

PADIGLIONE ITALIA A DUBAI

Il progetto strutturale

F&M Ingegneria

Il progetto del nuovo padiglione Italia concepito per l'evento Expo 2020 di Dubai, poi posticipato di un anno causa la pandemia mondiale Covid19, ebbe sin dalla sua nascita un obiettivo: essere unico. I progettisti si promisero di realizzare un'opera senza eguali, un'opera che non sia il classico edificio temporaneo bensì un'idea unica ed originale. Grazie alla professionalità di tutti i tecnici coinvolti, della Stazione Appaltante Invitalia e dell'Impresa RAQ, il padiglione è stato inaugurato senza imprevisti all'apertura dell'evento Expo.



Principi alla base della progettazione

L'unicità del padiglione doveva catturare l'interesse dei visitatori e della stampa grazie al suo forte impatto visivo. Senza dubbio la fluidità delle forme, a richiamare il moto ondoso del mare, conferisce al padiglione Italia un carattere unico ed immediatamente riconoscibile.

La continuità delle colonne con archi e catenarie, tutte a curvature variabili senza cuspidi ed angoli vivi, è la massima rappresentazione della fluidità delle forme che caratterizza il padiglione.

Unica al mondo è l'idea di completare la copertura con scafi rovesciati, sorretti da archi a raggio variabile, e colorati di rosso, bianco e verde come la bandiera italiana.

Grazie alle mirate scelte progettuali, è stato possibile ottenere leggerezza sia fisica e sia visiva delle strutture. Gli ampi spazi a disposizione sul primo impalcato, chiamato "la grande duna", sono il frutto di copertura a grande luce senza pilastri intermedi.

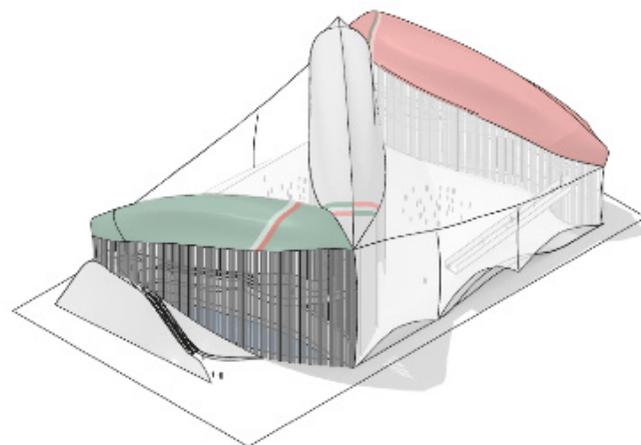
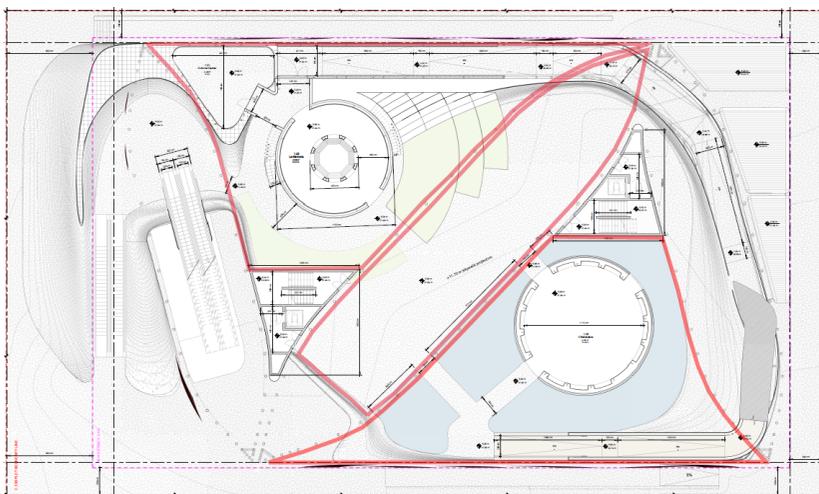
I pilastri sono tutti concentrati sotto i bordi degli scavi e disposti ad un interasse studiato secondo una regola ben precisa: la regola di Fibonacci.

Criticità alla base del progetto

La prima delle criticità alla base del progetto è stata la necessità di ampi spazi flessibili, liberi da pilastri, in grado di garantire grandi portate. Grandi luci e grandi portate sono i requisiti fondamentali per un impalcato destinato ad eventi pubblici con elevata affluenza. La seconda criticità è stata la geometria fluida delle aste, che passano da un andamento rettilineo delle colonne ad uno sviluppo curvilineo a raggio variabile di archi e catenarie senza angolature vive. L'obiettivo del progetto architettonico era così ambizioso come critico per la fattibilità tecnica dell'opera.

Non di secondaria importanza sono i vincoli urbanistici imposti da Expo: limiti di edificabilità in pianta e limiti di edificabilità in altezza. Detti limiti di ingombro sono tassativi pertanto il progetto ha dovuto attenersi scrupolosamente a queste prescrizioni.

I progettisti delle strutture hanno dovuto affrontare una duplice problema-



tica di snellezza e grandi campate. L'impossibilità di poter introdurre una maglia di pilastri ravvicinati, per esigenze espositive, e l'impossibilità di scegliere una reticolare classica, che richiederebbe maggiori ingombri, ha portato a scegliere una soluzione alternativa, ossia una "tensostruttura" leggera.

Metodologia BIM

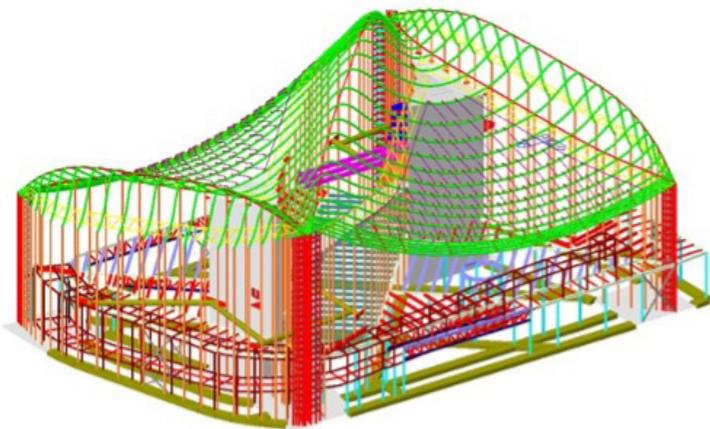
La modalità BIM (building information modeling) è stata adottata ed ampiamente sfruttata durante tutto il processo, dalle origini della progettazione alla realizzazione del cantiere. Questa modalità di progettazione è la moderna gestione dei processi nell'ambito dell'edilizia e rappresenta l'avanguardia del settore delle costruzioni.

Tutti i progettisti, nello specifico architetti, ingegneri strutturalisti ed ingegneri impiantisti, hanno sviluppato il progetto con il software Revit attraverso l'utilizzo della metodologia BIM, lavorando da uffici dislocati in luoghi geograficamente diversi.

L'origine della modellazione virtuale è stata opera di Studio Ratti, incaricato alla progettazione architettonica. Mediante l'uso di geometrie complesse, gli architetti hanno dato forma all'opera, decidendo la forma sinuosa della copertura e la posizione delle colonne strutturali con l'affiancamento degli ingegneri strutturalisti di FM Ingegneria. Definita la geometria, i progettisti delle strutture hanno costruito nello spazio 3D di Revit il modello analitico delle strutture, importando e facendo proprio il modello Revit architettonico.

Il terzo passaggio, anche questo a cura dei progettisti strutturali di FM Ingegneria, è stata la costruzione del modello di calcolo agli elementi finiti mediante il software MIDAS GEN. Per la costruzione del modello di calcolo strutturale è stato sfruttato il modello analitico dell'ambiente Revit grazie al quale sono stati riprodotti fedelmente ogni asta ed ogni solaio. Grazie al vantaggio dell'interfaccia tra la modellazione tridimensionale analitica e la modellazione tridimensionale con il software di calcolo strutturale, è stato possibile costruire un modello molto accurato ed affidabile.

Altro vantaggio della modalità di progettazione in Revit è stato la stima accurata delle quantità dei materiali impiegati per la costruzione, grazie alle



quali sono stati sviluppate le stime di costo ed i computi metrici estimativi. Grazie all'interfaccia tra il software Revit dei progettisti ed il software delle macchine a controllo numerico, è stato possibile collaborare in modo estremamente efficace e veloce con la carpenteria, con sede a Dubai, che ha acquisito l'appalto delle strutture in acciaio, consentendole di produrre con accuratezza ed esaustività tutti gli elaborati costruttivi di officina ed avviando la produzione delle carpenterie con congruo anticipo rispetto alla posa.

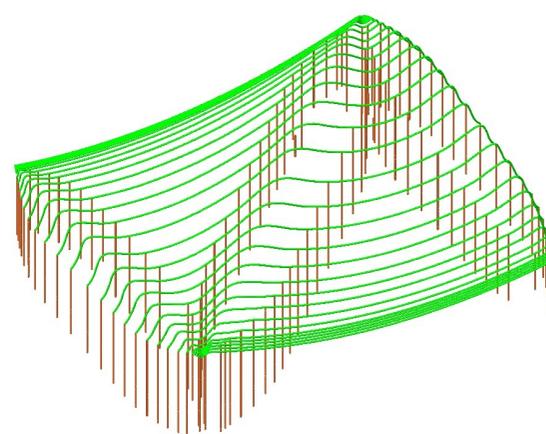
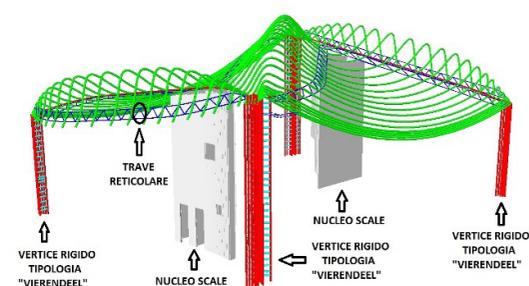
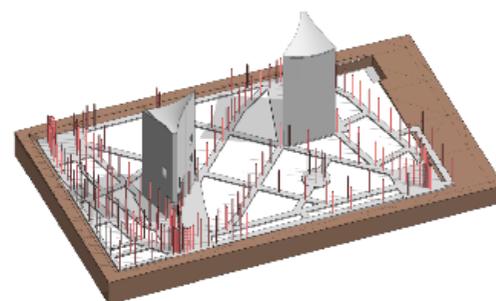
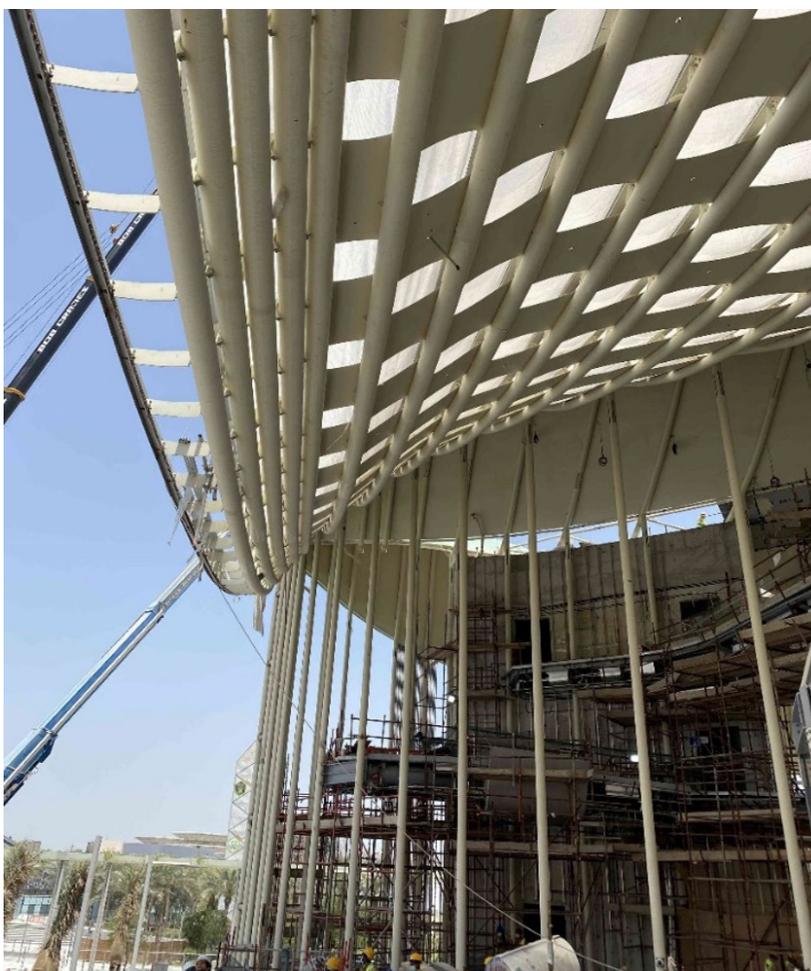
Le potenzialità dell'approccio BIM sono state decisive per FM Ingegneria per il trasferimento delle informazioni sia in sede di progetto e sia al momento della produzione.

La metodologia BIM ha altresì permesso la gestione dell'avanzamento dei lavori, monitorando in tempo reale le operazioni di cantiere.

Soluzioni Progettuali

L'attenta analisi delle ambizioni del progetto architettonico e delle prescrizioni normative imposte da Expo, hanno condotto la progettazione strutturale sulla scelta dell'acciaio come unico materiale in grado di soddisfare le molteplici esigenze.

La scelta finale ha puntato quindi su archi rovesci, ossia archi appesi alle estremità, stabili grazie allo stato di tensoflessione; questi archi non ge-



nerano elevate azioni orizzontali come invece avrebbe determinato una tensostruttura tradizionale.

In altre parole il principio che ha ispirato i progettisti di FM Ingegneria a trovare la soluzione per una copertura tanto grande quanto snella è stato l'arco catenario, già diffusamente utilizzato dal noto architetto spagnolo Antoni Gaudí y Cornet, in particolare nella Sagrada Família a Barcellona. Gaudí costruì dei modelli in scala di archi con carichi appesi e ne studiò la geometria assunta, arrivando ad intuire la stabilità dell'arco chiamato arco catenario.

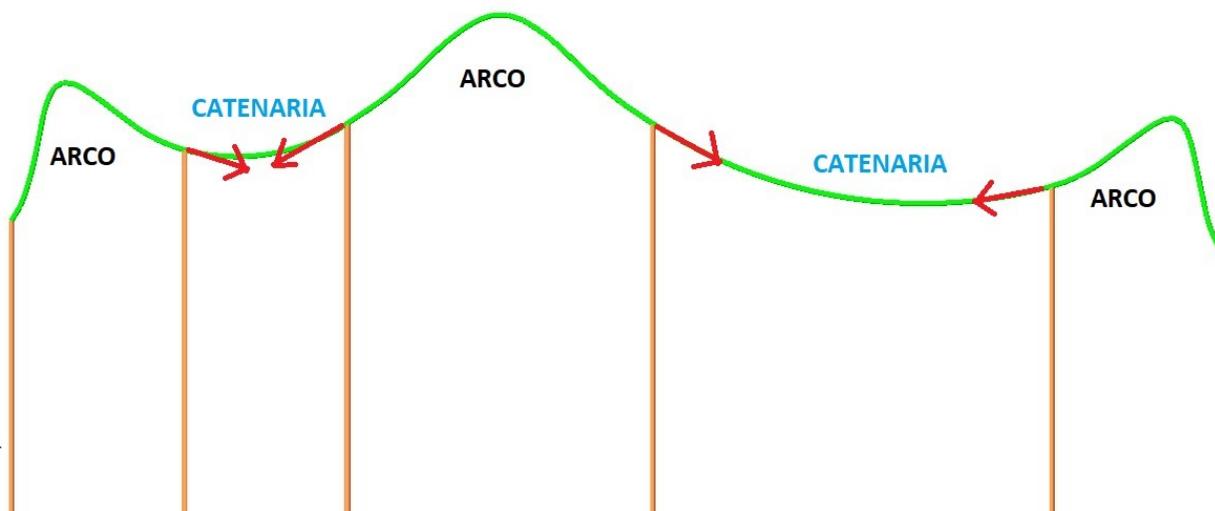
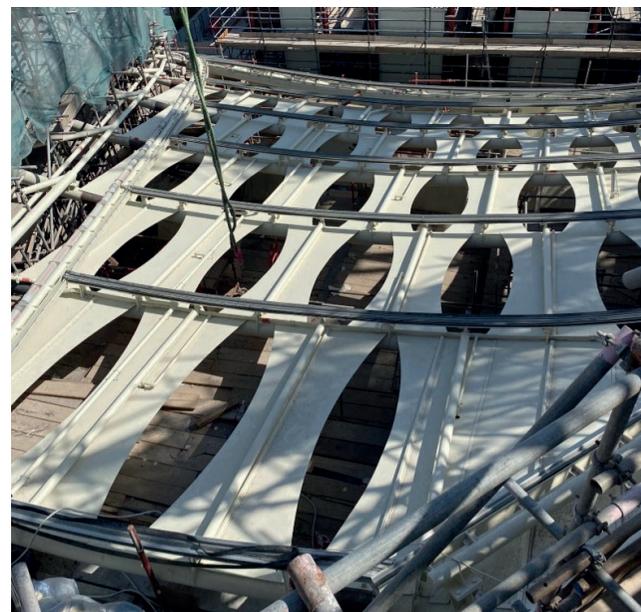
La soluzione a catenarie è stata ritenuta la più performante per coprire grandi campate senza colonne intermedie. Grazie alla scelta di elementi tensoinflexi, con netta prevalenza della trazione rispetto alla flessione, è stato possibile impiegare per le catenarie gli stessi tubi diametro 244mm già previsti per le colonne, ossia tubi molto esili. Le catenarie sono tutte in continuità con gli archi, mentre gli archi sono gli elementi che hanno il compito di collegare le sommità delle colonne garantendo un comportamento a telaio nel piano degli archi stessi.

Archi e catenarie sono tutti orditi parallelamente al lato lungo del padiglione e sono stabilizzati nel loro piano dalle colonne. Considerata la snellezza delle colonne, quindi il loro modesto apporto alla stabilizzazione orizzontale della copertura stessa, è stato necessario conferire un più efficace collegamento trasversale e si è puntato su robuste travi reticolari nascoste nei gusci, sotto rappresentate in blu.

Risolta la problematica della rigidità nel piano orizzontale si è scelto di sfruttare al meglio i corpi scale per stabilizzare tutto il sistema di copertura, coadiuvati dai quattro vertici di estremità che si configurano come "nuclei" in acciaio ottenuti da affiancamento di più colonne trasversalmente collegate alla "vierendeel". Le elevazioni sono infatti in gran parte costituite da esili colonne in acciaio a sezione circolare diametro 244mm spessore 12mm, che da sole non sarebbero idonee a far fronte ai carichi orizzontali. Le stesse colonne piegano alla quota degli scafi di copertura trasformandosi gradualmente in "archi", per poi invertire la concavità e diventare "catenarie", ossia archi rovesciati con comportamento paragonabile a quello delle funi appese.

Le reticolari sopra rappresentate in blu sono state nascoste dentro i gusci quindi non hanno alcun impatto estetico.

Le coperture con la concavità verso l'alto sono completate da cuscini di ETFE gonfiati con aria compressa. Ciascun cuscino ha la peculiarità di essere provvisto di un proprio telaio autoportante che confina le spinte dell'aria compressa dei cuscini annullando le spinte orizzontali sulle ca-



tenarie. I cuscini sono parzialmente mascherati all'intradosso da fogli di lamiera d'acciaio opportunamente tesati e ritagliati in modo tale da filtrare la luce solare diurna, creare un effetto di luci chiaro-scuro ma senza gravare eccessivamente sulle catenarie in termini di peso.

Le fondazioni, che trasmettono sul terreno i carichi derivanti dalle sovrastrutture, sono state concepite come fondazioni superficiali a plinti collegati da cordoli. Grazie a questa scelta, in luogo di fondazioni estese a platea, è stato possibile ottimizzare la cementificazione di suolo allo stretto necessario per garantire le necessità strutturali.

Particolare attenzione è stata posta all'integrazione tra impianti e strutture, non solo per ottimizzare costi e lavorazioni di cantiere, ma specialmente per raggiungere la massima bellezza estetica. Il progetto degli impianti è stato sviluppato in parallelo al progetto delle strutture con l'intento di inserire/integrare tubazioni, linee elettriche, canali, ecc all'interno di volumi rivestiti. A titolo esemplificativo, sono state introdotte tubazioni antincendio e linee elettriche all'interno delle intercapedini degli scafi, in modo da risultare completamente nascoste alla vista dei visitatori.

Analisi strutturali e verifiche

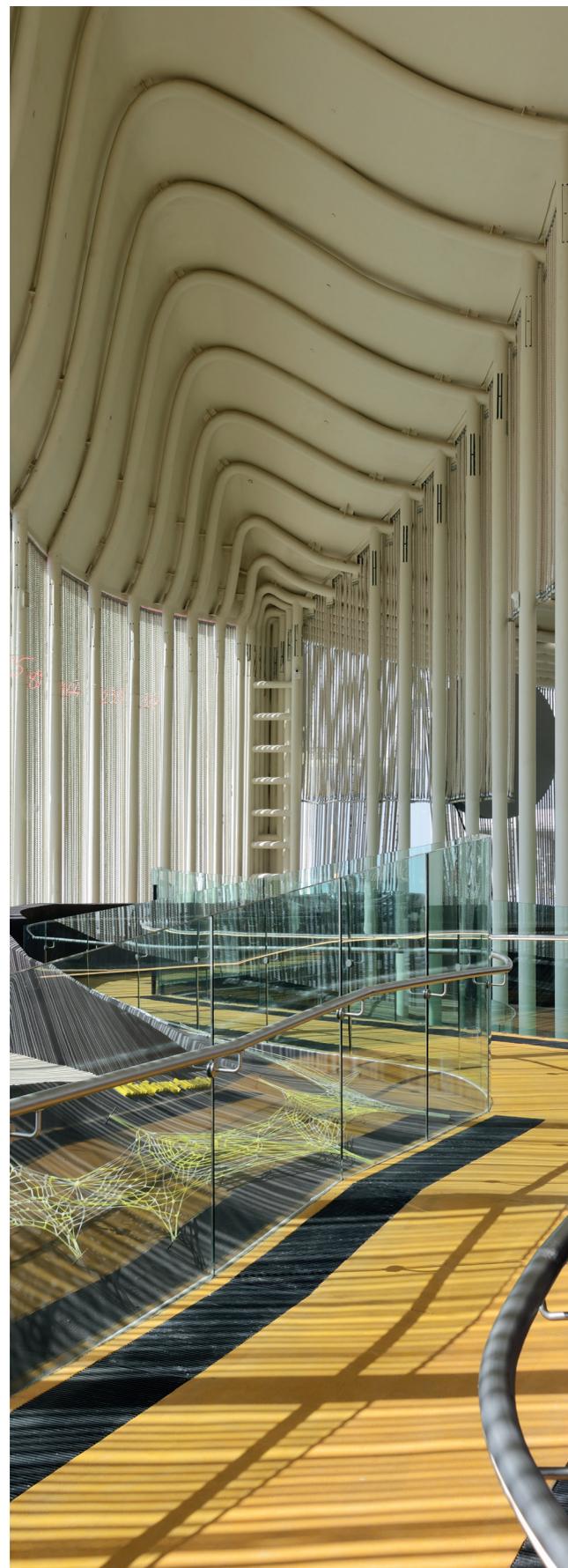
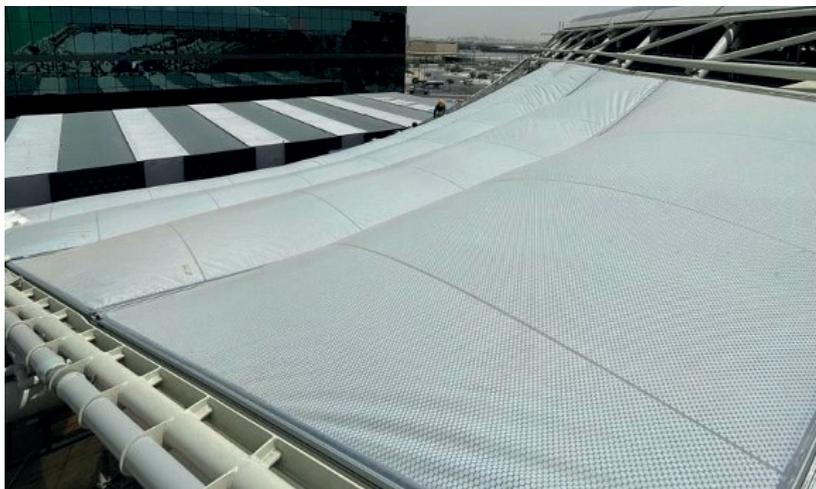
L'analisi del comportamento strutturale del padiglione è stata condotta con accurata modellazione tridimensionale agli elementi finiti mediante l'uso del software MIDAS GEN.

Il primo passo è stato l'individuazione del comportamento sismoresistente complessivo mediante riconduzione a schemi statici semplici: nuclei irrigidenti, colonne, archi, catenarie e reticolari di collegamento.

Dopo aver individuato il comportamento d'insieme gli ingegneri progettisti hanno riprodotto virtualmente le strutture mediante elementi finiti tipici del calcolo automatico delle strutture.

Il modello di calcolo è stato costruito con più di 20300 nodi, più di 12800 aste a due nodi tipo beam e 10300 elementi bidimensionali plate a 3 o 4 nodi.

I carichi di progetto accidentali e vento sono desunti dalla norma americana ASCE7, mentre l'azione sismica è desunta dalla norma americana UBC97 seppur con l'accelerazione al suolo desunta dalle norme locali du-



baine. L'uso delle norme americane è scaturito dal regolamento Expo.

Il carico accidentale di progetto è 5 kN/mq, intenzionalmente incrementato a 6 kN/mq per l'incertezza ad inizio progetto in tema di allestimenti espositivi.

Particolare attenzione è stata posta nella determinazione delle pressioni da vento tenuto in considerazione che il padiglione è sostanzialmente un edificio aperto e pertanto la copertura è sottoposta non solo all'aspirazione da estradosso ma anche alla pressione da intradosso. Il vento di progetto considerato ha velocità di 45 m/s mediato su tre secondi a 10 metri dal suolo.

Dubai è un sito a modesta sismicità, con accelerazione al suolo di progetto di 0.72 m/s² con tempo di ritorno 475 anni. L'azione sismica di progetto è stata dedotta dal seguente spettro di accelerazione orizzontale:

L'analisi statica condotta è stata di tipo elastico lineare in quanto si è preliminarmente appurato, attraverso modelli semplificati, che le fasi di montaggio non incidono sullo stato tensionale delle aste; in altre parole lo stato tensionale è proporzionale all'entità dei carichi pertanto non sono state implementate analisi tridimensionali con costruzioni per fasi.

L'analisi sismica condotta è stata di tipo lineare con spettro di risposta.

Il controllo critico del modello ha riguardato reazioni vincolari alla base in prima battuta ed a seguire i modi di vibrare dei quali se ne riportano i più significativi.

La prima verifica locale ha coinvolto naturalmente la copertura essendo l'elemento più critico. Sono stati verificati stato tensionale e deformazioni. Molta attenzione è stata posta nella verifica all'instabilità per pressoflessione delle colonne essendo elementi molto esili. Oltre alle verifiche delle singole aste secondo i dettami normativi, assumendo schema statico di incastro al piede e cerniera fissa all'estremità superiore (copertura stabilizzata dai corpi scale e dai vertici rigidi d'angolo), sono state condotte a parte analisi spinte per la ricerca dell'instabilità di buckling al fine di indagare tutte le criticità.

