

LE PROVE IN GALLERIA DEL VENTO

per i due hangar con struttura in acciaio del parco carbone della nuova centrale termoelettrica di Dubai, UAE

WIND TUNNEL TESTS

for the two coal yard steel sheds of the new power plant in Dubai, UAE

Ph. D. Ing. Fabio Dall'Aglio^{(1)*} Dott. Ing. Giovanni Monini⁽²⁾, Dott. Ing. Alberto Rizzioli⁽²⁾

⁽¹⁾ Consulente di INCICO SpA per le strutture in acciaio

⁽²⁾ INCICO SpA

Il primo gennaio 1992 la Compagnia Elettrica ed il Dipartimento per l'Acqua di Dubai, fondati nel 1959, furono uniti per dare vita a DEWA (Dubai Electricity & Water Authority). Da quella data DEWA è stato il solo fornitore di energia ed acqua del paese. Alla fine del 2013 DEWA aveva una capacità di produzione di energia pari a 9.656 MW. Sulla base delle previsioni di domanda di energia per il futuro, DEWA ha pianificato la costruzione di un nuovo impianto di generazione alimentato a carbone con una capacità di 1.200 MW composto da due unità di cui la prima operativa da marzo 2020. Il presente articolo tratta dei test in galleria del vento condotti per verificare la correttezza delle distribuzioni di pressioni considerate in fase di progetto dei due hangar gemelli di stoccaggio che compongono il parco carbone a servizio dell'impianto di produzione. Il progetto esecutivo degli hangar è stato redatto dalla società cinese HEI (Harbin Electric International), la società italiana INCICO SpA di Ferrara (www.incico.com) è stata incaricata per conto di Dubai Municipality di verificare il progetto esecutivo e di proporre eventuali modifiche migliorative. I test hanno consentito di prendere in considerazione l'amplificazione dinamica degli sforzi a cui sono soggetti gli hangar per effetto dell'interazione tra la natura turbolenta del vento e l'elasticità della struttura e di definire nuove distribuzioni di pressioni di progetto più aderenti al caso particolare rispetto a quanto previsto dalla normativa.

This paper deals with wind tunnel tests conducted to verify the correctness of the pressure distributions considered in the design of the huge coal yard steel shed (2 hangars) for the coal power plant. The project of the hangars has been drafted by the Chinese company HEI (Harbin Electric International), the Italian company INCICO SpA, established in 1980 in Ferrara (www.incico.com), was tasked as third part checker by the Dubai Municipality with monitoring the project and proposing possible improvements. The wind tunnel tests allowed to take into account the dynamic amplification of the stresses to which hangars are subjected, caused by the interaction between the turbulent nature of the wind and the structure elasticity and to define new distributions of design pressures more adherent to this particular case than the provisions of the ASCE 7-10.

*Corresponding author. Email: fabio.dallaglio@ordingbo.it



Fig. 1 - Il sito di costruzione del parco carbone a sud-ovest della città

1. INTRODUZIONE

Il presente articolo tratta delle analisi CFD e dei test in galleria del vento condotti per verificare la correttezza delle distribuzioni di pressioni considerate in fase di progetto esecutivo dei due hangar gemelli di stoccaggio che compongono il parco carbone a servizio della centrale termoelettrica del nuovo impianto di produzione di Dubai situato in prossimità della costa a sud-ovest della città.

Gli hangar, larghi 122 m e lunghi 677 m ciascuno, sono affiancati sul lato lungo ad una distanza di circa 17 m e posizionati sul bordo orientale dell'area occupata dalla centrale termoelettrica.

La struttura metallica di ciascuno dei due hangar, sulla destra nella figura 2, è divisa in 4 parti lunghe circa 160 m ciascuna separate da giunti strutturali ed è formata da una serie di archi disposti ad interasse di 12 m realizzati con traliccio reticolare a sezione



Fig. 2 - Render della centrale termoelettrica

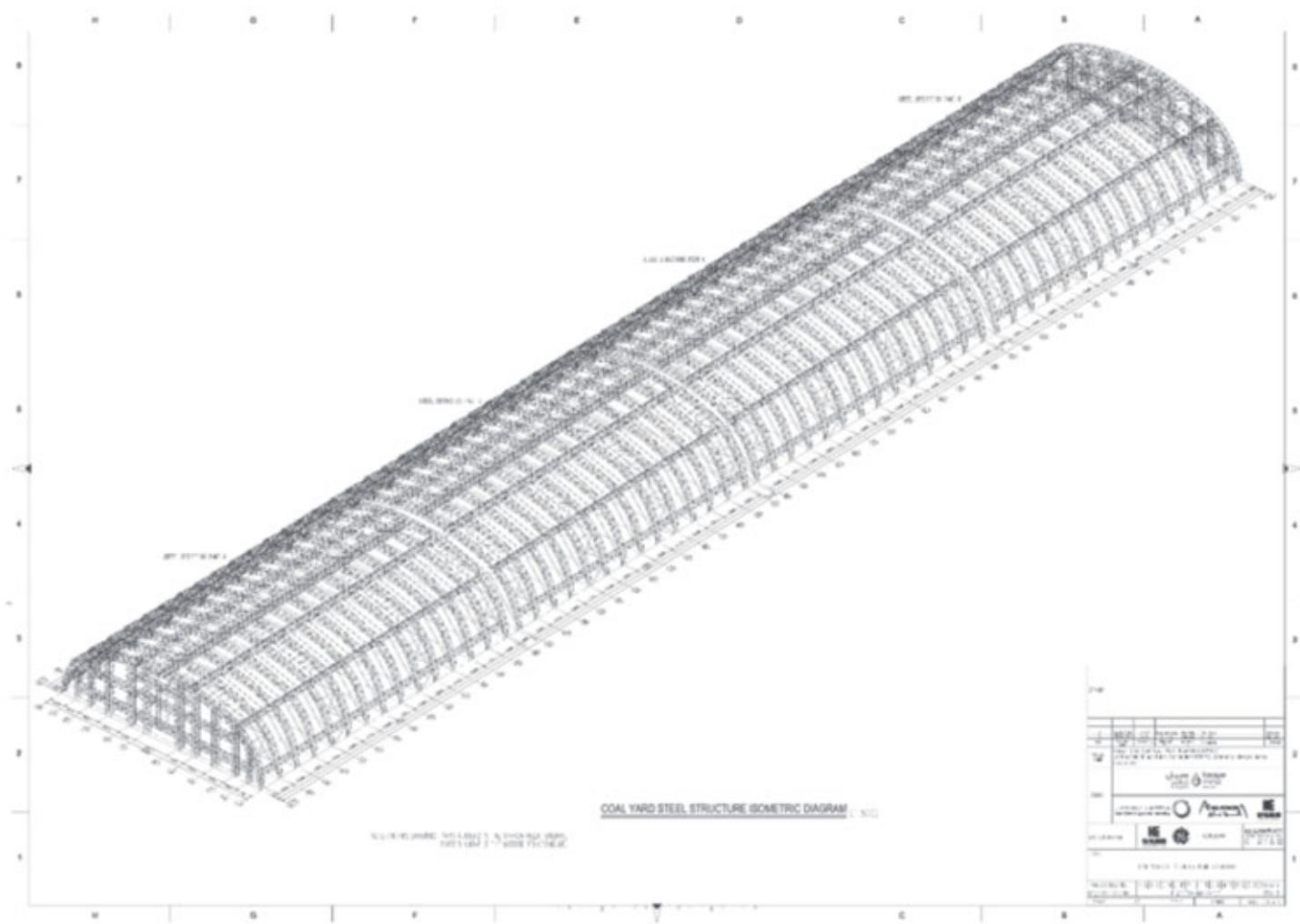


Fig. 3 - Vista 3D di un hangar

triangolare, rinforzato e presollecitato sullo sviluppo intradossale. Gli elementi costituenti il traliccio sono tubolari mentre l'elemento preteso è in fune spiroidale.

Gli archi sono mutuamente collegati da travi longitudinali tralicciate e ognuna delle 4 parti presenta 4 controventi di falda che stabilizzano orizzontalmente gli archi. Anche le travi longitudinali come

gli elementi di controvento sono realizzate con elementi tubolari. Completano la struttura gli arcarecci in tubi rettangolari e il manto di copertura in lamiera grecata.

La struttura è realizzata con i materiali riportati in tabella 1.

La verifica del progetto esecutivo si è focalizzata su alcune criticità tra cui il controllo della correttezza del campo di pressioni del vento.

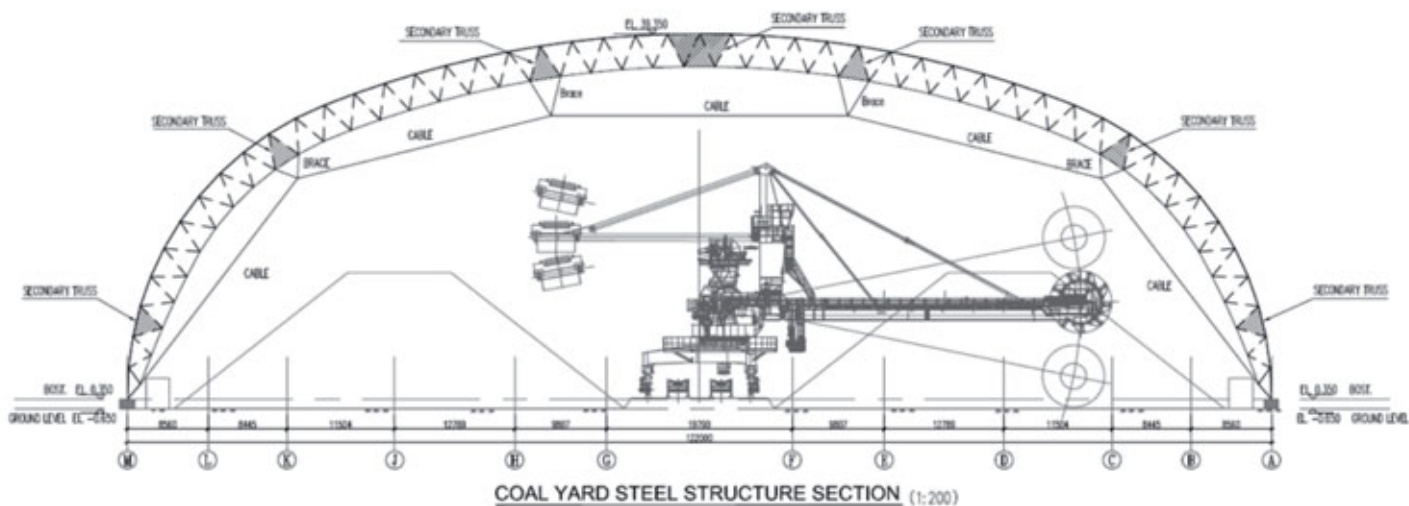


Fig. 4 - Sezione trasversale di un hangar



Fig. 5 - Pianta e sezione longitudinale di un hangar

In particolare il progetto esecutivo è basato sui carichi previsti dalla norma Americana ASCE 7-10 che tuttavia non contempla forme sufficientemente approssimanti l'arco policentrico che caratterizza la sezione trasversale degli hangar e nemmeno un criterio per valutare l'interazione dei due corpi disposti a distanza molto ravvicinata rispetto le dimensioni planimetriche degli stessi.

INCICO ha proceduto quindi con un'analisi numerica CFD preliminare semplificata su modello 2D rappresentativo della sezione

trasversale degli hangar (conclusa con il contributo degli Ingegneri Luca Patruno e Mattia Ricci), poi con i test in galleria del vento su modello fisico in scala, effettuati dalla società tedesca Wacker Ingenieure.

I test hanno consentito di prendere in considerazione l'amplificazione dinamica degli sforzi a cui sono soggetti gli hangar per effetto dell'interazione tra natura turbolenta del vento ed elasticità della struttura e di definire nuove distribuzioni di pressioni di progetto più aderenti al caso particolare rispetto a quanto previsto dalla normativa.

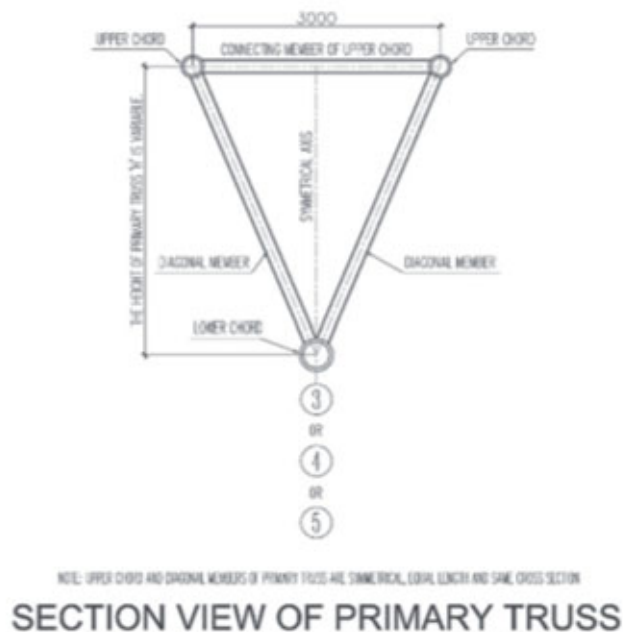


Fig. 6 - Sezione del traliccio degli archi

2. AZIONE DEL VENTO DI PROGETTO ESECUTIVO

I carichi del vento sulle strutture sono determinati nel progetto esecutivo degli hangar redatto dalla società cinese HEI, secondo la procedura stabilita nella norma americana ASCE 7-10, in accordo con le richieste della committente Dubai Municipality.

Secondo le indicazioni della norma, facendo riferimento ai dati storici delle stazioni di rilevamento meteo presenti in prossimità del sito di costruzione, la velocità di riferimento del vento (misurata con periodo di ritorno di 50 anni, a 10 m di altezza suolo, su raffica di 3 s di durata) è di 162 km/h. Considerando categoria di rischio III e periodo di ritorno di 1700 anni, parametri stabiliti in accordo con DEWA, il valore di riferimento della velocità secondo ASCE7-10 diventa 219 km/h.

Quindi il calcolo dell'azione del vento basato sulla norma ASCE 7-10 è stato condotto da HEI facendo riferimento ai parametri presenti

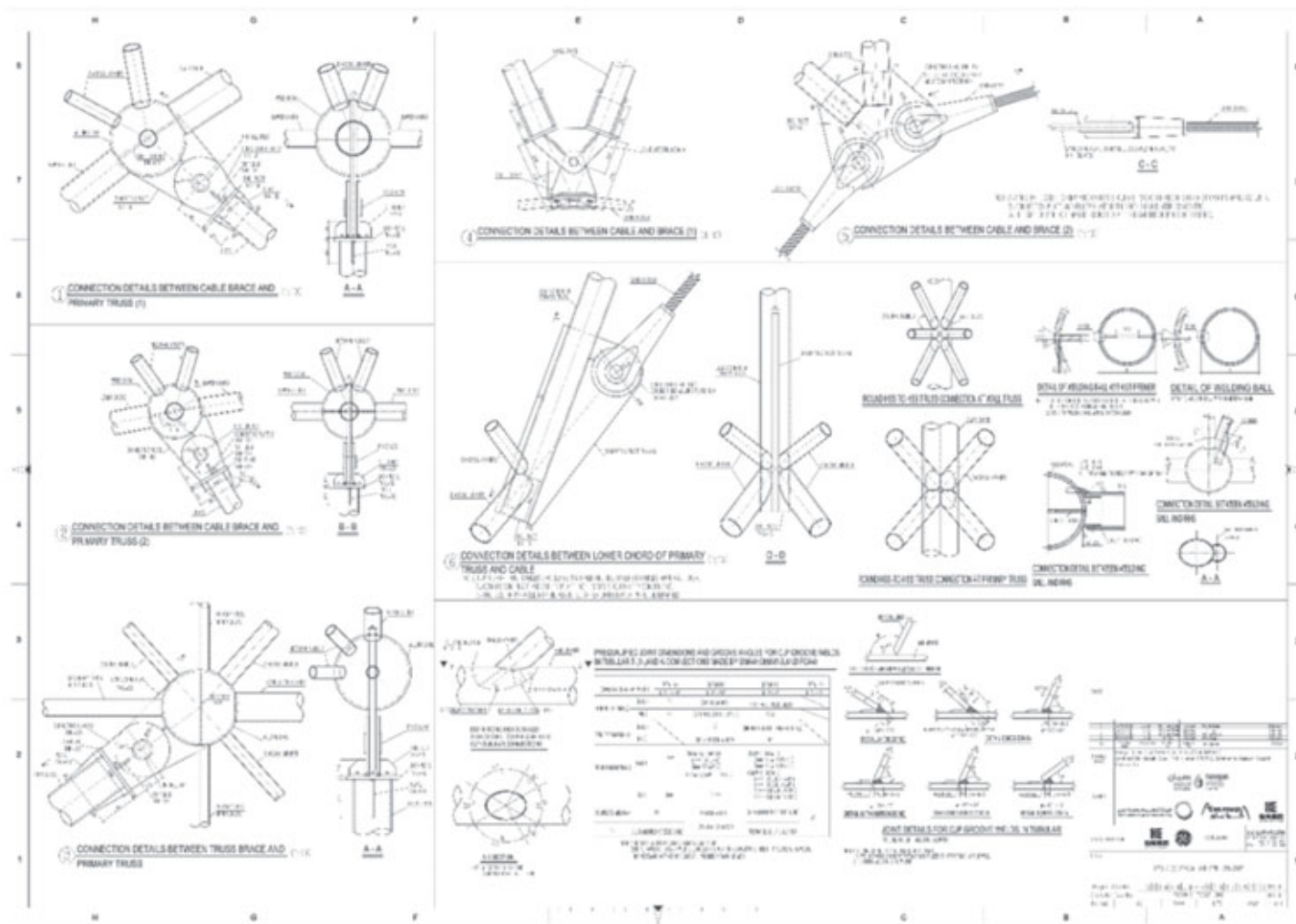


Fig. 7 - Dettagli costruttivi dei nodi

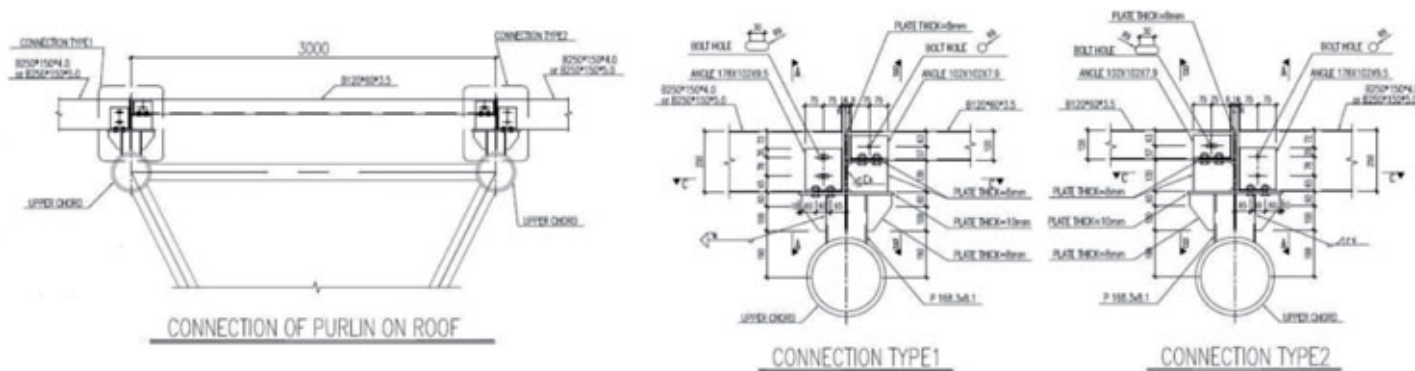


Fig. 8 - Dettagli costruttivi degli arcarecci

- 4.1 GENERAL STEEL ELEMENTS
- STRUCTURAL STEEL WIDE FLANGE SHAPES AND SECTIONS CUT FROM WIDE FLANGE SHAPES: ASTM A992 ($F_y = 50\text{ksi}$, 345MPa)
 - STRUCTURAL STEEL CHANNEL/ANGLES/PLATE: ASTM A36
 - STRUCTURAL STEEL CHANNELS, ANGLES OF HIGH STRENGTH MATERIAL (ALTERNATE, IF REQUIRED BY CONNECTION DESIGN): ASTM A572 ($F_y = 50\text{ksi}$, 345MPa)
 - STRUCTURAL PLATE, HIGH STRENGTH MATERIAL: ASTM A572, ($F_y = 50\text{ksi}$, 345MPa)
 - RECTANGULAR HSS: ASTM A501 GRADE A AND GRADE B OR ASTM A500 / A500M, GRADE B
 - ROUND HSS, ASTM A501 GRADE B. REDUCTION OF 0.02 PERCENTAGE POINT BELOW THE SPECIFIED MAXIMUM FOR CARBON, AN INCREASE OF 0.12 PERCENTAGE POINT ABOVE THE SPECIFIED MAXIMUM FOR MANGANESE IS PERMITTED.
 - CABLE: ASTM A586 (COVERED BY PE COATING)
 - PURLIN: ASTM A500/A500M, GRADE C ($F_y=354\text{MPa}$)
 - PE COATING:
 1. Tensile stress at break: $> 25\text{Mpa}$
 2. Tensile yield stress: $> 15\text{Mpa}$
 3. Crack nominal strain: $> 400\%$

Tab. 1 - Materiali impiegati



Fig. 9 - Vista interna della struttura in fase di costruzione



Fig. 10 - Dettaglio dell'imposta degli archi

nella tabella 2.

In merito ai parametri che caratterizzano l'azione del vento di progetto è possibile riportare alcune osservazioni:

1. la norma non consente di tenere in conto in maniera esplicita dell'eventuale interazione aeroelastica tra struttura e vento se non attraverso il fattore di raffica G_f ; inoltre in progetto esecutivo il parametro G_f è stato assunto pari a 0,85 come indicato in ASCE 7-10 per strutture rigide senza approfondimenti sulla correttezza dell'assegnazione agli archi che costituiscono gli hangar della categoria di strutture rigide;
2. la norma non consente di tenere in conto in alcun modo degli effetti di interazione dovuti alla vicinanza dei due hangar;

3. i fattori di forma considerati in accordo con i due schemi riportati nella figura 11, rispettivamente per vento perpendicolare e parallelo alla dimensione maggiore delle strutture, non sono calibrati esattamente sul caso della geometria degli archi policentrici. Il controllo effettuato da INCICO, oltre ad una verifica generale della progettazione, si è focalizzato quindi su questi tre aspetti.

3. ANALISI CFD E VALUTAZIONE DEL FATTORE DI RAFFICA G_f
In via preliminare, tenute in opportuna considerazione le incertezze insite in questo approccio di calcolo, si è proceduto ad una analisi CFD semplificata su un modello bidimensionale che rappresenta la sezione trasversale della struttura con lo scopo di stimare gli effetti

Calcolo dell'azione del vento basato sulla norma ASCE 7-10 è stato condotto da HEI	
Velocità di riferimento del vento con periodo di ritorno di 50 anni	45 m/sec
Velocità di riferimento del vento con periodo di ritorno 1700 anni	61 m/sec
Categoria di esposizione	D = III
Fattore di forma (o di pressione)	K_z (come da schemi di figura 11)
Fattore di topografia	$K_{zt} = 1,0$
Fattore di direzionalità (ASCE7-10, Tabella 26.6-1)	$K_d = 0,85$
Categoria di rischio	III
Fattore di raffica	0,85

Tab. 2

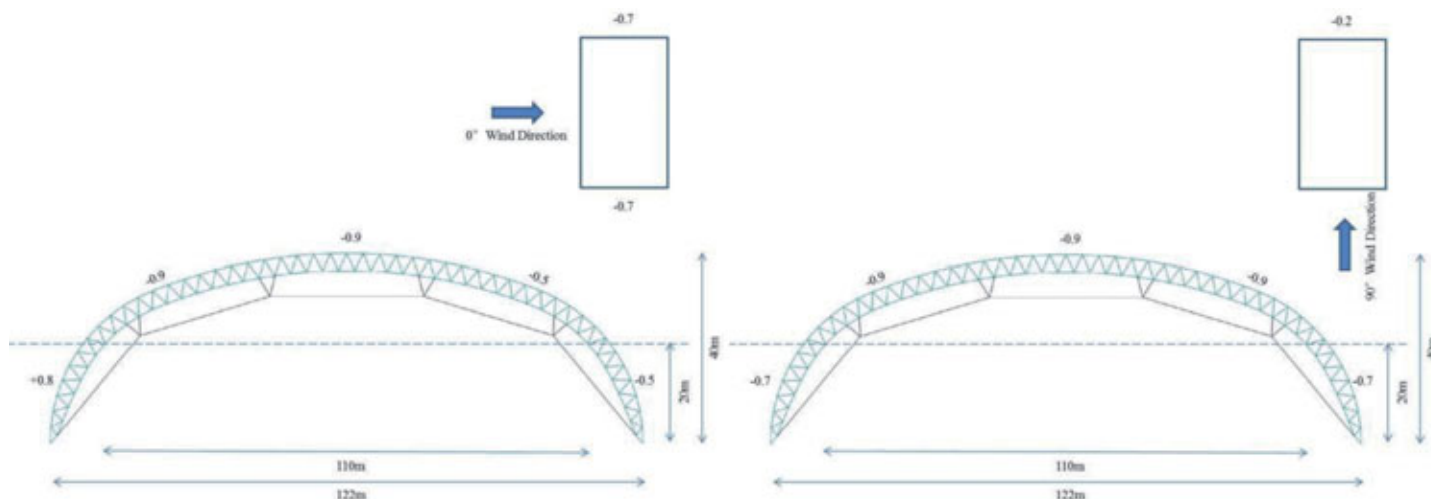


Fig. 11 - Fattori di forma per vento ortogonale e parallelo all'asse degli hangar

di interazione geometrica tra i due hangar e valutare l'attendibilità dei fattori di forma (o fattori di pressione) considerati in fase di progetto esecutivo. Si è inoltre provveduto ad una stima del fattore di raffica in base alle caratteristiche dinamiche della struttura.

La valutazione dell'importanza di eventuali fenomeni di natura aeroelastica è demandata completamente alla sperimentazione su modello fisico.

3.1 Premessa

Le strutture immerse nello strato atmosferico di confine (denominato ABL) sono soggette a distribuzioni di pressione variabili nel tempo che potrebbero portare ad una notevole amplificazione dinamica dei carichi dovuti al vento. In particolare, le pressioni che agiscono sulle superfici esposte all'azione del vento possono essere suddivise in una componente mediata nel tempo e in un campo di pressione fluttuante. La prima, vale a dire la componente mediata nel tempo, è correlata alla velocità media del vento mentre la seconda, ovvero la parte fluttuante, è originata da tre distinti fenomeni: dal comportamento aerodinamico locale della struttura, dall'interazione con le strutture circostanti o con qualsiasi altro ostacolo al flusso del vento e dalle fluttuazioni turbolente naturalmente presenti nello strato atmosferico di confine.

In accordo con la distinzione appena descritta, la risposta strutturale all'azione del vento può essere suddivisa in un contributo mediato nel tempo, originato dal campo di pressione media, e in un contributo dinamico, originato dal campo di pressione fluttuante. Tale contributo dinamico è di solito esso stesso suddiviso in un contributo di fondo, dovuto alla turbolenza atmosferica che eccita la struttura principalmente in modo quasi statico (cioè senza sostanziali amplificazioni dinamiche) e in un contributo risonante per il quale l'amplificazione dinamica non è trascurabile.

La valutazione dell'azione del vento sugli edifici è ulteriormente complicata dal fatto che i valori di picco del campo di pressione di solito non si registrano contemporaneamente su tutta la struttura,

portando così a riduzioni del carico effettivo da vento rispetto ai valori di picco locali quando si considera la risposta globale.

La valutazione del carico da vento sugli hangar della centrale a carbone di Dubai è stata eseguita secondo la norma ASCE 7-10. In particolare, tale norma adotta come velocità di progetto del vento la velocità media misurata su una raffica di 3 secondi che, di per sé, tiene già parzialmente in conto dell'effetto della turbolenza atmosferica. Inoltre, al fine di considerare gli effetti dinamici indotti dalla componente fluttuante del vento, viene introdotto (ASCE 7-10, 26.9.1) il fattore di raffica, G_f . In particolare l'analisi viene eseguita supponendo che la risposta dinamica della struttura possa essere convenientemente ottenuta amplificando la risposta al campo di pressione mediata nel tempo attraverso un coefficiente adeguatamente definito, vale a dire il fattore di raffica G_f .

Il calcolo di tale coefficiente è differenziato per le strutture rigide, per le quali la parte risonante della risposta ha un'importanza limitata (ASCE 7-10, 26.9.4) e per le strutture flessibili (ASCE 7-10, 26.9.5) per le quali la risposta risonante deve essere considerata. La distinzione tra queste due categorie si ottiene definendo 'strutture rigide' quelle caratterizzate da una frequenza naturale minima superiore a 1 Hz. Per le strutture rigide è possibile evitare il calcolo di G_f e assumerlo pari a 0,85 mentre per le strutture flessibili è necessario procedere alla sua valutazione.

In progetto esecutivo è stato assunto $G_f = 0,85$ senza motivare tale scelta.

3.2 Valutazione del fattore di raffica G_f

La frequenza naturale del primo modo di vibrare dei due corpi terminali di ciascuno dei due hangar di Dubai (parte A e parte D) è pari a $f_1 = 0,642$ Hz, mentre vale $f_1 = 0,604$ Hz per i due corpi centrali (parte B e parte C).

Essendo che la frequenza naturale del primo modo di vibrare risulta in entrambe i casi inferiore ad 1 Hz, è necessario valutare il fattore di raffica G_f considerando la struttura flessibile in accordo con

quanto indicato in ASCE 7-10, par 26.9.5.

Considerando le caratteristiche del vento:

Categoria di esposizione	D
v(m/s - km/h)	61 - 219
h(m)	40

e le caratteristiche geometriche della struttura per vento agente in direzione parallela alla sezione trasversale dell'hangar:

B = Lunghezza di ciascuna delle 4 parti (m)	170
h = Altezza (m)	40
L = Luce degli archi (m)	122

e per vento agente in direzione parallela alla direzione longitudinale:

B = Luce degli archi (m)	122
h = Altezza (m)	40
L = Lunghezza di ciascuna delle 4 parti (m)	170

Si ottiene il valore di G_f calcolato per le due direzioni di incidenza del vento che risulta:

$$G_{f,transv} = 0,925 \frac{1 + 1,7I_{(z)} \sqrt{g_q^2 Q^2 + g_r^2 R^2}}{1 + 1,7I_z} = 0,8704$$

e

$$G_{f,long} = 0,884$$

Per entrambe le direzioni del vento i fattori di raffica sono di poco superiori al valore 0,85 che può essere adottato per le strutture rigide. Tale risultato conferma nella sostanza le assunzioni di progetto esecutivo ed indica che, secondo l'approccio ASCE, gli hangar non sono soggetti a significativi fenomeni di amplificazione aeroelastica delle azioni da vento.

A conclusione delle valutazioni sul fattore di raffica G_f che è lo strumento normativo utile alla stima della sensibilità della struttura nei riguardi di amplificazione aeroelastica delle azioni, è stata effettuata una analisi di sensitività finalizzata a valutare le variazioni di G_f in funzione della variazione dei parametri che ne influenzano il calcolo. La figura 12 riporta la variazione di G_f al variare della frequenza naturale e dell'altezza dell'hangar con vento trasversale (a) e con vento longitudinale (b). I risultati ottenuti utilizzando i parametri di costruzione precedentemente menzionati sono riportati con il punto nero.

Analogamente la figura 13 riporta la variazione di G_f al variare delle caratteristiche geometriche dell'hangar con vento trasversale (a) e con vento longitudinale (b), e la figura 14 riporta la variazione di G_f al variare del coefficiente di smorzamento e della prima frequenza naturale.

3.3 Simulazioni CFD

I modelli numerici basati sulle tecniche di fluidodinamica computazionale (CFD) consentono di simulare il flusso del vento e la distribuzione della pressione attorno agli edifici. Nonostante la potenza

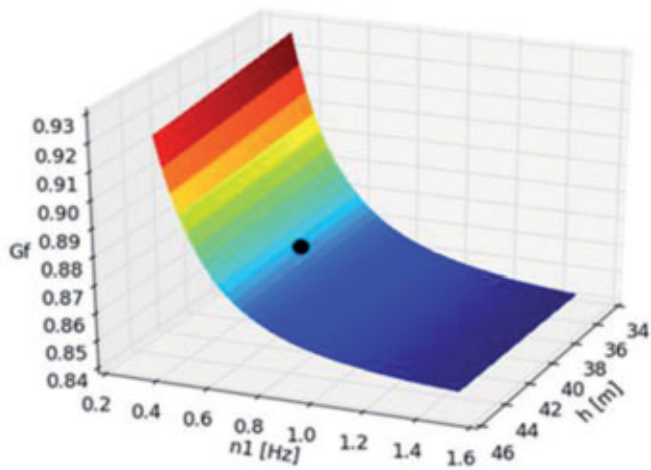
di tali metodologie, è importante sottolineare come tali simulazioni si siano rivelate spesso estremamente sensibili ai modelli matematici adottati nelle approssimazioni necessariamente introdotte per discretizzare e risolvere le equazioni che governano il flusso del fluido. Tale sensibilità è intrinsecamente correlata alla presenza di turbolenza, che è un fenomeno casuale, tridimensionale, caotico e multi-scala. In particolare, tale ultima caratteristica indica che in un flusso turbolento coesistono grandi vortici, caratterizzati da dimensioni paragonabili a quelle del corpo immerso, con vortici estremamente piccoli, la cui dimensione caratteristica è di diversi ordini di grandezza inferiore a quella dei più grandi. Una soluzione completamente soddisfacente e robusta del flusso del fluido dovrebbe tenere in conto di tutte queste caratteristiche, rendendo la sua simulazione numerica estremamente onerosa e sostanzialmente impossibile nella fase attuale dell'evoluzione tecnologica per le applicazioni di ingegneria civile.

Al fine di superare tali difficoltà, in CFD sono stati introdotti dei "modelli di turbolenza" con l'obiettivo di simulare esplicitamente solo il campo di velocità mediato nel tempo e i vortici più grandi. Seguendo tale approccio i vortici più piccoli non sono modellati in maniera esplicita (ottenendo così una forte riduzione degli oneri computazionali) ma viene utilizzato un "modello di turbolenza" che tiene in conto dei loro effetti sul campo di velocità mediato nel tempo. Tale risultato si ottiene generalmente modificando la viscosità locale del fluido. È quindi importante notare che le simulazioni CFD non corrispondono alla soluzione esatta delle equazioni che governano il flusso del fluido ma, piuttosto, impiegano equazioni modificate allo scopo di imitare le equazioni del flusso e facilitarne lo studio. Il campo di flusso valutato sarà generalmente diverso da quello reale e potrebbe corrispondere ad esso con buona approssimazione solo rispetto ad alcuni degli aspetti particolari che lo caratterizzano.

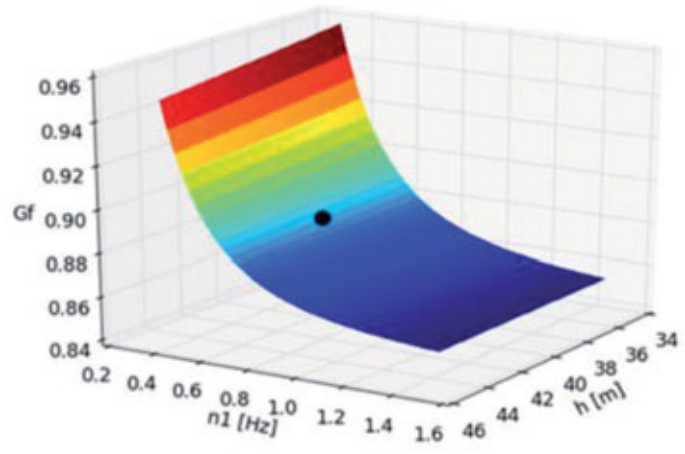
I modelli di turbolenza utilizzati nelle simulazioni CFD sono generalmente identificabili in due gruppi principali:

- ✓ RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations): sono i modelli usati per simulare solo il campo di flusso mediato nel tempo evitando la trattazione esplicita dell'instabilità. Possono essere utilizzati modelli bidimensionali e soluzioni stazionarie nonostante il fatto che la turbolenza abbia sempre carattere tridimensionale ed instabile e sono i modelli generalmente adottati per le applicazioni di ingegneria civile;
- ✓ LES (Large Eddy Simulation): sono i modelli utilizzati per valutare il flusso mediato nel tempo insieme ai fenomeni di grande e media turbolenza. I modelli devono essere sempre tridimensionali e sono utilizzati principalmente per applicazioni avanzate e attività di ricerca.

Il tempo di calcolo richiesto dal secondo approccio è generalmente compreso tra due e tre ordini di grandezza in più rispetto a quello richiesto dal primo.

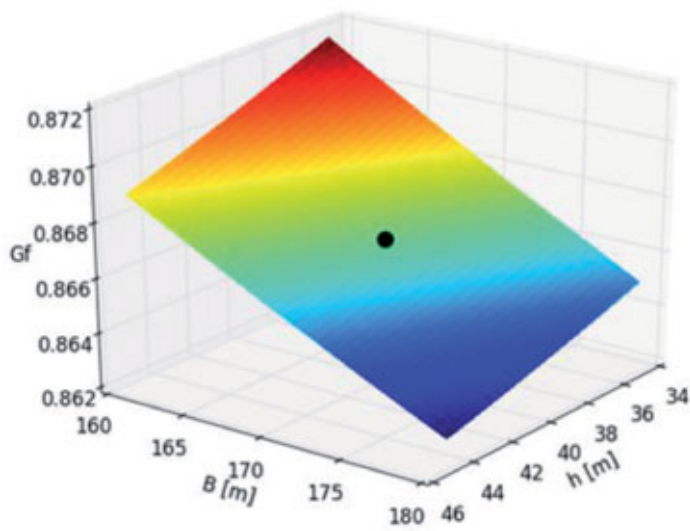


(a)

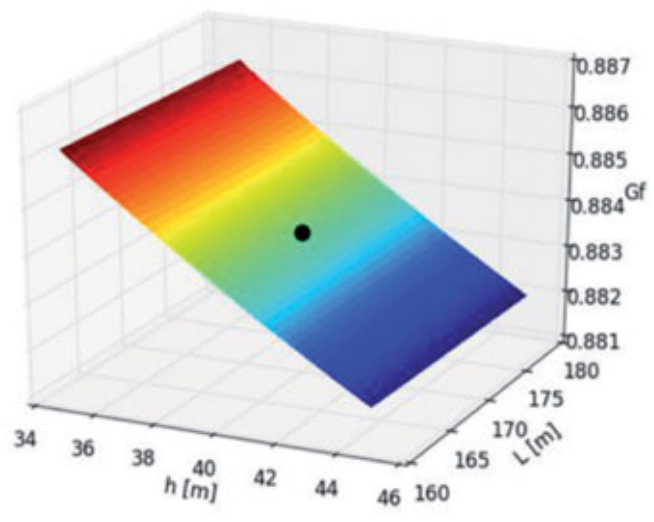


(b)

Fig. 12 - Variazione di G_f in funzione della frequenza e dell'altezza della copertura

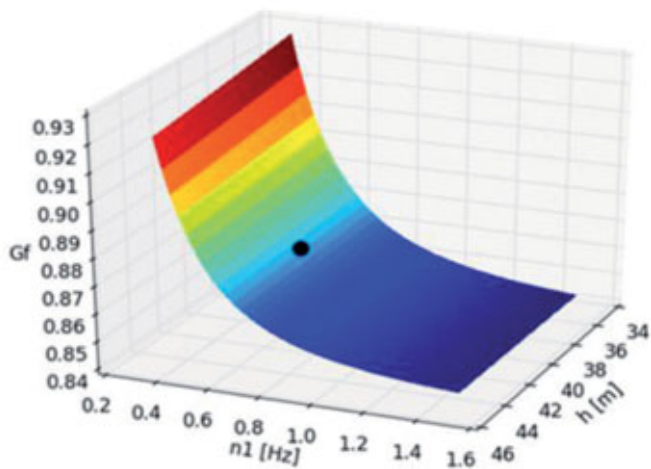


(a)

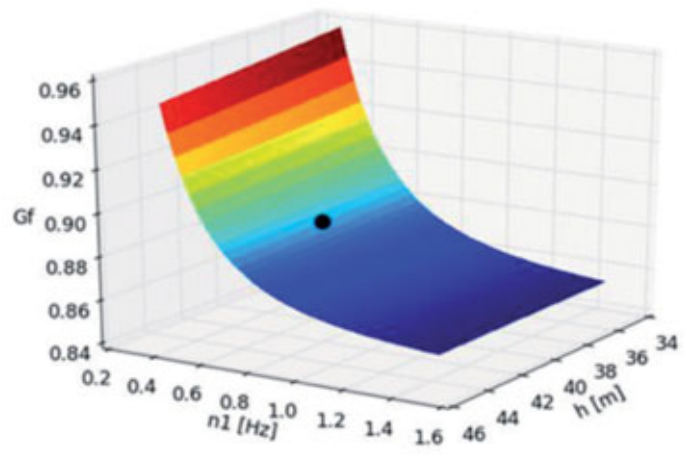


(b)

Fig. 13 - Variazione di G_f in funzione delle caratteristiche geometriche della struttura



(a)



(b)

Fig. 14. Variazione di G_f in funzione del coefficiente di smorzamento e della prima frequenza naturale

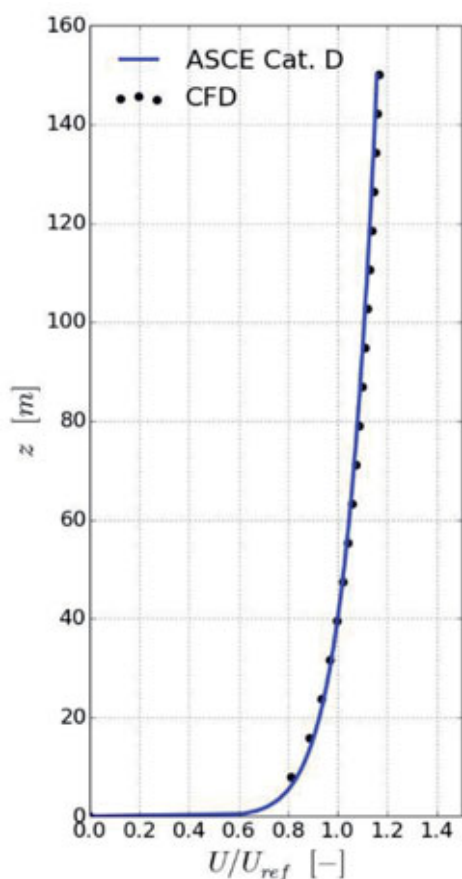


Fig. 15 - Confronto tra il target e il profilo di velocità considerato nelle analisi CFD

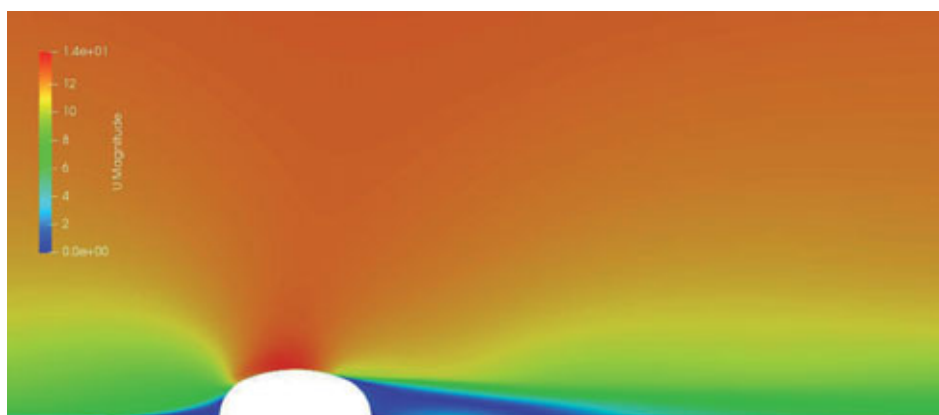


Fig. 16 - Distribuzione della velocità del vento (m/sec) per l'hangar isolato.

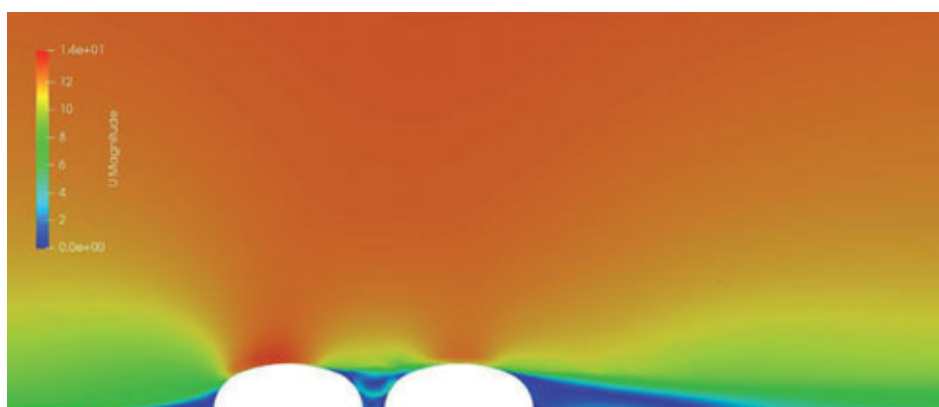


Fig. 17 - Distribuzione della velocità del vento (m/sec) per i due hangar affiancati.

La necessità di adottare modelli di turbolenza RANS o LES per applicazioni particolari e la stima del grado di confidenza che può essere attribuito ai risultati ottenuti devono essere sempre valutate con estrema attenzione da parte degli ingegneri in funzione del caso particolare oggetto di indagine.

La progettazione strutturale della centrale elettrica di Dubai, in accordo con la norma ASCE 7-10, richiede da un lato di individuare un valore appropriato del fattore di raffica G_f (necessario per tenere in conto della eventuale risposta risonante della struttura alla turbolenza presente nell'ABL) e, dall'altro lato, richiede di stimare la distribuzione della pressione mediata nel tempo facendo riferimento a forme costruttive comuni riportate nella norma o in altri documenti di comprovata validità.

Per quanto riguarda il primo problema, appurato che i modelli di turbolenza RANS non sono in grado di simulare accuratamente il comportamento instabile della turbolenza atmosferica e la sua interazione con la struttura, non è possibile adottare questo tipo approccio per valutare il valore di G_f . Tale valore dovrà quindi necessariamente essere quantificato in accordo con ASCE 7-10 (o mediante altri metodi di validità comprovata) come già discusso nel paragrafo precedente.

Per quanto riguarda il secondo problema è possibile adottare simulazioni RANS semplificate per valutare il campo di pressione mediato nel tempo che agisce sulla struttura. I risultati forniti da

queste simulazioni hanno lo scopo di rappresentare un termine di confronto per le distribuzioni di pressione dedotte dalle indicazioni della norma per la geometria dell'edificio in oggetto o per una geometria simile. Va comunque ricordato che le distribuzioni di pressione previste dalla norma sono state ottenute mediante prove in galleria del vento e quindi hanno un'affidabilità superiore rispetto alle simulazioni RANS. Esse vanno quindi preferite quando le caratteristiche geometriche dell'edificio ne consentono una realistica applicazione.

Tuttavia, nell'ambito del progetto degli hangar di Dubai, la presenza di due strutture di dimensioni estremamente grandi a distanza molto ravvicinata l'una dall'altra, circostanza che non è presa in considerazione da ASCE 7-10 o da altri codici sulle costruzioni, suggerisce fortemente di investigare l'interazione tra gli edifici per mezzo di simulazioni RANS.

Sulla sezione trasversale della struttura sono quindi state eseguite simulazioni bidimensionali CFD RANS al fine di valutare il campo di pressione mediato nel tempo che agisce sia sul singolo hangar che sui due corpi accoppiati.

Il profilo di velocità del vento mediato nel tempo che investe gli hangar è stato imposto in accordo con quanto indicato in ASCE 7-10 per categoria di suolo di tipo D. Nella figura 15 è riportato un confronto tra il profilo di velocità target della normativa e quello utilizzato nelle analisi numeriche.

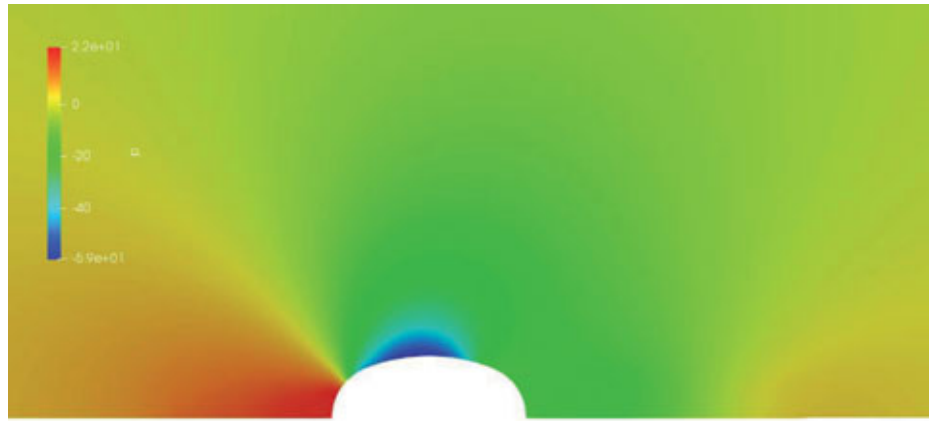


Fig. 18 - Distribuzione della pressione (Pa) per l'hangar isolato.

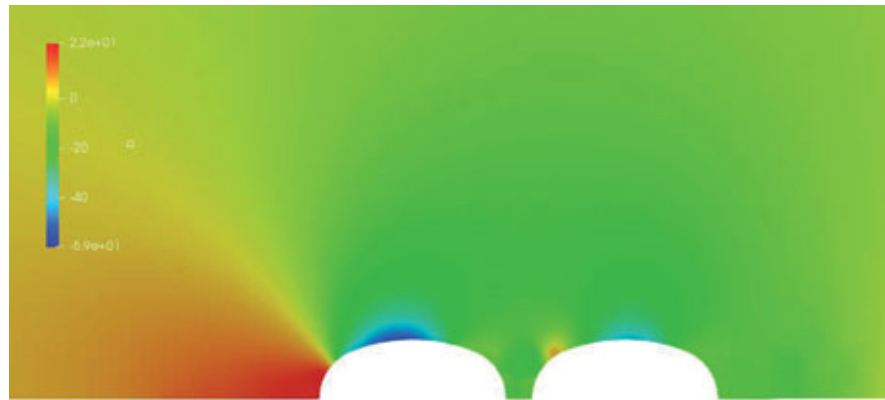


Fig. 19. Distribuzione della pressione (Pa) per i due hangar affiancati.

In figura 16 è mappata la distribuzione delle velocità del flusso di vento in prossimità dell'hangar isolato, mentre in figura 17 è mappata la distribuzione delle velocità nel caso dei due hangar affiancati. L'hangar isolato rappresenta una condizione transitoria riscontrabile durante la costruzione dell'impianto, mentre i due corpi affiancati rappresentano la configurazione finale di esercizio della centrale. Come prevedibile, a causa della vicinanza delle due strutture, si crea una zona di ricircolo del flusso di aria per cui i due hangar si comportano effettivamente dal punto di vista aerodinamico come un unico corpo.

Ciò è indirettamente confermato anche dalla buona velocità di convergenza verso la soluzione delle analisi numeriche.

La distribuzione della pressione in prossimità dell'hangar isolato è

mappata in figura 18 mentre la configurazione con due hangar è mappata in figura 19. Va ricordato che tali pressioni sono calcolate nelle analisi numeriche con riferimento ai valori $U_{ref} = 10$ (m/sec) e $z_{ref} = 40$ (m) così che andrebbero rapportate ad una pressione dinamica pari a $q_{ref} = U_{ref}^2 / 2 = 50$ (Pa).

Si possono quindi determinare i coefficienti di pressione dal rapporto $c_p = p/q_{ref}$.

La figura 20 rappresenta quindi la distribuzione dei valori del coefficiente di pressione C_p lungo lo sviluppo della sezione trasversale dell'hangar nel caso di struttura isolata.

L'andamento di C_p appare in buon accordo con quanto previsto dalla norma, tuttavia si riscontra una zona prossima alla chiave dell'arco in cui i valori sono leggermente superiori rispetto a quanto indicato

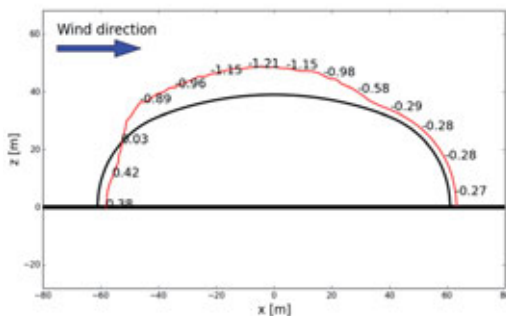


Fig. 18 - Distribuzione della pressione (Pa) per l'hangar isolato.

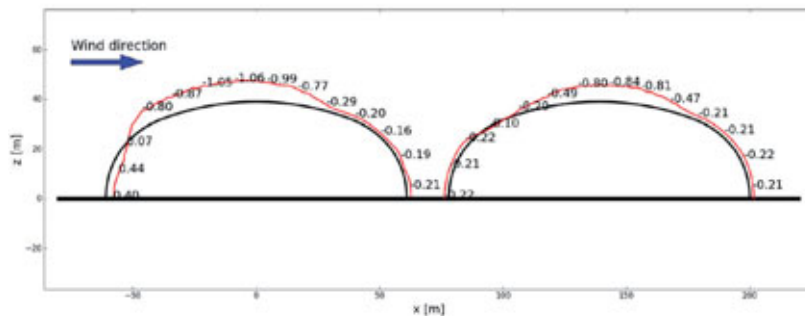


Fig. 21. Distribuzione del coefficiente di pressione per i due hangar affiancati.

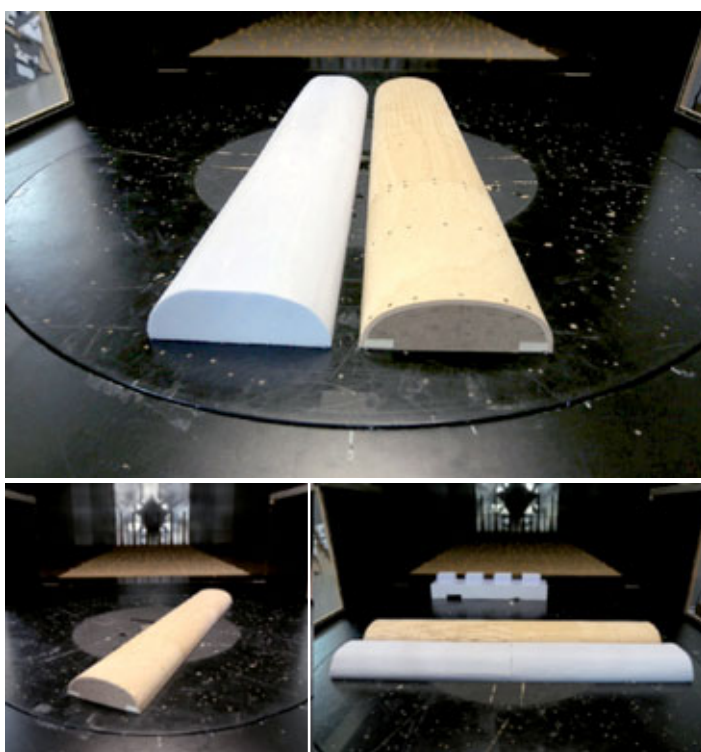


Fig. 22 - Il modello dei due hangar in scala 1:500 in galleria del vento

in ASCE 7-10 come anche all'imposta nella zona sopravvento dove si ha depressione.

La figura 21 fornisce l'andamento del coefficiente di pressione quando vengono considerati i due hangar accoppiati per i quali valgono le stesse osservazioni fatte per la struttura isolata.

4. TEST IN GALLERIA DEL VENTO

Wacker Ingenieure Consulting Wind Engineers è stata incaricata da INCICO di eseguire lo studio in galleria del vento per la determinazione della distribuzione delle pressioni sulla superficie esterna degli hangar al fine di validare i calcoli condotti da HEI in fase di progetto esecutivo della struttura, del rivestimento e dei dettagli costruttivi. Le prove in galleria del vento sono state eseguite in accordo con le indicazioni contenute in ASCE 49-12, ASCE 7-10 e in EN 1991-1-4, e sono stati tenuti in considerazione i criteri significativi per una corretta modellazione fisica relativamente alla somiglianza geometrica del modello e alla somiglianza del flusso del vento incidente.

4.1 Misura delle pressioni

Per la misura delle pressioni è stato realizzato un modello in scala 1:500 sulla base dei disegni di progetto esecutivo. In accordo con le indicazioni di INCICO, benchè la condizione provvisoria di un solo hangar costruito potesse non essere presa in considerazione, a favore di completezza dello studio, tale configurazione è stata comunque indagata come fatto anche in fase di analisi numerica CFD.

Uno dei due hangar riprodotti in scala 1:500 è stato dotato di 250 sensori di misura della pressione sulla superficie esterna distribuiti secondo lo schema riportato in figura 23. Dal momento che l'hangar

è completamente rivestito senza aperture di dimensioni significative ad eccezione delle porte principali sulle due testate (che comunque dovranno rimanere chiuse durante eventi di tempesta di vento) non sono state effettuate misurazioni della pressione interna.

I test sono stati condotti in una galleria del vento a bassa velocità a circuito aperto dotata di una sezione di prova di circa 12,00 m di lunghezza, 2,05 m di larghezza e 1,85 m di altezza.

Durante i test sono stati simulati un profilo del vento e caratteristiche di turbolenza del flusso simili a quelli del sito di costruzione della centrale elettrica, mediante l'utilizzo di generatori di vortici all'ingresso della galleria e mediante elementi di rugosità disposti sul pavimento del tunnel. Per determinare i parametri che descrivono il flusso (profilo del vento medio e profilo di intensità della turbolenza), sono state effettuate numerose misurazioni in campagna mediante tubi di Pitot e anemometri.

Il modello dell'edificio è stato quindi montato su un piatto girevole dotato di grande massa inerziale, che ha consentito la rotazione in tutte le angolazioni richieste ed è stato esposto a 36 diverse direzioni di vento incidente distanziate in incrementi di 10 gradi (da 0° a 360°). È stata misurata la componente media e la componente fluttuante delle pressioni agenti sulla superficie esterna degli hangar per le diverse direzioni di vento incidente mediante i 250 trasduttori di pressione ad alta sensibilità. I trasduttori di pressione erano collegati a un sistema di acquisizione dati digitale grazie al quale i dati sono stati filtrati, amplificati e digitalizzati.

Sono stati quindi determinati i coefficienti di pressione adimensionali a partire dalle registrazioni delle pressioni dinamiche sulla superficie della struttura. I coefficienti positivi definiscono pressioni dirette verso l'interno mentre i coefficienti negativi definiscono pressioni dirette verso l'esterno dell'edificio ovvero depressioni sulla superficie esterna.

In ultimo è stata stimata la sensibilità dell'hangar alle vibrazioni indotte dal vento per valutare se fenomeni di amplificazione aeroelastica dipendenti dai parametri strutturali dell'edificio potessero essere significativi ai fini del dimensionamento della struttura in aggiunta alla risposta istantanea ad un carico di tipo statico. I parametri strutturali richiesti per l'analisi dinamica sono dedotti dalla relazione di calcolo di progetto esecutivo e dai modelli FEM utilizzati per il calcolo della struttura stessa ed è stato considerato uno smorzamento equivalente della struttura metallica pari a 0.05. Sono state quindi determinate delle distribuzioni di pressione del vento di progetto che consentono di tenere in conto gli incrementi effettivi di carico dovuti ai fenomeni di amplificazione aeroelastica. I carichi da vento determinati mediante i test in galleria sono poi stati amplificati per gli opportuni coefficienti di sicurezza per allinearli ai criteri di progetto richiesti da ASCE 7-10.

La configurazione finale con la coppia di hangar affiancati e gli edifici circostanti completati rappresenta senza dubbio la condizione di maggiore interesse per lo studio effettuato su modello fisico. Quindi

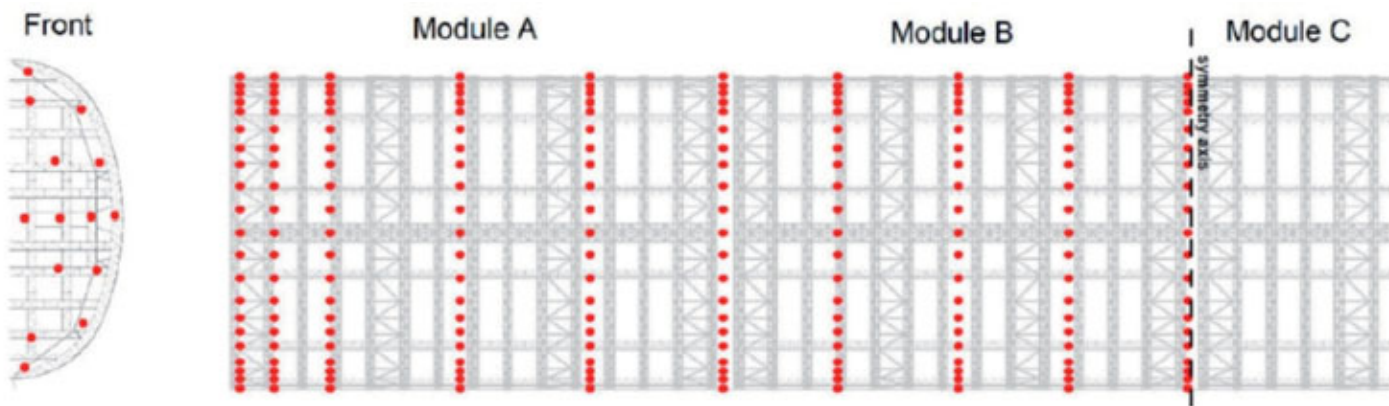


Fig. 23 - Posizione dei sensori di pressione sulla superficie esterna del modello dell'hangar.

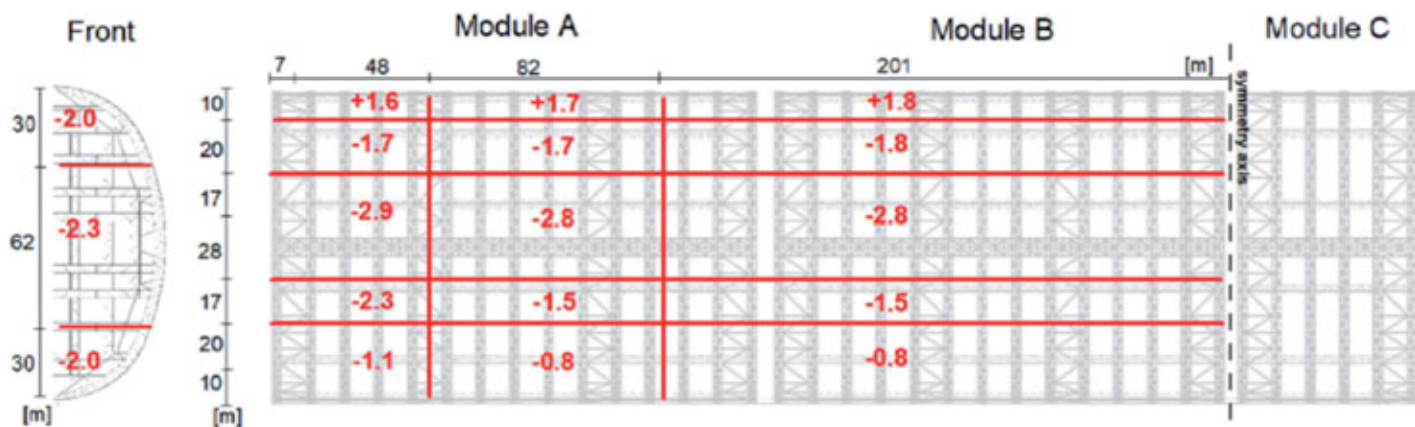


Fig. 24 - Pressioni statiche effettive del vento (kN/m²)

si riportano in figura 24 le pressioni sulla struttura con riferimento a questa situazione e con vento incidente perpendicolarmente all'asse longitudinale dell'hangar, in analogia allo studio bidimensionale effettuato mediante analisi CFD e alla distribuzione delle pressioni determinata mediante l'applicazione della norma ASCE 7-10.

5. CONFRONTO TRA I CAMPI DI PRESSIONE

L'analisi semplificata CFD su modello bidimensionale e i risultati della sperimentazione in galleria del vento hanno evidenziato due aspetti importanti relativamente all'azione del vento applicata agli hangar del parco carbone di Dubai.

In primo luogo, come era atteso, si è verificato che la struttura degli hangar, benchè non rientrante nella categoria delle strutture rigide secondo i criteri dati da ASCE 7-10, non risente in modo significativo di fenomeni di amplificazione aeroelastica dovuti all'interazione dell'azione turbolenta del vento con le sue caratteristiche dinamiche. In questo senso le ipotesi di calcolo fatte in sede di progetto esecutivo appaiono sostanzialmente accettabili a meno di una modesta correzione da apportare al fattore di raffica G_r per renderlo pienamente congruente con le caratteristiche di rigidità degli hangar. Secondariamente, ma non per importanza, i test su modello fisico confermano i risultati delle analisi CFD che mostrano una distribuzione del campo di pressioni sulla superficie esterna degli hangar

leggermente differente da quella considerata in progetto esecutivo. In particolare il campo di pressioni di progetto individuato mediante le prove in galleria del vento, pur non essendo globalmente più severo di quello individuato seguendo le indicazioni contenute in ASCE 7-10, presenta un maggiore sbilanciamento: la zona a pressione positiva sul lato sopravvento dell'edificio è maggiormente estesa, la zona centrale dell'arco è soggetta a depressioni di entità leggermente superiore e la depressione sul lato sottovento presenta valori inferiori a quelli utilizzati nel dimensionamento dell'edificio

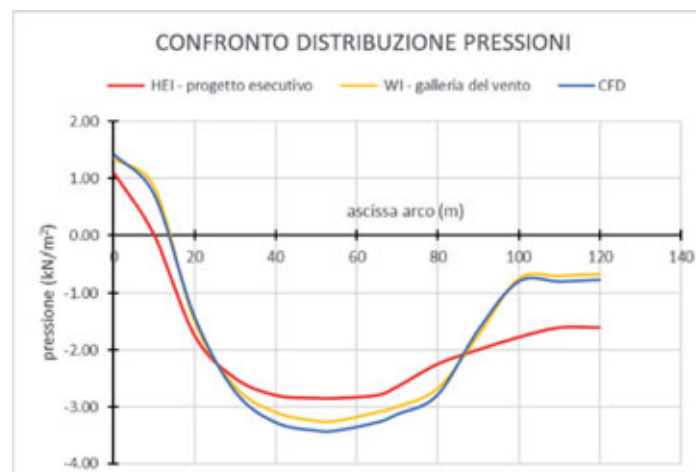


Fig. 25 - Confronto dell'andamento delle pressioni sulla sezione trasversale (kN/m²)

da HEI in fase di progetto esecutivo, come illustrato in forma comparativa nella figura 25. Questa distribuzione più irregolare delle pressioni sullo sviluppo dell'arco determina un regime secondario di azioni flessionali maggiormente impegnativo per la struttura rispetto a quello considerato dai progettisti di HEI.

Si conferma quindi che i test in galleria sono un utile riferimento nella definizione dei carichi da vento non solo nei casi di strutture che prevedibilmente possano essere interessate da fenomeni di amplificazione aeroelastica ma anche nei casi che presentano configurazioni geometriche non facilmente riconducibili ai casi standard trattati dalle norme di riferimento.

6. CONCLUSIONI

E' stata presentata una panoramica dei fenomeni che portano alla definizione dei carichi agenti su una struttura esposta all'azione del vento. Nel caso specifico i due hangar di stoccaggio del carbone della nuova centrale termoelettrica di Dubai.

Il calcolo del fattore di raffica G_r , eseguito in accordo con la procedura proposta in ASCE 7-10 per strutture flessibili, ha portato a risultati che sono solo leggermente superiori ai valori da assumere per strutture rigide.

L'analisi di sensibilità del valore di G_r rispetto al variare dei parametri che contribuiscono alla sua definizione non ha evidenziato variazioni eccessive per la struttura in esame ma ha indicato, come previsto, che il parametro più critico è rappresentato dal rapporto di smorzamento.

Sebbene la valutazione di fenomeni di amplificazione aeroelastica non possa essere perfezionata mediante modelli CFD semplificati (RANS), è possibile tuttavia fornire una valutazione del campo di pressione mediato nel tempo che agisce sulle superfici della struttura e procedere ad una stima preliminare dell'interazione che potrebbe

verificarsi tra i due hangar accoppiati a causa della loro vicinanza. I risultati ottenuti mediante simulazioni CFD hanno evidenziato un buon accordo con lo schema di carico dedotto dalle indicazioni contenute in ASCE 7-10 per l'hangar isolato e mostrano una riduzione delle pressioni complessive quando i due hangar sono considerati insieme. Ciò è dovuto al fatto che viene creata una regione di ricircolo del vento tra i due hangar che permette loro di comportarsi come un corpo unico dal punto di vista aerodinamico. Tuttavia si deve notare che tali considerazioni si basano su analisi bidimensionali RANS in regime stazionario e quindi sono influenzate dalle incertezze che caratterizzano sempre l'applicazione di tali analisi nel calcolo dei carichi da vento.

Considerando le possibili implicazioni di tali incertezze, il fatto che non tutti gli angoli di attacco del vento si possano studiare su un modello bidimensionale e l'importanza della struttura in esame, si è deciso di procedere a test su modello fisico in galleria del vento. I test in galleria del vento hanno confermato i risultati ottenuti mediante analisi CFD per quanto riguarda la distribuzione delle pressioni e gli effetti di interazione tra i due hangar accoppiati. Hanno inoltre evidenziato come la struttura in oggetto non sia soggetta a significativi fenomeni di amplificazione aeroelastica, in accordo con quanto dedotto dall'applicazione della norma ASCE 7-10 in merito alla determinazione del fattore di raffica G_r . Tuttavia sia le analisi CFD che i test su modello fisico in galleria del vento pur avendo restituito un campo di pressioni complessivamente leggermente meno severo di quello previsto dalla norma Americana, mostrano un maggiore sbilanciamento dello stesso. La maggiore asimmetria del carico da vento individuata dalle misure in galleria determina uno stato di sollecitazione su alcune zone della struttura (tipicamente le reni dell'arco) superiore a quello causato dai carichi della norma che quindi non risultano sempre cautelativi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ASCE 49-12: "Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures", American Society of Civil Engineers.
- [2] ASCE 7-10: "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", American Society of Civil Engineers.
- [3] EN 1991-1-4: "Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions", European Standard.
- [4] Plate, E.J., 1982: "Wind tunnel modelling of wind effects in engineering", in E.J.Plate, Engineering Meteorology, Chapter 13, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York, pp. 573-639.

CREDITS

Redazione del progetto esecutivo:	HEI, Harbin Electric International
Validazione del progetto esecutivo:	INCICO SpA
Test in galleria del vento:	Wacker Ingenieure – Wind Engineering