

sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Civile, Indirizzo Strutture

TORRI IN C.A.P. E ACCIAIO IN PARETE SOTTILE A SOSTEGNO DI AEROGENERATORI DI GRANDI DIMENSIONI

Autore: Laura BARTOLUCCI

Relatori: Prof. Ing. Claudio BORRI – Prof. Ing. Salvatore Giacomo MORANO

Correlatori: Ing. Paolo BIAGINI - Ing. Claudio MANNINI

Data di laurea: 1 Ottobre 2009

Il massiccio boom del ricorso all'energia eolica in Italia vede il settore dell'ingegneria civile e strutturale alquanto impreparato nel nostro paese. Le tecnologie provenienti dai paesi del nord Europa, ormai dominanti anche nel nostro paese, sono accompagnate da un know-how tutto concentrato sulle caratteristiche elettromeccaniche delle macchine (rotori) che oggi possono raggiungere anche i 130m di diametro. La bella Tesi dell' Ing. Laura Bartolucci dimostra come invece le competenze di ingegneria civile e strutturale siano di importanza fondamentale per il settore, trattandosi ormai di vere e proprie opere "giganti" dal punto di vista strutturale (le torri possono raggiungere i 130m di altezza): per di più, il loro utilizzo ed impiego in Italia (zona a diffusa ed estesa pericolosità sismica) pone problemi di definizione dei carichi di progetto e di interazione (e/o contemporaneità) delle azioni dominanti (vento e sisma): queste non sono a tutt'oggi ancora compiutamente previste neppure dalla nuova Normativa.

Prof. Ing. Claudio BORRI

INTRODUZIONE

Di primaria importanza oggi è lo sfruttamento del vento come fonte di energia rinnovabile. Durante gli ultimi anni in Europa è stata posta particolare attenzione nell'evoluzione di più grandi e più efficienti sistemi di sfruttamento di questa fonte energetica; nel 2006 il settore Europeo dell'energia eolica ha lanciato l'European Wind Energy Technology Platform (TPWind), i cui obiettivi sono l'innovazione e nuovi programmi di Ricerca e Sviluppo (R&D), nell'ottica dell'abbattimento dei costi da un punto di vista sociale, ambientale e tecnologico.

La tecnologia al momento più sviluppata in questo campo è quella on-shore, basata soprattutto sulla prefabbricazione di segmenti in calcestruzzo che vengono sovrapposti e sigillati in situ, ed infine precompressi longitudinalmente; l'articolo vuole quindi dare un contributo riguardo a questa tipologia di strutture.

Le torri sono composte, fino a una certa quota, da conci prefabbricati in calcestruzzo, solidarizzati tra di loro mediante un sistema di cavi di precompressione disposti al centro del guscio (fig. 1), e poi in sommità da una parte in acciaio. In questo tipo di strutture si cerca di sfruttare al meglio la prefabbricazione, arrivando più in alto possibile con i conci. La torre non può però essere realizzata tutta in precompresso; ciò è dovuto al fatto che, diminuendo i raggi ed aumentando gli spessori del guscio in calcestruzzo con l'altezza, oltre una certa quota non c'è più spazio sufficiente per gli accessori interni (come ad esempio scale ed ascensore).

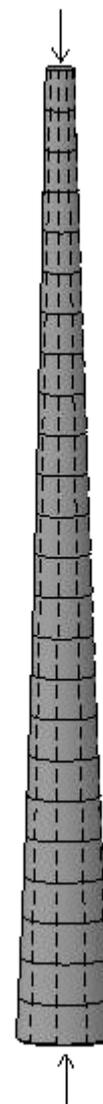


Fig. 1 - La precompressione

Si necessita quindi di una riduzione degli spessori nella parte più alta della struttura, e per questo motivo è previsto l'utilizzo di un segmento in acciaio, con il quale è possibile arrivare alla quota di montaggio della turbina. Per ragioni costruttive questo è realizzato mediante la giunzione flangiata di due elementi distinti; infatti, una volta montato l'ultimo concio in calcestruzzo, i cavi di precompressione devono essere messi in opera dall'alto e tesati; prima di questo deve però essere montato anche il segmento in acciaio, e, se questo fosse realizzato come un elemento unico, le sue dimensioni non permetterebbero le lavorazioni necessarie. Per questo motivo la parte in acciaio viene composta da due segmenti distinti, di cui solo il primo viene montato prima della tesatura dei cavi.

La scelta di questo tipo di strutture deriva da diversi motivi: con la precompressione è infatti possibile abbattere l'effetto del momento flettente presente nelle varie sezioni lungo il fusto, impedendo così l'insorgenza di elevate tensioni di trazione, che porterebbero ad una eccessiva fessurazione del calcestruzzo (fig. 1); inoltre, con questo tipo di tecnologia, è possibile adattare uno stesso profilo della torre a diverse situazioni progettuali e a diverse condizioni di carico, mediante una variazione del numero di cavi.

Le sezioni trasversali della struttura alle varie quote sono corone circolari. Ogni concio geometricamente è un tronco di cono "cavo"; la geometria della torre è quindi definita a partire dal valore assunto dai raggi alle varie quote di inizio – fine concio e dagli spessori del guscio in calcestruzzo e della lamiera in acciaio. Un altro parametro importante di progettazione sono i materiali; si prevede infatti l'utilizzo di calcestruzzi ad alta resistenza.

PROGETTAZIONE DELLA STRUTTURA DI SUPPORTO DI UNA TURBINA EOLICA: PRINCIPI BASE

Il punto di partenza nella progettazione di una struttura di questo tipo è la caratterizzazione del rotore che deve essere sostenuto; l'azienda produttrice fornisce le indicazioni necessarie in termini di peso del rotore e di azioni trasmesse alla struttura sottostante per effetto del carico del vento. Queste azioni vengono valutate in riferimento al rotore montato su un certo tipo di supporto, e possono essere utilizzate anche nella progettazione di altre strutture di sostegno, a patto che la loro frequenza propria di vibrazione non si discosti più del 5% da quella per la quale questi carichi sono stati calcolati. L'azienda produttrice valuta queste azioni in riferimento ad una normativa europea specifica per gli aerogeneratori: la IEC 61400-2005. In questa norma la vita di una turbina eolica è rappresentata da una serie di situazioni progettuali che coprono tutte le condizioni nelle quali l'aerogeneratore può trovarsi a lavorare nell'arco della sua vita utile.

Tali situazioni si concretizzano in una serie di casi di carico, ognuno dei quali è rappresentato da un set di tre forze e tre momenti da applicare, nel modello della struttura, al joint che rappresenta il rotore. Questi carichi devono essere combinati con le altre azioni agenti sulla torre; la IEC fornisce i coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni agli SLU, distinguendo tra casi di carico normali ($y_f = 1.35$) e anormali ($y_f = 1.10$).

Azioni agenti sulla struttura

Le azioni agenti sulla struttura sono i carichi permanenti (cioè il peso proprio della torre, i permanenti portati ed il peso del rotore), l'azione eolica sul fusto e i carichi trasmessi dal rotore per effetto del vento.

Inoltre, poiché queste strutture nascono per essere sottoposte continuamente all'azione eolica, può risultare difficile escludere una combinazione di carico in cui siano presenti sia il vento che il sisma. Nella normativa italiana di riferimento (D.M. del 14/01/2008) non esiste questa possibilità, mentre essa è correttamente contemplata nella IEC 61400-2005; l'azione sismica non deve però essere combinata con l'azione da vento estremo, ma con un'azione eolica ridotta, calcolata in riferimento ad una velocità del vento mediata sulla vita utile della struttura. L'esperienza mostra che, utilizzando questo valore ridotto della velocità, si ottengono, in riferimento al solo carico eolico, effetti pari a circa il 20% di quelli dovuti al vento estremo. Quindi è possibile procedere con la progettazione della torre trascurando l'azione sismica; la struttura potrà poi essere realizzata in tutti quei siti dove la somma degli effetti del sisma e del vento ridotto non superano quelli dovuti al vento di progetto.

Verifiche

Una struttura di questo tipo necessita ovviamente di molte verifiche. In relazione alla parte in c.a.p. devono essere svolte verifiche per tensioni verticali, utili a progettare la precompressione, e per tensioni orizzontali, necessarie a definire l'armatura di parete in ogni concio. In relazione alle verifiche per tensioni verticali, un possibile criterio di progettazione della precompressione può essere quello di richiedere che non nascano tensioni di trazione nelle sezioni di contatto tra concio e concio in condizioni di esercizio; la sezione resistente è rappresentata da un anello in calcestruzzo e da un certo numero di cavi di precompressione, posti al centro del guscio. Sulla base di questa verifica viene calcolato il numero di cavi necessario; le verifiche agli SLU risulteranno poi facilmente soddisfatte in quanto la struttura è, da questo punto di vista, molto lontana dalle sue condizioni ultime. In relazione alle verifiche per tensioni orizzontali devono essere considerati i contributi del taglio e della torsione, delle variazioni termiche e della fessurazione. Per quanto riguarda la parte in acciaio devono essere svolte verifiche di resistenza per tensioni verticali e orizzontali, ed inoltre verifiche di stabilità del guscio.

Infine devono essere effettuate le verifiche a fatica, separatamente per il calcestruzzo, per l'acciaio e per l'armatura di precompressione.

Un caso particolare è rappresentato dal cono di base, dove sono richieste analisi locali per il problema legato all'insorgenza di trazioni sopra le aperture presenti (porta e apertura di ventilazione), a causa delle quali è necessario un rinforzo di armatura.

UN CASO PRATICO: OTTIMIZZAZIONE E PROGETTAZIONE DELLA STRUTTURA DI SUPPORTO PER UN AEROGENERATORE DI GRANDI DIMENSIONI

I riferimenti normativi sono il D.M. del 14/01/2008, gli Eurocodici e la IEC 61400-2005; per la valutazione degli effetti del vento sulla costruzione è stato utilizzato il CNR-DT 207/2008.

Il punto di partenza sono le azioni trasmesse da un rotore da 3 MW, di peso pari a 1860 kN; a partire da una geometria iniziale è stato instaurato un processo di ottimizzazione, con il quale sono stati ricercati possibili miglioramenti della struttura di partenza. Durante il procedimento sono state mantenute costanti certe caratteristiche (il tipo di struttura, la sua altezza, il numero di conci), mentre altre sono state modificate (i raggi alle diverse quote, gli spessori del guscio e i materiali), alla ricerca del profilo e della combinazione spessori - materiali ottimali; si noti che la struttura di partenza era già stata frutto di un precedente processo di ottimizzazione. Le azioni trasmesse dal rotore erano state calcolate in riferimento ad una struttura la cui frequenza fondamentale era pari a 0.40 Hz; durante l'analisi l'attenzione è stata quindi limitata alle torri di frequenza pari, o al più poco maggiore, di 0.40 Hz; è stato assunto cioè 0.40 Hz come limite inferiore per la frequenza, e a questo valore si è cercato di avvi-

cinarsi il più possibile, tentando così di ottenere torri più snelle possibile.

Descrizione della struttura

Come osservato in precedenza, durante l'ottimizzazione certe caratteristiche della struttura sono state mantenute sempre costanti. La torre è quindi alta 100 m; da quota 0.00 m a quota 90.00 m è realizzata con 24 conci in calcestruzzo, di altezza pari a 3.75 m ciascuno; da quota 90.00 m a quota 100.00 m sono presenti due elementi in acciaio (fig. 2). Il profilo della torre, gli spessori del guscio ed i materiali sono frutto del processo di ottimizzazione.

Modellazione della struttura

La modellazione della struttura è stata realizzata con il programma di calcolo agli elementi finiti SAP2000.

Per effettuare l'ottimizzazione non è possibile procedere con un'unica modellazione, ma è inevitabile l'instaurarsi di un processo iterativo di progettazione. In ragione di ciò sono state realizzate due funzioni Matlab parametriche, che consentono la modellazione della torre, una con elementi trave e l'altra con elementi superficie. Al momento della chiamata Matlab assegna un valore fisso a certi parametri, mentre l'utente può assegnare il valore voluto ai raggi alle diverse quote, agli spessori e ai materiali. È possibile assegnare tre diversi valori dello spessore del guscio lungo il fusto e sono disponibili tre classi di resistenza del calcestruzzo. Entrambe le funzioni danno come output un file, da utilizzare come input per SAP, in cui devono essere contenute tutte le informazioni necessarie al programma di calcolo per modellare la struttura, scritte in un particolare linguaggio.

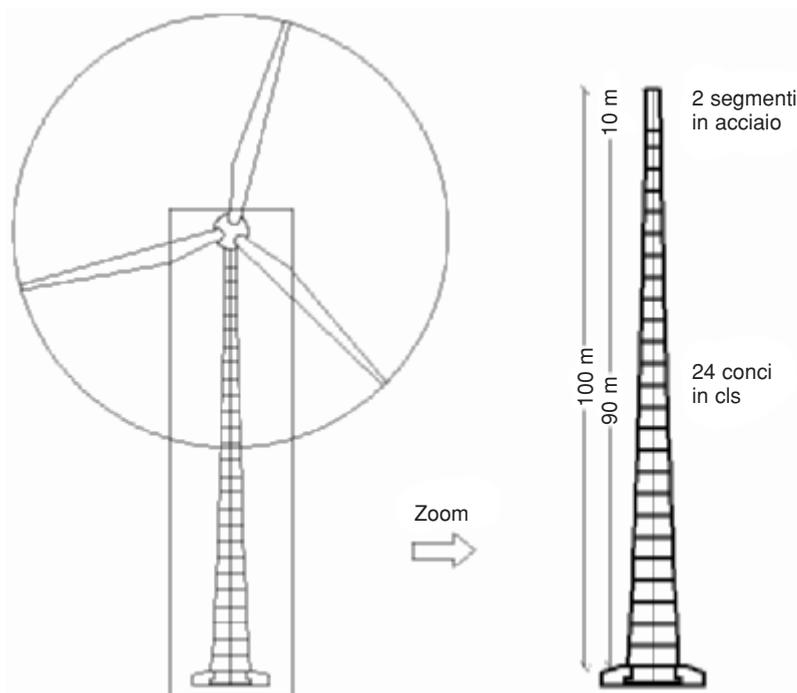


Fig. 2 - Caratteristiche geometriche principali

La struttura viene quindi modellata in un caso con elementi monodimensionali (elementi trave a sezione variabile) e nell'altro con elementi bidimensionali (elementi superficie). Entrambi i modelli sono incastrati a terra ed in entrambi il rotore è rappresentato da un joint, che viene posizionato con una certa eccentricità e connesso al resto della struttura mediante un vincolo body. A questo joint sono assegnati il peso del rotore e le azioni trasmesse alla struttura di sostegno.

Modellazione dell'azione del vento sul fusto

La doppia modellazione della torre si è resa necessaria per rappresentare correttamente l'azione eolica sul fusto. Infatti, in generale, l'azione del vento su una struttura, calcolata tenendo conto sia dell'effetto riduttivo dovuto alla non contemporaneità delle massime pressioni locali, sia quello amplificativo dovuto alle vibrazioni strutturali, può essere rappresentata o mediante delle pressioni agenti sulle superfici (ad esempio nel caso degli edifici e dei serbatoi) o mediante forze e momenti per unità di lunghezza agenti lungo l'asse di elementi snelli (ad esempio nel caso delle ciminiere, delle torri e dei ponti). È possibile che per una stessa struttura ci si riferisca ad un caso o all'altro a seconda del problema che si sta esaminando; ad esempio, in una ciminiera, si possono utilizzare i coefficienti di pressione per lo studio degli effetti radiali, e i coefficienti di forza per l'analisi degli effetti globali.

Nel modello con elementi superficie l'azione eolica è rappresentata dalle pressioni agenti sui singoli elementi, ed è quindi calcolata mediante i coefficienti di pressione. La norma impone di utilizzare questi coefficienti solo per le costruzioni, a pianta circolare, per le quali il rapporto altezza/diametro è minore di 5, cioè per gli elementi tozzi. Nel caso specifico però la struttura è snella, e quindi il vento deve essere rappresentato come una forza per unità di lunghezza. Per poter modellare comunque la torre con elementi bidimensionali, così da rendere possibile lo studio di problemi locali ed effetti radiali, è stata fatta un'equivalenza tra la distribuzione radiale delle pressioni e la forza per unità di lunghezza. È stato quindi mantenuto costante l'andamento delle pressioni, con il vincolo però che la loro risultante ad una certa quota fosse uguale alla forza per unità di lunghezza, valutata alla stessa quota. In questo modo si ottengono nel modello con elementi bidimensionali azioni ed effetti corretti, cioè quelli che si hanno per gli elementi snelli.

Nel modello con elementi trave si deve ottenere una distribuzione della forza per unità di lunghezza dello stesso tipo di quella mostrata in fig. 4: si osservi che, da una certa quota in poi, la forza tende a diminuire; ciò è dovuto al fatto che, oltre una certa altezza, l'aumento della pressione cinetica di picco con la quota non riesce a compensare la corrispondente diminuzione dei raggi.

Nel modello con elementi bidimensionali deve essere ottenuta una distribuzione di pressioni dello stesso tipo di quella mostrata in fig. 3: questa distribuzione è scalata e conforme alle indicazioni della normativa.

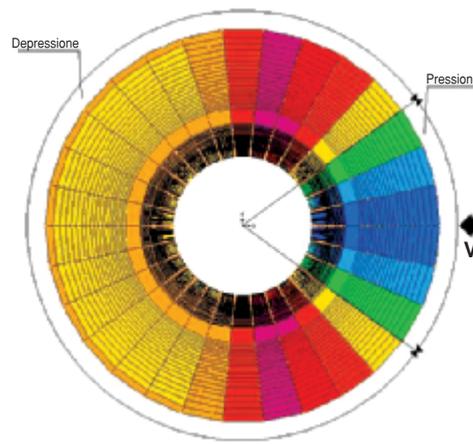


Fig. 3 - Distribuzione delle pressioni

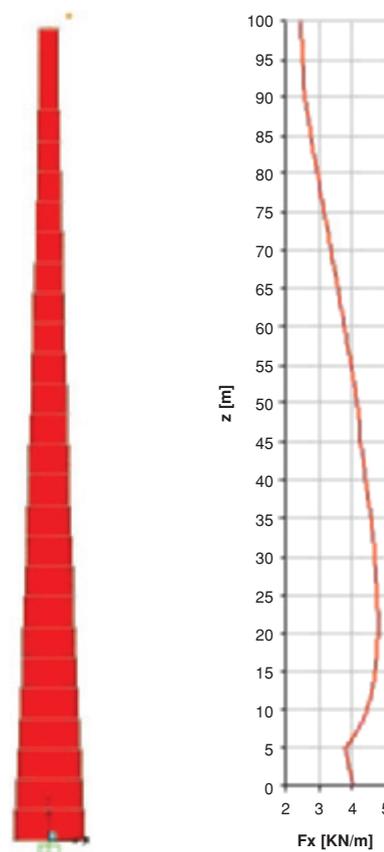


Fig. 4 - Forza per unità di lunghezza

Risposta della struttura across – wind

Deve essere analizzata anche la risposta across – wind della struttura, cioè in direzione trasversale a quella del vento. In particolare bisogna verificare che il fenomeno del distacco dei vortici non provochi nella torre effetti paragonabili a quelli dovuti alle azioni agenti in direzione longitudinale, così da poterlo trascurare in fase di progettazione. L'effetto delle vibrazioni trasversali indotte dal distacco risonante dei vortici può essere

schematizzato mediante l'applicazione di una forza statica equivalente, per unità di lunghezza, agente in direzione ortogonale a quella del vento. Questa forza è proporzionale al modo trasversale di vibrazione considerato; trattandosi quindi nel caso specifico di una struttura a mensola, potrebbe sembrare ovvio che fare l'analisi in riferimento al solo primo modo di vibrazione sia a favore di sicurezza, in quanto la distribuzione delle forze è sicuramente tale da massimizzare la risposta (fig. 5). In realtà occorre fare attenzione al modulo di queste forze: infatti, andando a considerare il secondo modo di vibrazione trasversale, lo spostamento in sommità è molto inferiore rispetto a quello del primo modo (fig. 5), e quindi la massa del rotore è attivata meno: il numero di Scruton si abbatta e si ottengono moduli delle forze superiori rispetto a quelli calcolati in riferimento al primo modo. In ogni caso si hanno comunque effetti inferiori rispetto a quelli dovuti alle azioni agenti in direzione longitudinale, e quindi il fenomeno può essere trascurato in fase di progettazione.

Modi di oscillazione principali normalizzati della struttura

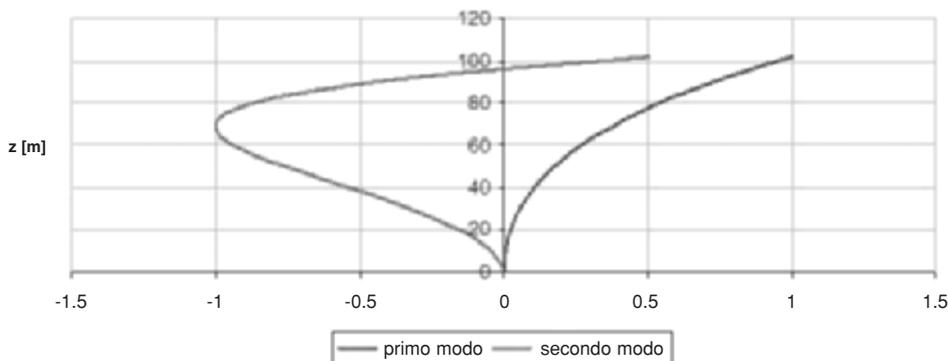


Fig. 5 - Modi di oscillazione principali normalizzati della struttura

Ottimizzazione della struttura: principi base

Sulla base delle azioni agenti, e con le funzioni Matlab realizzate, può essere instaurato il processo di ottimizzazione. I principi fondamentali alla base del procedimento sono i seguenti: è necessario ridurre più possibile il volume di calcestruzzo in modo da minimizzare i costi, in quest'ottica occorre procedere con una riduzione dei raggi e degli spessori del guscio; la frequenza propria di vibrazione dell'aerogeneratore non deve scendere sotto gli 0.40 Hz, da questo punto di vista occorre fare attenzione a non diminuire troppo la rigidezza della struttura; i conci in calcestruzzo il cui diametro massimo sia minore di 4.80 m possono essere trasportati e montati come pezzo unico, mentre se le dimensioni sono maggiori il concio viene realizzato mediante la giunzione di due elementi distinti, che devono essere trasportati separatamente in cantiere e collegati; in quest'ottica bisogna cercare di ottenere un diametro minore di 4.80 m prima possibile lungo il fusto, minimizzando così i costi relativi al trasporto e alla giunzione di due pezzi separati.

Durante il processo di ottimizzazione non è stato ovviamente possibile tener conto di tutte le verifiche descritte in precedenza; sono state quindi considerate solo le verifiche della parte in c.a.p. per tensioni verticali. Si fa notare che, tra tutte le verifiche svolte durante l'ottimizzazione, la più restrittiva è stata sempre quella della decompressione, cioè il fatto di impedire l'insorgenza di trazioni nelle sezioni di contatto tra concio e concio in condizioni di esercizio. È stato infatti sulla base di questa verifica che è stato sempre calcolato il numero di cavi necessario per la sezione in esame, in quanto tutte le altre, di questo gruppo, risultavano poi sempre soddisfatte.

Ottimizzazione della struttura: risultati

Il processo di ottimizzazione è stato svolto a partire da una geometria iniziale, derivante essa stessa da un'ottimizzazione precedente. In essa si raggiunge un diametro massimo inferiore a 4.80 m al concio 15, e la torre è caratterizzata da un certo volume di calcestruzzo. Si può quindi tentare di migliorare questa geometria cercando di ottenere un diametro massimo minore di 4.80 m prima del concio 15, o volumi totali di calcestruzzo inferiori. Riducendo i diametri bisogna ovviamente provvedere ad aumentare gli spessori o a migliorare i materiali, altrimenti la torre diventa troppo flessibile.

Diminuendo i raggi in modo da ottenere un diametro massimo inferiore a 4.80 m al concio 12 o al concio 13 gli spessori devono essere aumentati molto, e si ottengono aumenti inaccettabili del volume complessivo di calcestruzzo; inoltre si richiedono quasi ovunque materiali di classe di resistenza più elevate. Quindi non è possibile ottenere questo risultato senza peggiorare le cose in termini di costi relativi ai volumi di calcestruzzo o alle classi di resistenza dello stesso.

Perciò, per migliorare la geometria di partenza, l'unico modo è portare il raggio massimo inferiore a 4.80 m al concio 14 anziché al 15, e cercare di diminuire il volume complessivo di calcestruzzo. Quindi si possono diminuire, anche se non di molto, i raggi rispetto al caso iniziale lungo tutta l'altezza della torre, ottenendo così una struttura complessivamente più snella e un volume complessivo minore. Per evitare un aumento degli spessori si utilizzano calcestruzzi di classe di resistenza migliore, ma questo è limitato solo a pochi conci e quindi non comporta rilevanti aumenti dei costi.

Geometria definitiva della struttura

Nella struttura definitiva (fig. 6) il guscio in calcestruzzo è spesso 20 cm nei primi 5 conci, poi 25 cm ed arriva a 30 cm nell'ultima sezione (quota 90.00 m). Si prevede l'utilizzo di un calcestruzzo di classe di resistenza C55/67 nei primi 8 conci, poi C60/75. La scelta di questi materiali è dettata soprattutto da problemi di resistenza; ad esempio, nelle verifiche per tensioni orizzontali in riferimento al taglio e alla torsione, nascono tensioni principali di trazione non trascurabili, che devono risultare inferiori alla resistenza media a trazione del calcestruzzo. La parte superiore della torre è realizzata con due segmenti in acciaio S235 spessi 20 mm.

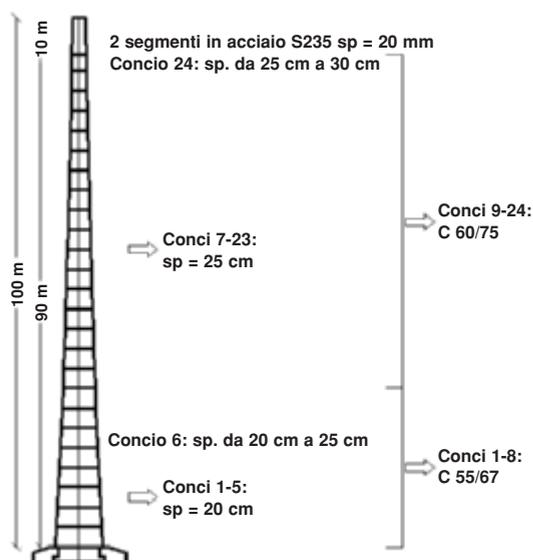


Fig. 6 - Geometria definitiva della struttura

Verifiche della parte in c.a.p.

Una volta scelta la geometria definitiva della struttura devono essere svolte tutte le verifiche.

Per quanto riguarda la parte in c.a.p. sono state svolte prima quelle per tensioni verticali agli SLU e SLE, mediante le quali è stata progettata la precompressione. In particolare è stato calcolato il numero di cavi necessario ad impedire l'insorgenza di trazioni nelle sezioni di contatto tra concio e concio in condizioni di esercizio; le altre verifiche risultavano poi sempre soddisfatte. La struttura è infatti, da questo punto di vista, molto lontana dalle sue condizioni ultime. A titolo di esempio si osservi il grafico della verifica a pressoflessione svolta per la sezione di base della torre per le quattro combinazioni di carico più gravose (fig. 7):

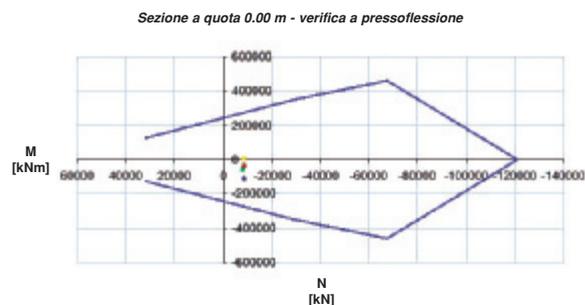


Fig. 7 - Esempio di verifica agli SLU a pressoflessione

In definitiva è previsto l'utilizzo di 40 cavi di precompressione da 7 trefoli per i primi 19 conci; solo 30 cavi proseguono fino al concio 24.

Le verifiche per tensioni orizzontali agli SLU e agli SLE sono state svolte considerando gli effetti di taglio e torsione, delle variazioni termiche e

della fessurazione (causata dal fenomeno del ritiro durante la fase di presa e indurimento del calcestruzzo e dai carichi esterni durante il normale esercizio della struttura), e calcolando l'armatura di parete necessaria ad assorbire le trazioni derivanti da questi fenomeni.

I conci sono quindi armati con ferri di parete, interni ed esterni, $\phi 14$ a passo i , dove i vale 18 cm nei primi 8 conci, 15 cm dal concio 9 al concio 23 e 13 cm nell'ultimo concio (fig. 8).

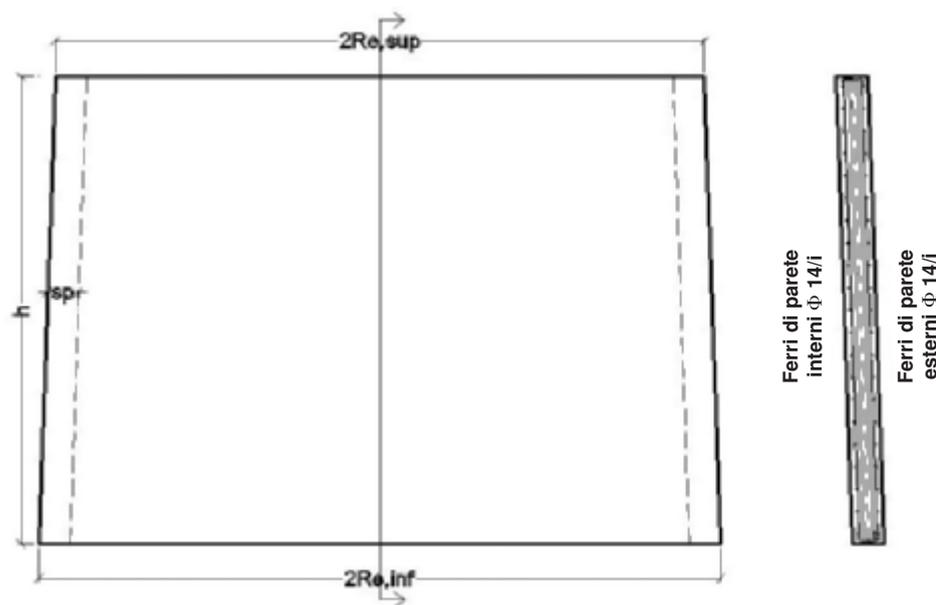


Fig. 8 - Il concio generico, armatura di parete

La verifica determinante nei primi 19 conci è stata quella relativa alla fessurazione dovuta al fenomeno del ritiro; la diminuzione del passo dal concio 8 al concio 9 è dovuta alla maggiore resistenza a trazione del calcestruzzo, che per normativa è proporzionale al quantitativo minimo di armatura per il problema della fessurazione. Oltre il concio 19 diventano invece determinanti le verifiche agli SLU, ed in particolare aumentano le tensioni tangenziali, e quindi il quantitativo minimo di ferri per assorbirne il flusso è maggiore dei minimi per fessurazione.

Inoltre sono state svolte le verifiche a fatica sul calcestruzzo e sull'armatura di precompressione.

Infine deve essere analizzato il caso particolare del concio di base. Qui sono infatti presenti due aperture, la porta e l'apertura di ventilazione, a causa delle quali nascono sul guscio in calcestruzzo delle tensioni orizzontali di trazione che devono essere assorbite da armatura apposita. Gli effetti si risentono fino a una certa altezza, e nei conci superiori al primo non destano particolari preoccupazioni. È invece necessario un rinforzo di armatura nel primo concio nella zona sopra la porta (fig. 9), per calcolare il quale non è stata determinante la verifica di resistenza ma, ancora una volta, quella a fessurazione.

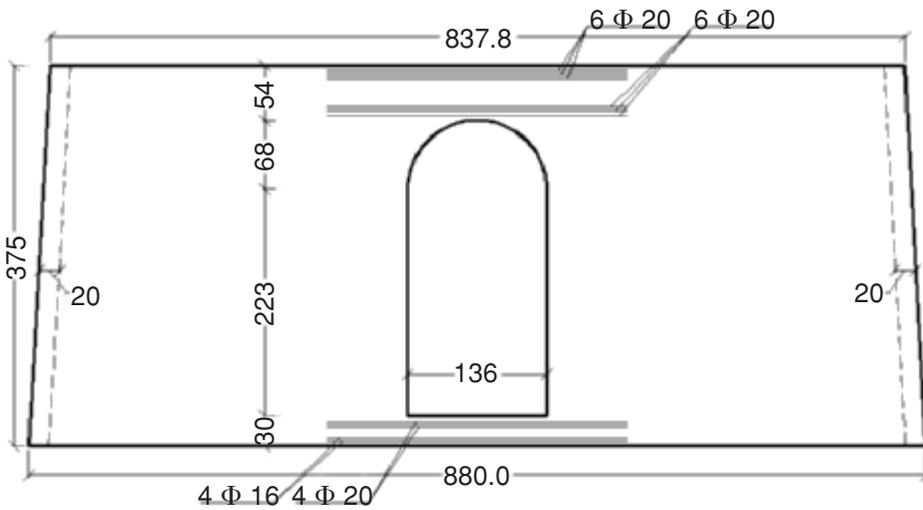


Fig. 9 - Il conco di base, armatura di rinforzo

Verifiche della parte in acciaio

Per quanto riguarda la parte in acciaio devono essere svolte verifiche di resistenza per tensioni verticali e orizzontali, verifiche di stabilità del guscio secondo l'Eurocodice 3 e verifiche a fatica.

Inoltre si ricorda che la parte alta della torre non viene realizzata con un unico segmento in acciaio, ma mediante la giunzione flangiata di due elementi tronco-conici. Deve essere quindi progettata la connessione tra i due segmenti. Questa è realizzata mediante due flange metalliche anulari bullonate, alle quali i due elementi vengono saldati. Sono presenti 80 bulloni di classe 10.9 disposti in un'unica fila (fig. 10). La progettazione delle flange ha richiesto lo studio di un giunto sottoposto a taglio e trazione; per il problema della trazione si deve fare riferimento al caso particolare dei giunti flangiati eccentrici (fig. 10), per i quali la determinazione della trazione sul singolo bullone è legata all'analisi dello stato di sollecitazione della flangia.

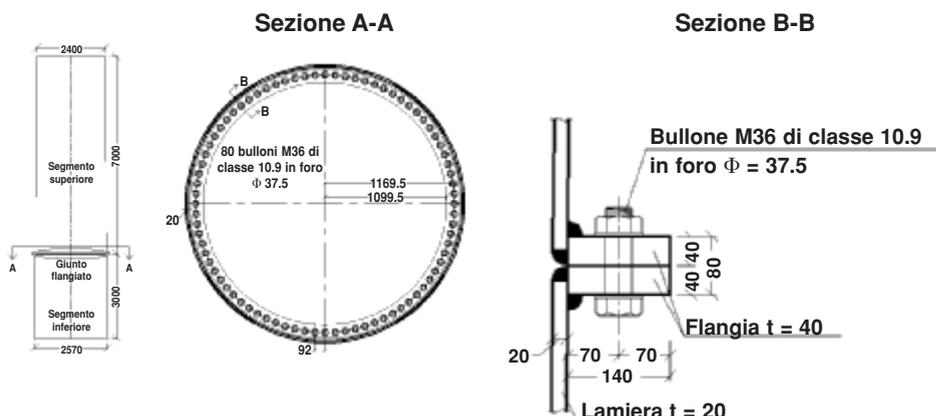


Fig. 10 - Giunto flangiato, sezioni e particolari

FASI COSTRUTTIVE

Il processo costruttivo per questo tipo di strutture è diverso rispetto a quello delle torri metalliche, in quanto il sistema di precompressione porta ad un differente approccio.

Le fondazioni consistono di un plinto anulare di grosse dimensioni (fig. 11); per aumentare la capacità portante questo può essere realizzato su un sistema di pali, la cui lunghezza è funzione delle caratteristiche del terreno. È richiesta ovviamente la presenza di una fondazione molto massiccia che possa ricentrare le azioni trasmesse dalla sovrastruttura (fig. 11).

La fondazione è gettata in opera; una volta realizzata può essere messa in opera la struttura in elevazione. I primi 14 conchi devono essere assemblati, mediante la giunzione di due pezzi distinti, prima di poter essere montati (fig. 12); i vari segmenti vengono installati disponendo uno strato di una malta specifica, dotata di una elevata resistenza a trazione, nelle sezioni di contatto.

Durante il montaggio della torre non sono presenti forze di precompressione; la struttura sostiene se stessa solo grazie al peso proprio e alla malta, presente nelle sezioni di contatto tra conco e conco, abile a assorbire le trazioni.



Fig. 11 - Il plinto di fondazione



Fig. 12 - Il conco assemblato

Una volta montato il primo segmento in acciaio (alto 3 m), i cavi vengono inseriti dall'alto; l'elemento metallico è dotato degli appositi apparecchi utili all'ancoraggio dei cavi; questi poi vengono tesati e la torre raggiunge la configurazione richiesta, dove possono essere montati il secondo segmento in acciaio (fig. 13) e la turbina (fig. 14).

I due elementi metallici vengono connessi mediante un giunto flangiato; una ulteriore flangia, presente sulla cima, permette di installare il rotore, precedentemente assemblato a terra.

CONCLUSIONI

In conclusione la progettazione di questo tipo di strutture non è guidata solo da problemi di resistenza; si ricorda infatti che la valutazione del profilo e della combinazione spessori – materiali ottimali è fortemente influenzata dal problema dell'eccessivo abbattimento della rigidità della torre. Infatti, assegnando un vincolo di minimo alla frequenza, si esclude la possibile scelta di strutture più snelle, e quindi economicamente più vantaggiose in termini di volumi di calcestruzzo e di conci che devono essere trasportati separatamente in cantiere e giuntati. D'altronde, come già osservato, non è possibile allontanarsi troppo dal valore 0.40 Hz di frequenza utilizzato dall'azienda per calcolare le

azioni trasmesse dal rotore per effetto del vento, e la scelta progettuale di volersi avvicinare a questo valore il più possibile sembra la più adeguata.

Si osservi inoltre che in molte analisi gioca un ruolo fondamentale il problema della fessurazione. Si tratta infatti di un fenomeno frequente in queste strutture, ed inoltre il fatto che queste siano ovviamente destinate ad essere sottoposte agli agenti atmosferici, e quindi a classi di esposizione generalmente svantaggiose, abbatte i limiti di accettabilità per l'apertura delle fessure.

BIBLIOGRAFIA

- CLAUDIO BORRI, STEFANO PASTÒ – *Lezioni di ingegneria del vento* – Firenze University Press, 2006
- GIANDOMENICO TONIOLO – *Cemento armato, calcolo agli stati limite* – Zanichelli, 2007
- EMANUELE FILIBERTO RADOGNA – *Tecnica delle costruzioni, volume 2: costruzioni composte acciaio - calcestruzzo, cemento armato, cemento armato precompresso* – Zanichelli, 2000
- GIULIO BALLIO, FEDERICO MAZZOLANI – *Strutture in acciaio, sistemi strutturali: sicurezza e carichi, materiale, unioni e collegamenti, resistenza e stabilità* – Hoepli, 2005
- GIULIO BALLIO, CLAUDIO BERNUZZI – *Progettare costruzioni in acciaio* – Hoepli, 2004
- VINCENZO NUNZIATA – *Teoria e pratica delle strutture in acciaio* – Dario Flaccovio Editore, 2000



Fig. 13 - Montaggio del secondo segmento in acciaio



Fig. 14 - La struttura definitiva