

ANALISI NUMERICHE E SPERIMENTALI DEL COMPORTAMENTO TERMO-MECCANICO DI UNA TURBINA EOLICA

F.C. Ponzo¹, R. Ditommaso¹, G. Auletta¹, A. Nigro¹, D.S. Nigro¹, D. Pica¹, L. Carosielli²

¹ Scuola di Ingegneria, Università degli studi della Basilicata, Italy

² Società Daunia Faeto, Italy

Abstract. Le fonti energetiche rinnovabili, in particolare l'energia eolica, sono diventate un punto di forza delle politiche energetiche in diversi paesi in tutto il mondo. Le turbine, pertanto, tendono ad avere potenze sempre più elevate e di conseguenza le strutture sulle quali sono collocate dimensioni e prestazioni sempre più al limite. Le torri eoliche sono collocate in siti caratterizzati da elevate velocità del vento e da significative escursioni termiche, i cui effetti congiunti possono, in taluni casi, provocare stati tensionali sulla struttura in grado di determinare anche danni strutturali.

Questo studio presenta i risultati preliminari ricavati da indagini sperimentali e numeriche effettuate su una torre eolica realizzata in parte in acciaio, in parte in conci di calcestruzzo prefabbricato e precompresso sui quali è stato registrato uno quadro fessurativo significativo.

Al fine di individuare le cause dei fenomeni di danneggiamento osservati, sono state effettuate valutazioni vibrazionali basate su acquisizioni accelerometriche per la calibrazione dei modelli numerici, mediante i quali sono state condotte analisi numeriche multifisiche, di tipo termo-meccanico, grazie alle quali è stato possibile individuare i meccanismi che governano lo stato tensionale e di deformazione dei conci in calcestruzzo posti alla base della torre eolica. In particolare, l'analisi transitoria ha consentito la corretta valutazione dei picchi di tensione che spiegano la formazione delle lesioni sulla faccia esterna dei conci di base.

Descrizione della struttura. La torre eolica oggetto di studio (vedi Fig. 1) è costituita da una struttura mista di calcestruzzo armato prefabbricato a cavi post tesi e acciaio, di altezza complessiva pari a $H_{\max}=83.3$ m ($H_{\text{mozzo}}=84.3$ m). Il rotore per la produzione nominale di 2000 kW ha un diametro di 82 m. La porzione di torre realizzata in calcestruzzo armato precompresso a cavi post tesi raggiunge l'altezza complessiva di $H_{\text{cls}}=57.39$ m. Essa è composta dalla sovrapposizione di n.15 segmenti anulari, ciascuno di altezza pari a 3.826 m, aventi sezione variabile con legge esponenziale. I primi 5 segmenti anulari sono costituiti da due elementi semicircolari, mentre i restanti 10 segmenti sono composti da un unico elemento circolare. Lo spessore degli elementi (conci) dei primi 14 segmenti anulari è pari a $s=30$ cm mentre l'ultimo segmento presenta elementi di sezione con spessore variabile da 30 cm alla base a 36 cm in sommità. Gli ultimi 2 segmenti finali della torre sono in acciaio. Gli elementi sono stati solidarizzati mediante l'interposizione di apposite malte all'interfaccia e l'applicazione di uno stato tensionale normale di precompressione mediante un sistema composto da 32 trefoli post-tesi.



Fig. 1 - Immagini della torre e particolare delle lesioni verticali alla base del cono di terra.

I conchi prefabbricati sono stati realizzati in stabilimento con calcestruzzo avente classe di resistenza variabile da $R_{ck,55}$ a $R_{ck,75}$. Le armature lente inglobate nei conchi prefabbricati sono del tipo ad aderenza migliorata B450C. Le strutture in acciaio sono realizzate con acciaio del tipo S235, mentre le flange di collegamento, alle diverse quote, sono realizzate con acciaio del tipo S355.

Le torri sono connesse alla struttura di fondazione, realizzata in calcestruzzo armato gettato in opera, mediante un sistema di cavi di post compressione. Detta struttura di fondazione è composta da una piastra in calcestruzzo armato, con pianta a corona circolare (diametro esterno $d_e=15,60$ m, diametro interno $d_i=6,90$ m, altezza variabile linearmente dal diametro interno a quello esterno da $h=3,20$ m a $h=2,20$), innestata su un gruppo di n. 16 pali f 1000 equidistanti radialmente. In corrispondenza dell'attacco della torre alla fondazione è presente un sistema di fessure equidistanti che si sviluppano lungo tutto il perimetro della struttura.

Indagini dinamiche sperimentali. Nel 2016 sulla torre è stato installato un sistema di monitoraggio accelerometrico permanente, composto da due stazioni equipaggiate con sensori triassiali force-balance, (accelerometro triassiale $\pm 0.5g$, conversione A/D a 24 bit e frequenza di campionamento fino a 500 Hz), installate rispettivamente alla base della struttura e all'altezza della turbina (83m), in grado di registrare i dati accelerometrici e correlare le caratteristiche dinamiche della torre alle diverse condizioni climatiche: temperatura dell'aria e velocità del vento.

I dati accelerometrici sono stati analizzati sia in condizioni di bassa ventosità (velocità inferiore a 5 m/s), con strumenti che operano in regime stazionario, quali la funzione di trasferimento valutata con il metodo di Welch (Welch, P. D. 1967), che in condizioni di elevata velocità del vento (velocità superiore a 20 m/s), valutando, in quest'ultimo caso, le fasi transitorie del comportamento dinamico mediante strumenti capaci di analizzare risposte stazionarie e non del sistema monitorato (Stockwell *et al.*, 1996; e Ditommaso R *et al.*, 2012). I risultati delle prove di identificazione sono stati utilizzati per i) verificare la corrispondenza delle proprietà dinamiche strutturali con quelle previste in progetto, ii) per calibrare opportunamente i modelli numerici utilizzati nelle fasi successive dello studio e iii) per stimare l'eventuale progressione del danno.

La campagna è stata espletata in due fasi distinte (Luglio 2014 e maggio 2015), quindi ad una distanza temporale di circa 1 anno, al fine di verificare eventuali differenze comportamentali attribuibili a una progressione del danno strutturale. Nella seconda fase, oltre alle tre stazioni accelerometriche installate sulla torre, è stata utilizzata un'ulteriore stazione velocimetrica mobile installata alla base della torre e, successivamente, sul terreno circostante per stimare eventuali fenomeni di interazione terreno struttura.

Le misure vibrazionali sono state effettuate in tre differenti condizioni operative: i) con aerogeneratore fermo, ii) con aerogeneratore in movimento e iii) con aerogeneratore in fase di

arresto. Le misure vibrazionali hanno consentito la valutazione sperimentale delle caratteristiche dinamiche della torre monitorata. In particolare, il valore della frequenza fondamentale di oscillazione è risultato superiore a quello previsto in fase di progetto con una differenza media che si attesta intorno al 20%. Tutto questo potrebbe dipendere da una maggiore rigidezza della struttura reale rispetto quella assunta in fase di modellazione numerica. Le misurazioni effettuate a distanza di un anno non hanno evidenziato variazioni significative delle frequenze di vibrazione. È importante evidenziare che nell'ambito del monitoraggio dinamico effettuato sono stati registrati più volte eventi relativi al distacco dei vortici di Von-Karman (come mostrato in Figura 2) per i quali sono state valutate anche le sollecitazioni aggiuntive, debitamente combinate con le sollecitazioni statiche e dinamiche derivanti dagli altri carichi gravanti sulla struttura. Dalle indagini dinamiche eseguite emerge un comportamento dinamico strutturale prevalente di tipo elastico.

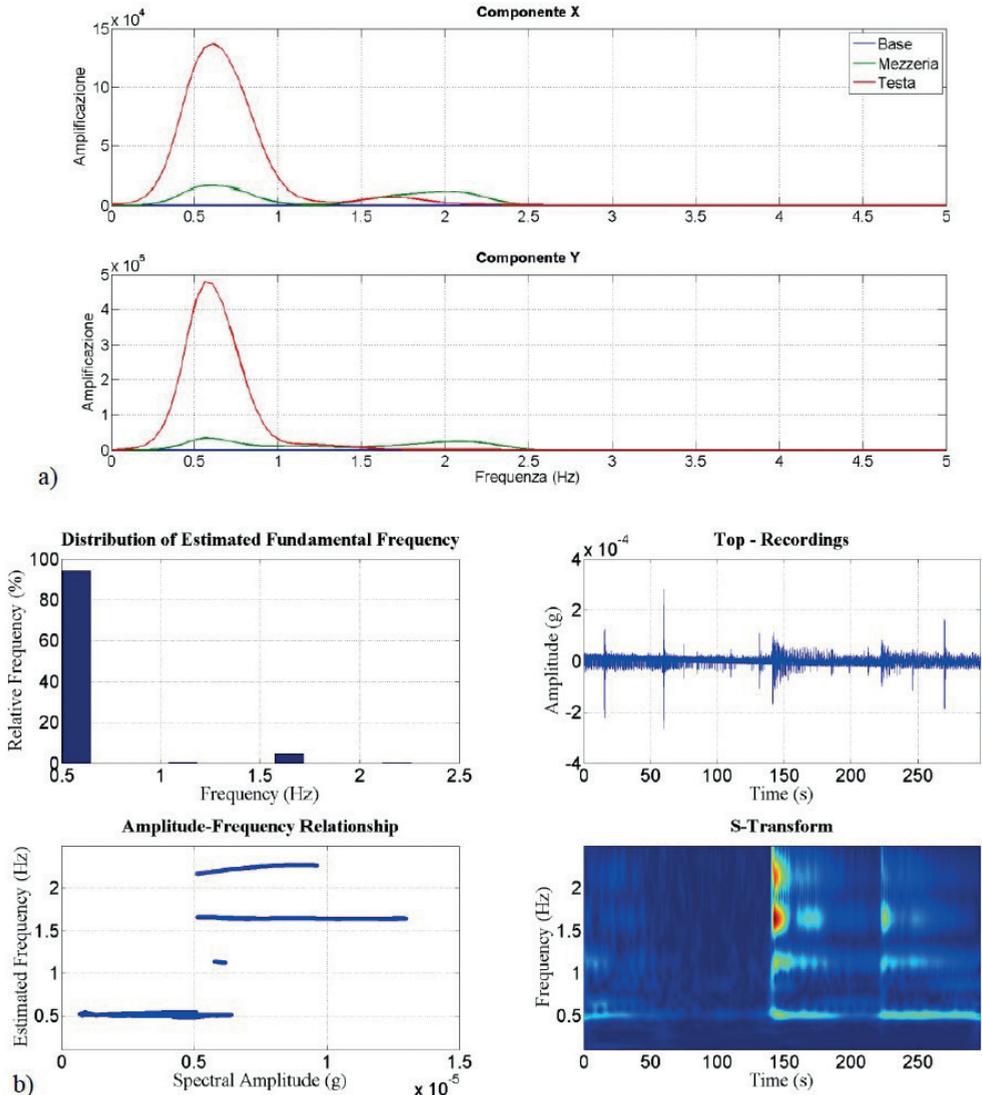


Fig. 2 - a) Calcolo delle funzioni di trasferimento della torre in regime dinamico stazionari, b) Analisi del comportamento dinamico della torre in regime non stazionario.

Modellazione e analisi termomeccaniche. Per analizzare nel dettaglio il reale andamento delle tensioni all'interno delle pareti della torre eolica, prodotto dai carichi gravitazionali, dall'azione nei cavi di precompressione, dal vento e dall'effetto della differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno, è stato realizzato un apposito modello agli elementi finiti tridimensionale con elementi solidi in ambiente Comsol Multiphysics (versione 5.3a). Le caratteristiche dei materiali impiegati nella modellazione sono stati desunti dalle prove effettuate su campioni di calcestruzzo estratti dalla torre. Dalle prove è emerso un calcestruzzo con resistenza alla compressione media f_{cm} pari a 57.52 MPa e resistenza alla trazione pari a 5.53 MPa.

Sono stati modellati nel dettaglio solamente i primi tre livelli di conci in c.a.p. di base, sede delle lesioni. Tutte le sollecitazioni rinvenienti dalla parte superiore della struttura sono state preventivamente calcolate con modelli semplificati e poi applicate all'interfaccia superiore dei conci in c.a.p. Sul modello così realizzato sono state effettuate analisi termo-meccaniche considerando un transitorio termico in grado di simulare le diverse condizioni di temperature interne ed esterne nei vari periodi dell'anno, ricavate da registrazioni effettuate *in situ*. La condizione più gravosa corrisponde al transitorio giornaliero con temperature minime esterne pari a circa -10 °C e temperature interne che possono raggiungere e superare anche i 30 °C in condizione di elevata ventosità, per effetto del calore rilasciato dal sistema di generazione elettrica posto alla base delle torri. In queste condizioni si generano all'interno dello spessore dei conci stati tensionali variabili dalla compressione in corrispondenza della faccia interna dei conci e di trazione all'esterno (fig. 3), con valori che superano le tensioni di fessurazione del calcestruzzo. Come si può osservare dalla fig. 3, anche per l'effetto del vincolo esercitato dalla piastra di fondazione i picchi di tensione si localizzano in maniera equidistanziata proprio alla base della torre, con una buona approssimazione rispetto a quanto effettivamente osservato sulla torre.

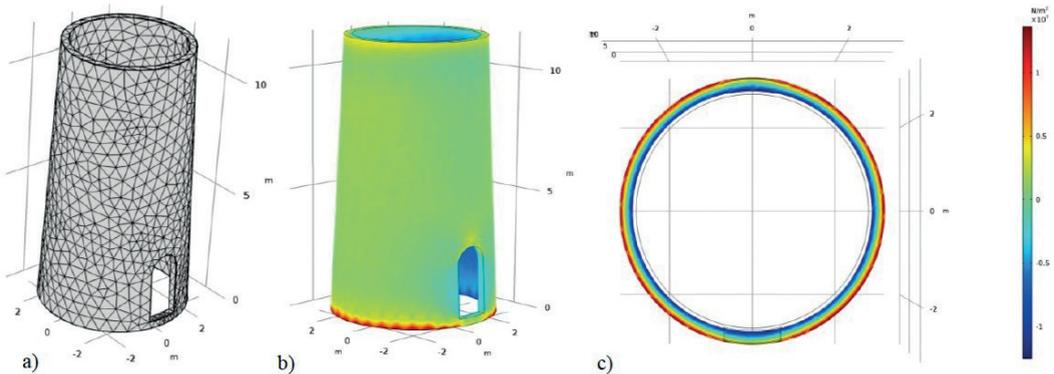


Fig. 3 - a) Mesh e b) andamento dei picchi di tensione in corrispondenza delle lesioni, c) distribuzione delle tensioni nello spessore dei conci.

Conclusioni. Le indagini sperimentali e le analisi condotte sulla torre eolica oggetto di studio hanno consentito di individuare le cause che hanno determinato la comparsa di uno stato fessurativo alla base della torre, in corrispondenza dei conci in calcestruzzo armato precompresso. Partendo dalla valutazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati, mediante prove distruttive e non effettuate *in situ*, sono state successivamente misurate le caratteristiche dinamiche della torre in varie condizioni di operatività mediante sistemi di monitoraggio dinamico (accelerometri e velocimetri). Tali misure hanno consentito, da una parte, di controllare in tempo reale l'eventuale progressione del danno sulla torre, dall'altro, hanno fornito gli elementi per calibrare opportunamente i modelli numerici con i quali sono state successivamente condotte le analisi in campo multifisico. Le elaborazioni numeriche

hanno restituito una distribuzione delle tensioni compatibile col quadro fessurativo osservato, in cui il particolare andamento delle tensioni nello spessore dei conci in c.a.p., posti alla base della torre, è legato fundamentalmente alle condizioni di vincolo alla base e al delta termico fra esterno ed interno della torre. In particolare, si è osservato che in determinate condizioni climatiche, una differenza di temperatura di circa 25-30 °C, tra la faccia interna e quella esterna dei conci di base, è in grado di generare tensioni di trazione superiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo utilizzato per la realizzazione dei conci.

Bibliografia

- Welch P. D.; 1967: *The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms*. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, AU-15 (2): 70-73, DOI 10.1109/TAU.1967.1161901.
- Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P.; 1996: *Localization of the complex spectrum: the S transform*. IEEE Trans Signal Process 44, 998-1001.
- Ditommaso R., Mucciarelli M. and Ponzo F.C.; 2012: *Analysis of Non-stationary Structural Systems by Using a Band-variable Filter*. Bulletin of Earthquake Engineering, 10, 895-911, DOI 10.1007/s10518-012-9338-y.
- Software Comsol Multiphysics versione 5.3°.