



Indagini dinamiche e modellazioni multifisiche finalizzate allo studio del quadro fessurativo anomalo presente sulla struttura di una turbina eolica in condizioni di esercizio

Felice Carlo Ponzo^a, Rocco Ditommaso^a, Gianluca Auletta^a, Antonella Nigro^a, Domenico S. Nigro^a, Donato Pica^b, Luca Carosielli^b

^a Scuola di Ingegneria, Università degli studi della Basilicata, Potenza, Italia

^b Libero Professionista

Keywords: Monitoraggio strutturale; Analisi tempo-frequenza; Modellazione FEM multifisica; Analisi termo-meccanica

ABSTRACT

La produzione di energia elettrica da turbine eoliche è diventata negli ultimi anni un elemento strategico delle politiche energetiche di molti paesi in tutto il mondo. Al fine di raggiungere gli obiettivi fissati, si tende a installare turbine caratterizzate da potenze sempre più elevate, installate su strutture di grandi dimensioni, con prestazioni strutturali sempre più al limite. Al fine di massimizzare la produttività dei parchi eolici, o delle singole turbine, normalmente queste vengono collocate in siti caratterizzati da elevate velocità del vento e, spesso, da significative escursioni termiche giorno-notte (specie in alta quota). In questo lavoro vengono presentati i risultati conseguiti a seguito di indagini numeriche e sperimentali condotte su una torre eolica ubicata in Italia in località Faeto (FG). La struttura della torre è composta da conci precompressi in calcestruzzo armato alla base e acciaio nella parte sommitale a cui si aggancia la turbina. I conci di base della torre, a poco tempo dall'installazione, hanno manifestato un quadro fessurativo anomalo. Al fine di comprendere le cause dei meccanismi evolutivi in atto, sulla struttura della torre è stato installato un sistema di monitoraggio accelerometrico utile sia a verificare che le sollecitazioni a cui la struttura era sottoposta fossero in linea con le previsioni progettuali, sia a caratterizzarne il comportamento dinamico al fine di calibrare i modelli da utilizzare nelle indagini numeriche. Queste ultime sono state effettuate ricorrendo a modelli FEM (Finite Element Method) multifisici, di tipo termo-meccanico, capaci di tener conto simultaneamente sia delle sollecitazioni prodotte dai carichi statici e dinamici agenti sulla torre che dello stato tensionale variabile prodotto dalla variazione non stazionaria delle temperature interne ed esterne alla struttura. Tale approccio ha consentito la corretta valutazione dello stato tensionale tempo-variabile e dei picchi di tensione, presenti solo in alcune condizioni del transitorio termico, che spiegano la formazione delle lesioni sulla faccia esterna dei conci di base.

1 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA

La torre eolica (Figura 1) oggetto di studio è costituita da una struttura mista di calcestruzzo armato prefabbricato a cavi post tesi e acciaio, per una altezza complessiva pari a $H_{max}=83.3$ m ($H_{mozzo}=84.3$ 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 $H_{cls}=57.39$ 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.



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

I conci prefabbricati sono stati realizzati in stabilimento con calcestruzzo avente classe di resistenza variabile da Rck55 a Rck75. Le armature lente inglobate nei conci 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 ϕ 1000 equidistanti radialmente. In corrispondenza dell'attacco della torre alla fondazione è presente un sistema di fessure equidistanziate che si sviluppano lungo tutto il perimetro della struttura.

2 INDAGINI DINAMICHE SPERIMENTALI

Sulla torre eolica oggetto di studio è stato installato un sistema di monitoraggio accelerometrico permanente composto da due stazioni accelerometriche tridirezionali. Ciascun ricevitore della rete integra un sensore accelerometrico tri-assiale, un digitalizzatore a 24bit, una memoria di massa, un ricevitore GPS per la sincronizzazione, apparati di comunicazione e microprocessore per la gestione di tutto il sistema. Il sensore accelerometrico è di tipo "force-balance" a bassissimo rumore ed elevata dinamica che consente di rilevare rumore ambientale e forti fenomeni sismici (strong-motion). La sezione di conversione A/D è caratterizzata da una risoluzione a 24 bit e la frequenza di campionamento è programmabile fino al massimo di 500 Hz per canale. I canali sono campionati in modo sincrono, requisito indispensabile per il monitoraggio strutturale. Il ricevitore GPS integrato consente di creare una rete di strumenti tutti sincronizzati con il tempo assoluto. È possibile collegarsi localmente al sistema tramite un collegamento di rete via cavo o Wi-Fi, oppure tramite interfaccia Bluetooth. Il registratore (rappresentato in Figura 2) integra, inoltre, un sistema di comunicazione UMTS/HSPA che consente di poterne controllare il funzionamento da remoto. Il sistema può essere utilizzato come unità stand-alone per registrare eventi sismici sul terreno (ad esempio rete

accelerometrica), oppure per il monitoraggio di strutture. Nel caso in questione, avendo installato più di una unità di acquisizione, la rete è stata programmata con una unità MASTER e una unità SLAVE (sistema di acquisizione permanente, una stazione in testa e una stazione alla base), mentre nelle acquisizioni temporanee è stata aggiunta una stazione slave ulteriore così come rappresentato in Figura 3.



Figura 2. Stazione accelerometrica utilizzata

L'unità MASTER è in grado di comunicare e accumulare i dati di tutte le unità presenti nella rete. La disposizione delle tre stazioni, riportata in Figura 3, prevedeva una alla base della torre eolica S30, la stazione S32 a 57m di altezza e la stazione S31 a 83m di altezza.

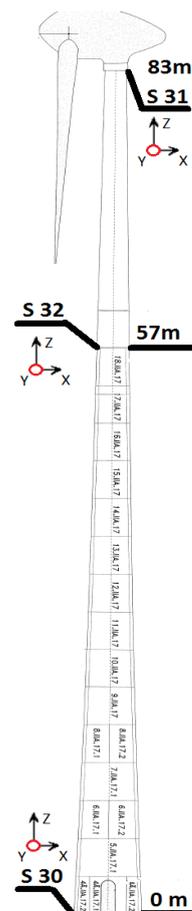


Figura 3. Ubicazione delle stazioni accelerometriche nella torre eolica analizzata

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 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), (Ditomaso 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 (annualità 2014, prima fase, e 2015-2016, seconda fase), quindi ad una distanza temporale di circa 1 anno, questo al fine di verificare eventuali differenze comportamentali attribuibili a una progressione del danno strutturale. Nella seconda fase, oltre alle due 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 rigidità 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 4) 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.

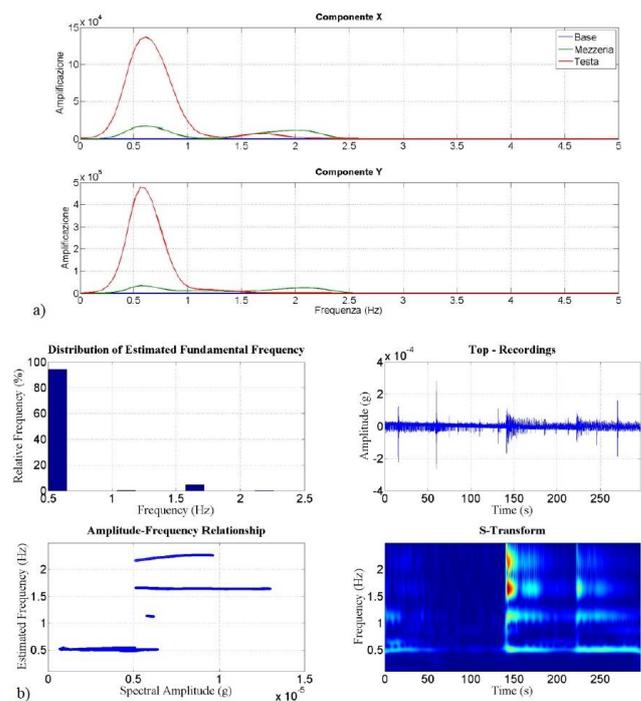


Figura 4. a) Calcolo delle funzioni di trasferimento della torre in regime dinamico stazionari, b) Analisi del comportamento dinamico della torre in regime non stazionario

Dalle analisi effettuate, anche grazie all'utilizzo di tecniche raffinate non stazionarie, tipo la trasformata di Stockwell (Stockwell et al. 1996), (Ditomaso et al. 2012), è emersa sistematicamente la linearità del comportamento strutturale. Questo è confermato dal fatto che indipendentemente dalla tipologia e intensità dell'azione della forzante esterna, la frequenza fondamentale risulta sostanzialmente sempre costante e pari a circa 0,5Hz. Condizioni di eccitazione differenti sono in grado, invece, di evidenziare in maniera differente i modi superiori al primo. Ciò sembrerebbe confermare, nel periodo preso in considerazione, la linearità del comportamento strutturale della Torre Eolica e quindi la scarsa influenza sul comportamento dinamico dello stato fessurativo evidenziato nei conci alla base, esteso verosimilmente al solo strato superficiale esterno del calcestruzzo e non in grado, dunque, di determinare uno stato di danneggiamento significativo per la struttura. Ciononostante, uno stato di fessurazione superficiale abbastanza esteso, come quello riscontrato, potrebbe essere in grado di accelerare il degrado della struttura (ossidazione dei ferri di armatura, carbonatazione, etc.) per effetto dell'interazione diretta con gli agenti atmosferici, e quindi produrre, alla lunga, effetti significativi.

Stando alle risultanze delle indagini statiche e dinamiche e delle relative verifiche effettuate durante la prima fase di studio, anche in particolari condizioni di ventosità in grado di

determinare il distacco dei vortici di Von Karman, è possibile ritenere che i livelli di sollecitazione registrata sulla torre determinino ancora condizioni di comportamento lineare e che pertanto il progredire del quadro fessurativo non sia direttamente ascrivibile ai fenomeni di fatica prodotti dalla sola dinamica vibrazionale della torre oggetto di studio.

3 MODELLAZIONE E ANALISI TERMOMECCANICHE

Sulla scorta dei risultati precedentemente ottenuti, si è deciso di esplorare altri fenomeni fisici in grado di determinare stati tensionali significativi, quali quelli legati al comportamento termomeccanico di elementi tridimensionali di forma curva in combinazione con le particolari condizioni di vincolo alla base della torre. La ciclicità di tali condizioni può giustificare il lento progredire delle lesioni anche per fenomeni di fatica.

Si è passati, dunque, allo studio dello stato tensionale dei conci prodotto dall'interazione delle tensioni legate ai carichi statici e dinamici gravanti sugli elementi strutturali e le tensioni determinate dalle variazioni di temperatura tra le superfici interne ed esterne alla torre, utilizzando le formulazioni classiche della meccanica strutturale (Rehman e Rao 2017). Considerata la complessità del fenomeno, il fine è stato quello di verificare la possibilità che le lesioni ed i fenomeni di fatica potessero essere correlabili alle dilatazioni/contrazioni termiche degli elementi strutturali (Bobba et al. 2019), nonostante verifiche in tal senso fossero già state fatte dai progettisti, considerando, però, elementi shell e non elementi tridimensionali. Pertanto, si è deciso di avviare un'estesa campagna numerica finalizzata a verificare la presenza di correlazioni tra il quadro fessurativo osservato e il comportamento termo-meccanico dei materiali. Al fine di calibrare i valori delle temperature da utilizzare per le simulazioni numeriche sono stati effettuati dei rilievi termici all'interno e all'esterno della torre, in corrispondenza del concio di base. Le misurazioni sono state riferite sia alla temperatura ambientale che a quella superficiale del calcestruzzo. Tali misurazioni sono state effettuate dalle ore 10:00 del mattino fino alle ore 17:00 del pomeriggio. Sono state effettuate 4 misurazioni di 30 minuti, come riportato nella seguente tabella insieme alle velocità del vento.

Tabella 1. Fasce oraria delle misurazioni di temperatura e velocità del vento

Ora di inizio	Ora di fine	Velocità del vento (m/s)
10:00	10:30	5 - 5.5
12:00	12:30	-
15:00	16:30	7
16:30	17:00	8 - 9

Si riporta di seguito in Figura 5 l'indicazione della disposizione delle termocoppie utilizzate per le misure di temperatura.

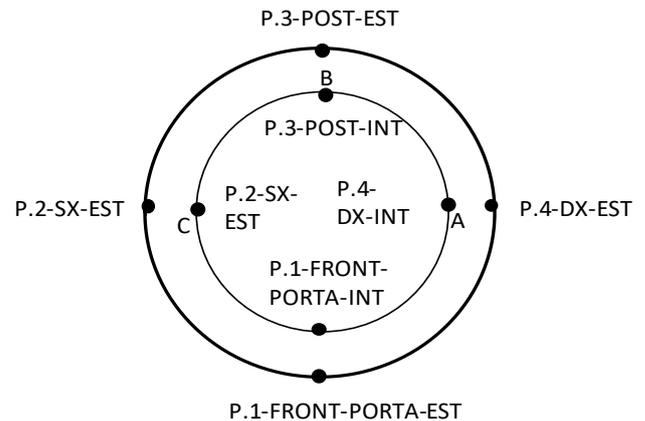


Figura 5. Posizione delle termocoppie

Dove:

- A centro di raffreddamento degli accumulatori.
- B scala interna.
- C trasformatori.

Di seguito si riportano alcune immagini (Figura 6) riprese durante la campagna di prove sperimentali, finalizzata al rilievo delle temperature ambientali e superficiali (interne ed esterne) della torre eolica.

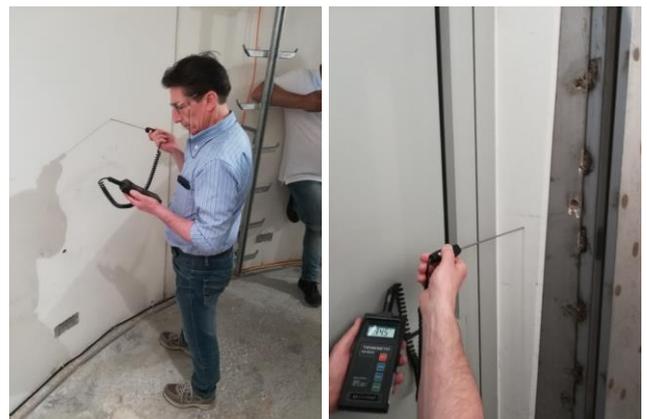


Figura 6. Immagini della campagna sperimentale per il rilievo delle temperature

I dati relativi alle misure effettuate, sono riportati nei seguenti grafici (da Figura 7 a Figura 10).

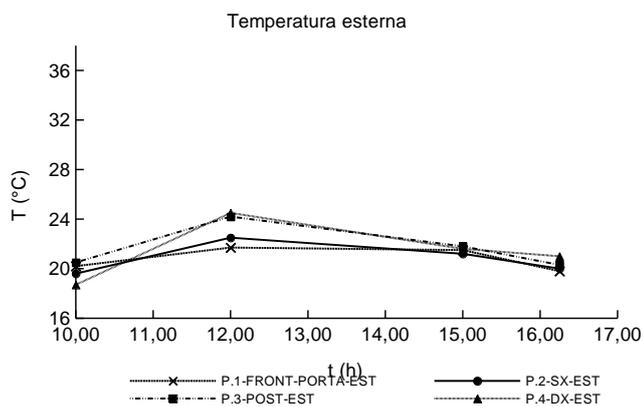


Figura 7. Andamento della temperatura ambientale esterna

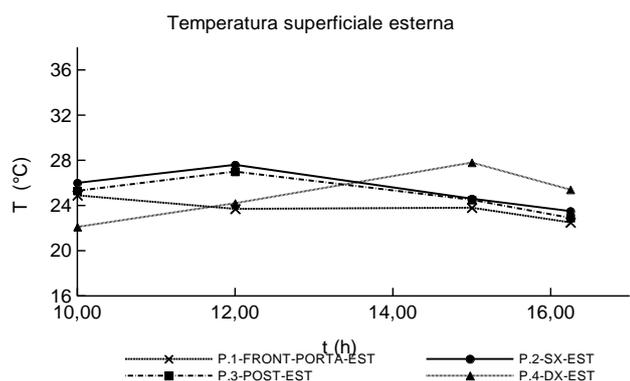


Figura 8. Andamento della temperatura sulla superficie del cono esterna

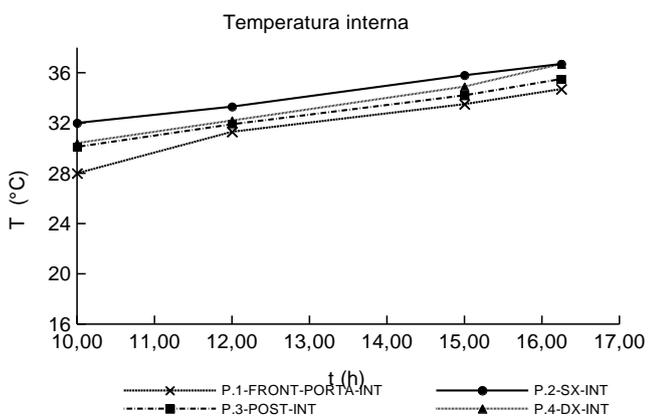


Figura 9. Andamento della temperatura ambientale interna

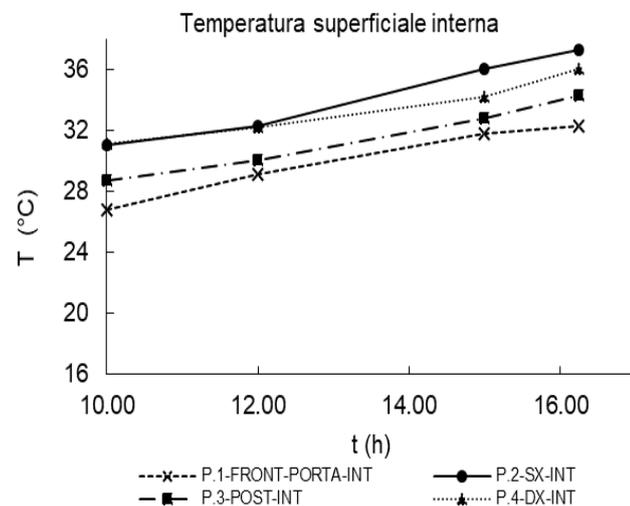


Figura 10. Andamento della temperatura sulla superficie del cono interna

Come evidenziato dalle misure, la temperatura interna risulta maggiore di 25°C ed aumenta all'aumentare della velocità del vento, in questo caso fino a circa 36°C (Figura 9), in quanto aumenta il calore prodotto dai trasformatori di corrente per l'aumento di produzione.

Per quanto riguarda i dati di temperatura esterna, si hanno a disposizione i dati relativi al periodo compreso tra il 12/06/2014 e il 01/07/2016.

Tali dati, fanno riferimento alle registrazioni eseguite dall'elettronica NRG collegata al sensore installato sull'asta anemometrica di sito. Trattasi di dati decimimali di temperature ambientali, registrati dal sensore ubicato a 6 metri di quota dal piano campagna, montato sull'anemometro di campo distante all'incirca 150 metri in direzione Nord dall'asse dell'aerogeneratore. Nel sito considerato i valori di temperatura ambientale variano mediamente di circa 40°C, partendo da circa 30°C nel periodo estivo raggiungendo circa -9 °C in quello invernale.

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 e dell'effetto della variazione di temperatura tra l'interno e l'esterno, è stato utilizzato un modello agli elementi finiti tridimensionale (Ponzo et al. 2018 e 2019) con elementi solidi in ambiente Comsol Multiphysics (versione 5.3a). Sono stati modellati nel dettaglio solamente i primi tre livelli di conchi in c.a.p. di base (Figura 11), sede delle lesioni.

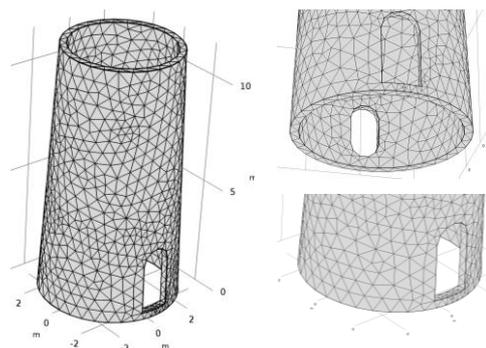


Figura 11. Discretizzazione ad elementi finiti della torre

Le caratteristiche dei materiali impiegati nella modellazione sono state desunte 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 media pari a 5.53 MPa.

Il materiale utilizzato nella modellazione è stato il solo calcestruzzo, mentre le armature non sono state inserite in quanto il modello è stato

realizzato, in maniera semplificata, con proprietà elastico lineari. Per quanto riguarda invece la precompressione verticale, questa è stata schematizzata applicando al modello il carico equivalente alla precompressione. Come vincolo alla base è stato considerato un vincolo fisso e cioè in grado di bloccare tutti gli spostamenti.

Tutte le sollecitazioni provenienti 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 della torre. Sono state effettuate diverse simulazioni, facendo variare sia la temperatura esterna che quella interna in un certo range, compatibile con le temperature riscontrate in situ.

In particolare, nelle analisi numeriche multifisiche, i valori delle temperature sono stati parametrizzati nel modo seguente: le temperature esterne sono state fatte variare da un minimo di -10°C ad un massimo di 20°C , mentre quelle interne da un minimo di 10°C ad un massimo di 35°C .

Nelle figure a seguire si riportano le immagini con gli andamenti delle tensioni più significativi, delle varie simulazioni effettuate, con l'indicazione delle tensioni massime raggiunte. I grafici seguenti fanno riferimento all'andamento delle tensioni nello spessore dei conci dove i valori negativi rappresentano tensioni di compressione ed i valori positivi rappresentano quelle di trazione.

Come si evince dai risultati delle analisi effettuate (Figura 12 e Figura 13), per effetto del delta termico, la superficie esterna presenta tensioni di trazione mentre quella interna prevalentemente tensioni di compressione, questo accade per tutti i delta termici considerati, però con intensità diverse nei vari punti della struttura.

Dalle analisi, si osserva che, a partire da una temperatura esterna di 10°C e con un delta termico totale di 10°C o 20°C , le sezioni in prossimità della base risultano essere caratterizzate da tensioni tutte di compressione,

mentre da circa 1 m dalla base a salire, l'andamento delle tensioni all'interno dello spessore dei conci risulta contraddistinto sempre da tensioni di trazione sulla parte esterna e di compressione su quella interna. In tutti gli altri casi esaminati (con temperatura esterna inferiore a 10°C), si nota che il picco delle tensioni di trazione sulla superficie esterna, si concentra alla base per effetto del vincolo.

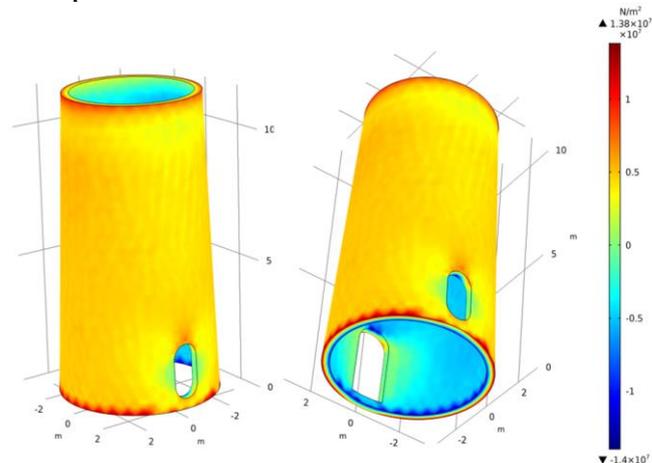


Figura 12. Rappresentazione 3D dello stato tensionale, simulazione con Test. -10°C e Tint. 20°C

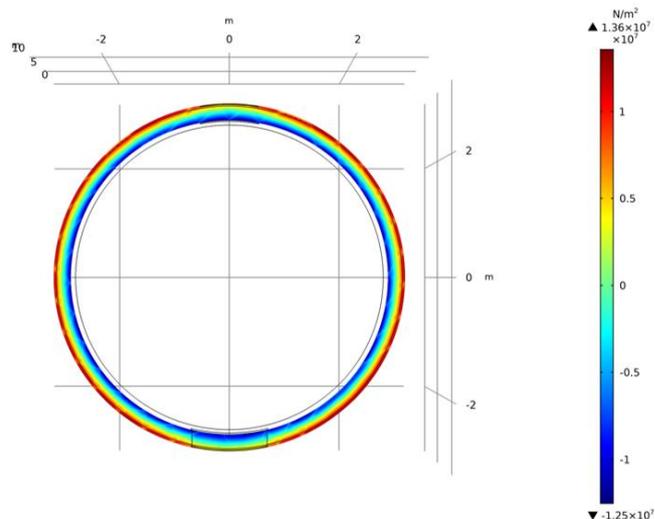


Figura 13. Andamento delle tensioni sulla sezione di base, simulazione con Test. -10°C e Tint. 20°C

Nelle rappresentazioni monodimensionali di Figura 14 e Figura 15 la faccia interna dei conci è stata convenzionalmente posizionata al valore 0 delle ascisse mentre la faccia esterna si trova al valore dell'ascissa pari a 30cm. Le valutazioni sono estese alla sezione di base e ad una sezione posta ad 1 m di altezza dalla base. Come si può osservare dalle analisi eseguite, tensioni di trazione elevate sulla superficie esterna, tali da superare la resistenza a trazione del calcestruzzo, si registrano per delta termici superiori a 25°C , con prevalenza di temperature esterne sotto lo zero o prossime allo zero. È da sottolineare però che, in determinate condizioni, il delta termico

può addirittura superare i 25°C, in quanto la temperatura all'interno può raggiungere valori più elevati a causa del calore prodotto dai generatori di corrente elettrica, soprattutto quando lavorano alla massima velocità di produzione. Condizione questa che si verifica in maniera più diffusa nel periodo invernale. Vi è da sottolineare anche il fenomeno del raffreddamento della superficie esterna a causa del vento, questo quindi comporta che quando è presente vento per la massima produzione (quindi massimo calore all'interno), si ha un contemporaneo ulteriore raffreddamento della superficie esterna.

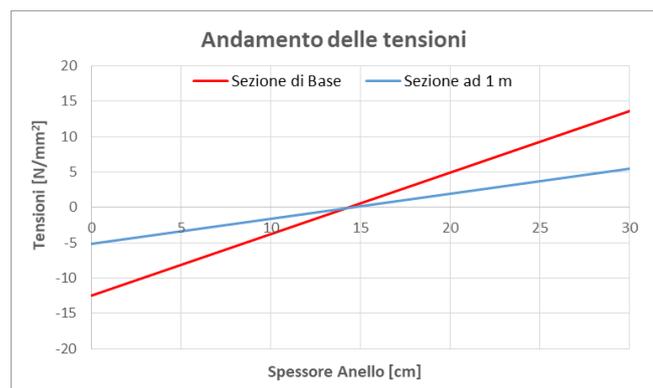


Figura 14. Rappresentazione monodimensionale delle tensioni su sezioni di base, simulazione con Test. -10°C e Tint. 20°C

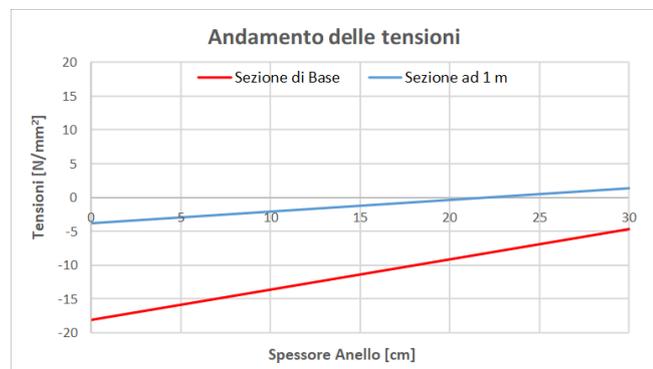


Figura 15. Rappresentazione monodimensionale delle tensioni sulla sezione di base e ad 1m dalla base, simulazione con Test. 20°C e Tint. 30°C

Esaminiamo una singola sezione della torre, si evidenzia chiaramente la variazione di tensioni presenti nello spessore del conico. Tale variazione può essere colta e apprezzata, solo effettuando una modellazione con elementi finiti di tipo solido, e non con una modellazione bidimensionale con elementi tipo shell, con i quali i valori tensionali ricavati dal calcolo sono quelli mediati nello spessore.

Comparando in Figura 16 la foto del conico di base con le lesioni e l'immagine dell'andamento delle tensioni ottenute dalla simulazione numerica, si osserva come i picchi di tensioni indotte dall'effetto del vincolo di tipo fisso alla base, si localizzano in maniera equidistanziata

proprio alla base della torre, con una buona approssimazione rispetto a quanto effettivamente osservato sulla torre.

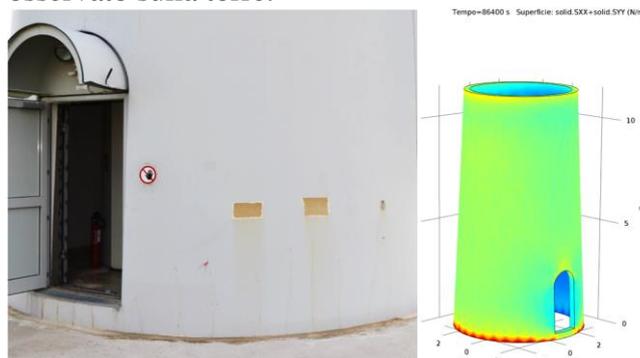


Figura 16. Confronto tra le lesioni effettivamente riscontrate sulla torre e i picchi di tensione ottenuti dalla simulazione numerica (Ponzo et al. 2018)

Tale distribuzione cambia al variare del vincolo applicato alla base della torre (Ponzo et al. 2018 e 2019).

4 CONCLUSIONI

La presente fase di studio è stata inizialmente dedicata all'analisi del comportamento stazionario e non stazionario della Torre Eolica in regime di esercizio ampliando anche il periodo di monitoraggio della stessa. Le ulteriori analisi eseguite hanno messo in evidenza l'inesistenza di una significativa correlazione tra comportamento dinamico della torre e quadro fessurativo osservato. Si è quindi deciso di andare a ricercare le cause del degrado in fenomeni diversi da quelli strettamente correlabili alla dinamica del sistema terreno-torre-rotore nelle reali condizioni di esercizio. Dopo attente analisi, anche della letteratura scientifica nazionale ed internazionale, si è deciso di provare ad investigare il comportamento termo-meccanico dei materiali costituenti il sistema strutturale portando in conto le reali geometrie della porzione di torre interessata dal degrado, le caratteristiche meccaniche dei materiali e le temperature di esercizio. Le analisi condotte hanno fatto emergere una significativa correlazione tra gli stati tensionali indotti dalle differenze di temperatura interne ed esterne e la formazione di fessure in alcuni punti della struttura. Quest'ultima dovuta al superamento della resistenza a trazione degli elementi strutturali (in particolare nel copriferro dei conici di base sulla superficie esterna). La formazione di picchi tensionali significativi, oltre che alle differenze di temperatura, che sono in grado di procurare una significativa deformazione dei conici della torre, è principalmente dovuta alla presenza dei vincoli alla base della torre. In assenza di tali vincoli,

probabilmente, gli effetti sortiti sarebbero stati diversi.

Ad oggi, al fine di comprendere la reale distribuzione delle tensioni sui conci costituenti la torre eolica si renderebbe necessaria la calibrazione del modello termo-meccanico da utilizzare per le analisi in funzione delle condizioni termiche riscontrabili in sito nei diversi periodi dell'anno. Tale calibrazione sarebbe possibile attraverso l'installazione di un sistema di monitoraggio delle temperature ambientali e delle temperature superficiali dei conci, interne ed esterne.

Tale calibrazione consentirebbe, inoltre, di correlare la propagazione delle fessure a fenomeni di fatica dovuti alle continue dilatazioni/compressioni a cui sono assoggettati i conci della torre. La corretta comprensione dei fenomeni in atto consentirebbe, inoltre, la progettazione di idonee contromisure finalizzate a bloccare il progredire delle fessure e, contestualmente, progettare un intervento per garantire la durabilità dei materiali così come prescritto dalle vigenti norme tecniche per le costruzioni.

BIBLIOGRAFIA

- Bobba, S., Abrar, S., Rehman, S.M. 2019. Probability Study on the Thermal Stress Distribution in Thick HK40 Stainless Steel Pipe Using Finite Element Method, *Designs*, **3**, 9; doi:10.3390/designs3010009.
- Ditommaso, R., Mucciarelli, M., 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.
- Ponzo, F.C., Ditommaso, R., Auletta, G., Pica, D., Carosielli, L., 2019. Preliminary numerical and experimental analyses of the thermo-mechanical behaviour of a monitored wind-turbine located in Italy, *European Geosciences Union General Assembly*, Vol. **21**, EGU2019-16446, Vienna, 7- 12 April 2019.
- Ponzo, F.C., Ditommaso, R., Auletta, G., Nigro, A., Nigro, D. S Pica, D., Carosielli, L., 2018. Analisi numeriche e sperimentali del comportamento termo-meccanico di una turbina eolica, *XXXVII Convegno GNGTS*, Bologna, 19-21 Novembre 2018.
- Rehman, S.M.; Rao, C.S., 2017. Vibration buckling and fracture analysis of a cracked cylindrical shell. *Int. J. Des. Eng.*, **7**, 33–53.
- Software Comsol Multiphysics versione 5.3a.*
- Stockwell, R.G., Mansinha, L., Lowe, R.P.; 1996. Localization of the complex spectrum: the S transform, *IEEE Trans Signal Process* **44**, 998–1001.
- 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.