



Scientific Report

*Sistemi di monitoraggio residenti per il controllo delle
fondazioni di torri eoliche*

Authors: G. Porco, S. Fusaro

Scientific Publications by Sismlab s.r.l.
Spin-Off University of Calabria
Rende (CS), Italy
N.04 - XI- 2020
ISBN: 979-12-80280-03-9

EDIZIONI SISMLAB
Available online at www.sismlab.com

EDIZIONI SISMLAB

Scientific Publications by Sismlab s.r.l.
Spin-Off University of Calabria
Rende (CS), Italy

N.04 - November 2020
ISBN: 979-12-80280-03-9

(Year I)

*Available online at www.sismlab.com
info@sismlab.it - sismlab@pec.it
Via Ponte Pietro Bucci - Università della Calabria - Rende (CS) P.Iva: 02730000789
- Tel./Fax.: +390984-447093*

SISTEMI DI MONITORAGGIO RESIDENTI PER IL CONTROLLO DELLE FONDAZIONI DI TORRI EOLICHE

G. Porco* - S. Fusaro**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria

giacinto.porco@unical.it

**Sismlab s.r.l.- Spin – Off Università della Calabria

info@sismlab.it

SOMMARIO

Una delle fonti rinnovabili maggiormente diffusa sul territorio nazionale è sicuramente quella legata alla produzione di energia elettrica con la forza eolica, ossia utilizzando il vento. Diverse sono le installazioni identificate come parchi eolici presenti principalmente nel sud Italia dove, la prerogativa principale è quella di essere inequivocabilmente ambiti multisettoriali nei quali vengono a contatto principalmente due realtà, ossia, il campo della ingegneria civile ed il campo della ingegneria industriale. Infatti, la quasi totalità dei generatori presenta strutture di fondazione in calcestruzzo armato quindi proprie del campo civile e la sovrastruttura costituita da navicelle e torri invece del settore industriale. Gli impianti, alcuni dei quali in esercizio ormai da oltre venti anni, mostrano grande affidabilità e certezze di vita utile per la sovrastruttura mentre per le fondazioni, il vuoto normativo relativo alla mancanza di idonei piani di manutenzione, resi obbligatori solo dal 2008, ha creato non pochi problemi per la gestione delle condizioni di crisi sul cls e per la valutazione dei reali coefficienti di sicurezza detenuti dalla struttura fondale per garantire l'esercizio. Sulle strutture esistenti tale sofferenza è affrontata oggi, applicando procedure e protocolli a volte invasivi e con conseguenti costi e tempi di fermo macchina non sempre accettabili. Appare evidente che, per la costruzione dei nuovi impianti sia necessario applicare dei correttivi in termini di individuazione di procedure e metodi di controllo, affinché sia assicurata una gestione effettiva con dei piani di manutenzione, con la finalità di scongiurare fermi macchina e limitare fortemente le attività di verifica impiegate oggi, sicuramente impegnative temporalmente e con costi non sempre accessibili. È in questo ambito che si inserisce il presente lavoro con il quale si propone una modalità di controllo basata sull'impiego di misuratori di deformazione con tecnologia a fibra ottica da installare nella struttura in fase di realizzazione. Con i sensori attivi in tempo reale, per come di seguito descritto, sarà possibile verificare la consistenza delle fondazioni, prevenire le condizioni di crisi e garantire una corretta attività di manutenzione.

1. INTRODUZIONE

L'eolico rappresenta una delle principali fonti di energia rinnovabile, con un potenziale di crescita significativo sia a livello mondiale, che europeo ma anche italiano. Il 2019 è stato un anno importante per quanto riguarda l'energia eolica, le installazioni globali infatti hanno superato i 60GW, una crescita del 19% rispetto al 2018 e che ha portato la capacità totale installata a 650 GW. Le nuove installazioni on-shore hanno raggiunto i 54,2 GW, mentre quelle off-shore hanno superato il traguardo di 6 GW, rappresentando il 10% delle nuove installazioni globali nel 2019, che è il livello più alto raggiunto fino ad ora.[1]

L'Italia si colloca tra i primi cinque paesi europei per potenza installata. Sul territorio nazionale sono installati circa 7000 aerogeneratori di varia taglia per un totale di potenza installata pari a 10.527 MW. Gli impianti sono quasi totalmente on-shore e sono installati prevalentemente nel sud Italia e nelle isole. Per il 2030 l'obiettivo vincolante dell'Unione Europea è di raggiungere una quota dei consumi finali lordi complessivi di energia coperta da fonti rinnovabili almeno pari al 32%. Di questa percentuale una grossa parte spetterà all'eolico. L'Italia potrebbe arrivare entro il 2030 ad una potenza installata di 18 GW on-shore[2]. È quindi evidente in prospettiva, un notevole sviluppo in termini di consistenza, sia con la costruzione di nuovi parchi eolici che con il potenziamento di quelli esistenti.

Il processo costruttivo sul nuovo che da qui a breve verrà avviato, nonché l'ammodernamento dei parchi esistenti, non può che partire dalla esperienza maturata fino ad oggi sui parchi attivi, i quali sono in esercizio ormai da più di venti anni. Queste strutture sin dall'avvio dalle fasi progettuali che risalgono agli anni '90, hanno evidenziato l'esistenza di due attività parallele di approccio, completamente diverse in termini di definizione della vita utile e di programmazione degli interventi di manutenzione. Infatti, la parte fuori terra, propria del mondo industriale, proponeva concetti quali manutenzione e durata di vita utile come elementi dominanti, mentre, la parte a contatto con il terreno ossia la fondazione, propria del campo civile, ha registrato la totale assenza sia di processi di manutenzione che di linee guida per il controllo periodico a corredo dei documenti progettuali.

Ciò ha fatto sì che, molte strutture di fondazione a causa della completa assenza di verifiche e controlli periodici, nonché anche, di una programmata attività di manutenzione ordinaria abbiano mostrato condizioni di crisi, causando costosi fermi macchina. Inoltre, le attività intraprese di controllo sulle strutture danneggiate, il più delle volte non sono state perfettamente orientate in modo da assicurare l'esercizio dell'impianto sulla scorta di dati oggettivi, ma bensì, su procedure organizzate al momento e almeno fino al 2008 senza un percorso programmato e armonizzato con i riferimenti normativi.

Con i nuovi impianti sarà quindi necessario applicare nuove procedure e modalità costruttive tali da mitigare fortemente queste criticità, realizzando opere che, a differenza di quello che accade oggi, non dovranno ritrovarsi con le stesse problematiche. Con questi obiettivi e con le esperienze maturate in campi affini, il presente lavoro propone anche sulle strutture in c.a. presenti nel campo dell'eolico, l'impiego di sistemi di monitoraggio basati su misuratori di deformazione con tecnologia a fibra ottica. In effetti, la proposta appresso descritta, punta a specializzare, sulle strutture di fondazione delle torri eoliche, l'impiego di questi rilevatori già in uso sia sulle opere geotecniche che sulle strutture in c.a. di tutto il campo dell'ingegneria civile [3].

Nelle sezioni seguenti, pertanto, verranno analizzate in dettaglio tutte le attività correlate con l'impiego di tali tecnologie partendo, dalle fasi di progettazione fino alla installazione e restituendo, infine, anche un protocollo di gestione del sistema che potrà, opportunamente essere inquadrato, all'interno dei controlli routinari previsti nel piano di manutenzione o a valle di eventi singolari, il tutto con riferimento alle NTC18.

2. SISTEMI DI MONITORAGGIO PER IL CONTROLLO DI STRUTTURE IN C.A.

Prima di illustrare come i sistemi di monitoraggio possano essere impiegati per la verifica di consistenza delle fondazioni delle torri eoliche è opportuno soffermarsi su quali campi siano oggi interessati dal monitoraggio strutturale e quali siano le prerogative offerte da questi sistemi.

Il monitoraggio strutturale è un processo che permette di ottenere in tempo reale informazioni riguardanti lo stato di salute e le prestazioni di una struttura; consiste nell'acquisizione che può essere continua o periodica di parametri rappresentativi appunto delle sollecitazioni in esercizio, in modo da disporre in tempo reale, delle effettive potenze dei coefficienti di sicurezza detenute dalle sezioni resistenti.

La possibilità di implementare attività continuative di monitoraggio che seguano l'opera dalle fasi costruttive e per tutto il ciclo di vita utile, permette di ottenere informazioni sul comportamento reale della struttura con le quali si può attestare la realizzazione a perfetta regola d'arte certificando l'assenza di difetti costruttivi. Aspetto ancora più importante è la possibilità di verificare nel tempo se una struttura conserva i requisiti di progetto e se, le diverse membrature presentano gli stessi regimi di deformazione rilevati e documentati in una idonea banca dati costruita dopo l'entrata in servizio [4]. Sostanzialmente la misura di deformazione su una prefissata base prevede, in una specifica sezione, l'applicazione di un misuratore su una barra di acciaio in modo da rilevare qualsiasi effetto prodotto sulla sezione resistente sia dai pesi propri che dai permanenti e naturalmente dagli accidentali, consentendo agevolmente di risalire alle sollecitazioni e alle tensioni in esercizio.

L'impiego dei sensori a fibra ottica permette di oltrepassare gli svantaggi delle altre tipologie di sensori, primo fra tutti l'influenza dei fenomeni elettromagnetici, infatti, risultano immuni da campi elettromagnetici e presentano ulteriori vantaggi tra i quali una elevata precisione e affidabilità nel lungo periodo.

Un sistema di monitoraggio statico, schematizzato in Fig.1, è costituito dai seguenti elementi:

- Sensori

Sono i trasduttori che trasformano la grandezza fisica da acquisire ossia gli spostamenti su una prefissata base in una modifica corrispondente delle proprietà della luce che attraversa la fibra ottica. Un tale cambiamento può coinvolgere la sua intensità, la fase, il contenuto spettrale, lo stato di polarizzazione o una combinazione di questi. Il sensore rappresenta la parte attiva. I sensori possono essere posizionati, nelle strutture di nuova realizzazione, sulle armature appartenenti alle membrature resistenti maggiormente sollecitate. Nelle strutture esistenti invece si applicano direttamente a contatto con le membrature da monitorare.

- Rete di cavi

La rete di cavi rappresenta la parte passiva ed è usata per connettere i sensori al sistema di acquisizione dati. I sensori a fibre ottiche offrono il vantaggio di una rete di cavi puramente passivi che è composta interamente da fibre ottiche. A volte possono essere combinati più segnali provenienti da più sensori in una singola fibra ottica o in un cavo multifibra.

- Centralina di acquisizione dei dati

Per ogni tipo di sensore esiste una corrispondente centralina di acquisizione dati che trasforma il cambiamento nel segnale ottico in informazione sul cambiamento del parametro monitorato. I dati sono generalmente resi disponibili in formato digitale.

- Switch ottici

Le centraline utilizzate possono essere a un solo canale, si può quindi utilizzare uno switch ottico che raccoglie i terminali di tutti i sensori, per il segnale inviato dalla centralina a uno specifico sensore viene diramato al sensore stesso dallo switch ottico.

- Software di acquisizione

Il software di acquisizione permette di memorizzare e analizzare i dati.



Fig. 1. Schema di sistema di monitoraggio statico

Al fine di completare la panoramica sui sistemi di monitoraggio di seguito sono riportati alcuni esempi di controllo effettuati su elementi resistenti in c.a. con riferimento principalmente a strutture di fondazione e

proprie del campo geotecnico. Il tutto con l'obiettivo di restituire una naturale percezione di impiego dei sistemi di monitoraggio presenti nel campo delle strutture civili nel mondo dell'eolico.

2.1. Monitoraggio delle fondazioni di un edificio in calcestruzzo armato

La prima attività illustrata è quella relativa alla progettazione, installazione e gestione di un sistema di monitoraggio statico per le fondazioni di un edificio multipiano in calcestruzzo armato [5].

L'edificio in oggetto è ubicato nella città di Cosenza è costituito da 23 piani fuori terra più uno interrato e raggiunge un'altezza di 80m.

In riferimento alla fondazione l'immobile presenta un sistema di trasmissione dei carichi con piastre, travi rovesce a diversa geometria, collocate entrambe su pali di fondazione. Nello specifico gli scarichi prodotti dalla sovrastruttura sono quindi trasmessi ad una palificata, solidarizzata nel nucleo centrale della struttura, ad una piastra continua con spessore di tre metri. Nelle zone periferiche, dove gli sforzi diminuiscono la piastra è sostituita con un sistema a trave rovesce. Nella zona a maggiore impegno statico sono stati ubicati 128 pali di fondazione con diametro di 1m e profondità di 22m.

Complessivamente sull'opera sono stati installati n.52 sensori a fibra ottica di cui 44 sulle parti in elevazione e 8 sugli elementi di fondazione, in particolare 4 sulle travi di fondazione e 4 sui pali. Fig.2

È il caso di sottolineare che le membrature prescelte da strumentare vengono identificate, in fase progettuale, attraverso lo studio del comportamento della struttura per le diverse condizioni di carico. Individuate quindi le travi di fondazione e i pali da monitorare i sensori sono stati collocati sulle barre di armatura delle sezioni resistenti che mostrano le sollecitazioni più importanti.

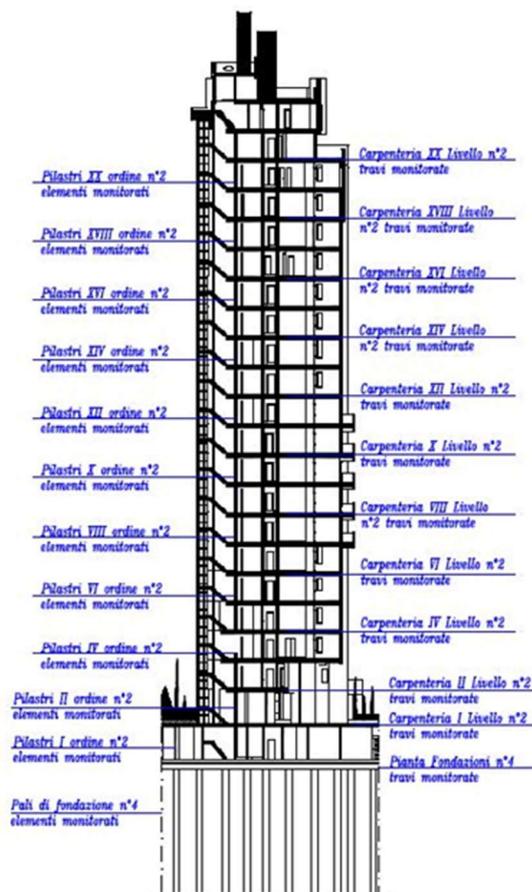


Fig. 2. Elementi resistenti monitorati

In Fig. 3 è mostrata l'ubicazione dei sensori in una trave di fondazione.

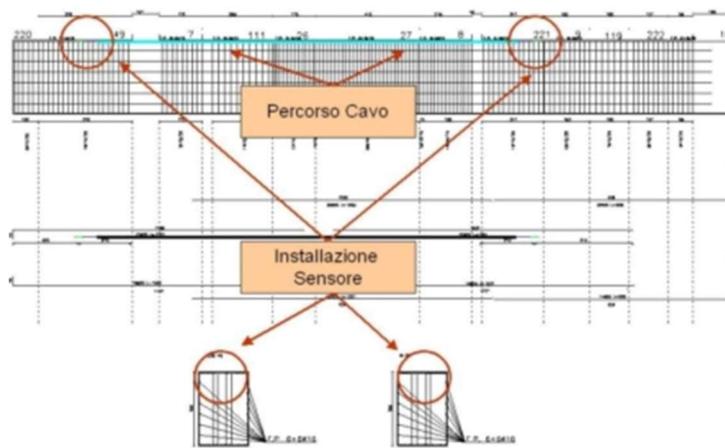


Fig. 3. Ubicazione dei sensori in una trave di fondazione

In Fig. 4 è mostrata invece la posizione di messa a dimora dei sensori in un palo di fondazione. Il numero e la posizione di sensori da collocare su un palo di fondazione dipendono dal regime di sollecitazione che si intende controllare. Nello specifico il controllo dello sforzo normale agente sul palo prevede una dislocazione diversa rispetto ad un controllo invece orientato a rilevare sempre sul palo gli effetti flettenti.

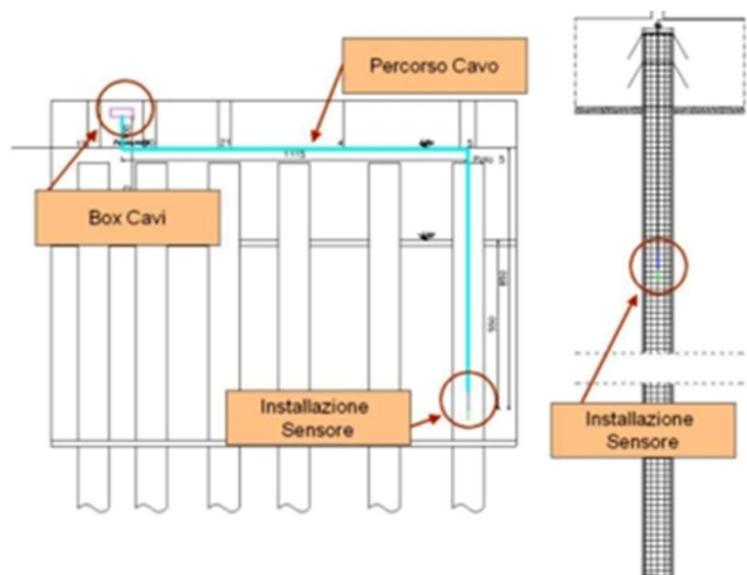


Fig. 4. Ubicazione dei sensori in un palo di fondazione

I sensori vengono collocati sulle barre di armatura prima del getto di calcestruzzo. La possibilità di predisporre un sistema di monitoraggio residente con sensori annegati nelle membrature portanti permette di seguire lo stato tensionale e deformativo sia in fase di costruzione che di esercizio.

In fase di costruzione è possibile confrontare gli incrementi di tensione, dovuti alla realizzazione delle parti in elevazione, con quelli restituiti in fase progettuale con modelli agli elementi finiti.

In fase di esercizio l'obiettivo è quello di creare una banca dati relativa alle perturbazioni del regime di deformazione dovute ai cambiamenti delle condizioni ambientali. Per le strutture ordinarie come travi e pilastri solitamente un periodo di 12 mesi è sufficiente per avere dati rappresentativi, per i pali invece non è facile stabilire l'estensione del periodo di osservazione. I pali, infatti, essendo strutture di fondazione

profonde, sono soggetti a variazioni dovute alle caratteristiche meccaniche dei suoli che sono influenzate dalla presenza dell'acqua, tali variazioni non per forza sono legati a fattori stagionali; si ritiene comunque che un periodo di 18 mesi sia sufficientemente rappresentativo.[3][6]

2.2. Monitoraggio di un'opera di sostegno

La progettazione geotecnica è un settore dell'ingegneria civile che presenta notevoli complessità, infatti le NTC18 confermano quanto già esposto nelle NTC08, circa il monitoraggio richiedendo al tecnico in fase progettuale la programmazione delle attività di controllo e monitoraggio di grandezze rappresentative atte a restituire l'efficacia di quanto realizzato e a consentire il controllo nel tempo del mantenimento delle prerogative di progetto. Le attività di controllo e monitoraggio hanno quindi in questo settore l'obiettivo di verificare la corrispondenza tra le ipotesi fatte in fase progettuale e il comportamento reale dell'opera, con l'impiego di strumentazioni atte a misurare grandezze significative quali spostamenti, tensioni, forze e pressioni interstiziali prima, durante e/o dopo la costruzione [7].

Al fine di rispondere a tali esigenze normative la possibilità di implementare, già a partire dalle fasi realizzative di una struttura, sistemi di monitoraggio residenti, offre grandi vantaggi agli operatori del settore. Infatti, con la seconda attività appresso riportata verranno evidenziate le opportunità offerte da un sistema di monitoraggio impiegato per il controllo di un muro di sostegno.

La struttura in oggetto realizzata nel Comune di Rocca D'Arce è costituita da una fondazione nastriforme su micropali sulla quale è collocato il fusto che si erge per un'altezza di 4m. Sia la struttura in elevazione che la suola sono armati con barre di 16 mm di diametro, disposte in successione regolare, sulle quali è stato possibile collocare i rilevatori a fibra ottica. Il sistema di monitoraggio è stato distribuito su tre distinte sezioni, per ogni sezione è stato previsto di collocare 4 sensori come mostrato in Fig.5.[3]

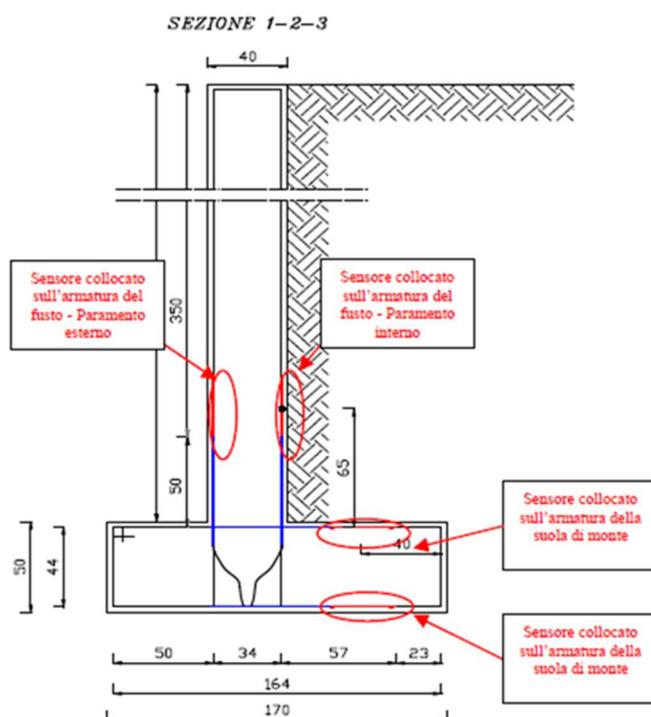


Fig. 5. Ubicazione dei sensori su una sezione del muro di sostegno

Anche in questo caso come già visto per il precedente esempio, la disponibilità del sistema di controllo permette di seguire l'incremento del regime deformativo e quindi tensionale che si produce sulle sezioni resistenti a partire addirittura dal rinterro delle aree a monte del muro. Inoltre, la creazione di una robusta

banca dati costituita da misure acquisite periodicamente dopo l'entrata in esercizio della struttura consentirà di poter effettuare controlli routinari nonché verifiche a valle di eventi singolari.

2.3. Obiettivi perseguibili con un sistema di monitoraggio statico

A fronte di quanto sopra esposto si può affermare che i sistemi di monitoraggio statico con rilevatori di deformazione a fibra ottica rappresentano un efficiente mezzo tramite il quale è possibile verificare le condizioni di conservazione e di prestazione delle strutture in c.a..

Sistemi di questo tipo permettono sia di effettuare controlli dal punto di vista locale che da quello strutturale, e possono essere implementati sia su strutture esistenti che di nuova realizzazione.

Nelle strutture di nuova realizzazione implementare un sistema di monitoraggio statico residente permette di valutare le condizioni sia nelle fasi costruttive che in quelle di esercizio e quindi durante tutta la vita utile dell'opera.[8]

Per meglio specificare tale concetto si riporta di seguito un insieme di dati restituiti da una campagna di monitoraggio, tali dati sono riassunti in grafici in cui sono rappresentate le deformazioni in relazione alla data di acquisizione. Fig.6

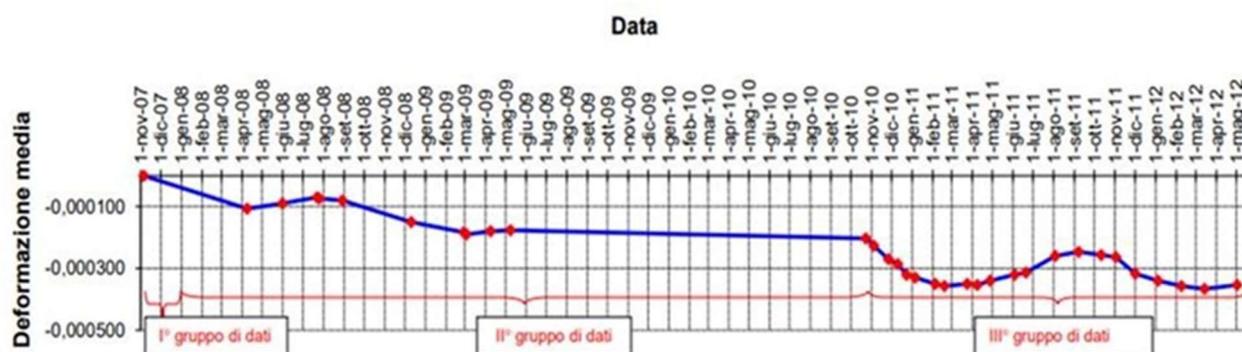


Fig. 6. Rappresentazione delle deformazioni con suddivisione in gruppi di misure

Un grafico tipo, come quello restituito in figura contiene tre campioni omogenei di valori di deformazione.

Il primo gruppo di dati è relativo alla certificazione di funzionamento delle apparecchiature installate. Tali dati occasionalmente possono rappresentare misura di riferimento per la valutazione delle deformazioni e quindi degli sforzi, infatti solo in casi particolari quando si è potuto verificare che le operazioni di getto, presa e indurimento del calcestruzzo non disturbano il dato sperimentale.

I valori del secondo gruppo restituiscono i regimi di deformazione dovuti alle diverse fasi costruttive. Il secondo gruppo è costituito quindi da tutte le misure eseguite sui sensori dal momento in cui il calcestruzzo della membratura oggetto di analisi, è diventato strutturale, ossia ha estinto in parte gli effetti del ritiro e pertanto, l'elemento monitorato, è in grado di sopportare regimi di sforzo. Tali dati sono utili perché, una volta depurati dalla componente dovuta a variazioni termiche, possono essere rappresentativi della crescita del carico nelle fasi costruttive e comparati con la crescita deformativa simulata in fase progettuale con modellazioni numeriche agli elementi finiti. Se il dato sperimentale è conforme al dato teorico si può attestare che non ci sono vizi costruttivi.

Il terzo gruppo di valori è costituito dai dati acquisiti a partire dall'entrata in esercizio dell'opera. I dati raccolti secondo un periodo sufficientemente rappresentativo di tempo vengono raccolti in una banca dati per mezzo della quale è possibile eseguire controlli periodici con metodologia comparativa per tutta la vita utile dell'opera.[9].

3. SISTEMI DI MONITORAGGIO STATICO RESIDENTI NELLE FONDAZIONI DI TORRI EOLICHE

Le fondazioni di turbine eoliche on-shore si distinguono in generale in superficiali o dirette e profonde [10]. Nel corso degli anni la geometria delle fondazioni si è evoluta passando da fondazioni a geometria quadrata con dislocazione di armatura concentrata nella zona centrale secondo due direttrici principali, a fondazioni con geometria circolare e disposizione di armatura in senso anulare e radiale. Dal momento che la sollecitazione maggiore che agisce su una turbina eolica è il vento, che non sarà mai statico su una sola direzione, ma potrà variare su 360 gradi, lo schema che permette di distribuire in modo omogeneo tale sollecitazione è quello con geometria circolare. Tale geometria permette di armare, in senso radiale e anulare tutti i 360° gradi che compongono il plinto di fondazione; di conseguenza fondazioni di questo tipo sono preferibili a quelle utilizzate in passato, anche se la messa in opera risulta più complicata. Per quanto detto, nella presente nota si farà riferimento a fondazioni con geometria circolare, sia superficiali che profonde. Tali fondazioni possono essere di diverse tipologie anche in base all'elemento di collegamento con la torre. Alcuni esempi sono riportati in Fig.7.

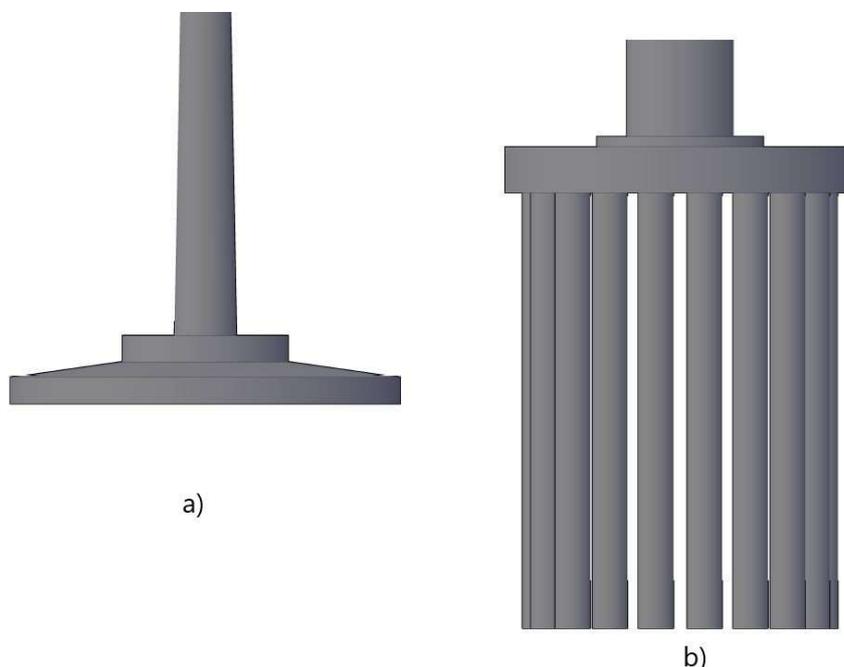


Fig. 7. a) Esempio di fondazione diretta. b) Esempio di fondazione profonda

La realizzazione di un sistema di monitoraggio statico con sensori a fibra ottica per fondazioni di torri eoliche si sviluppa secondo diverse fasi [11]:

- Progettazione del sistema di monitoraggio
- Posa in opera del sistema di monitoraggio
- Gestione del sistema di monitoraggio

3.1. Progettazione del sistema di monitoraggio

La prima fase è la progettazione del sistema di monitoraggio. Questa fase è evidentemente quella più importante, infatti più le analisi in fase progettuale saranno accurate più i controlli potranno essere mirati in modo da garantire risultati attendibili con il numero minimo di sensori. Un buon sistema di monitoraggio, infatti, non può prescindere dall'essere anche economico in rapporto alla struttura che si sta monitorando.

La progettazione di un sistema di monitoraggio prevede, come ogni progetto nell'ambito civile, tre livelli di successivi approfondimenti tecnici, ossia saranno stilati un progetto preliminare in cui si identificano le finalità del sistema di monitoraggio e si individua il numero di sensori da applicare; un progetto definitivo in

cui si individuano con precisione le sezioni sulle quali vanno montati i sensori e un progetto esecutivo in cui si individuano in maniera univoca, nella distinta delle armature, le barre che verranno monitorate e in quale posizione. Il progetto del sistema di monitoraggio sarà quindi posto a corredo del progetto del parco eolico.

Di seguito per brevità espositiva non si entrerà nel dettaglio degli elaborati da produrre nelle varie fasi progettuali, ma si porrà l'attenzione sugli aspetti più significativi della progettazione:

1. Analisi degli elaborati di progetto

La progettazione del sistema di monitoraggio inizia con l'analisi degli elaborati di progetto delle strutture. Si dovranno quindi individuare tutte le caratteristiche geometriche, materiche e strutturali delle fondazioni, le posizioni in cui queste saranno costruite, il tipo di torri che queste dovranno sostenere. Inoltre, a monte della progettazione di un parco eolico vi è, evidentemente, un'analisi anemometrica dettagliata che costituisce un elemento essenziale anche per la corretta progettazione del sistema di monitoraggio.

2. Analisi dei dati del vento

Il vento rappresenta l'azione più gravosa che agirà sulla torre eolica durante la sua vita utile. L'individuazione delle zone di massima sollecitazione è dunque determinata a partire dall'analisi dei dati del vento. All'atto della progettazione di un parco eolico si hanno a disposizione i dati del vento relativi alle posizioni, in cui verranno ubicate le turbine, registrati per un arco temporale di almeno 5 anni. Attraverso la rielaborazione di tali dati si potranno ottenere alcuni parametri caratteristici come, ad esempio, la distribuzione percentuale delle direzioni del vento, la velocità massima e/o media del vento su un dato periodo.

Si potranno elaborare grafici del tipo in Fig.8 in cui sono rappresentate per un determinato mese, la frequenza con cui il vento agisce nelle diverse direzioni e la sua velocità media.

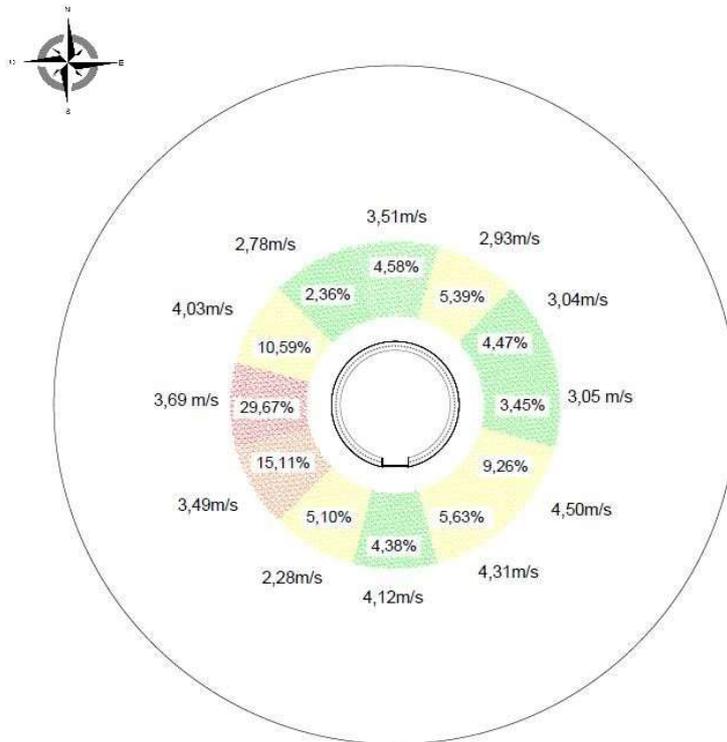


Fig. 8. Analisi dei dati del vento

3. Individuazione delle zone di massima sollecitazione con modellazione agli elementi finiti

Avendo a disposizione i dati di progetto e avendo individuato le direzioni prevalenti del vento si procede al calcolo con modellatore agli elementi finiti della fondazione. È possibile così determinare

i valori della sollecitazione e delle tensioni nelle barre di armatura. Si dovrà analizzare il regime di sollecitazione nelle diverse condizioni di carico, individuando quindi le sezioni che si presume saranno soggette alla sollecitazione massima, tali sezioni saranno quelle monitorate. La piastra di fondazione risulta soggetta a momenti massimi lungo le direzioni preferenziali del vento, per cui le barre di armatura presenti lungo tali direzioni saranno quelle monitorate. In Fig.9 è riportata l'individuazione della sezione in cui andranno posizionati i sensori.

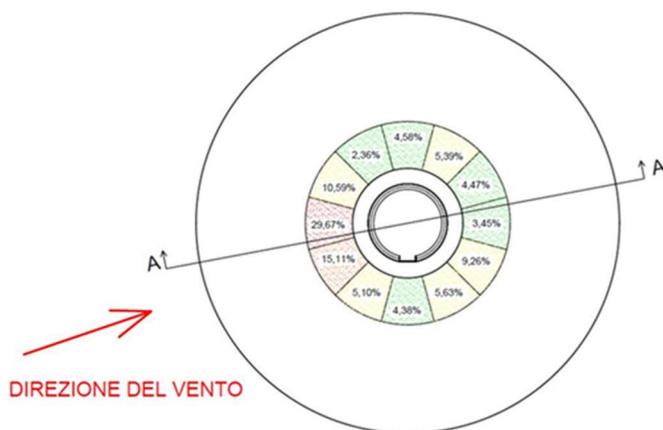


Fig. 9. Individuazione delle zone di massimo impegno derivante dall'azione del vento
 Uno schema tipo di sezione con indicata la collocazione dei sensori è presentato in Fig.10

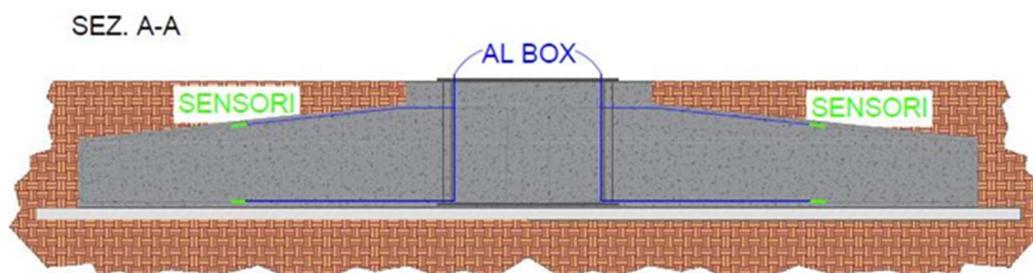


Fig. 10. Schema tipo di montaggio dei sensori su una fondazione diretta

Nel caso di fondazioni profonde oltre ai sensori sulla piastra rigida vanno previsti i sensori sui pali. Si determina quindi quali sono i pali da monitorare e per il regime di sollecitazione previsto i pali monitorati saranno due, ossia quelli che secondo la direzione di massima sollecitazione saranno sottoposti uno allo sforzo massimo di compressione e l'altro a un possibile sforzo di trazione. Si potrebbero quindi strumentare i due pali come indicato in Fig.11.

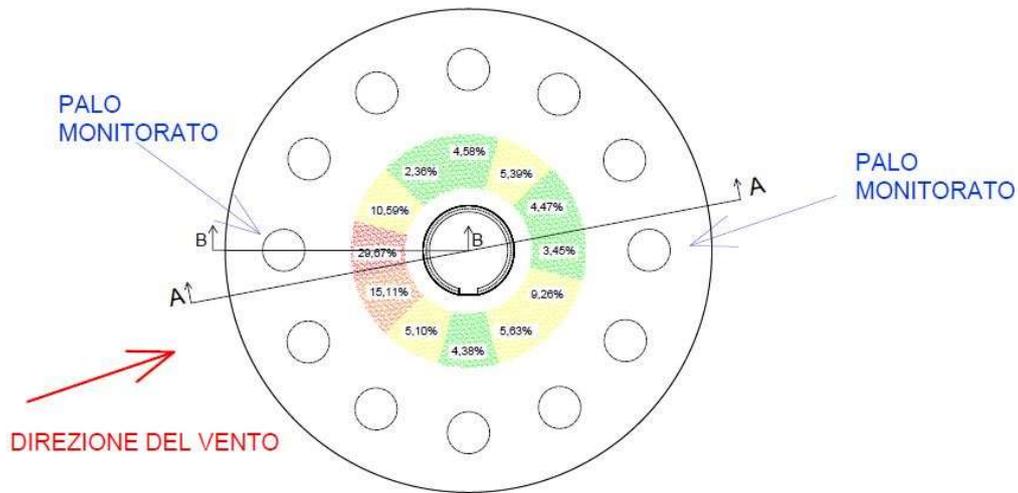


Fig. 11. Individuazione dei pali da strumentare

In generale un palo di fondazione soggetto a solo carico assiale si potrebbe strumentare con una topologia semplice di sensori, ossia, basterebbe un sensore su una delle barre di armatura, posizionato nelle vicinanze della testa del palo. Si predispose, però, l'installazione sulla sezione del palo di due sensori dislocati in posizione contrapposta in modo da poter cogliere eventuali effetti legati al momento flettente. Nel posizionamento del sensore bisogna tenere conto di non essere in prossimità di zone singolari, di non essere in zone in cui c'è sovrapposizione di armatura e di essere nella zona in cui si prevedono le sollecitazioni massime [8].

In Fig.12 è mostrato lo schema tipo di montaggio dei sensori nei pali di fondazione.

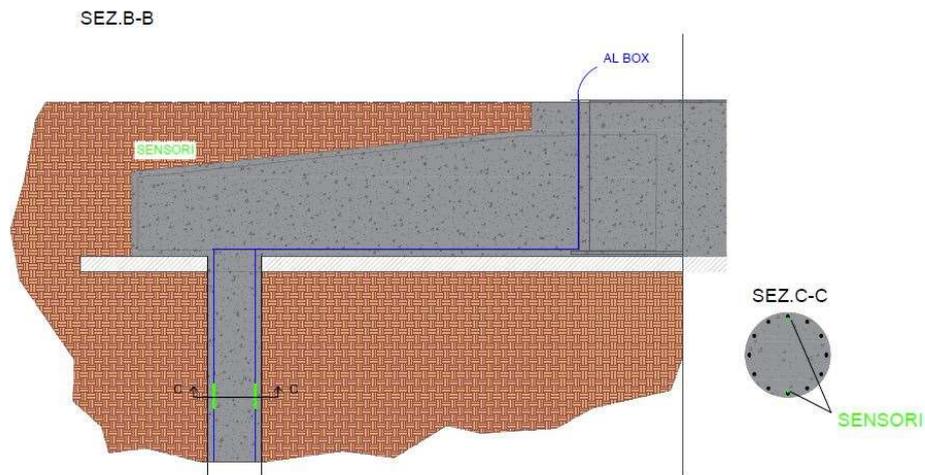


Figura 12. Schema tipo di montaggio dei sensori su un palo di fondazione

La progettazione del sistema riguarda anche il percorso della parte passiva del sistema di monitoraggio, ossia il percorso dei cavi attraverso i quali i sensori potranno essere collegati alla centralina per l'acquisizione delle misure. La rete di cavi dovrà confluire nel box di raccolta cavi che sarà ubicato all'interno della torre in posizione accessibile al personale per effettuare l'acquisizione dei dati. La centralina di acquisizione può essere sia residente e con la possibilità di effettuare controlli in remoto o non residente.

Nel caso in esame non è necessario un sistema residente in grado di effettuare anche autodiagnosi, ma è sufficiente che un operatore colleghi periodicamente la centralina ed esegua le acquisizioni.

Nel presente lavoro si fa riferimento alla progettazione del sistema di monitoraggio dei soli elementi strutturali in calcestruzzo armato, ma si ritiene opportuno prevedere anche il monitoraggio degli elementi di collegamento tra la torre e la fondazione [12]. Tali elementi a seconda della tipologia costruttiva si possono anch'essi monitorare con sensori di deformazione a fibra ottica.

3.2. Posa in opera del sistema di monitoraggio

La posa in opera del sistema di monitoraggio avviene secondo tempi e modi definiti nel progetto. Poiché si tratta di un sistema di monitoraggio residente con sensori annegati nel getto di calcestruzzo, i tempi coincideranno con quelli dell'esecuzione dei lavori di costruzione delle fondazioni. Si vuole sottolineare che la posa in opera del sistema di monitoraggio si inserisce perfettamente nelle fasi costruttive senza comportare rallentamenti o modifiche ai piani di esecuzione dei lavori.

Si distinguono, quindi, le fasi di installazione dei sensori sui pali di fondazione e quelle sulla piastra di fondazione.

– Pali di fondazione

In fase di progettazione sono stati individuati i pali da monitorare e la posizione sulle barre di armatura dei sensori. I sensori vengono fissati in modo solidale all'armatura, come in Fig.13, prima che la gabbia di armatura del palo sia posta in opera. Ogni sensore, inoltre, è dotato di un numero seriale in modo da essere univocamente riconoscibile.



Figura 13. Installazione di un sensore su un palo

I cavi vengono anch'essi fissati alle barre di armatura, ed eventualmente ricoperti con materiale protettivo. I cavi dovranno viaggiare in direzione della testa del palo in modo poi da essere collegati al box di raccolta cavi.

I sensori dovranno avere la possibilità di leggere la deformazione sia in senso negativo che positivo per cui ci sarà una fase di verifica della corretta installazione dei sensori.

Sistemati, quindi, i sensori e i cavi si può procedere con la posa in opera della gabbia di armatura e quindi con il getto di calcestruzzo.

– Piastra di fondazione

Nel caso della piastra di fondazione vengono messe in opera le armature e in seguito vengono fissati i sensori e i cavi secondo il percorso delineato in progetto in modo che essi confluiscono nel box di raccolta cavi. Si può, quindi, procedere alle operazioni di getto del calcestruzzo.

Il box di raccolta cavi sarà unico sia per i cavi che provengono dai sensori installati sui pali, sia per quelli relativi ai sensori installati sulla piastra; esso sarà posto all'interno della torre in posizione accessibile al personale.

I sensori a fibra ottica danno la possibilità di effettuare misure attraverso le quali seguire le fasi di maturazione del calcestruzzo. Nel presente lavoro però questo aspetto non verrà analizzato, le misure effettuate prima dei 28 giorni di maturazione del calcestruzzo serviranno solo a verificare il corretto funzionamento dei sistemi installati [13]. Di seguito, nella illustrazione del protocollo procedurale previsto per le fondazioni di torri eoliche si farà riferimento alle acquisizioni effettuate a partire dal momento in cui il calcestruzzo della membratura oggetto di analisi è diventato strutturale.

3.3. Protocollo procedurale

Con la disponibilità dei sistemi applicati sulle fondazioni delle torri eoliche sarà possibile perseguire diversi obiettivi:

- Controllo delle fasi costruttive.
- Controllo della fase di esercizio e creazione della banca dati.
- Verifica della conservazione dei coefficienti di sicurezza previsti in fase progettuale a seguito di eventi singolari.

Nell'ottica di perseguire tali obiettivi la gestione del sistema di monitoraggio si articola nel seguente modo:

1. Gestione del sistema di monitoraggio nelle fasi costruttive

A partire dai 28 giorni di maturazione del calcestruzzo si eseguono le misure relative alle fasi costruttive. I dati acquisiti in questa fase potranno essere confrontati con i dati restituiti in fase progettuale in modo da verificare che non vi siano vizi costruttivi.

Si prevede quindi di seguire gli incrementi deformativi e quindi lo stato tensionale che si ha sulle fondazioni durante le fasi di installazione e montaggio delle parti in elevazione.

Le torri eoliche sono costituite da più elementi, generalmente da un minimo di due per le torri di taglia media, e possono arrivare anche a cinque per altezze ad esempio di 100 m.. Questi elementi detti conci vengono via via sollevati e montati a partire dalla fondazione; finita di assemblare la torre si procede con l'alloggiamento della navicella e del rotore.

Si procede quindi secondo il seguente iter:

- Acquisizione dei dati sperimentali secondo prefissata cronologia temporale che segua le fasi costruttive delle parti in elevazione, quindi a seguito del montaggio di ogni concio della torre, dell'alloggiamento della navicella e dell'alloggiamento del rotore.
- Elaborazione dei dati con software di visualizzazione numerica e grafica.
- Modellazione teorica della struttura con software di analisi agli elementi finiti, tale modellazione deve prevedere l'analisi di tutte le fasi intermedie di costruzione.
- Confronto tra i dati sperimentali, depurati delle aliquote dovute al ritiro del calcestruzzo, e i dati teorici.

2. Gestione del sistema di monitoraggio nelle fasi di esercizio

A seguito dell'entrata in servizio dell'opera si attenderà il periodo necessario affinché la struttura monitorata raggiunga una configurazione di equilibrio. Le misurazioni, acquisite a partire da tale momento e per un lasso temporale utile a cogliere le perturbazioni dovute ai cambiamenti stagionali, costituiranno una banca dati da inserire nei piani di manutenzione. Attraverso tali dati sarà possibile durante tutta la vita utile dell'opera eseguire controlli con metodologia comparativa.

I dati potrebbero essere acquisiti sia a impianto fermo sia in esercizio. Di seguito si farà riferimento a dati acquisiti in caso di impianto fermo.

Il periodo di acquisizione atto a creare la banca dati sarà di 12 mesi. Le acquisizioni dei dati di deformazione dovranno essere integrate con i dati di temperatura, di umidità, di orientazione della torre, ossia tutti i dati relativi ai fattori che potrebbero avere influenza sulle misure di deformazione.

La procedura sarà quindi articolata nel seguente modo:

- Acquisizione delle misure di deformazione durante i 12 mesi di osservazione
- Creazione del database con misure di deformazione corredate da dati di temperatura e orientazione della torre
- Durante tutta la vita utile dell'opera, esecuzione di controlli routinari con rilevazione delle deformazioni, che acquisite nelle stesse condizioni del periodo di osservazione, possono essere confrontate con i dati della banca dati in modo da poter attestare il buono stato di salute delle strutture.

Si vuole inoltre sottolineare che, essendo gli impianti eolici on-shore situati prevalentemente in zone collinari o montuose, è possibile che siano ubicati nei pressi di versanti o pendii. La stabilità di tali zone viene studiata a monte della progettazione con metodi che esulano dal presente lavoro, tuttavia le misure di deformazione relative ai pali di fondazione possono rappresentare un dato utile per le verifiche di stabilità durante tutta la vita utile dell'opera, e possono costituire

3. Gestione del sistema di monitoraggio a seguito di eventi singolari

Durante la vita utile di una struttura quale è una torre eolica possono presentarsi eventi singolari a seguito dei quali è opportuno verificare se siano conservati i coefficienti di sicurezza previsti dal progetto.

Tra tali eventi possono ricadere ad esempio situazioni di vento estremo o condizioni di arresto improvviso. Se a valle di questi eventi le misure di deformazione non eccedono di più del 20% rispetto alle misure acquisite durante il periodo di osservazione si può attestare che non si sono verificati danneggiamenti che necessitano controlli più approfonditi.

4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato presentato un sistema di monitoraggio statico basato sull'utilizzo di sensori a fibra ottica dedicato alla verifica di affidabilità delle strutture di fondazione delle torri eoliche di nuova realizzazione. Il lavoro ha messo in evidenza la possibilità di eseguire controlli sia in fase di costruzione con lo scopo di verificare la corretta esecuzione della struttura, sia in fase di esercizio in modo da verificare la consistenza delle fondazioni individuando dei protocolli procedurali che garantiscano una corretta attività di manutenzione.

Lo sviluppo di tale lavoro sarà la realizzazione di un sistema di monitoraggio su un caso di studio reale di cui si auspica potranno essere pubblicati i futuri risultati.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] GWEC (Global Wind Energy Council)- Global Wind Report 2019

[2] ANEV (Associazione Nazionale Energia del Vento) -Brochure Anev 2020

[3] G. Porco, D. Romano, G. F. Valer Montero - Controlli NDT sulle opere geotecniche per la verifica delle fasi costruttive e dello stato di esercizio, Il Giornale delle prove non distruttive - Monitoraggio diagnostica – N.01, Gennaio 2013

[4] G. Porco, D. Romano, G.F. Valer Montero - Il monitoraggio strutturale per il controllo delle fasi costruttive e per la verifica di affidabilità delle strutture in c.a., Prove non distruttive monitoraggio diagnostica, Dicembre 2012

[5] G. Porco, D. Romano, - Sistemi di monitoraggio residenti e nuove tecniche di controllo dei materiali nella realizzazione di edifici in calcestruzzo armato, Stringhe, Quadrimestrale di divulgazione scientifico culturale dell'Università della Calabria, Anno 1 n.03, 2011

[6] de Battista, N., Kechavarzi, C. & Soga, K., - Distributed fiber optic sensors for monitoring reinforced concrete piles using Brillouin scattering, In Proceedings of the European Workshop on Optical Fibre Sensors - EWOFS 2016. Limerick, Ireland: SPIE

[7] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008“Norme tecniche per le costruzioni” – G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30

[8] B. Glisic, D. Inaudi- Fibre Optic methods for structural health monitoring, John Wiley&Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England, 2007

[9] G. Porco - Il monitoraggio per la verifica dell'affidabilità strutturale, Seminario Controllo e monitoraggio strutturale per l'entrata in servizio e la verifica in esercizio di strutture civili- Milano 2016

[10] Riso and DNV-Guidelines for Design of Wind Turbines 2002

[11] S. Fusaro - Sistemi di controllo e monitoraggio locali e globali per la manutenzione di fondazioni di torri eoliche di nuova costruzione, Tesi di Laurea magistrale in Ingegneria Civile, Università della Calabria, Novembre 2020

[12] Magnus Currie, Mohamed Saafi, Christos Tachtatzis, Francis Quail, - Structural integrity monitoring of onshore wind turbine concrete foundations, Renewable Energy 11 Giugno 2015

[13] B. Glisic, D. Inaudi, A. Del Grosso, F. Lanata, G. Brunetti, - Monitoraggio a breve e lungo termine delle strutture in calcestruzzo tramite sensori a fibre ottiche, 22° Convegno Nazionale AICAP 2002, Pages 531-540, Giugno 6-8, Bologna, Italia

N.04 - November 2020
ISBN: 979-12-80280-03-9

EDIZIONI SISMLAB
Available online at www.sismlab.com