



Scientific Report

*Controlli, verifiche e manutenzioni su fondazioni di torre
eoliche*

Authors: G. Porco, P. E. Greco

Scientific Publications by Sismlab s.r.l.
Spin-Off University of Calabria
Rende (CS), Italy
N.03 - XI- 2020
ISBN: 979-12-80280-02-2

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.03 November 2020
ISBN: 979-12-80280-02-2

(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*

CONTROLLI, VERIFICHE E MANUTENZIONI SU FONDAZIONI DI TORRE EOLICHE

G. Porco* - P. E. Greco**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria

giacinto.porco@unical.it

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

info@sismlab.it

SOMMARIO

Il settore delle energie rinnovabili e in particolar modo quello della produzione energetica legata al campo eolico rappresenta un settore in forte espansione, sia in Italia che nel resto del mondo. Il presente lavoro si inserisce in questo ambito con riferimento alle parti proprie dell'ingegneria civile e specificatamente alle fondazioni delle torri eoliche. In particolare, verranno esaminate le problematiche ancora aperte relative al controllo della consistenza delle strutture di fondazione di generatori esistenti e verrà fornito un contributo in termini di protocolli procedurali, atti ad affrontare e risolvere tali carenze. Nello specifico l'articolo ha come obiettivo principale l'individuazione di un protocollo procedurale di tipo statico, eventualmente integrato con approcci dinamici guidati, con i quali sarà possibile gestire con dati oggettivi l'esercizio di queste strutture produttive in attività da oltre venti anni.

1. INTRODUZIONE

In Italia la produzione di energia eolica negli ultimi trenta anni ha subito un notevole sviluppo, conseguenza di questo è l'installazione di differenti parchi eolici soprattutto nel meridione, con circa 78% degli aereogeneratori che corrispondono a 7911 MW di potenza (79.5% del totale).

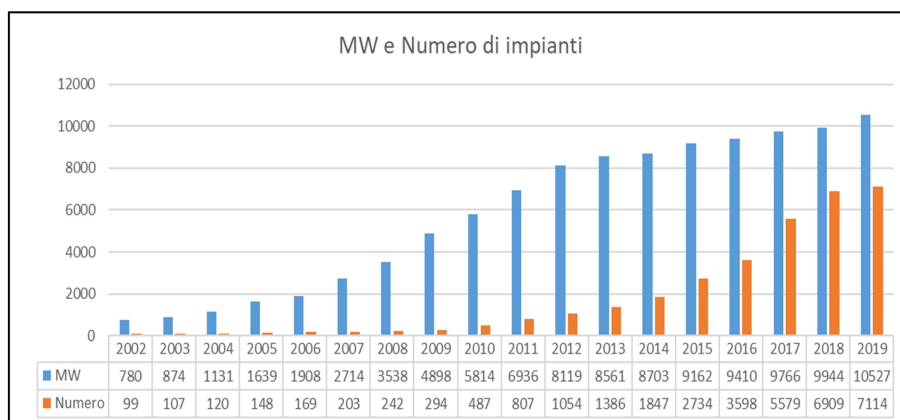


Figura 1- Andamento storico di Mw e torri installate in Italia - [2][3]

Le prime torri nascono negli anni novanta e oggi il settore eolico è in continua crescita prevedendo per gli impianti nuovi anche aereogeneratori con elevata potenza, unitamente per come è ovvio con il rifacimento delle torri esistenti. Solo nel 2019 sono stati registrati ed eseguiti circa 450 rifacimenti. Appare evidente che in questi processi, sia di reimpiego dell'esistente che di mantenimento dei parchi in esercizio, assuma un ruolo centrale la verifica di sicurezza delle strutture di fondazione, che è quella parte che più delle altre mostra danneggiamenti e riduzione dei coefficienti di sicurezza a volta anche marcati. Il problema principale risiede nel fatto che, le strutture di fondazione appartengono al campo dell'ingegneria civile e in tale ambito solo negli

ultimi anni è stata introdotta l'obbligatorietà di redigere i piani di manutenzione, inserendo altresì il concetto di vita utile. Quindi, gli operatori del settore, così come pure tutti i gestori di opere in calcestruzzo armato generiche, realizzate prima del 2008, si sono imbattuti, con la problematica di gestire l'esercizio dell'opera in presenza di evidenti danneggiamenti e in assenza di controlli e manutenzioni pregresse. In pratica il tecnico, con una carenza di strumenti e di procedure specifiche, ha dovuto affrontare la prosecuzione dell'esercizio o il fermo macchina in presenza di stati di dissesto e senza dati oggettivi. Bisogna considerare inoltre che, la progettazione e la realizzazione di circa la totalità delle torri eoliche presenti sul territorio italiano sono state effettuate con riferimento principalmente a norme relative agli anni 1986 e 1996 e diversamente dall'ambito industriale, che presenta direttive chiare e precise riguardanti la progettazione e il monitoraggio della sovrastruttura, per l'ambito civile non esistevano all'epoca previsioni di vita utile e obbligatorietà di redazione dei piani di manutenzione per le opere in fondazione. Tale scenario è fortunatamente cambiato nel 2009 con l'entrata in vigore delle NTC 2008, che introducono non solo l'obbligatorietà della redazione dei piani di manutenzione ma definiscono le modalità di controllo da seguire per effettuare lo screening delle strutture esistenti.

Successivamente e precisamente nel 2019 tale l'assetto è stato confermato con il dispositivo NTC18. E' opportuno osservare che è vero che stato fatto obbligo della redazione dei piani di manutenzione e sono state rese note le previsioni di vita utile, ma va sottolineato che, queste attività rimangono propriamente incentrate sugli edifici in c.a. e quindi non proprio dedicate per le fondazioni delle torri eoliche. Con queste premesse si comprende il perché, negli ultimi anni notevole è stato il numero di segnalazioni di danneggiamenti sulle fondazioni delle torri eoliche. Il tutto accompagnato da precise richieste agli operatori del settore sui coefficienti di sicurezza detenuti dalle strutture danneggiate ma anche sulla possibilità di mantenere generatori in esercizio in attesa di procedere con gli interventi di consolidamento.

E' in questo contesto che muove il presente lavoro con il quale fatta una preliminare analisi delle geometrie costruttive più diffuse di fondazioni presenti sui parchi italiani, verranno analizzate le condizioni di danneggiamento più frequenti, correlandole con le cause innescanti. Successivamente verrà illustrato un protocollo procedurale basato su esperienze pregresse degli autori, in ambito di controllo e monitoraggio nel settore civile. Infine verrà illustrata la validazione della procedura proposta su casi reali di studio.

2. GEOMETRIE COSTRUTTIVE E DANNEGGIAMENTI DI STRUTTURE DI FONDAZIONE IN C.A.

Le tipologie di fondazioni a cui ci riferiamo si dividono in dirette e indirette, la loro funzione principale è di ripartire i carichi derivanti dal peso proprio della torre, dalla navicella e dai carichi del vento.



Figura 2- Possibile tipologia e forma di fondazione

Per migliorare la rigidità entrambe le tipologie sono realizzate mediante dei plinti in c.a. e possono assumere diverse forme, del tipo poligonale, quadrata o circolare. Le loro dimensioni dipendono dalla capacità portante del terreno e dal funzionamento statico che si vuole ottenere, da questo può dipendere anche un differente quadro fessurativo della fondazione. Internamente ai plinti la giunzione fondazione torre può essere realizzata con l'inserimento di un anello o mediante un adattatore retto da "prigionieri" (anchor cage).

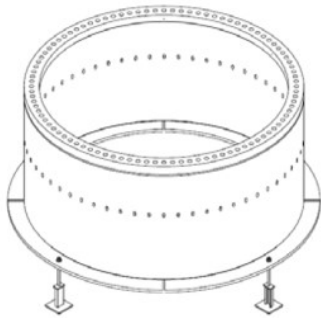


Figura 3- Anello di giunzione [5]

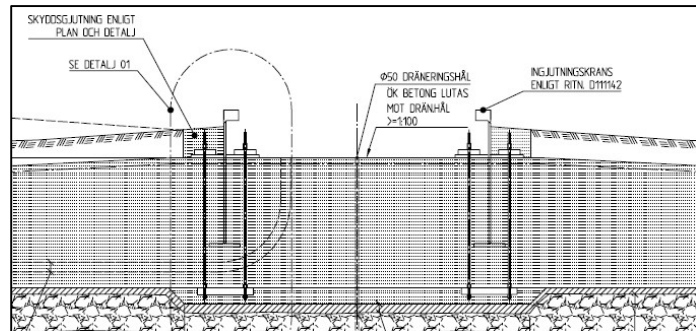


Figura 4-Rappresentazione grafica dell'anello in fondazione [5]

I "prigionieri" sono a loro volta fissati nella struttura per mezzo di una flangia nella parte inferiore della fondazione, come in figura.

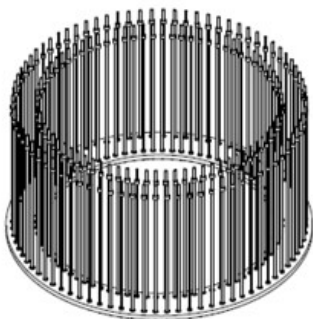


Figura 5-Prigionieri e piastra inferiore [5]

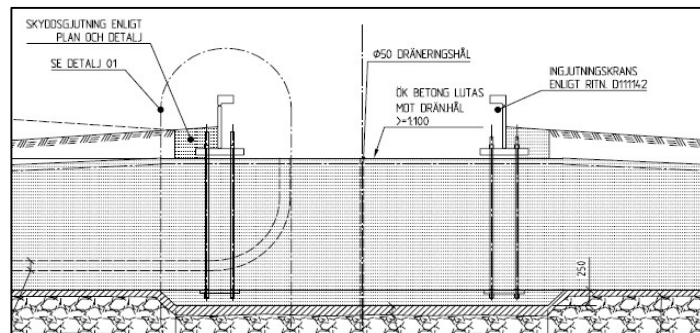


Figura 6-Rappresentazione grafica adattatore in fondazione [5]

In prima analisi una fondazione deve garantire la stabilità ad un elemento snello e flessibile come la torre. Quello che è necessario è che la rigidità rotazionale sia abbastanza alta, questa non dovrebbe mai scendere al di sotto di un determinato valore (in caso contrario ci sarebbe la necessità di valori di rigidità laterale alti) affinché la fondazione garantisca il corretto esercizio della torre.

Dunque il sistema fondazione torre, che erroneamente viene considerato come semplice, risulta abbastanza complesso e ad oggi molto spesso ne vengono denotati i limiti strutturali, sotto forma di danneggiamenti in fondazione. Essi si possono presentare per diverse ragioni e con differenti disposizioni, come: localizzati in corrispondenza della giunzione torre o diffusi in base alla direzione del vento. Accade quindi che, se non si hanno gli strumenti adatti per valutarli o addirittura meglio prevenirli, si può incorrere anche ad un possibile collasso della struttura.

La maggior parte delle fessure presenti in fondazione sono dovute ad errori di progettazione, come: copertura in calcestruzzo insufficiente, rinforzo installato in modo errato, miscela del calcestruzzo non corretta e collegamento tra fondazione-torre. Uno degli errori più comuni in letteratura è in corrispondenza della zona di transizione costituita con malta che si adopera per ottenere la planarità della flangia o la piastra dove poi sarà collegata la torre. Questo può prevedere fessure da restringimento, materiale in eccesso ai bordi, mancanza di resistenza dovuta alla lavorazione a basse temperature, vuoti tra il cemento e la flangia o piastra della torre a causa dell'insufficiente iniezione di malta.



Figura 7-Materiale in eccesso [5]



Figura 8-Vuoti all'interno della malta [5]

Oltre a questi, che possono anche essere considerati come danni fisiologici, i danneggiamenti maggiori sono assimilabili alla fessurazione nel calcestruzzo in determinate zone della fondazione e alla conseguente ossidazione delle armature presenti. Da premettere è che le zone in riferimento, danneggiate o prossime al danneggiamento, potranno essere riconosciute mediante il protocollo proposto ma prima si identificheranno le fessure maggiormente riscontrabili nel calcestruzzo, le cause e i fenomeni associati.

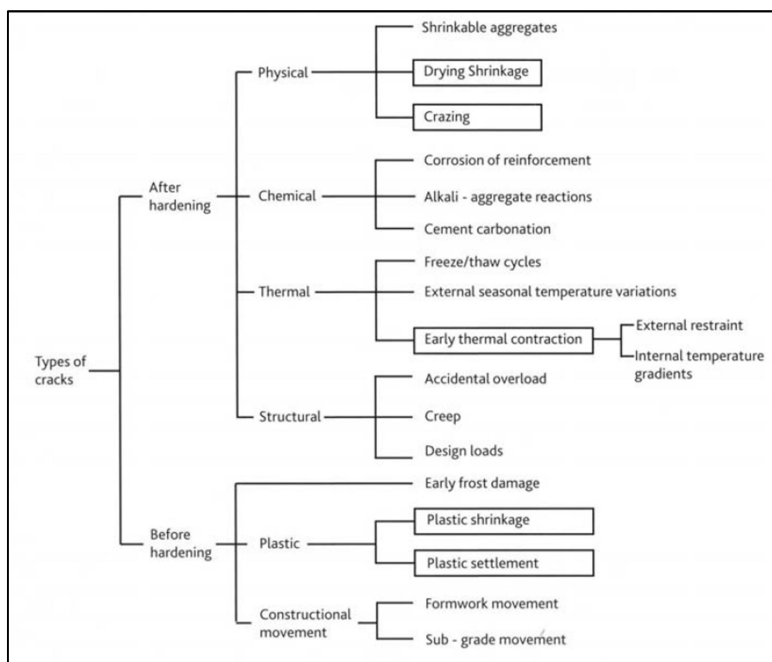


Figura 9- Tipologia di danno [5]

3. DANNEGGIAMENTO STRUTTURE IN CALCESTRUZZO

L'installazione delle torri eoliche è attuata in ragione alla produzione di energia elettrica e questo favorisce delle condizioni atmosferiche non consone al perdurare della vita utile delle fondazioni di torri eoliche. Infatti l'ubicazione plano-altimetrica di tali strutture favorisce un danneggiamento materico a livello superficiale che interessa la maggior parte delle fondazioni esistenti, questo viene accentuato da escursioni termiche, azioni del vento ed eventuali cicli di gelo e disgelo.

E' possibile evidenziare due differenti quadri fessurativi che sono maggiormente riscontrabili nelle fondazioni di torri eoliche esistenti. Il primo è dovuto alle sollecitazioni del vento, esso si presenta come fessure localizzate in fondazione in determinate aree dipendenti dalla frequenza, direzionalità e intensità del vento. Il secondo è legato al degrado materico dato dalle condizioni esterne, i fenomeni riscontrabili in questo caso possono essere l'espulsione del copri-ferro, fessure perimetrali e possibile innesco di ossidazione delle barre di armatura. La riduzione dei coefficienti di sicurezza utilizzati in fase progettuale è una delle principali conseguenze dovute al formarsi di quadri fessurativi, che non si intendono solo come danneggiamento materico del calcestruzzo ma come la possibilità dell'evoluzione di un danno strutturale.

Gli elementi cardine da tenere in considerazione, in relazione al danneggiamento del calcestruzzo, sono: condizioni atmosferiche, geometrie costruttive; disposizioni delle armature.

Le condizioni atmosferiche di riferimento sono riguardanti principalmente le azioni del vento in termini di direzionalità e intensità. Inoltre possono essere presenti anche delle condizioni climatiche particolari e con questo si fa riferimento ai possibili cicli di gelo e disgelo. I fenomeni del clima freddo normalmente associati alle torri eoliche producono danni al calcestruzzo della fondazione e sono identificati come: sollevamento della fondazione dovuta al gelo, indebolimento del terreno dovuto al disgelo e insediamento dell'acqua dovuto al disgelo. Una possibile osservazione è che al momento non esiste un criterio generalmente accettato che caratterizzi una tipologia di suolo sensibile al gelo, ma i criteri più comunemente utilizzati si basano sulla dimensione del grano. Paesi come Stati Uniti, Svezia, Norvegia e Finlandia usano tutti metodi diversi per classificare la suscettibilità al gelo del suolo, sebbene la distribuzione granulometrica sia comune a tutti.

Country	Grain size distribution	Capillarity	CBR	Freezing test
U.S.	x			x
Sweden	x			
Norway	x		x	
Finland	x	x		

Figura 10 -Metodi utilizzati per classificare la suscettibilità al gelo

Per geometrie si intendono il design strutturale assunto in fondazione e le componenti facenti parte, come la giunzione fondazione torre utilizzata. Per esempio si può considerare che nel caso in cui non sono presenti particolari giunzioni, l'azione del vento, può produrre danni diffusi in fondazione. A differenza delle strutture in presenza della giunzione, osservate in precedenza, nelle quali le fessure sono di tipo localizzato e possono essere riscontrate a vista, tipicamente nelle zone che sono identificate come soggette a trazione. Per le zone soggette a compressione, invece, il danno non è visibile in quanto interno ma è riscontrabile da indagini dettagliate.

Di particolare interesse, per ultimo punto, è la disposizione delle armature in quanto dettagli errati oppure mancanza di barre potrebbero indicare delle aree predisposte al danneggiamento.

Dunque congiuntamente all'azione del vento i danni maggiormente riscontrati fanno capo a questi aspetti.



Figura 11-Quadro fessurativo diffuso

[20]

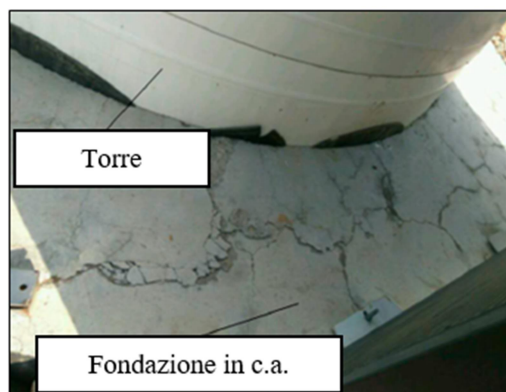


Figura 12-Quadro fessurativo localizzato nell'intorno della giunzione

Il calcestruzzo, in base alle condizioni atmosferiche considerate, può perdere la sua funzione protettiva per perdita di alcalinità o per penetrazione di cloruri fino alle armature e rottura locale del film protettivo.

I fenomeni maggiormente riscontrabili a causa di quadri fessurativi sono quelli di innesco di una possibile ossidazione delle barre di armatura a causa dell'insediamento di anidride carbonica, aria e acqua. In questo caso può accadere che la sezione resistente della barra in esercizio tenda a ridursi, andando a compromettere l'opera. Le aree maggiormente colpite sono quelle perimetrali in quanto, riconducendoci nuovamente alle geometrie, è stato riscontrato più volte che le dimensioni di copri-ferro non sono realizzate correttamente e inoltre bisogna considerare che il terreno risulta essere un agente aggressivo.



Figura 13-Insedimento di acqua e fango nell'intorno della giunzione [14]



Figura 14-Quadro fessurativo perimetrale

Appare dunque evidente la necessità di operazioni dettagliate di rilievo geometrico strutturale e delle fessure se presenti, in modo tale da evidenziare il danno, classificarlo ed eventualmente intervenire in modo adeguato. Il tutto però deve essere svolto in base ad indicazioni specifiche e esperienze maturate, per questo il seguente testo propone successivamente un protocollo procedurale mirato riguardante le fondazioni di torri eoliche esistenti.

4. PROPOSTA DI UN PROTOCOLLO PROCEDURALE STATICO PER LA VERIFICA DI AFFIDABILITA' DELLE FONDAZIONI

Il protocollo proposto, nato da un'esperienza maturata da anni nel settore riguardante il controllo e monitoraggio su differenti opere in ambito civile, costituisce un utile strumento per eseguire lo screening sulle strutture fondali. Tali strutture possono diversificarsi per tipologia e forma ma quasi tutte risultano essere interrato, per migliorare le condizioni di stabilità. L'assunzione di attività di scavo, dunque, risulta essere necessaria ed essenziale al fine di identificare l'eventuale danneggiamento della struttura. Il seguente protocollo, redatto in base a tale informazioni, ha la prerogativa di utilizzare un'analisi predittiva per la circoscrizione delle zone con una maggiore probabilità di riscontrare la presenza di danni, affinché si possano porre le successive analisi osservazionali su determinate superfici e quindi eseguire degli scavi mirati, riducendoli in numero e di conseguenza in costo. Il protocollo nella veste presentata si adatta ad essere applicato a tutti gli elementi del singolo parco eolico. I passi procedurali sono:

- 3.1 Acquisizione della documentazione di progetto, sulle fasi esecutive, struttura ultimata e collaudo. Analisi delle geometrie e delle armature della fondazione presenti in un parco soggetto ad indagine;*
- 3.2 Acquisizione dei dati vento, mediante accesso alla banca dati del gestore e elaborazione;*
- 3.3 Analisi del comportamento strutturale dei singoli componenti del campione rappresentativo mediante modellatori agli elementi finiti;*
- 3.4 Indagini a seconda delle tensioni risultanti dalle analisi*
- 3.5 Indagini di campo, rilievo geometrico della fondazione e prima classificazione;*
- 3.6 Esecuzione degli scavi mirati in dipendenza alle analisi svolte;*
- 3.7 Rilievo e graficizzazione del danno;*
- 3.8 Classificazione dello stato di dissesto;*
- 3.9 Identificazione dei livelli di danno, deduzioni tecniche ed eventuali modalità di intervento.*

Il Protocollo Procedurale è finalizzato non solo ad individuare eventuali condizioni di riduzione dei coefficienti di sicurezza, ma a rendere disponibile anche una indicazione sulle attività da intraprendere per bloccare il processo di danneggiamento o per ripristinare gli originari livelli di sicurezza in base ai danni rilevati per ogni singola torre.

Di seguito sono descritti i differenti passi procedurali:

- 3.1 Acquisizione della documentazione di progetto, sulle fasi esecutive, struttura ultimata e collaudo. Analisi delle geometrie e delle armature della fondazione presenti in un parco soggetto ad indagine;***

L'analisi del campione rappresentativo, quindi delle differenti tipologie di strutture che possono essere presenti in un parco eolico in quanto non necessariamente sono tutte dotate dello stesso tipo di fondazione, si persegue acquisendo preliminarmente la documentazione disponibile relativa alla fase di progettazione, realizzazione e collaudo, includendo eventuali dati sulle attività manutentive svolte sulle singole torri. I risultati attesi da questa fase sono:

- Identificare le modalità progettuali e le norme di riferimento per la stesura del progetto,
- Rappresentare l'intero campione in una cartografia di rilievo plano-altimetrico orientata,

- Ottenere geometrie e volumi di calcestruzzo,
- Ottenere il confinamento del terreno laterale previsto da progetto e caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati ossia calcestruzzo e acciaio,
- Ottenere dei dati geologici geotecnici dell'area di interesse e caratterizzazione meccanica dei suoli interessati;
- Organizzare le strutture del parco in campioni rappresentativi con geometrie simili.
- Disponibilità per ogni elemento del campione rappresentativo delle distinte di armatura nelle diverse sezioni con evidenza di eventuali aree debolmente armate e di potenziali superfici esposte a fessurazione per disposizione di armatura o per l'esistenza di superfici resistenti discontinue per interruzione d'armatura;

Mediante questo ultimo punto, inoltre, si potranno riorganizzare i campioni a seconda sia delle geometrie che delle disposizioni delle armature.

3.2 Acquisizione dei dati vento, mediante accesso alla banca dati del gestore e elaborazione;

Tale fase si basa su considerazioni riguardanti le direzioni preferenziali e le sollecitazioni del vento che riversano i propri effetti strutturali sulle fondazioni.

I dati del vento acquisiti mediante la banca dati del gestore devono avere almeno dieci anni di registrazione, il tutto finalizzato all'individuazione di direzioni preferenziali di sollecitazione singolari per alta frequenza direzionale e/o sollecitativa. Esse risultano essere informazioni base per una corretta analisi predittiva in quanto possono determinare in modo mirato delle aree in cui la probabilità di danneggiamento è alto, dunque dove eventualmente porre la prima fase osservazionale e successivamente procedere con attività di scavo. Inoltre è chiaro che nel momento in cui le zone considerate come potenzialmente danneggiabili, nella fase di indagini di campo, non dovessero assumere nessun danneggiamento questo implicherebbe che le restanti aree dove le sollecitazioni sono definite come minori è molto probabile che non subiscano alcun danno.

L'elaborazione dei dati è attuata in gradi o radianti e viene costruita con essi la cosiddetta "rosa dei venti", ossia una figura che riporta la direzione percentuale e velocità media del vento per ogni suo range.

Da osservare in particolar modo in questa fase è se le torri in esame hanno avuto dei periodi di fermo in quanto fuori servizio, tale osservazione potrebbe già evidenziare dei periodi in cui la torre potrebbe aver avuto problematiche relative al danneggiamento in fondazione.

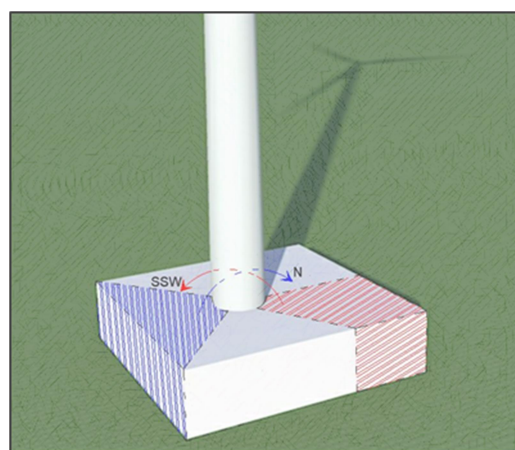
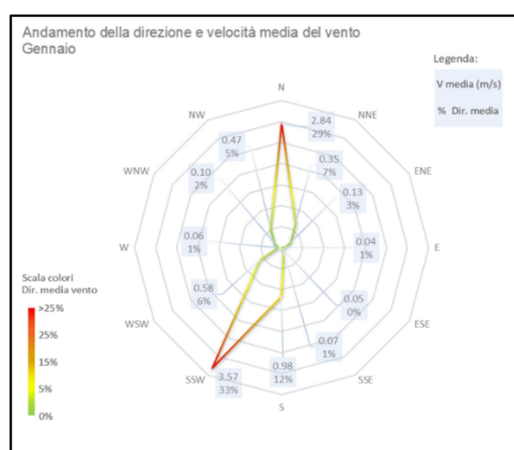


Figura 15-Rosa dei venti
Figura 16- Aree maggiormente sollecitate

3.3
Analisi del

comportamento strutturale dei singoli componenti del campione rappresentativo mediante modellatori agli elementi finiti;

L'analisi dovrà prioritariamente essere orientata alla verifica dei livelli di tensione sui materiali base per includere o meno nel processo eventuali controlli di verifica in opera sui calcestruzzi e sugli acciai, ma stante le caratteristiche geometriche e le prerogative delle strutture fondali difficilmente i regimi di tensione saranno tali da evidenziare valori superiori ad un quarto o un quinto del valore ultimo escludendo di fatto indagini dedicate al controllo delle caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi e degli acciai. Successivamente la valutazione della distribuzione delle tensioni sarà indirizzata alla individuazione delle superfici con alta probabilità di presenza di quadri fessurativi indotti dalle sole zone tese o per presenza di superfici di discontinuità dovute alla dislocazione delle armature o alla presenza di ridotte dimensioni geometriche rispetto al corpo della fondazione.

L'analisi dei regimi di sollecitazione e la individuazione di superfici di discontinuità consentirà di disporre per ogni struttura di fondazione di un quadro definito delle superfici dove potenzialmente possono generarsi dei quadri fessurativi e quindi guidare le attività di campo con una ricerca finalizzata e non casuale. In pratica per ogni struttura di fondazione dovranno essere ispezionate le aree ottenute come sovrapposizione di zone potenzialmente a rischio per geometria e per analisi delle sollecitazioni.

3.4 Indagini distruttive e non, dipendenti dalle tensioni risultanti;

In questa fase potrà essere inserito, qualora i livelli di lavoro dei calcestruzzi e degli acciai siano significativi, un piano di indagine per la caratterizzazione dei materiali basato su tecniche pacometriche, ultrasonore, carotaggi, estrazione di barre, test a trazione, test a compressione ed eventuali indagini chimiche, ma si ribadisce ancora una volta che, viste le prerogative di alta rigidità delle strutture e lo scarso impegno tensionale, tale condizione ha una bassa probabilità di essere presente. Da osservare è che le seguenti analisi riguardanti la caratterizzazione dei materiali si dovranno svolgere nel momento in cui le torri danneggiate, a seguito del protocollo procedurale applicato, abbiano bisogno di interventi straordinari. Al fine di evidenziare i livelli di lavoro del calcestruzzo ed acciai in fondazione prima dell'intervento, come previsto dalle attuali normative.

3.5 Indagini di campo, rilievo geometrico della fondazione e prima classificazione;

Questa è la prima attività di campo ed è dedicata ad acquisire le seguenti informazioni: dati di carattere geometrico finalizzati alla verifica di quanto riscontrato sui documenti progettuali, dimensioni in pianta, orientamento della fondazione della torre e verifica della tipologia costruttiva. Dalle analisi fatte in precedenza si riporteranno i lati da ispezionare obbligatoriamente, si consiglia di concludere questa fase con un rilievo fotografico. Da questa azione i risultati attesi sono nell'ordine:

- Individuazione delle aree da preparare per l'eventuale scavo, redigendo documenti grafici per il supporto delle attività di scavo e pulizia delle aree;
- Prima graficizzazione dello stato di dissesto per ogni elemento del campione rappresentativo, redigendo tavole dedicate che riproducano i quadri fessurativi rilevati per ogni area rilevata;
- Redazione di una prima classificazione di rischio;

- Riduzione oggettiva della consistenza del campione rappresentativo a seguito della esclusione di un numero di fondazioni che non evidenziano alcun tipo di anomalia;
- Individuazione di un campione rappresentativo ridotto per la fase successiva di eventuale scavo;
- Definizione di un campione di torri da sottoporre dopo un biennio ad un nuovo screening seguendo la procedura appena elencata.

Da questo primo screening è possibile osservare, dunque, se i campioni sono ritenuti integri e quindi si opta per la riproposizione di questa attività di tipo periodico (biennale) in modo comparativo oppure se è necessario eseguire scavi mirati per identificare al meglio lo stato di danneggiamento ed eventualmente intervenire.

3.6 Esecuzione degli scavi mirati in dipendenza alle analisi svolte;

Questa fase riguarda le strutture di fondazione in cui è stato riscontrato un danno non fisiologico sulle aree segnalate dalle fasi precedenti. Le fondazioni, in numero ridotto rispetto ad un primo screening osservato nel punto precedente, prevedono in questa fase degli scavi mirati eseguiti considerando le aree prima identificate in dipendenza alle geometrie, disposizioni di armature, indagini di campo, direzionalità, intensità del vento e modello agli elementi finiti.

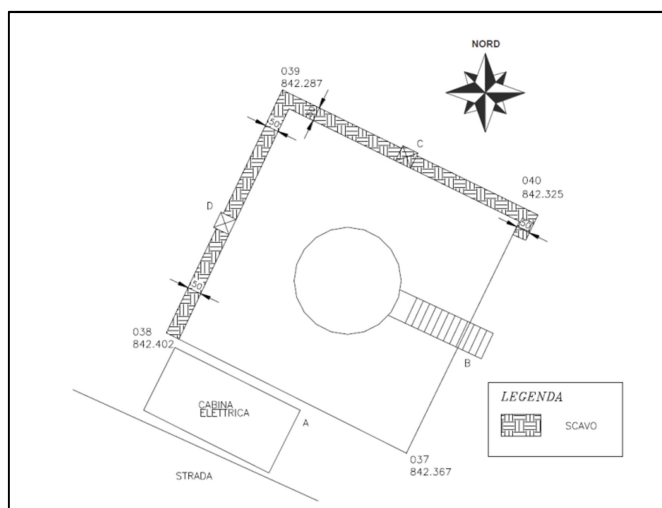


Figura 17 -Esempio schematico degli scavi da effettuare

3.7 Rilievo e graficizzazione del danno;

Nel caso di esecuzione dello scavo per ogni elemento del campione rappresentativo dovranno essere acquisiti i seguenti dati:

- Rilievo del quadro fessurativo di dettaglio riguardante tutte le aree ispezionate; si agisce acquisendo ampiezze rappresentative, inclinazioni dei piani di discontinuità e rilevazione delle eventuali barre danneggiate;
- Graficizzazione di dettaglio; si agisce riportando su tavole i dati acquisiti dal rilievo;
- Redazione di una orientata documentazione fotografica secondo un ordine preordinato e finalizzata all'acquisizione dei quadri fessurativi ed all'identificazione delle aree con una marcata presenza di riduzione delle sezioni d'acciaio.

In fine per ogni campione rappresentativo si dovranno individuare gli elementi minimi da inserire nella procedura di screening biennale ed eseguire la classificazione dello stato di dissesto.

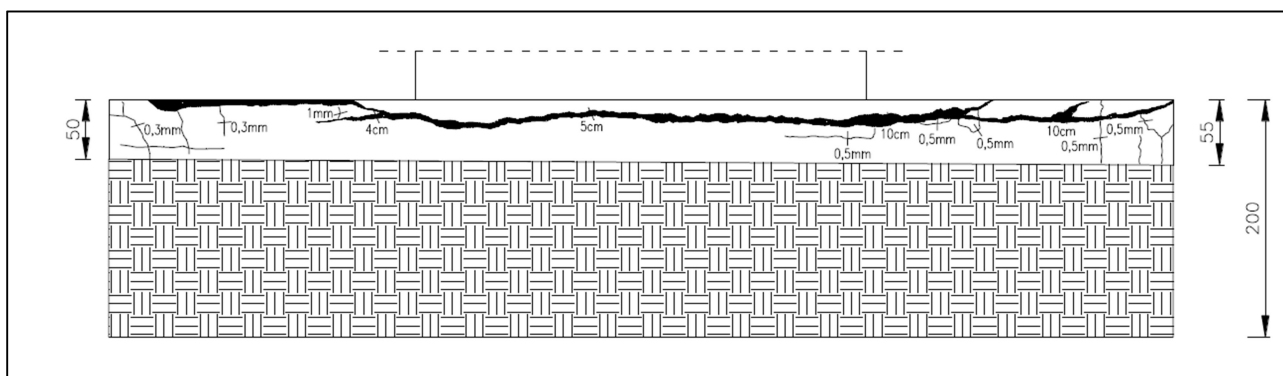


Figura 18- Esempio quadro fessurativo di dettaglio

3.8 Classificazione dello stato di dissesto;

In base alle osservazioni dedotte da rilievo, graficizzazione ed eventuali campagne di indagine sperimentali, si adotta una classificazione dello stato di dissesto. Da questo si possono identificare dei difetti “fisiologici” oppure stati di dissesto maggiori:

Stato di dissesto	Descrizione	Tipo di danno
Fisiologico	Premonitore	Microfessurazioni. Fessurazioni
Evolutivo	Senza una riduzione significativa dei coefficienti di sicurezza	Microfessurazioni, Quadri fessurativi
In Evoluzione	Con riduzione non significativa dei coefficienti di sicurezza	Microfessurazioni, Quadri fessurativi, Superfici di separazione.
Elevato	Associato ad una riduzione significativa dei coefficienti di sicurezza	Microfessurazioni, Quadri fessurativi, Superfici di separazione. Rottura barre,

Figura 19- Quadro riassuntivo dello stato di dissesto

Questo passo è essenziale per poi definire in modo corretto i livelli di danno associati e quindi gli screening eseguibili ed eventualmente gli interventi straordinari applicabili.

In dipendenza alla tipologia e livello di danno saranno poi definiti degli screening di dettaglio.

3.9 Identificazione dei livelli di danno, deduzioni tecniche e modalità di intervento;

Per un campione danneggiato i livelli di danno si considerano esse quattro. Un primo, come osservato precedentemente, è considerato essere fisiologico e quindi soggetto a screening biennale.

Nel caso di dissesto evolutivo il livello di danno considerato è iniziale. Le attività di screening proposte sono del tipo annuale, sono una riproposizione delle attività osservate in precedenza ma vengono attuate in modo comparativo con i risultati già ottenuti. In particolare la comparazione sarà adottata tra i quadri fessurativi repertati con il rilievo di dettaglio e riguarderà le ampiezze e le estensioni delle lesioni, nonché la verifica dell'esistenza della perdita di affidabilità delle barre d'acciaio. I risultati attesi con questa azione saranno sostanzialmente due ossia:

- Quadro evolutivo del danneggiamento quiescente e quindi prescrizione di altro screening a cadenza annuale.
- Quadro evolutivo in progressione con conseguente prescrizione di attivare uno screening con cadenza semestrale per come riportato di seguito;

Invece per i dissesti più marcati con riduzione sostanziale dei coefficienti di sicurezza i livelli identificati sono dedicati e definiti come “in fase di avanzamento” o “ultimo”. Quello “in fase di avanzamento” è relativo ad una riduzione dei coefficienti di sicurezza per effetto della perdita di prestazionalità di qualche barra sulle sezioni resistenti, pertanto si utilizzano le modalità di screening con finalità comparative e con cadenza semestrale, quindi, si potrà verificare l'evoluzione del danno e programmare un intervento di consolidamento anche con macchina in produzione. In questo caso l'intervento di consolidamento attivabile è sostanzialmente di ripristino delle condizioni iniziali mediante la cucitura delle superfici di scorrimento con angoli diversificati.

Il livello di danno definito come “ultimo” è invece relativo ad una marcata riduzione dei coefficienti di sicurezza di più barre che hanno perso efficacia su diverse sezioni resistenti e pertanto da assoggettare ad uno screening sempre con le stesse modalità ed a cadenza semestrale ma da assoggettare a due tipi di attività, ossia messa in sicurezza ed attivazione di interventi di consolidamento finalizzati non solo al ripristino delle superfici compromesse ma anche al miglioramento della stabilità globale del complesso fondale. Ovviamente queste ultime situazioni singolari con riduzione dei coefficienti di sicurezza anche evidenti potranno precauzionalmente essere oggetto di fermo macchina.

Livello di danno	Stato di dissesto	Screening	Modalità di intervento
1°	Fisiologico	Biennale	Osservazione evoluzione con screening
2°	Evolutivo	Annuale	Osservazione evoluzione con screening
3°	In evoluzione	Dedicato (Semestrale)	Interventi di manutenzione straordinaria.
4°	Elevato	Dedicato con intervento immediato	Fermo macchina, Interventi di manutenzione straordinaria.

Figura 20- Quadro riassuntivo dei livelli di danno, screening e modalità di intervento

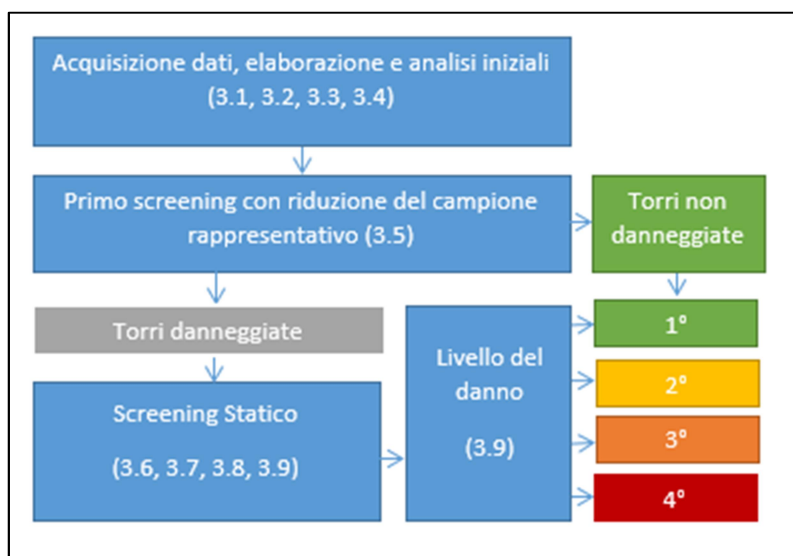


Figura 21- Diagramma di flusso protocollo statico

Protocollo dinamico

Il protocollo dinamico viene presentato in veste di applicazione rapida del protocollo statico e non nasce per essere eseguito in modo autonomo ma partendo dai dati acquisiti dal protocollo statico per poi essere utilizzato in modo comparativo. Esso infatti rientra tra le tecniche non distruttive, cui una delle finalità è quella di confrontare informazioni di sistemi strutturali simili, al fine di coglierne le differenze e risalire alle cause generatrici di possibili danneggiamenti. Tali attività, di controllo dinamico, si esplicano in situ mediante architetture di monitoraggio costituite da sensori e centrali di acquisizione.

La premessa è che l'esame dei dati forniti dalla sperimentazione dinamica, accoppiata alla modellazione numerica, consente di formulare un giudizio di integrità strutturale mediante la determinazione delle frequenze naturali, le corrispondenti forme dei modi di vibrare ed i valori di smorzamento associati di una struttura.

Le prove di caratterizzazione dinamica presentano inoltre numerosi vantaggi:

- Prova rapida, economica e di facile conduzione grazie all'attrezzatura maneggevole;
- I parametri modali sono rappresentativi del comportamento globale nelle reali condizioni di esercizio della struttura;
- La prova non interferisce con l'operatività dell'opera, per cui non è necessario chiudere l'infrastruttura;
- Confronto dei risultati ante e post intervento;
- Rappresentano un importante strumento per la calibrazione di un modello FEM di una struttura esistente e nella conseguente validazione.

Questo approccio consente di sviluppare una serie di attività, quali: esecuzione di controlli periodici nell'ambito dei piani di manutenzione, verifica dei livelli di sollecitazione cui è stata assoggettata la struttura a seguito di condizioni di carico non previste e non prevedibili e

determinazione di variazioni significative di grandezze fisiche del manufatto da impiegare in procedure comparative per l'esecuzione di controlli diagnosi. Come è stato già osservato, infatti, è probabile che ci troveremo di fronte a casi di fondazioni integre e casi di fondazioni danneggiate o prossime al danneggiamento. Nel primo caso le informazioni raccolte vengono utilizzate per creare un modello "zero" di riferimento nel dominio del tempo e delle frequenze, così sarà possibile confrontare i dati provenienti da una torre di cui si vuole conoscere la condizione strutturale. Se dal confronto emerge una spiccata convergenza tra le acquisizioni, si può affermare che non è stata intaccata l'integrità strutturale della fondazione; in caso contrario una divergenza, può essere indicativa di un'incipiente stato di danneggiamento, o di un avvenuto degrado del corpo fondazione.

Nel secondo caso (torre danneggiata), l'acquisizione di frequenze ed accelerazioni, può essere utile per un controllo continuativo della struttura. Anche in questo caso il confronto tra i dati acquisiti in tempi diversi, è un valido aiuto per conoscere e monitorare l'evoluzione del danno nel tempo, prima che si giunga ad una condizione di irreversibilità. Per queste ultime è possibile rilevare frequenze diversificate tra zone integre e zone danneggiate in fondazione.

Dunque è possibile eseguire uno screening sulle fondazioni con la finalità di individuare aree danneggiate applicando gli accelerometri secondo una connotazione dedicata.

Gli autori in riferimento a tale applicazione si ripropongono di produrre un report scientifico successivo al medesimo nel quale verrà trattato per esteso tale protocollo.

5. VALIDAZIONE DEL PROTOCOLLO PROCEDURALE PROPOSTO

Affinché si possa concepire al meglio l'applicazione del protocollo procedurale proposto e di visionare possibili casistiche di danneggiamento su fondazioni di torri eoliche esistenti si è pensato, in conclusione, di considerare una breve descrizione del protocollo applicato per differenti parchi eolici ubicati nel sud Italia, i quali ne sono ancora oggetto di applicazione.

Come da protocollo, per il primo caso sono stati effettuati i primi passi procedurali riguardanti l'acquisizione dei dati che hanno permesso l'identificazione della collocazione temporale, della fase costruttiva e le condizioni di carico per le verifiche di sicurezza. In seguito, sono state riconosciute mediante l'acquisizione e l'elaborazione dei dati del vento le frequenze di carico e le direzioni maggiormente sollecitate, da tali direzioni di massimo impegno è stato valutato il comportamento strutturale delle fondazioni. La successiva analisi svolta, dei modellatori agli elementi finiti, ha restituito livelli tensionali sui materiali tali da escludere la necessità di verificare i parametri di resistenza a rottura di acciai e calcestruzzi. Quindi mediante la conoscenza delle geometrie costruttive, regime di sollecitazione e distribuzione delle armature è stato possibile evidenziare le aree soggette al danneggiamento.

La prima indagine di campo è stata svolta secondo le modalità elencate in precedenza e in dipendenza alle aree identificate come danneggiate o prossime al danneggiamento. Questa fase ha ridotto il numero delle fondazioni da ispezionare con screening statico soprattutto per le strutture di tipo indiretto, in quanto esse risultano avere una rigidità maggiore.

Successivamente sono state svolte le attività di scavo mirato con successivo screening statico. Questo ha restituito torri con differente stato di dissesto, torri con livello di danno paragonabili al 1° o 2° sulle quali ancora oggi è applicato l'iter di screening di tipo biennale/annuale e torri con livello di danno in evoluzione o ultimo, in figura, che sono state sottoposte ad interventi straordinari.

La prosecuzione del protocollo ha previsto le attività di screening in dipendenza al livello di danno e questo ha prodotto tre famiglie:

- Fondazioni con danno lieve;
- Fondazioni con danno medio;



Figura 22-Esemplio 1, livello alto di danno

• R
iparate.



Figura 23- Esemplio 1, rottura barre di fondazione

Gli screening successivi, atti a stabilire la reale sicurezza dell'opera e la consecutiva fruizione in termini energetici, sono stati applicati secondo i quadri schematici e gli archi temporali osservati in precedenza. Inoltre si è optato all'applicazione del protocollo dinamico per consentire l'individuazione del danneggiamento in modo continuativo nel tempo, con affiancato il protocollo statico per evidenziare quantitativamente le fessure e relative ampiezze. In particolare dall'applicazione del dinamico si è osservato il comportamento strutturale nel dominio delle frequenze a fronte di un input dinamico, dato dal vento. Quindi in prima analisi questo ha consentito di identificare l'eventuale presenza di danni strutturali e successivamente ha permesso la comparazione del danno con le acquisizioni fatte in precedenza.

Di seguito è evidenziato un esempio del possibile andamento dell'accelerazione nel dominio delle frequenze, considerando un'elaborazione mediante un modello agli elementi finiti in modo tale da riprodurre le reali condizioni di campo, in cui il punto di controllo è situato sull'estradosso della fondazione.

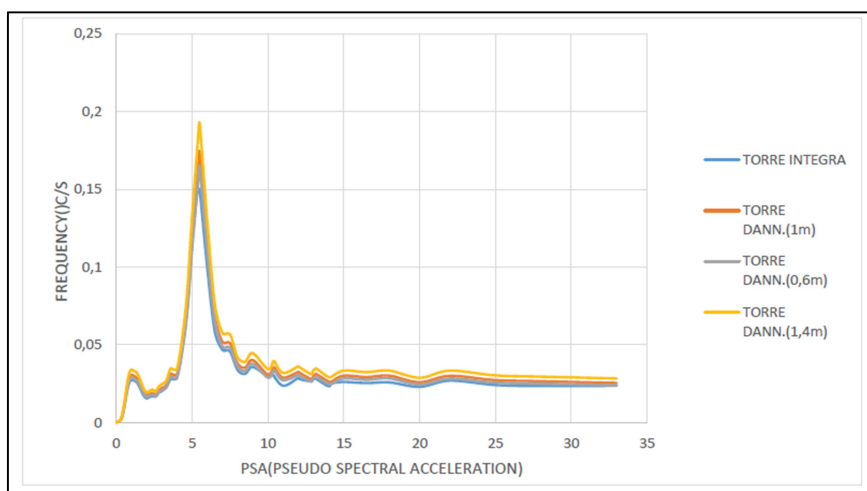


Figura 24-Confronto accelerazioni, dominio delle frequenze

E' osservabile che le frequenze relative a stati di danneggiamento maggiori sono superiori rispetto a torri definite come integre, inoltre è possibile affermare che campagne dinamiche di piano

forniscono maggiori informazioni rispetto a quelle sugli elementi in elevazione, che potrebbero anche deviare le deduzioni tecniche definendo strutture danneggiate come integre in fondazione.

Dai risultati ottenuti dagli screening effettuati si è passati alle deduzioni tecniche che hanno previsto per alcune torri il rinnovamento degli iter statici e dinamici invece per altre il passaggio da mediamente a altamente danneggiate, quindi con ricorso a interventi straordinari al fine di garantire la sicurezza strutturale.

Un secondo caso riguarda un parco in cui le torri prese in esame hanno restituito un livello di danno minore. In questo caso l'applicazione dello statico ha restituito danni lievi e il dinamico frequenze relative di torri integre pari a quelle danneggiate. Il che ha indicato la una riproposizione dello screening biennale affinché si continui a fruire delle torri in totale sicurezza.



Figura 25-Esempio 2, livello minore di danno



Figura 26-Esempio 2, livello minore di danno

In conclusione, data l'esperienza degli autori sul campo del controllo e monitoraggio e data la reale applicazione del protocollo procedurale proposto, si accerta la validità dello stesso in veste statica e dinamica. Infatti è sicuramente affermabile che tale protocollo ad oggi permette la gestione in sicurezza dei parchi nei quali sono stati evidenziati dei danni come i casi precedenti, dove il protocollo è ancora in uso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Porco, P.E. Greco - “Indagini e controlli per le verifiche di consistenza delle fondazioni di torri eoliche esistenti” – Tesi di Laurea 2020.
- [2] Anev – Associazione nazionale energia del vento – Brochure 2019 e 2020.
- [3] GSE – Gestore dei servizi elettrici – “Il punto sull’eolico” – Analisi statistica 2017.
- [4] GSE – Gestore dei servizi elettrici – “Rapporto delle attività” – 2019.
- [5] M. Perry, J. McAlorum, G. Fusiek , P. Niewczas , I. McKeeman, T. Rubert - “Crack Monitoring of Operational Wind Turbine Foundations” -2017.
- [6] Elforsk rapport - Manouchehr Hassanzadeh - “Cracks in onshore wind power foundations Causes and consequences” - 2012.
- [7] E. Ntambakwa1, H. Yu, C. Guzma, M. Rogers - “Geotechnical design consideration for onshore wind turbine shallow foundations” - 2018.
- [8] M. Currie, M. Saafi, F. Quail – “Development of a robust structural health monitoring system for wind turbine foundations” - 2012.
- [9] Nordisk Vindkraft – “Study of wind turbine foundations in cold climates” – Report 2012.

- [10] C. Viggiani. – “Fondazioni – Criteri di dimensionamento delle strutture di fondazione [319-331] - Stabilità dell’equilibrio [501-511] – 2014.
- [11] T. Rubert, M. Perry , G. Fusiek, J. McAlorum, P. Niewczas, A. Brotherston, D. McCallum – “Field Demonstration of Real-Time Wind Turbine Foundation Strain Monitoring” – 2017.
- [12] C. Fujiyama, Y. Koda, N. Sento – “Evaluation and Stability Analysis of Onshore Wind Turbine supporting structures” - 2014.
- [13] M. Currie, M. Saafi, C. Tachtatzis, F. Quail – “Structural integrity monitoring of onshore wind turbine concrete foundations” – 2015.
- [14] N. Chijiwa, T.M. Hong, M. Iwanami, T. Saito, A. Yamaya, H. Motegi, H. Shinozaki. – “Rapid degradation of concrete anchorage performance by liquid water. Journal of Advanced Concrete” - 2015.
- [15] C. Fujiyamaa, K. Yonetsua , T. Maeshimab ,Y. Koda – “Identifiable stress state of wind turbine tower-foundation system based on field measurement and FE analysis” - 2014.
- [16] F.C. Ponzio, R. Ditommaso, G. Auletta, A. Nigro, D.S. Nigro, D. Pica, L. Carosielli - “Analisi numeriche e sperimentali del comportamento termo-meccanico di una turbina” – 2018.
- [17] I. Prowell, C.M. Uang, A. Elgamal, J.E. Luco, L. Guo - “Shake Table Testing of a Utility-scale Wind Turbine,” – 2012.
- [18] D. Kaoshan1, H. Yichao, G. Changqing, H. Zhenhua, R. Xiaosong – “Rapid seismic analysis methodology for in-service wind turbine towers” – 2015.
- [19] M. Hongwang – “Seismic analysis for wind turbines including soil-structure interaction combining vertical and horizontal earthquake” -2015.
- [20] J. Chen, Y. Xu, J. Li – “Numerical Investigation of the Strengthening Method by Circumferential Prestressing to Improve the Fatigue Life of Embedded-Ring Concrete Foundation for Onshore Wind Turbine Tower” – 2020.
- [21] ASCE/AWEA – “Recommended Practice for Compliance of Large Land-based Wind Turbine Support Structures” – RP 2011.

N.03 - November 2020
ISBN: 979-12-80280-02-2

EDIZIONI SISMLAB
Available online at www.sismlab.com