



---

# *Scientific Report*

---

*Controlli di aderenza su fondazioni di torri eoliche esistenti:  
strategie sperimentali di approccio*

Authors: G. Porco, N.F.D. De Vita, F. Forestieri, F. De Bartolo, A. Iorfida

Scientific Publications by Sismlab s.r.l.

Spin-Off University of Calabria  
Rende (CS), Italy

N.16 - IV- 2023

ISBN: 979-12-80280-15-2

## EDIZIONI SISMLAB

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

N.16 – April 2023  
ISBN: 979-12-80280-15-2  
(*Year IV*)

Available online at [www.sismlab.com](http://www.sismlab.com)  
[info@sismlab.it](mailto:info@sismlab.it) - [sismlab@pec.it](mailto:sismlab@pec.it)

*Via Ponte Pietro Bucci - Università della Calabria - Rende (CS) P.Iva: 02730000789  
- Tel./Fax.: +390984-447093*

# CONTROLLI DI ADERENZA SU FONDAZIONI DI TORRI EOLICHE ESISTENTI: STRATEGIE SPERIMENTALI DI APPROCCIO

G. Porco \* - N.F.D. De Vita \*\* - F. Forestieri \*\* - F. De Bartolo \*\* - A. Iorfida \*\*

\*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria

[giacinto.porco@unical.it](mailto:giacinto.porco@unical.it)

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

[info@sismlab.it](mailto:info@sismlab.it)

[nfd.devita@sismlab.it](mailto:nfd.devita@sismlab.it)

[f.forestieri@sismlab.it](mailto:f.forestieri@sismlab.it)

[f.debartolo@sismlab.it](mailto:f.debartolo@sismlab.it)

[a.iorfida@sismlab.it](mailto:a.iorfida@sismlab.it)

## SOMMARIO

La maggior parte dei parchi eolici italiani in produzione da circa due decenni stanno per raggiungere la scadenza di vita utile. È quindi oggi necessario prevedere per le turbine eoliche l'estensione del periodo di vita per poter proseguire la produzione di energia. Il controllo in esercizio risulta attuato in maniera programmata sul sistema torre, ma non è altrettanto esercitato per quanto riguarda il sistema di fondazione. Sul sistema di connessione alla base di tali opere, la valutazione di affidabilità interessa tre tipi di controllo, quello dei volumi di calcestruzzo armato resistenti, quello sulle bullonature e la verifica di aderenza tra gli elementi in acciaio ammorsati nel calcestruzzo della fondazione in c.a. È nell'ambito di quest'ultimo controllo che si inserisce il presente studio atto a proporre strategie sperimentali di campo finalizzate a verificare la rispondenza della condizione di solidarizzazione acciaio-calcestruzzo con le specifiche del costruttore. I risultati sperimentali contenuti nel lavoro offrono una panoramica sullo stato di aderenza degli elementi in acciaio alle fondazioni in c.a. restituendo utili spunti per la progettazione e l'esecuzione degli interventi di riadesione.

## 1. INTRODUZIONE

La crescita dello sviluppo energetico sostenibile, spinge verso la realizzazione di torri eoliche onshore con strutture tubolari in acciaio di dimensioni sempre più importanti che necessitano di sistemi e procedure di controllo efficaci sia in fase costruttiva che in esercizio.

Nel settore dell'eolico sono recenti sia il concetto di vita utile, introdotto con la NTC 2008, e sia l'individuazione di un affidabile Piano di Manutenzione basato su adeguate metodologie da svolgere in preventive attività di screening.

Le problematiche strutturali che influenzano la stabilità e il funzionamento di una turbina eolica sono da riferirsi a tre macro-gruppi di danneggiamento, che interessano le pale, la torre e il sistema torre-fondazione.

I sistemi costruttivi di connessione torre-fondazione più utilizzati per le turbine onshore sono sostanzialmente due: il sistema che realizza la connessione attraverso l'ammorsamento di un anello flangiato in acciaio nel colletto superiore della fondazione in c.a.; ed il sistema che prevede un

ancoraggio diretto della flangia inferiore del fusto al corpo fondazione mediante tirafondi annegati nel calcestruzzo che mostrano in sommità solo la testa.

I meccanismi di collasso più frequenti del sistema torre-fondazione possono ricondursi a problemi di stabilità o di resistenza. Nel primo caso il sistema di fondazione è soggetto a fenomeni di ribaltamento, sradicamento, scivolamento o inclinazione per pressioni che superano la capacità ultima del terreno. In particolare, i recenti episodi di perdita di ancoraggio tra l'anello in acciaio e il calcestruzzo di fondazione, possono essere imputabili, sia al verificarsi di spostamenti verticali alla base che a rotture localizzate nel volume in c.a. della fondazione stessa. La formazione di zone di de-aderenza tra l'acciaio e il calcestruzzo può avvenire in seguito agli spostamenti verticali dell'anello per fenomeni oscillatori della torre o a cedimenti differenziali dovuti a schiacciamenti localizzati del calcestruzzo.

Gli sfilamenti dell'anello in acciaio dalla fondazione costituiscono un fattore ricorrente nei casi di crollo. Pertanto, risulta necessario individuare procedure personalizzate di controllo di tali fenomeni, che migliorino non solo i protocolli di gestione nei riguardi di eventi casuali ma anche la programmazione delle attività manutentive.

È in questo contesto che si inserisce il presente studio, con il quale gli autori intendono definire un protocollo procedurale per la verifica della solidarizzazione acciaio-calcestruzzo nel sistema torre-fondazione di turbine eoliche onshore. L'approccio proposto è basato sull'impiego di comparatori, posizionati assialmente sull'anello secondo direzioni predefinite in base ad analisi statistiche dei dati del vento, e di telecamere ad alta velocità per l'acquisizione in continuo di immagini su sistemi graduati. La strumentazione dedicata sarà scelta ed utilizzata con modalità e frequenze di campionamento individuate attraverso analisi numeriche predittive. Il protocollo presentato offrirà un utile strumento non solo per verificare le condizioni di aderenza tra l'anello e il corpo fondazione, ma anche dati utili per individuare procedure di intervento atte a ripristinare la solidarizzazione.

L'ambito in cui si inquadrano le attività di natura sperimentale del presente studio, è quello dei controlli routinari effettuati su torri eoliche onshore, in particolare sulle parti strutturali di competenza dell'ingegneria civile, ovvero il corpo fondazione, ivi compreso il sistema di solidarizzazione con la torre.

Nel presente articolo, dopo una trattazione iniziale sui possibili scenari di danneggiamento e sugli approcci attuali di controllo delle parti costituenti il sistema torre-fondazione, si passerà a presentare la proposta di procedura di controllo in esercizio degli scorrimenti verticali alla base tra anello e fondazione, mediante sensori a contatto e riprese video, durante le oscillazioni della torre innescate in seguito all'imposizione di condizioni di arresto dell'aerogeneratore. La procedura prevede che le condizioni di Stop in esercizio siano di due tipi, routinaria e in emergenza.

In infine, si riportano i risultati di una campagna sperimentale di validazione effettuata su quattro casi studio di torri eoliche, appartenenti a due case differenti costruttrici.

## **2. DANNEGGIAMENTO NEI SISTEMI COSTRUTTIVI DI TORRI EOLICHE ONSHORE**

I danneggiamenti che influenzano la stabilità e il funzionamento di una turbina eolica sono da riferirsi principalmente alle parti strutturali, ovvero le pale, il fusto e il sistema torre-fondazione.

Gli studi sui casi storici più gravi di crollo di torri eoliche onshore, verificatisi tra il 2000 e il 2016, hanno fornito un resoconto del danno ed identificato i meccanismi di collasso più frequenti. In

particolare, è emerso che la maggior parte dei crolli sia avvenuta per una combinazione di fattori, di cui la condizione di vento estremo è considerato il più comune.

I casi di crollo sono da imputare al superamento di resistenza dei componenti strutturali o a problemi di instabilità. Le torri crollarono in seguito al cedimento del loro sistema di fondazione, per rottura dei bulloni o delle saldature, o ancora per ribaltamenti e per fenomeni di instabilità delle pareti a guscio del fusto.

Nel complesso, i casi di cedimento in qualsiasi fase della vita utile sembrano corrispondere a due fattori principali, le condizioni di carico estreme e gli errori di natura umana, quali scarso controllo di qualità, costruzione difettosa, funzionamento errato e manutenzione impropria durante il normale funzionamento e nelle fasi di usura. L'esame dettagliato dei casi registrati ha mostrato che sebbene il carico accidentale di vento estremo sia la causa più comune di crollo, gli eventi fatali si concentrano nella fase iniziale o tardiva della vita utile [4].

Il cedimento che si verifica nella fase iniziale di vita della torre è dovuto tipicamente a difetti di progettazione, di costruzione e dei materiali. Le condizioni che portano tipicamente a un crollo di questo tipo sono lo scarso controllo di qualità e la presenza di difetti nei componenti.

Durante il normale funzionamento, il tasso di crollo rimane abbastanza costante e la struttura presenta il rischio più basso nel corso della sua vita. Le cause più comuni di un crollo durante questo periodo riguardano un funzionamento difettoso, una manutenzione impropria e un deterioramento precoce dei materiali. Il funzionamento errato comunemente porta il rotore ad avere un beccheggio o un'imbardata sfavorevole e una posizione di arresto della pala. Tali condizioni potrebbero aumentare considerevolmente gli effetti del vento, poiché le forze nette agenti sulla torre sono altamente sensibili al movimento del rotore, con aumentato dei carichi effettivi oltre i limiti accettabili. Anche una manutenzione impropria è stata identificata come un fattore responsabile dei crolli. I programmi di manutenzione possono quindi diventare un fattore chiave di affidabilità durante la fase di usura delle turbine eoliche.

Il tasso di crollo aumenta nuovamente verso la fase finale della vita utile, principalmente a causa dell'usura delle parti dopo un periodo operativo considerevole o per effetti di fatica che si amplificano se combinati ad errori di natura umana. Rientra in questi casi il collasso per fatica dei bulloni, presumibilmente da imputare all'applicazione di forze di pretensionamento inadeguate in fase di installazione.

Costituisce frequentemente motivo di collasso anche il caso di impatto della pala rotta con la parte superiore del fusto mentre il rotore gira. In questo caso c'è alta probabilità che la pala fratturata colpisca la parete superiore del guscio della torre più sottile rispetto alle sezioni inferiori. Questo tipo di collasso è quindi considerato di natura casuale; tuttavia, la probabilità che si verifichi è elevata, come hanno dimostrato le statistiche.

Altra causa di collasso spesso osservata in passato è lo squilibrio di forza generato da una pala rotta o comunque da un carico verticale che diventa eccentrico rispetto all'asse centrale della struttura. A causa della configurazione degli elementi del rotore, che risulta non simmetrica, lo squilibrio di forza in seguito alla rottura della pala è un tipo di carico che comunemente viene trattato come ciclico dai progettisti. Tuttavia, l'eccentricità della forza non può essere assorbita dalle strutture della turbina eolica quando supera un certo limite. Le deflessioni e le vibrazioni derivate da un tale configurazione potrebbero aumentare a livelli non sicuri se il carico ciclico si avvicina alla frequenza di vibrazione naturale della torre.

## **2.1 PERDITA DI ADERENZA TRA ACCIAIO E CALCESTRUZZO NEL SISTEMA DI CONNESSIONE ALLA BASE**

Nella presente sezione, in riferimento ai due sistemi di connessione alla base più diffusi, quello con in acciaio incorporato nel calcestruzzo del colletto superiore e quello con tirafondi direttamente ammorsati nel corpo fondazione, si riportano brevemente i possibili meccanismi che portano alla perdita di aderenza tra gli elementi in acciaio e il calcestruzzo di fondazione nel quale risultano ammorsati.

Dagli studi sperimentali si riscontra che la formazione di zone di de-aderenza acciaio-calcestruzzo nel caso di tipologia di fondazione con anello avviene per effetto di spostamenti verticali alla base. Tali movimenti verticali possono verificarsi o durante le oscillazioni della torre nelle operazioni di arresto della macchina o nel corso del normale esercizio per una condizione di alto carico di vento. Gli spostamenti verticali sono da imputare anche ai cedimenti differenziali dell'anello per il verificarsi di schiacciamenti localizzati del calcestruzzo sottostante la flangia inferiore dell'anello.

È diventato di recente molto frequente il verificarsi di movimenti verticali eccessivi dell'anello. Si registra che i movimenti di questi anelli possono arrivare fino a 20 mm o più in alcuni casi estremi e questo potrebbe portare a un collasso catastrofico delle turbine.

Sebbene non siano disponibili dati pubblicati sul numero esatto dei cedimenti per ragioni di riservatezza industriale, si ritiene che il problema sia diffuso data la diffusione di tale sistema di fondazione in tutto il mondo [2]. Pertanto, la perdita di solidarizzazione costituisce un danno rilevante e potrebbe provocare non solo il crollo delle torri, ma anche il blocco della produzione, in quanto i sensori ubicati nella navicella rilevando accelerazioni che vanno oltre determinati limiti producono segnali di allerta che di fatto mettono in sicurezza la torre eolica bloccandone l'esercizio.

Le attuali attività di controllo routinario, eseguite dagli operatori del settore sul livello di solidarizzazione tra l'anello o i tirafondi ammorsati e il calcestruzzo armato della fondazione, avvengono solitamente secondo i due approcci, statico e dinamico, ed hanno la finalità di individuare le eventuali aree di distacco e di programmare interventi di ri-solidarizzare. Ad oggi le tecniche di monitoraggio con sensori wireless per la misurazione degli spostamenti dell'anello in condizioni operative della turbina prevedono anche l'emissione di segnali di allerta in caso di escursioni significative. Tuttavia, i recenti episodi di sfilamento dell'anello hanno evidenziato la carenza di tali tecniche e quindi la necessità di avere procedure più affidabili per la verifica della solidarizzazione.

Di seguito, viene proposto un protocollo procedurale per verificare il livello di solidarizzazione dell'anello con il corpo fondazione. Con tale protocollo si vuole valutare la potenza degli spostamenti verticali alla base con una modalità sperimentale che parte dalla scelta degli strumenti da impiegare per poter seguire adeguatamente l'evoluzione del fenomeno. La procedura, confinata alla sola acquisizione della funzione spostamento/tempo, restituisce gli spostamenti verticali relativi tra anello e calcestruzzo ed ha la finalità di individuare eventuali aree di distacco per indirizzare e personalizzare gli interventi di ri-solidarizzazione

## **3. UNA PROPOSTA DI PROCEDURA SPERIMENTALE DI CONTROLLO**

La proposta di procedura sperimentale per il controllo degli spostamenti relativi, di seguito illustrata, previa calibrazione delle frequenze di campionamento e accurata scelta della sensibilità di misura degli strumenti, potrà essere personalizzata e quindi impiegata per qualsiasi tipo di torre

eolica dotata di anello in fondazione. Ovviamente, adottando come condizione di carico l'arresto in condizioni normali, in condizioni di emergenza o in entrambe le modalità di blocco congruentemente con le indicazioni fornite dal costruttore.

Ad oggi i costruttori in base alle caratteristiche delle turbine installate forniscono, inoltre, anche lo spostamento relativo verticale limite non superabile tra l'anello e la fondazione per garantire l'esercizio in condizioni normali. Al di sotto di tale valore si individuano range di spostamenti per cui è consentita comunque la produzione, ma è necessario tenere sotto osservazione la macchina, fino ad un eventuale arresto in caso di raggiungimento e superamento del limite stabilito. Per le turbine eoliche, per come già evidenziato, si prevedono di Norma due procedure di arresto: lo Stop normale e lo Stop in emergenza.

La procedura di controllo degli spostamenti di seguito proposta, per completezza dei casi, comprende entrambe le condizioni di arresto. Per cui si conducono, in sequenze diverse, due test, uno secondo la procedura normale "Normal Stop" e il successivo con arresto in emergenza "Emergency Stop". Ciascun test consiste nel monitorare gli spostamenti alla base generati dal fenomeno oscillatorio innescato all'arresto della macchina. Tali spostamenti sono acquisiti su due punti predeterminati dell'anello e misurati contestualmente, sia con comparatori di spostamento a contatto che mediante ripresa video. Il periodo di osservazione deve iniziare dalla condizione di fermo e continuare per tutto il fenomeno oscillatorio per una durata di circa cinque minuti e comunque con il fenomeno oscillatorio estinto.

L'affidabilità del test aumenta per regimi di carico generati da un vento al tempo di prova che supera i valori di velocità di riferimento indicati dal costruttore.

Sinteticamente la procedura di approccio sperimentale prevede le seguenti azioni cronologicamente organizzate:

1. Fermo macchina. La procedura prevede un monitoraggio degli spostamenti a partire da una condizione iniziale di fermo macchina. Nella condizione di aerogeneratore "non in funzione" le pale risultano ruotate in maniera tale da non subire la sollecitazione dovuta dal vento. Di conseguenza, le membrane resistenti della fondazione, nella configurazione di partenza presentano regimi di sollecitazioni iniziali, dovuti a peso proprio e alla configurazione deformata del fusto;
2. Individuazione della direzione del vento prevalente e dei punti di osservazione. Sulla base di studi statistici dei dati del vento si individua la direzione prevalente. Si determina poi la direzione del vento al tempo del test e su questa si individuano i due punti di osservazione simmetrici rispetto al centro della torre dove posizionare la strumentazione;
3. Applicazione dei comparatori e predisposizione delle camere di ripresa nei punti di osservazione secondo un piano di indagine dedicato, in maniera tale da ridurre al minimo le interferenze dovute alle condizioni al contorno;
4. Verifica delle caratteristiche del vento al tempo della prova. Si controlla che il vento abbia velocità superiore al valore limite e che la direzione sia prossima a quella prevalente. Dopo l'esito affermativo si procede all'avvio delle registrazioni;
5. Verifica delle caratteristiche del vento al tempo della prova. Si controlla che il vento abbia velocità superiore al valore limite e che la direzione sia prossima a quella prevalente. Dopo l'esito affermativo si procede all'avvio dell'aerogeneratore;

6. Verifica della velocità del vento e dell'entrata in produzione dell'aerogeneratore in linea con le richieste di carico dettate e in caso di esito affermativo, si impone la procedura di Normal Stop o di Emergency Stop, a seconda del test da effettuare;
7. Controllo dello smorzamento degli spostamenti rilevati sui comparatori e generati a seguito dell'oscillazione prodotta dalla modalità di stop prescelto e conseguente blocco delle registrazioni.

Gli andamenti dei grafici tipo, individuati con l'acronimo CDB, relativi agli spostamenti verticali ricavati dai comparatori millesimali sono di seguito rappresentati a titolo di esempio per entrambe le condizioni di carico.

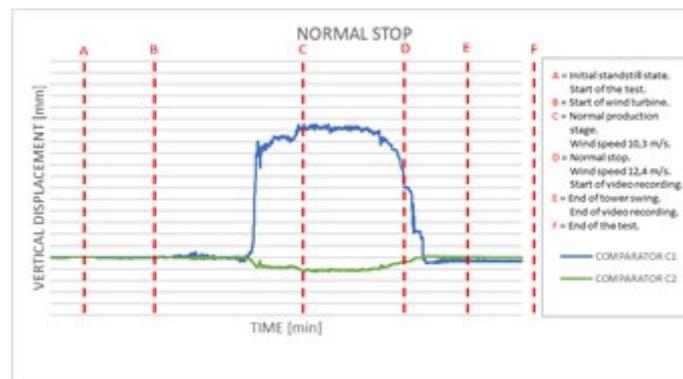


Figure 3. Diagramma tipo CDB per arresto Normale.

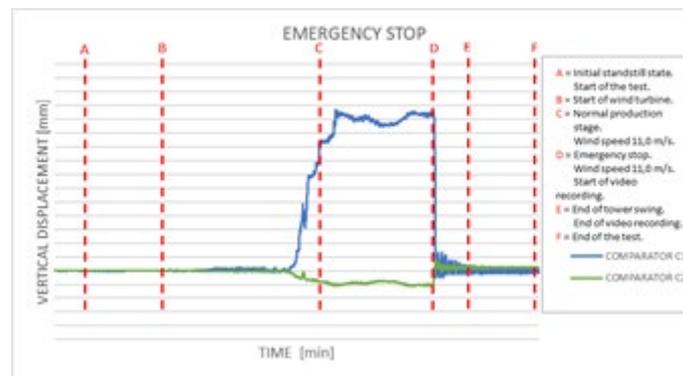


Figure 1. Diagramma tipo CDB per arresto in Emergenza.

L'obiettivo della procedura è quello di controllare se, nelle condizioni di Stop previste per la data tipologia di torre, gli spostamenti verticali dell'anello si mantengono al di sotto della soglia fornita dal costruttore, caso di esito positivo, altrimenti se si supera tale limite l'esito è negativo e di conseguenza è necessario procedere ad eventuali interventi di resinatura per ripristinare la solidificazione del sistema torre-fondazione.

#### 4. CAMPAGNA SPERIMENTALE DI CONTROLLO

Il protocollo procedurale proposto dagli autori è stato validato a seguito di una campagna sperimentale su due gruppi di torri eoliche, presenti sul territorio nazionale e realizzati da due

differenti casa costruttrici, di seguito denominati come A e B. Per brevità di esposizione si restituiscono i risultati sperimentali di soli due casi studio per ciascun gruppo, nominati come: Torre 1A e Torre 2A, appartenenti al gruppo A, e Torre 1B e Torre 2B, appartenenti al gruppo B.

Il costruttore del gruppo A ha previsto, per la misura degli spostamenti alla base, la possibilità di adottare come condizioni di carico della turbina sia la procedura di Stop Normale che quella di Stop in Emergenza. Mentre il costruttore del gruppo B ha previsto solo condizioni di Stop Normale.

La velocità del vento di riferimento per l'esecuzione dei test è stata assunta pari a 7 m/sec per il costruttore del gruppo A e pari a 10 m/sec per il costruttore del gruppo B. Inoltre, sono stati forniti da ciascun costruttore gli spostamenti relativi guida, in particolare i valori consentiti con le relative limitazioni per il Gruppo A ed il valore di riferimento in condizioni di vento normale per il Gruppo B, come di seguito riportate nelle tabelle 1 e 2.

Spostamento verticale $\Delta V$	Osservazione
$\Delta V \leq 1 \text{ mm}$	Valori di spostamento con assenza di anomalie per cui è possibile l'esercizio
$1 \text{ mm} < \Delta V \leq 5 \text{ mm}$	Modesti valori di spostamento con nessuna implicazione sulla funzionalità e sulla riduzione di sicurezza
$5 \text{ mm} < \Delta V \leq 10 \text{ mm}$	Valori di spostamento per cui si ritiene necessaria un'ispezione e un monitoraggio delle fondazioni
$\Delta V > 10 \text{ mm}$	Valori di spostamento per cui si ritiene necessario intraprendere interventi di ri-solidarizzazione

**Tabella 1.** Spostamenti verticali consentiti per il Gruppo A.

Spostamento verticale $\Delta V$	Osservazione
$\Delta V = 0.7 \text{ mm}$	Valore di riferimento dello spostamento in condizioni di vento normale

**Tabella 2.** Valore di riferimento dello spostamento in condizioni di vento normale per il Gruppo B.

Le attività di campo sono state svolte secondo la procedura proposta e solo in alcune circostanze l'arresto dell'osservazione è stato effettuato con lieve anticipo, ma comunque attuato solo dopo aver verificato la presenza di uno stato di smorzamento sui comparatori tendente a zero.

Come si evince dal grafico CDB il test inizia all'istante A con un monitoraggio degli spostamenti a partire da una condizione iniziale di macchina non in esercizio. In tale condizione di fermo sono comunque presenti in fondazione regimi di sollecitazione, dovuti al peso proprio e alla configurazione deformata per l'azione prodotta dal vento sul fusto e sulle pale in condizione di blocco.

Si prosegue con l'avvio della turbina eolica all'istante B e si attende l'entrata a regime della produzione della turbina al tempo C, verificando che la velocità del vento superi il valore preso a riferimento. In caso affermativo si impone all'istante D, a seconda del test da effettuare, lo Stop Normale o in Emergenza.

Eseguito l'arresto prescelto si continua ad acquisire i campi di spostamento e se ne controlla lo smorzamento fino al termine delle oscillazioni e delle riprese video nell'istante E. Il rilevamento degli spostamenti termina all'istante F.

Le misure video eseguite in aggiunta, sono state estese all'intero intervallo di prova, ma possono essere restituite anche solo in parte per attestare le condizioni significative, confinate alle immagini rappresentative che documentano il passaggio, dal massimo spostamento verticale assunto, alla configurazione di fermo macchina.

Prima di restituire i valori sperimentali acquisiti durante la campagna sperimentale di seguito si riportano le attività preliminari.

#### 4.1 SCELTA DEGLI STRUMENTI DI MISURA CON ANALISI PREDITTIVE

Nel progettare le attività di campo sono state preventivamente valutate le caratteristiche delle grandezze da acquisire e individuate in maniera congruente le specifiche tecniche della strumentazione da impiegare, in termini di precisione, fondo scala e frequenze di campionamento.

La scelta della strumentazione è stata effettuata sulla base di analisi numeriche predittive agli elementi finiti finalizzate a:

1. Individuare le grandezze rappresentative del fenomeno oscillatorio da osservare, i tempi di smorzamento e le frequenze, tramite analisi numeriche predittive su modelli FEM di aerogeneratori congruenti con quelli oggetto di analisi;
2. Individuare i valori teorici degli spostamenti verticali attesi, tramite sempre analisi numeriche predittive su modelli FEM di aerogeneratori sia per torri integre che con danneggiamento simulato;
3. Individuare i requisiti tecnici, con riferimento al fondo scala, alla frequenza di campionamento ed alla precisione richiesta, dei rilevatori a contatto e di ripresa visiva, da impiegare per osservare il fenomeno e acquisire dati in giusta frequenza senza ridondanze.

In particolare, a valle delle analisi è stato scelto un comparatore di tipo millesimale con una escursione massima di spostamento rilevabile di circa 5 cm ed è stato installato nei punti prescelti con l'ausilio di basi magnetiche di fissaggio. Il software dedicato per la visualizzazione e l'elaborazione dei dati ha restituito i valori istantanei, i valori massimi e minimi e lo scostamento tra i due in valore assoluto, come riportato nelle figure seguenti



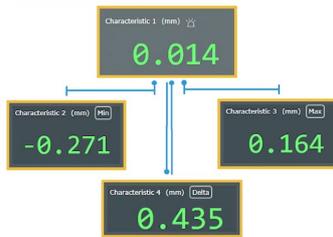


Figure 2. Acquisizione con comparatori e valori restituiti.

Analogamente è stata scelta la camera per la ripresa video da posizionare opportunamente in pianta per una accettabile messa a fuoco di due superfici non collocate sullo stesso piano. La misurazione con registrazione video ha messo a confronto due righelli millimetrati affiancati, collocati uno sul fu-sto della torre e l'altro su un supporto metallico poggiato sul colletto della fondazione. È bene sottolineare che, a causa delle tensioni agenti in prossimità dell'elemento in acciaio annegato nel calce-struzzo e quindi delle deformazioni che avrebbero potuto falsare la prova, si è ritenuto necessario distanziare radialmente le due basi da porre a confronto, andando così a compromettere la perfetta sovrapposizione tra i righelli. Tale distanziamento è stato tenuto in conto nella scelta del posizionamento delle camere digitali cercando un compromesso tra le due scale graduate e la messa a fuoco dei due righelli millimetrati.

È bene precisare che la scelta di questi strumenti dedicati è fortemente legata al tipo di aerogeneratore preso in esame, alle sue specifiche rigidità e alla geometria delle fondazioni che ne influenza il comportamento. Per cui la scelta della strumentazione dovrà necessariamente essere rivisitata in condizioni di rigidità diverse, ossia per altre torri e per altre tipologie di fondazioni.



Figure 3. Acquisizione con camera di ripresa.

#### 4.2 INDIVIDUAZIONE DEI PUNTI DI MONITORAGGIO

Per eseguire i test in condizioni di vento prossime a quella prevalente, determinata dagli studi statistici, le attività di campo sono state programmate quando possibile nei periodi favorevoli. La direzione del vento agente al momento di prova è stata individuata in condizione di fermo macchina e ne è stata verificata la prossimità con quella prevalente. Nella direzione del vento al momento di prova sono state poi individuate sull'anello in maniera contrapposta due punti di acquisizione denominati come C1, per la zona tesa esposta al vento, e C2, per la zona compressa. Questi

costituiscono i punti su cui installare i comparatori e puntare le riprese video per effettuare la misura degli spostamenti, durante tutta l'esecuzione del test.

In alcuni casi il rilievo degli spostamenti è stato effettuato su 4 punti di acquisizione, aggiungendo a C1 e C2 un'altra coppia contrapposta di punti denominati C3 e C4. In questo modo è stato possibile eseguire il test nel solo rispetto del regime di carico sulla turbina generato da vento con velocità maggiore del valore fissato dal costruttore, senza tener conto della direzione prevalente.



*Foto 4. Acquisizione con sui 4 punti.*

#### **4.3 CONDIZIONI DI CARICO E PROCEDURE DI MISURA ALLO STOP**

L'attività sperimentale condotta in opera ha previsto una serie di misure in corrispondenza sia dello stop normale che dello stop in emergenza, secondo quanto indicato di seguito. La procedura ha avuto inizio con l'arresto della turbina e il blocco delle attività produttive. In questa condizione di fermo macchina sono stati collocati gli strumenti e sono state avviate le registrazioni. Dopodiché, la turbina è stata messa in funzione controllando il rispetto del superamento della velocità del vento rappresentativa. A seguito dell'avvio dell'attività produttiva successivamente è stata imposta la procedura di stop: una volta di stop normale e una volta di stop in emergenza. La condizione di stop ha innescato le oscillazioni della torre e la strumentazione ha continuato a misurare gli spostamenti verticali dei punti di acquisizione per tutta la durata del fenomeno. All'arresto delle oscillazioni e verificata la stabilizzazione degli spostamenti sono state interrotte le attività di registrazione

#### **4.4 RISULTATI SPERIMENTALI**

Di seguito, si riportano i risultati della campagna in termini di grafici CDB spostamento verticale/tempo per ciascuna delle due coppie di torri 1A-2A e 1B-2B. Il rilevamento degli spostamenti relativi verticali dell'anello è stato effettuato a seguito delle imposizioni delle due condizioni di carico. In particolare, per ogni torre sono stati effettuati due test separati, uno con imposizione dello Stop Normale e l'altro con quello in Emergenza, ottenendo così due diagrammi CDB distinti, come di seguito riportato nelle figure.

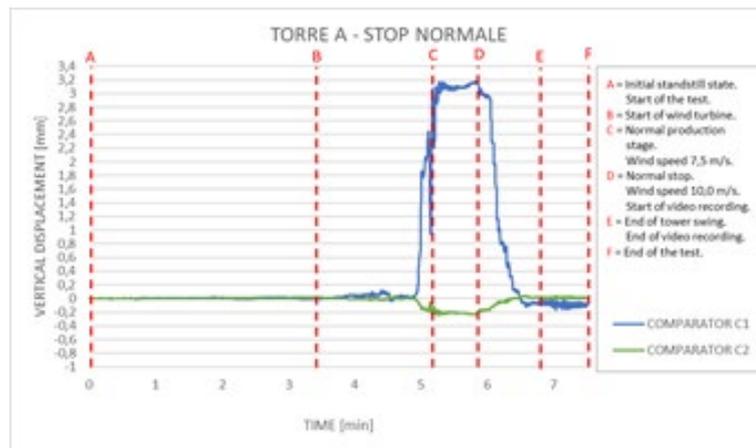


Figure 5. Diagramma Spostamenti CDB Torre 1A per arresto Normale.

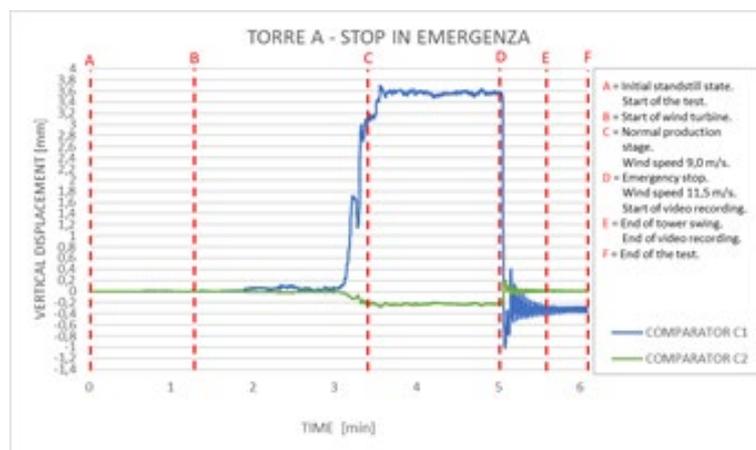


Figure 6. Diagramma Spostamenti CDB Torre 1A per arresto in Emergenza.

Al fine di poter interpretare, congruentemente con le indicazioni di spostamento limite relativo imposto del costruttore, i risultati sperimentali, di seguito si espongono in forma tabellare gli spostamenti massimi negativi, positivi e relativi, rilevati per ciascuna torre nelle due condizioni di arresto.

Condizione di Arresto Normale			
Spostamento	Negativo	Positivo	Relativo
	mm	mm	mm
C1 zona tesa	-0,161	3,188	3,349
C2 zona compressa	-0,239	0,039	0,278
Condizione di arresto in Emergenza			
Spostamento	Negativo	Positivo	Relativo
	mm	mm	mm
C1 zona tesa	-1,022	3,701	4,723
C2 zona compressa	-0,286	0,203	0,489

Table 3. Massimi spostamenti per Torre 1A.

Gli spostamenti relativi della Torre 1A raggiungono valori di 3,349 mm in condizione di arresto normale e di 4,723 mm in emergenza

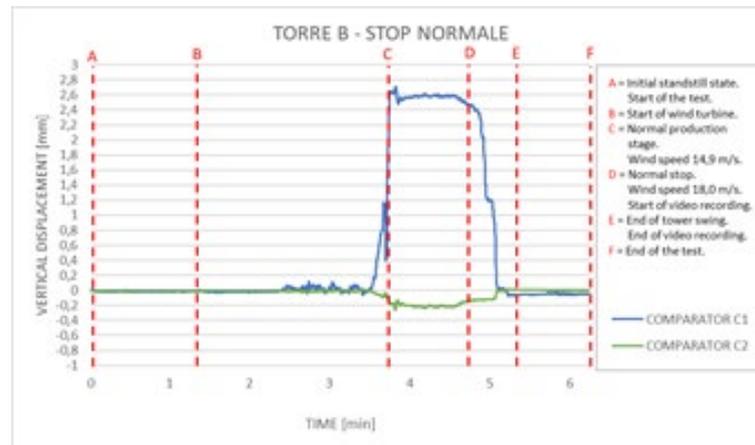


Figure 7. Diagramma Spostamenti CDB Torre 2A per arresto Normale.

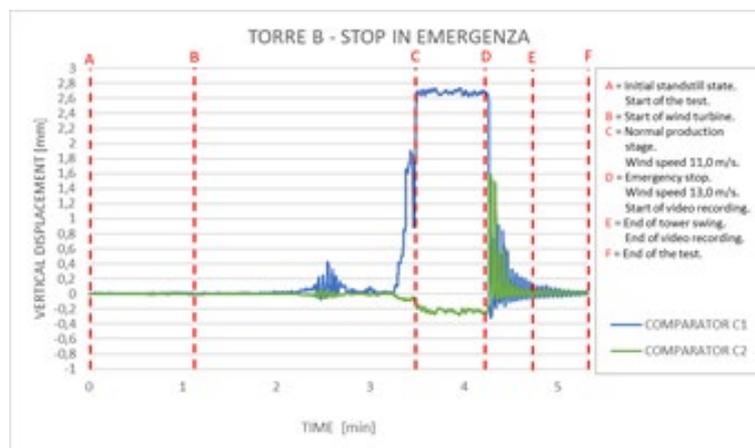


Figure 8. Diagramma Spostamenti CDB Torre 2A per arresto in Emergenza.

Per la Torre 2A si raggiungono spostamenti relativi di 2,784 mm in condizione di arresto normale, e di 3,057 mm in caso di arresto in emergenza.

Condizione di Arresto Normale			
Spostamento	Negativo	Positivo	Relativo
	mm	mm	mm
C1 zona tesa	-0,075	2,709	2,784
C2 zona compressa	-0,260	0,020	0,280

Condizione di arresto in Emergenza			
Spostamento	Negativo	Positivo	Relativo
	mm	mm	mm
C1 zona tesa	-0,317	2,740	3,057
C2 zona compressa	-0,280	1,588	1,868

Table 4. Massimi spostamenti per Torre 2A.

Il confronto con le limitazioni indicate dai costruttori si ottengono risultati confortevoli, si ha che: per la Torre 1A il raggiungimento dello spostamento massimo relativo di 4,723 mm in seguito all'arresto in emergenza, rientrando nel secondo intervallo  $1 \text{ mm} < DV \leq 5 \text{ mm}$ , non comporta alcuna perdita di funzionalità e riduzione di sicurezza; analogamente per la Torre 2A lo spostamento massimo relativo di 3,057 mm in seguito all'arresto in emergenza rientra nei valori accettabili per cui non necessitano né ispezioni né azioni di ri-solidarizzazione tra anello e fondazione in c.a.

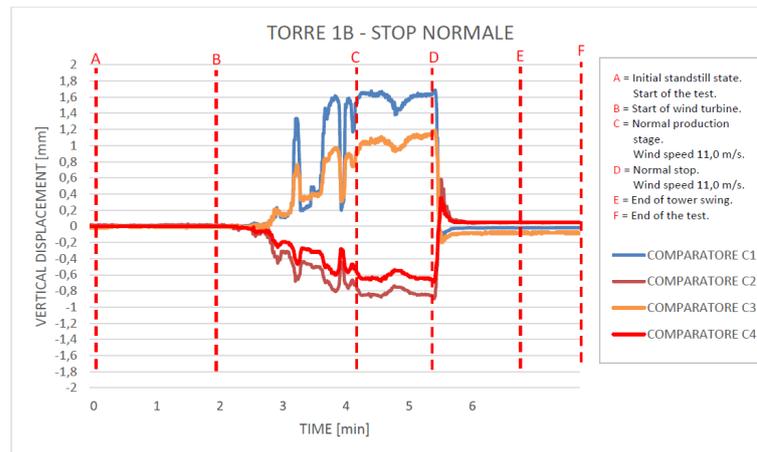


Figure 9. Diagramma Spostamenti CDB Torre 1B per arresto Normale.

Condizione di Arresto Normale			
Spostamento	Negativo	Positivo	Relativo
	mm	mm	mm
C1 zona tesa	-0,135	1,687	1,822
C2 zona compressa	-0,897	0,582	1,479
C3 zona tesa	-0,200	1,190	1,390
C4 zona compressa	-0,690	0,350	1,040

Table 5. Massimi spostamenti per Torre 1B.

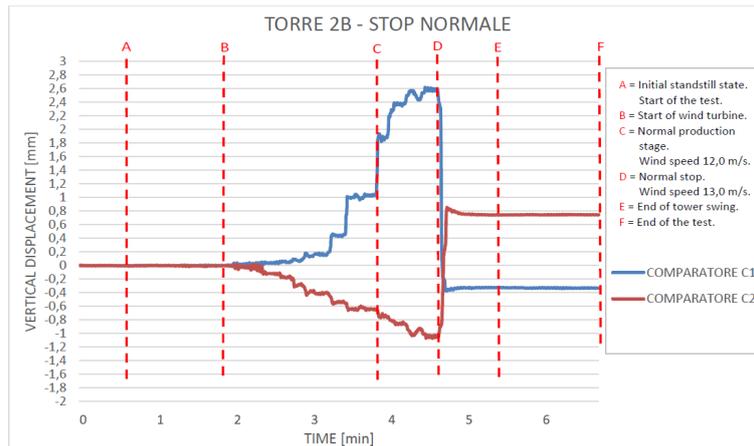


Figure 10. Diagramma Spostamenti CDB Torre 2B per arresto Normale..

Condizione di Arresto Normale			
Spostamento	Negativo	Positivo	Relativo
	mm	mm	mm
C1 zona tesa	-0,374	2,620	2,994
C2 zona compressa	-1,069	0,856	1,925

Table 5. Massimi spostamenti per Torre 2B.

I risultati confortevoli ottenuti dalla sperimentazione validano l'efficacia della procedura proposta che può essere impiegata con continuità nelle attività di controllo.

## CONCLUSIONI

La procedura sperimentale di controllo proposta ha consentito di acquisire, secondo una serie di azioni preordinate, gli spostamenti alla base dei due gruppi A e B di torri eoliche, con la finalità di poter emettere un giudizio sull'affidabilità della solidarizzazione tra l'anello in acciaio e la struttura fondale all'interno della quale risulta ammortato.

Le rilevazioni effettuate, secondo la procedura, hanno restituito valori massimi e minimi che consentono una valutazione di merito sull'affidabilità dell'ammorsamento tra le due parti. Pertanto, è possibile affermare che la procedura proposta può essere impiegata per lo screening su campioni rappresentativi di parchi eolici.

Inoltre, è bene precisare che quanto validato è relativo ad una sola geometria di struttura produttiva. Per cui, al fine di poter rendere applicabile in diversi contesti la procedura proposta, è opportuno, a parere degli scriventi, estendere la campagna sperimentale alle altre tipologie di aerogeneratore, in modo da verificare come i diversi sistemi costruttivi torre-fondazione e le diverse rigidità in gioco possano influenzare la scelta degli strumenti impiegati per le rilevazioni.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Lacalle, S. Cicero, J.A. Álvarez, R. Cicero, V. Madrazo “*On the analysis of the causes of cracking in a wind tower*” Engineering Failure Analysis, February 2011, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2011.02.012.
- [2] Magnus Currie, Mohamed Saafi, Christos Tachtatzis, Francis Quail “*Structural integrity monitoring of onshore wind turbine concrete Foundations*” Renewable Energy 83 (2015) 1131e1138, May 2015.
- [3] Nafsika Stavridou, Charalampos C. Baniotopoulos “*Verification of Anchoring in Foundations of Wind Turbine Towers*” Research Gate, DOI: 10.3844/ajeassp.2015.717.729, April 2015.
- [4] Yang Ma, Pedro Martinez-Vazquez , Charalampos C. Baniotopoulos “*Wind Turbine Tower Collapse Cases: A Historical Overview*” ICE Proceedings Structures and Buildings, DOI: 10.1680/jstbu.17.00167, May 2018.
- [5] Stavridou Nafsika, Efthymiou Evangelos, Baniotopoulos Charalampos “*Wind induced fatigue in wind turbine joints*” WINERCOST '17; The international conference on wind energy harvesting, April 2017, Coimbra, Portugal.



N.16 – April 2023  
ISBN: 979-12-80280-15-2

ISBN 979-12-80280-15-2



9 791280 280152

*EDIZIONI SISMLAB*  
Available online at [www.sismlab.com](http://www.sismlab.com)