



ISAAC S.r.l.

Sede Lega e Operativa Via Magolfa 27, 20143 Milano (MI)
Cap. Sociale € 50.842,09 i.v. - Registro delle Imprese CCIAA Milano Monza Brianza Lodi
Cod. Fiscale e P. IVA 10142270965 - REA MI-2509625
Tel. +39 02 5002 1099 | info@isaacsrl.com

Tower Pro:

Tecnologia per il controllo attivo di torri in acciaio e tralicci

Ing. Stefano Cii e Andrea Codina

Caso studio: torre per le telecomunicazioni

La prima struttura al vero sul quale è stata installata la tecnologia Tower-Pro è una torre per le telecomunicazioni in acciaio, alta 50 metri, di massa complessiva pari a circa 30 tonnellate, di pianta quadrata, rastremata dalla base fino a oltre metà altezza e con sviluppo verticale negli ultimi metri. La struttura è riccamente addobbata con varie infrastrutture per le telecomunicazioni (parabole e antenne) e, trovandosi sulla cima di un monte non lontano dal mare è spesso soggetta a forti venti. Una foto dal basso della struttura in questione è mostrata in Figura 1



Figura 1 – Torre in acciaio per le telecomunicazioni

Le indagini svolte sulla struttura si dividono in quattro fasi:

1. analisi dinamica volta a identificare frequenze propri e modi di vibrare della torre;
2. modellazione con software di calcolo strutturale a elementi finiti (modello FEM) della struttura, opportunamente calibrato sui risultati sperimentali ottenuti al punto 1;
3. dimensionamento del sistema Tower-Pro, in termini forza massima, massa mobile e corsa;
4. verifica dei miglioramenti ottenibili sulla struttura con l'utilizzo del sistema Tower-Pro.

1.1. Analisi dinamica

L'analisi dinamica consente di stimare i parametri modali di una struttura, quali frequenze proprie, smorzamenti adimensionali e modi di vibrare.

In particolare, l'Operational Modal Analysis (OMA) consente di identificare i parametri modali di una struttura misurandone la risposta dinamica provocata da eccitazioni ambientali (ad esempio il vento) anche non completamente note.

Per effettuare l'OMA sono stati montati 6 sensori accelerometrici (da A1 ad A6) sulla struttura dislocati lungo l'altezza della torre per consentire la ricostruzione dei modi di vibrare, secondo lo schema in Figura 2.

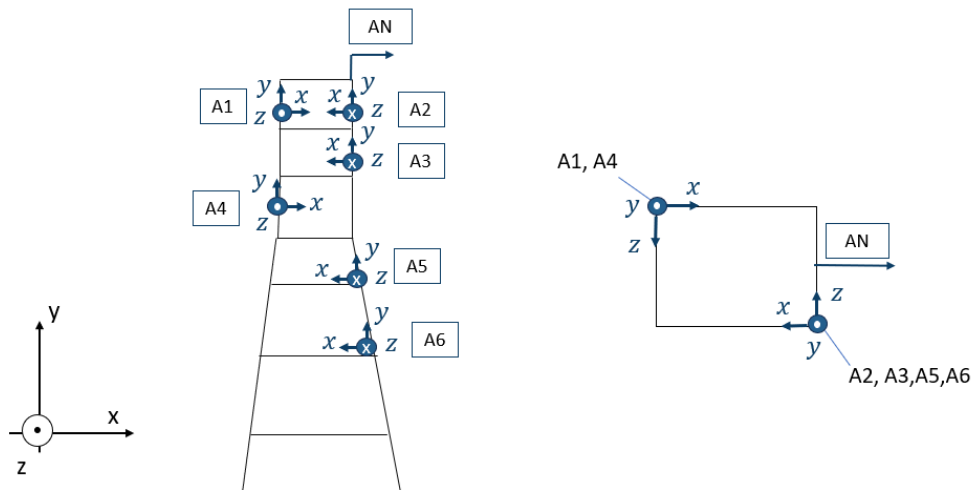


Figura 2 – Schema di installazione degli accelerometri sulla torre



Figura 3 – Esempio installazione accelerometri A1 e A3

Per le analisi sono state prese in considerazione le storie di accelerazione acquisite dal 23/06/2023 al 22/08/2023. Le storie di accelerazione sono state salvate in set da 10 minuti e campionate ad una frequenza di 25 Hz, la quale consente di identificare i modi della struttura fino a 12.5 Hz (oltre il range di frequenze di interesse). Data l'enorme quantità di dati, l'OMA è stato effettuato solo sulle storie di dati più significative in cui la velocità del vento ha avuto un picco superiore ai 10 m/s e un RMS superiore a 9 m/s.

In Figura 6 sono riportati i grafici di velocità e direzione del vento acquisite dal 23/06/2023 al 22/08/2023.

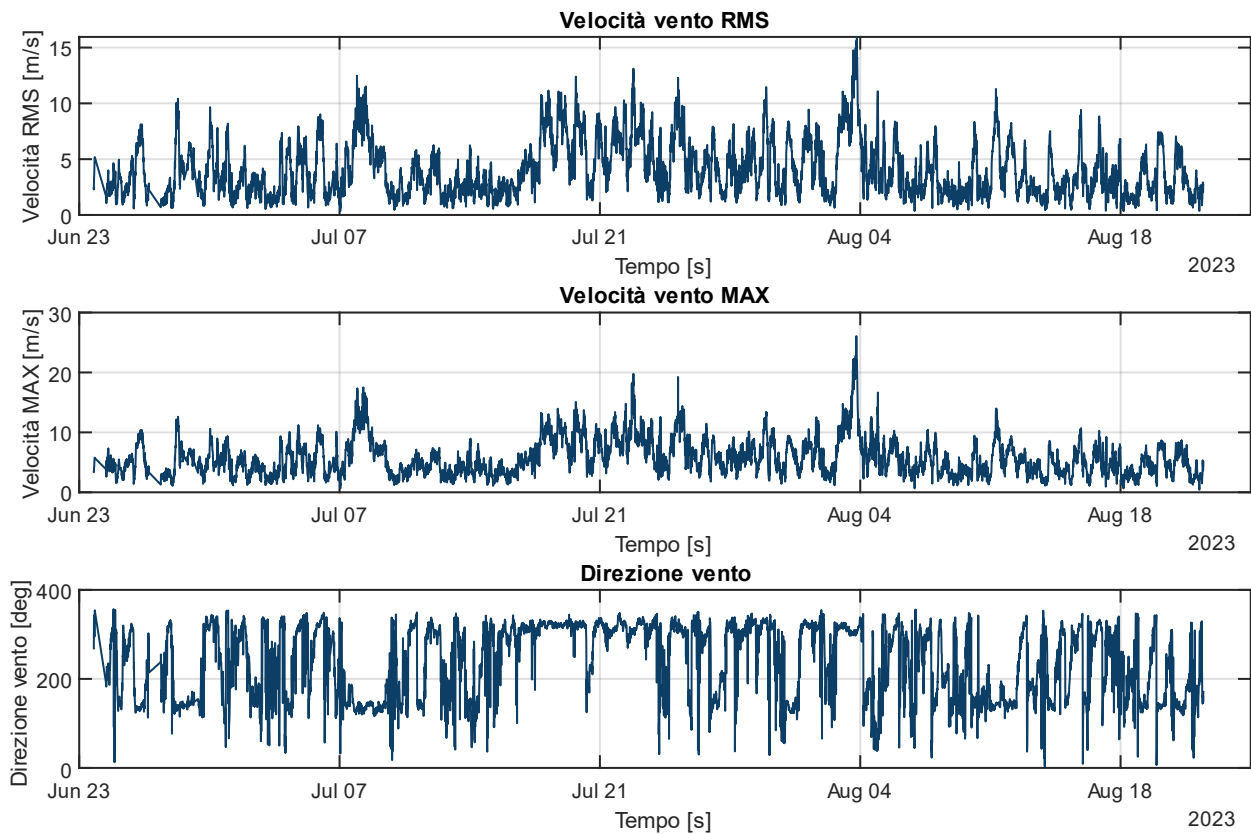


Figura 4 – Velocità e direzione del vento campionati dal 23/06/2023 al 22/08/2023

In Figura 5 sono rappresentati i primi 4 modi di vibrare individuati e ricostruiti tramite OMA.

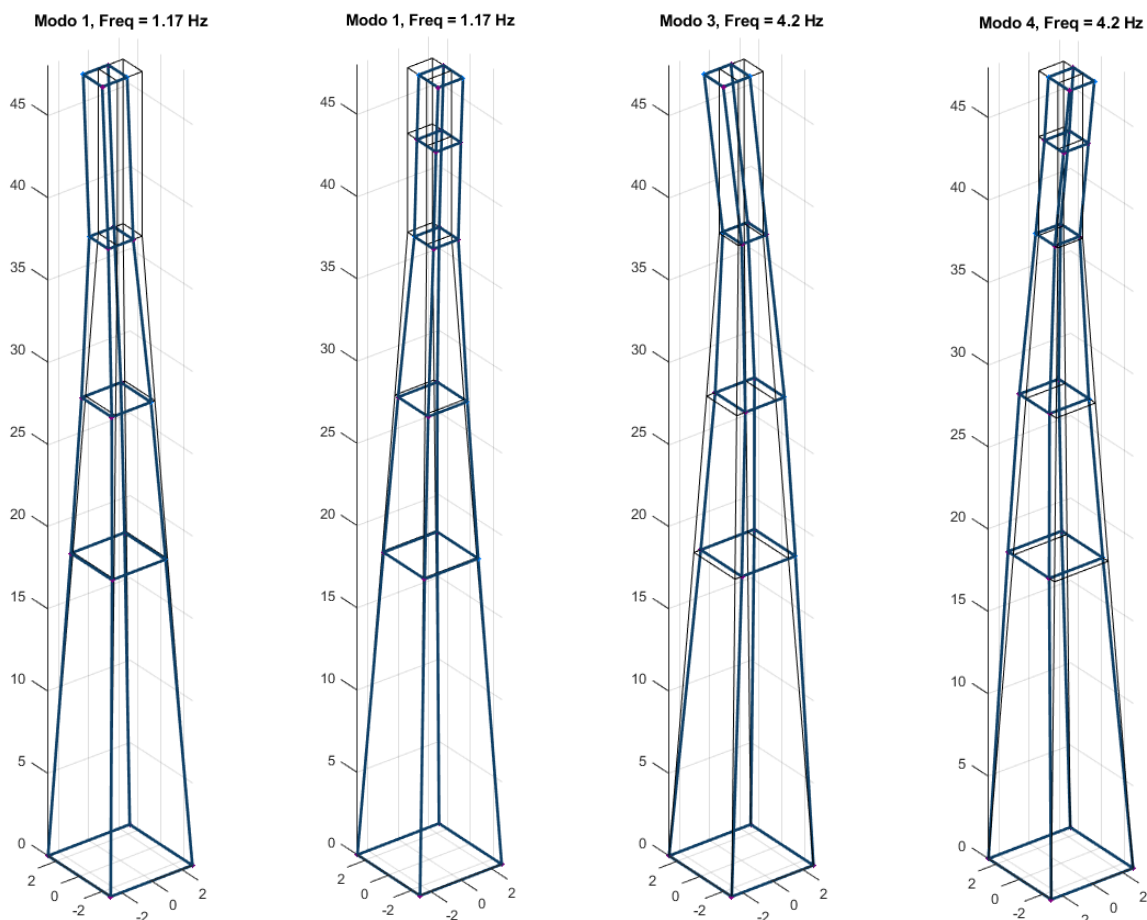


Figura 5 – Forme modali dei primi 4 modi di vibrare identificati tramite OMA

In Tabella 1 sono riassunti i parametri modali dei modi di vibrare identificati tramite OMA. In particolare, si può vedere che lo smorzamento adimensionale dei modi di vibrare dei primi due modi della struttura è molto basso ($< 0.5\%$).

Modo di vibrare	Periodo proprio [s]	Frequenza propria [Hz]	Smorzamento adimensionale [%]	Descrizione
1	0.86	1.17	0.42	Primo modo flessionale in direzione x
2	0.86	1.17	0.32	Primo modo flessionale in direzione y
3	0.24	4.20	0.40	Secondo modo flessionale in direzione x
4	0.24	4.20	0.39	Secondo modo flessionale in direzione y
5	0.18	5.64	0.20	Primo modo torsionale

Tabella 1 – Modi di vibrare identificati tramite OMA

1.2. Modello FEM

Il modello a elementi finiti della torre è stato realizzato con il software di calcolo strutturale SAP2000. Il modello è stato arricchito delle masse di ciascun elemento (parabole e antenne), inserite come masse concentrate nei nodi corrispondenti al punto di installazione. In questo modo si ottiene già una buona concordanza tra le frequenze proprie calcolate numericamente e le frequenze sperimentali misurate in campo sulla struttura reale (si veda a questo proposito il paragrafo 3.1.).

In Figura 6, vengono mostrati i primi 5 modi della struttura con i relativi periodi di oscillazione. Il periodo di oscillazione, la frequenza propria, la massa modale di ciascun modo sono riassunti in Tabella 2, assieme a una breve descrizione del modo in questione.

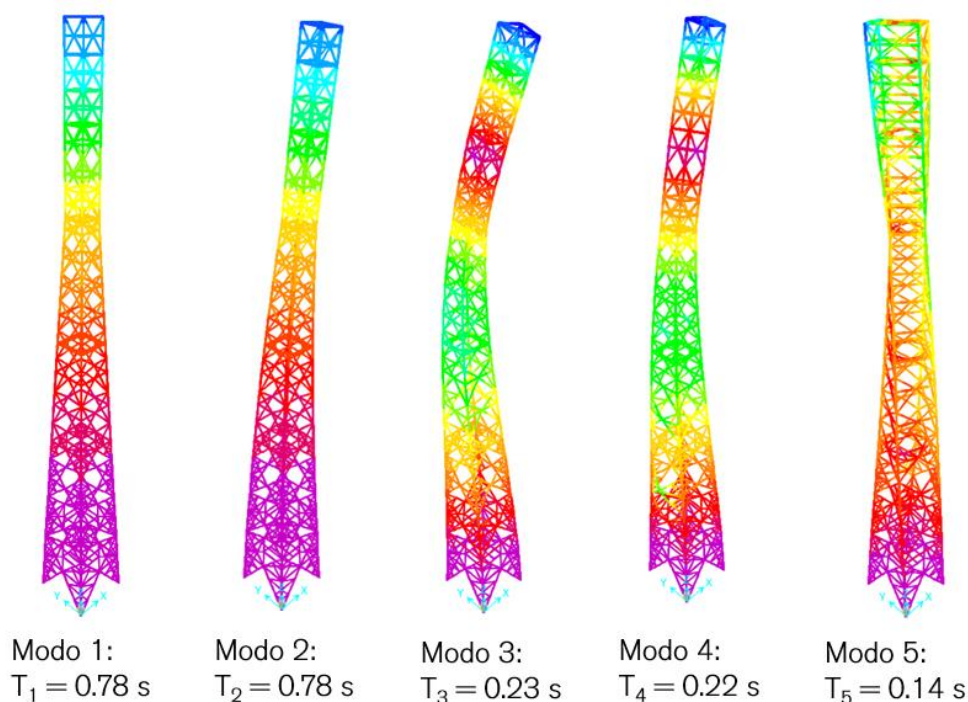


Figura 6 – Primi 5 modi di vibrare identificati dal modello FEM

Modo di vibrare	Periodo proprio [s]	Frequenza propria [Hz]	Massa modale [t]	Descrizione
1	0.78	1.29	12.6	Primo modo flessionale in direzione x
2	0.78	1.29	12.6	Primo modo flessionale in direzione z
3	0.23	4.43	7.05	Secondo modo flessionale in direzione z
4	0.22	4.45	7.23	Secondo modo flessionale in direzione x
5	0.14	5.98	12	Primo modo torsionale

Tabella 2 – Modi di vibrare identificati dal modello FEM calibrato della struttura

Secondo il principio di sovrapposizione modale è possibile considerare il comportamento della struttura come la sovrapposizione di modi indipendenti. In particolare, vale la pena concentrare l'analisi sui modi più significativi per la struttura in questo caso i primi due (primo flessionale in x e primo flessionale in y).

Il singolo modo di vibrare può essere descritto da tre semplici parametri (massa, rigidità e smorzamento equivalenti) che lo rendono equivalenti a un oscillatore armonico semplice (si veda in Figura 7), sul quale verrà di seguito effettuato il dimensionamento del singolo asse meccanico del sistema Tower-Pro. Per effettuare una stima corretta dello smorzamento modale è necessario effettuare l'identificazione dinamica sulla struttura reale, poiché non è possibile estrarre questa informazione dal solo modello FEM.

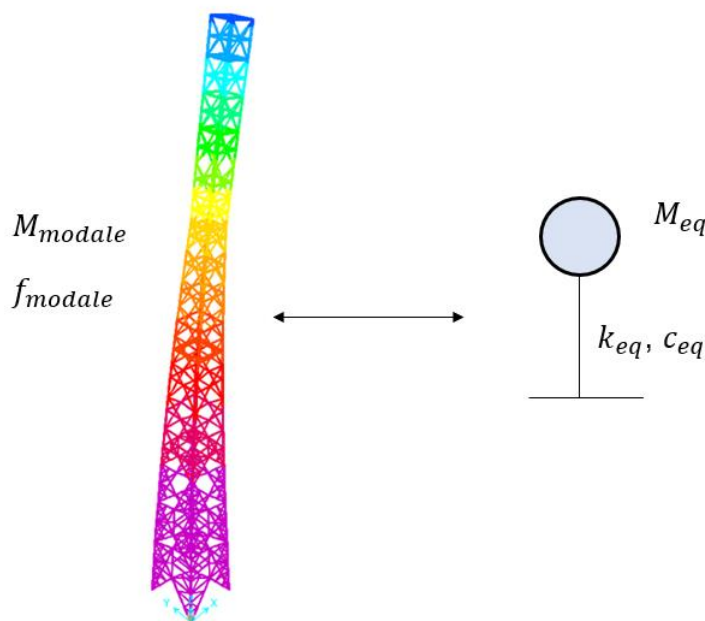


Figura 7 – Approccio modale. Semplificazione della struttura con oscillatore armonico semplice

3.3. Dimensionamento del sistema Tower-Pro

In prima approssimazione, per il dimensionamento dell'attuatore di Tower-Pro, è conveniente considerare la struttura come un sistema a un unico grado di libertà, corrispondente al suo primo modo di vibrare, indipendentemente per le due direzioni principali della struttura (primo flessionale in x e primo flessionale in y). Si parte dall'assunto che i modi di vibrare successivi al primo abbiano

un effetto complessivo piccolo o trascurabile sulla dinamica della struttura, soprattutto nel caso di strutture alte e snelle come la torre in questione.

La modellazione di una struttura complessa con una struttura equivalente a un grado di libertà (Figura 7) semplifica di molto il dimensionamento del sistema.

Nella condizione di massima sollecitazione della struttura si è registrata sperimentalmente un'accelerazione del piano di copertura pari a 0.7 m/s^2 , massimo spostamento di 15 mm, per un vento incidente massimo di 26 m/s. Questo viene considerata come il ciclo di lavoro limite dell'attuatore.

Si è simulata quindi la condizione di oscillazione libera della struttura non controllata e struttura dotata dello smorzatore attivo Tower-Pro a parità di deformazione imposta nell'istante iniziale (in entrambi i casi pari a 15 mm al tetto). Nel caso di struttura dotata del sistema Tower-Pro si mostra anche il grafico della forza (Figura 8).

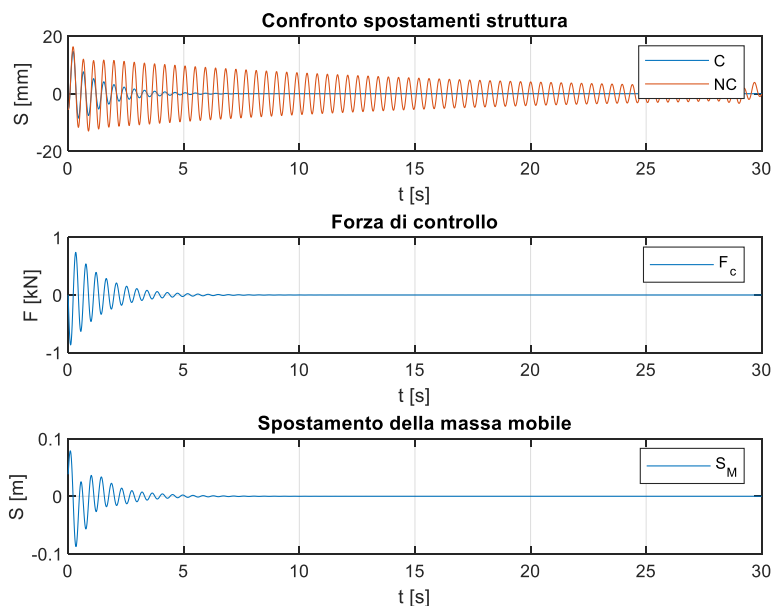


Figura 8 – Nel grafico in alto simulazione “Free-decay” della struttura non controllata (in blu) e della struttura con sistema di protezione Tower-Pro (in rosso). Al centro la forza di controllo erogata dall'attuatore lineare, in basso lo spostamento della massa mobile considerando una massa pari a 60 kg.

La legge di controllo utilizzata, denominata “Sky-hook”, permette alla massa di comportarsi come uno smorzatore equivalente posto tra il punto di applicazione della forza e il terreno. La sua formulazione è:

$$F_c = -G (\dot{x}_{tetto} - \dot{x}_{fondazione})$$

Il parametro G (detto “gain”) viene scelto in modo tale da rendere lo smorzamento totale della struttura controllata pari al 5%, considerato uno smorzamento di partenza pari allo 0.4% (come evidenziato dall’analisi del paragrafo 3.1.).

Considerando la struttura come un oscillatore armonico semplice ricondotto ai parametri del solo primo modo di vibrare l’equazione di moto diventa:

$$M(\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x) = F_c = -G\dot{x}$$

Per il calcolo dello smorzamento adimensionale si utilizza di conseguenza la formula:

$$\frac{G}{2M\omega_0} + \xi = 5\%$$

Per ottenere uno smorzamento pari al 5% il gain di controllo viene imposto pari a:

$$G = (0.05 - \xi) \cdot 2M\omega_0 = 8.5 \frac{kNs}{m}$$

Con uno spostamento imposto pari a 15 mm, la forza di controllo necessaria per incrementare lo smorzamento dallo 0.4% al 5% rimane al di sotto di 1kN. Questo valore di picco è stato scelto per il dimensionamento del motore elettrico. Anche lo spostamento della massa mobile (del valore di 60 kg) rimane contenuta tra +10 cm e -10 cm e richiede dunque una corsa totale di 20 cm.

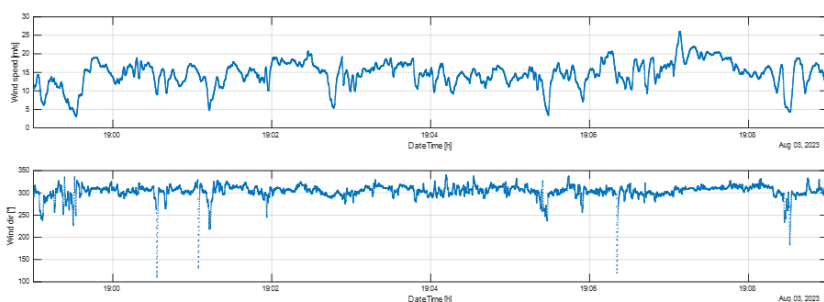
3.4. Stima dei miglioramenti ottenuti

Per stimare i miglioramenti ottenuti con la tecnologia Tower-Pro si valuta la riduzione di spostamento della struttura controllata rispetto alla struttura sprovvista del sistema, a parità di condizioni esterne.

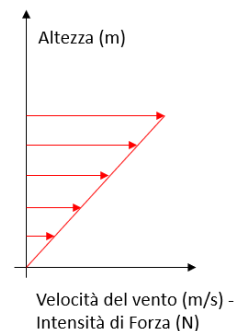
A tal fine la stessa forzante viene imposta nei due casi: struttura non controllata e struttura controllata.

Il profilo temporale della forzante del vento sulla struttura viene ricavata dal profilo di velocità del vento misurato in campo. Data la complessità del fenomeno di interazione tra vento e struttura per quantificarne l’ampiezza viene utilizzato un fattore di scala tale da far coincidere la massima accelerazione del piano di copertura misurata sperimentalmente con la massima accelerazione ottenuta dalla simulazione numerica. Infine, per la distribuzione spaziale delle forze di interazione

generate dal vento viene adottato un profilo di forze triangolare, massima forza in sommità e forza nulla al suolo, come in Figura 9.



Storia temporale di vento



Distribuzione spaziale di vento

X Fattore correttivo

Figura 9 – Definizione dei carichi da vento

Le accelerazioni calcolate dal modello FEM con e senza controllo vengono confrontate in Figura 10

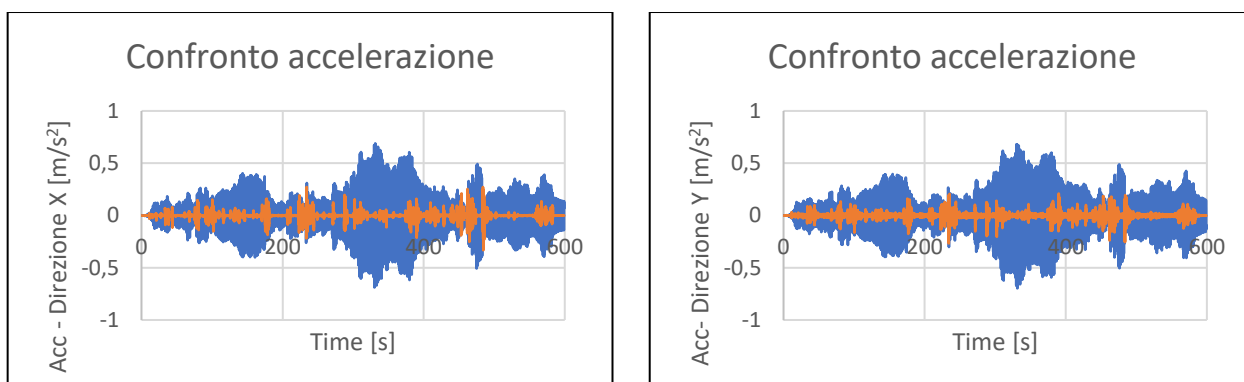


Figura 10 – Confronto accelerazione sulla struttura controllata e non controllata in direzione x (a sinistra) e in direzione y (a destra).

In direzione x, l'accelerazione massima della struttura passa dagli 0.7 m/s^2 del sistema non controllato agli 0.33 m/s^2 della struttura con il sistema Tower-Pro attivo, con una riduzione percentuale del 53%.

In direzione y, l'accelerazione massima della struttura passa dagli 0.7 m/s^2 del sistema non controllato agli 0.26 m/s^2 della struttura con il sistema Tower-Pro attivo, con una riduzione percentuale del 63%.