



Analisi dinamica e sismica di una ciminiera alta in muratura

Elvis Cescatti^{a,b}, Filippo Lorenzoni^{a,b}, Mirko Sgaravato^b, Claudio Modena^{a,b}

^a Dipartimento di Ingegneria Edile Civile e Ambientale, Università degli Studi di Padova, via Marzolo, 9, Italy

^b SMIngegneria s.r.l., Via Dell'Artigianato 7, Caselle di Sommacampagna, Verona, Italy

Keywords: muratura, edifici sistenti, modelli numerici, analisi dinamica, ciminiera, identificazione dinamica

ABSTRACT

The seismic response of masonry structures under seismic loads is an interesting topic of research and this becomes even more attractive with tall and slender structures, as in case of chimneys, where the dynamic behaviour plays a detrimental role. The spectral position of natural periods, typically high for slender structures, varies significantly the seismic demand, and the contribution of higher modes cannot be neglected. In this framework an accurate dynamic identification test was performed.

The case study presented in the paper is a brick masonry chimney located in San Bonifacio (Verona – Italy) with a height of 44 m with a squared base 5 m wide and 5 m high and the funnel is tapered with an external diameter from 5 m to 2.5 m.

A deep and accurate knowledge phase has been carried out performing NDT and MDT tests to define the precise geometry (Laser scanner, GPR) and to characterize materials in terms of mechanical properties (flat jacks) and chemical components and degradations. Indeed, the thermic degradation of bricks and mortar could affect also mechanical properties.

A series of analysis to evaluate the structural response are presented to account for all dynamic effects of the structure. Based on ambient vibration test results a numerical model was compared with the ID results, thus increasing the FE models reliability.

The results of the dynamic analyses pointed out the need of strengthening of the structure specifically in the higher part of the structure. With the aim of improving the seismic response, an evaluation on interventions and on their calculations is presented. The designed interventions pointed out the possibility to significantly increase the overall seismic performance of the chimney itself.

1 INTRODUZIONE

Nell'ambito della valutazione della sicurezza strutturale degli edifici esistenti in muratura, un caso particolare è rappresentato dalle ciminiere, che come le torri particolarmente snelle, presentano rapporti di forma, e conseguentemente di comportamento, significativamente diversi dalle usuali strutture in muratura.

In particolare le maggiori differenze riguardano il comportamento dinamico di tali strutture dove i modi superiori di vibrare svolgono un ruolo non trascurabile sulla dinamica complessiva della strutture (Ivorra 2014, Minghini 2014). Inoltre, la variazione lungo l'altezza dello sforzo normale, modifica considerevolmente il momento resistente

della sezione e conseguentemente i rapporti di verifica. Il lavoro presenta lo studio di una ciminiera in muratura di un Ex-Zuccherificio localizzato a San Bonifacio in provincia di Verona. Lo studio mostra lo sviluppo della fase della conoscenza particolarmente approfondito con particolare riferimento all'identificazione dinamica. Sebbene infatti l'effettiva risposta di una struttura all'eccitazione sismica alla base dipenda dall'evoluzione delle sue proprietà dinamiche durante il transiente, la loro conoscenza per bassi livelli di vibrazione è rilevante. Le proprietà modali in condizioni operative sono infatti responsabili del comportamento strutturale in regime lineare e il progressivo aumento del periodo naturale è conseguenza dell'eccitazione

sismica alla base e della sua intensità (Rainieri & Fabbrocino 2011).

I risultati delle indagini sono stati utilizzati per lo studio e la calibrazione dei modelli di calcolo per le successive verifiche, nonché per lo studio degli interventi di rinforzo necessari al miglioramento sismico della struttura.

2 IL CASO STUDIO

La ciminiera in muratura è stata costruita all'inizio del XX secolo al servizio dello stabilimento produttivo di San Bonifacio per la lavorazione della barbabietola da zucchero. In origine la struttura della ciminiera nasceva come indipendente ma successivamente è stata parzialmente inglobata all'interno di fabbricati aggregatesi nel tempo (Figure 1 e 2).



Figura 1. Vista aerea dell'ex-zuccherificio e della ciminiera.

La ciminiera ha un'altezza dal piano campagna di 44,2 m e una base di 5 m. Da un punto di vista dei rapporti geometrici L/H si hanno valori di circa 1/8-1/10 del tutto simili a quelli dei campanili. Il rilievo geometrico è stato svolto con tecniche topografiche e con un rilievo laser-scanner.

Attraverso l'analisi visiva e il rilievo si è riscontrato un lieve fuori-piombo nella porzione sommitale che dovrà essere adeguatamente verificato. Inoltre attraverso un'analisi ravvicinata con drone è stato possibile rilevare fessurazioni e sconnessioni locali lungo la canna a sezione circolare.

L'obiettivo della fase di studio è quello di valutarne la sicurezza strutturale anche da un punto di vista sismico e pianificare eventuali interventi per raggiungere un livello di adeguamento, deciso dal committente a seguito della verifica di sicurezza, secondo la circolare esplicativa ed NTC2018, pari a $\zeta_E=0.8$.



Figura 2. Vista area da drone della parte sommitale della ciminiera.

2.1 Geometria e caratteristiche costruttive

La ciminiera è composta sostanzialmente da due macro-elementi murari: il basamento di spessore massimo pari a 130 cm e il tipico camino a sezione variabile rastremata, realizzato a doppia canna (per buona parte dello sviluppo in altezza) con 8 muri trasversali di collegamento.

Il basamento presenta una pianta quadrata di dimensioni in pianta pari a 5x5m e si sviluppa per un'altezza di circa 8,5 metri, al di sopra del quale vi è un capitello modanato.

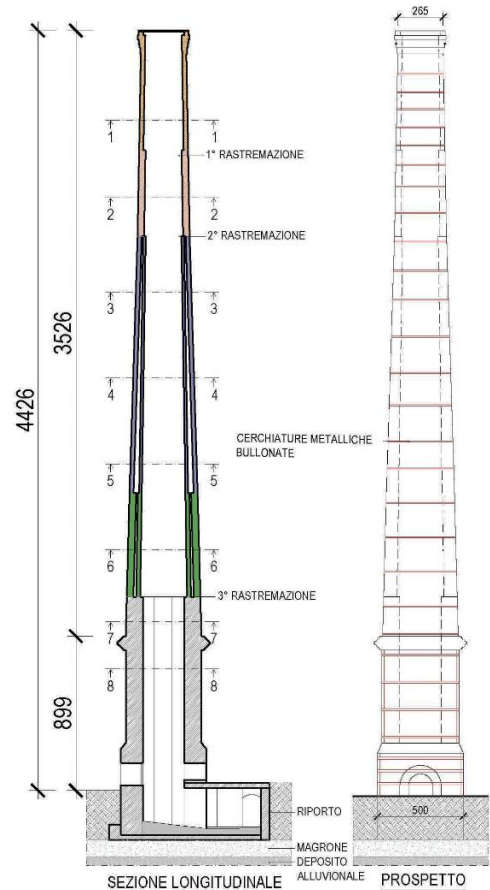


Figura 3. Sezione longitudinale e prospetto della ciminiera.

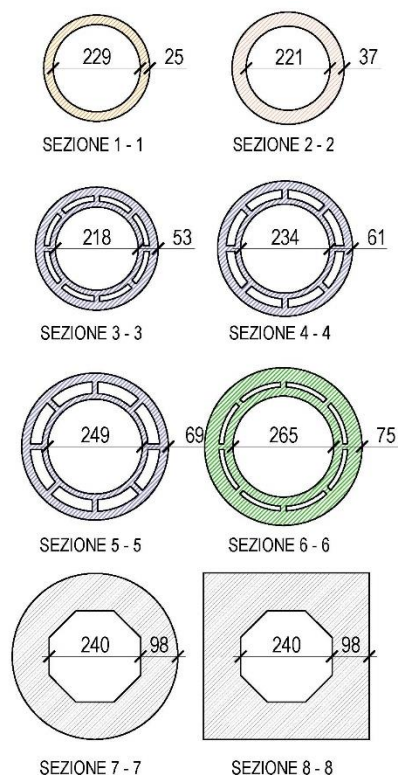


Figura 4. Sezioni della ciminiera alle differenti quote.

Alla quota di 9,0 metri, rispetto al piano di campagna, la ciminiera inizia ad assumere la tipica forma conica con la base circolare dal diametro di 4,35 metri che si rastrema fino ad un diametro di 2,80 metri sulla sommità (Figura 4). Il camino raggiunge uno sviluppo di 35 metri in altezza, mentre la struttura dell'intera ciminiera compreso il basamento raggiunge i 44,2 metri rispetto al piano di campagna.

Attraverso molteplici indagini consistenti in fori alle varie altezze, video-ispezione, indagini georadar (Deiana 2019) e laser scanner si è riusciti a ricostruire la geometria della struttura alle varie quote. Le sezioni di seguito rappresentate mettono in evidenza come la camera d'aria sia variabile lungo l'altezza. Internamente la geometria della sezione varia da ottagonale alla base a circolare con diametro esterno variabile lungo lo sviluppo in altezza.

Le strutture di fondazione risultano composte da un basamento importante in muratura di spessore pari a circa 2 m poggiante su uno strato di magrone di altrettanti 2 m circa posato su sabbia. Il sistema fondazionale è integrato con un sistema di cunicoli che servivano originariamente quando la struttura era in funzione per alimentare il "fuoco".

L'intera struttura, ad esclusione del capitello lapideo, è composta da laterizio faccia a vista confinato per tutta la sua altezza da cerchiature in

ferro bullonate poste a distanza variabile. Il dettaglio costruttivo dell'epoca di costruzione ha evidenziato nel tempo segni di cedimento, in particolare una delle cerchiature, proprio in corrispondenza del giunto bullonato, si è spezzata e in generale denota un quadro fessurativo locale composto da fessurazioni verticali (Figura 5), associabili probabilmente agli stati di sollecitazione dovuti agli effetti termici generati dai fumi caldi ascendenti all'interno lungo tutto il periodo dell'anno.



Figura 5. Dettaglio della fessurazione dovuta alla non efficace giunzione delle cerchiature preesistenti.

2.2 Caratterizzazione geotecnica

Sono state eseguite indagini geotecniche e geofisiche per analizzare la stratigrafica dei terreni alla base. I sondaggi eseguiti hanno evidenziato strati di buone caratteristiche meccaniche composte da sabbie e ghiaie sotto il basamento murario. I sondaggi, spinti a 10 m di profondità, sono stati eseguiti in corrispondenza del basamento della ciminiera, rispettivamente a Ovest e a Est della stessa.

Il primo sondaggio intercetta per circa 2 m una muratura in cotto, sotto cui si individua uno strato di altrettanti 2 metri di sottofondo artificiale costituito da ghiaia sabbiosa.

Il substrato alluvionale naturale si individua a profondità di 4.5 m dal p.c. ed è costituita da sabbia ghiaiosa passante a circa 7.5 m di profondità a ghiaia sabbiosa. Nel sondaggio S2 la muratura in cotto è ridotta ai soli primi 60 cm, mentre il sottofondo artificiale si spinge fino a 5.3 m dalla quota di inizio carotaggio.

A livello fondazionale quindi la struttura poggia su terreni di buone caratteristiche meccaniche (vedi Figura 3) dettate dal sottofondo alluvionale e dallo strato artificiale realizzato per impostare le fondazioni in muratura. Da un punto di vista deformativo e del quadro fessurativo infatti non sono riscontrabili problematiche dovute a cedimenti di tipo fondazionale.

3 INDAGINI E CARATTERIZZAZIONE MATERIALI

In parallelo all'acquisizione di precisi dati geometrici della struttura si è eseguita un'accurata caratterizzazione dei materiali valutando le proprietà meccaniche attraverso l'esecuzione di martinetti piatti e attraverso prove chimico-fisiche si è valutata la composizione originale e lo stato di conservazione.

3.1 Analisi chimico-fisiche malte

Per poter fare delle comparazioni tra lo stato iniziale e degradato dei materiali si sono eseguiti, tramite dei carotaggi continui orizzontali, dei prelievi di muratura a diverse profondità della sezione muratura. Si sono quindi ottenuti dei campioni sul lato interno esposti al calore dei fumi del camino e dei campioni al centro della sezione che sono stati quindi limitatamente esposti ad agenti di degrado. Le prove hanno riguardato l'esecuzione di prove a diffrazione ai raggi-X (XRPD) per valutare il profilo mineralogico delle fasi presenti, e prove microscopiche a scansione associate a microanalisi chimiche a dispersione di energia (SEM-BSE) (Secco, 2017).

Da un punto di vista della composizione, la malta è piuttosto omogenea con rapporti legante/aggregato di 1:3 con una prevalenza di clasti silicatici e subordinatamente carbonatici. Il legante è costituito da una composizione mista a base di calce e cemento Portland con alcune variazioni riconducibili al confezionamento manuale del tempo. Le malte sono quindi delle malte bastarde di buona costituzione. Dalle analisi nelle parti più esposte, in particolare all'interno della canna, si osserva un consistente fenomeno di degrado dovuto ad effetti termici con una matrice legante fortemente fratturata, porosa e decalcificata. Storicamente, durante l'utilizzo della ciminiera si sono eseguite diverse riparazioni e ristilature a base di gesso. L'estensione del degrado è comunque ridotta e relativa alla superficie della muratura interna alla ciminiera che non comporta quindi problemi di degrado dei materiali a livello globale.

3.2 Martinetti

La caratterizzazione meccanica della muratura è stata eseguita mediante un martinetto singolo e doppio alla base della ciminiera e, per disturbare eccessivamente il basamento due martinetti doppi sono stati eseguiti in prossimità della ciminiera su

murature in mattoni coeve. Il martinetto piatto singolo è stato eseguito in prossimità dell'arco soprastante l'apertura di accesso alla ciminiera ed ha confermato una concentrazione locale di sforzo restituendo un valore di tensione di esercizio pari a 1.16 MPa. Valutando invece la tensione media nella rimanente parte della sezione dovuta ai pesi propri si ottengono valori negli intorni di 0.30 MPa, circa un decimo del limite elastico mostrato dal martinetto. Tabella 1 mostra i risultati della prova ai diversi cicli eseguita secondo le linee guida RILEM ed interpretate in accordo a Cescatti (2016). Viene quindi anche valutato il modulo elastico secante nel ramo di scarico (vedi Figura 6 in grigio) ed il suo valore medio viene assunto come modulo elastico della muratura testata.

I valori delle prove eseguite sulle murature limitrofe hanno confermato i valori desunti dal presente martinetto. I moduli elastici medi sono nell'ordine dei 4800 MPa e mostrano un comportamento quasi elastico fino a 2.5 MPa riconducibile al carico di prima fessurazione (Binda 2000, 2007). Questo indica quindi una muratura molto resistente e con moduli elastici molto importanti considerando i range di normativa per i mattoni pieni, anche tenendo conto di una buona muratura.

Tabella 1. Risultati della prova di martinetto piatto.

Step di carico [MPa]	E Tangente [MPa]	E Secante sc. [MPa]
0.30	5607	5494
0.60	5376	5404
1.00	5068	5279
1.50	5067	5217
2.00	4843	5152
2.50	4021	4965
3.00	2964	4599
3.50	1972	4139
4.00	1396	3696

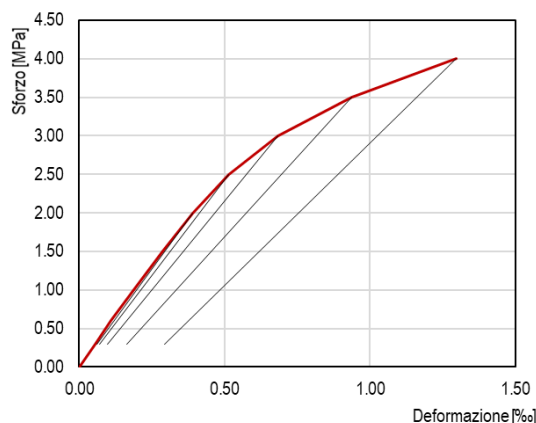


Figura 6. Grafico sforzo deformazione ottenuto con il martinetto e rami di scarico.

4 IDENTIFICAZIONE DINAMICA

Il comportamento dinamico della ciminiera è stato caratterizzato attraverso l'analisi modale sperimentale, sfruttando il rumore ambientale come fonte di eccitazione della struttura nel range di frequenze di interesse. L'estrazione dei parametri modali (frequenze naturali, fattori di smorzamento e forme modali) è avvenuta tramite l'applicazione di tecniche non parametriche *output-only* nel dominio delle frequenze, basate sulla decomposizione in valori singolari della matrice dei cross-spettri, che prendono il nome di Frequency Domain Decomposition (FDD) e Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) (Brincker et al. 2000, Brincker et al. 2001). Tali tecniche, a partire dalla stima della matrice di densità spettrale (PSD), operano una decomposizione ai valori singolari (SVD). Il primo valore singolare corrisponde, per ogni frequenza, allo spettro in potenza di un sistema a un grado di libertà. Dalla rappresentazione grafica dello spettro dei valori singolari, è possibile individuare i picchi a cui corrispondono i modi di vibrare. La tecnica EFDD permette inoltre di determinare i rapporti di smorzamento con il metodo del decremento logaritmico.

4.1 Set-up

La caratterizzazione sperimentale dei parametri dinamici della ciminiera è stata svolta sfruttando la sola eccitazione ambientale. La risposta dinamica della struttura è stata misurata attraverso l'installazione di una rete di 14 accelerometri lungo il fusto della ciminiera. In ciascuna delle 7 posizioni sono stati installati due accelerometri piezoelettrici uniassiali ad alta sensibilità del tipo PCB 393B12 diretti lungo le 2 direzioni principali (tangenziale e parallela rispetto alla sezione orizzontale circolare del manufatto) (Figura 7).

Gli accelerometri installati sono caratterizzati da una banda a 3dB di circa 4000 Hz, da un fondo scala di ± 0.5 g e da una sensibilità di 10,000 mV/g. L'acquisizione è stata effettuata tramite hardware National Instrument e software dedicato di acquisizione dei segnali, sviluppato in ambiente LabView. RegISTRAZIONI di durata pari a 20 minuti sono state effettuate con una frequenza di campionamento di 100 Hz. Le analisi sono state condotte applicando una finestra di Hanning per ridurre i problemi di *leakage*, e adottando un *overlap* (sovrapposizione delle finestre) del 66%.

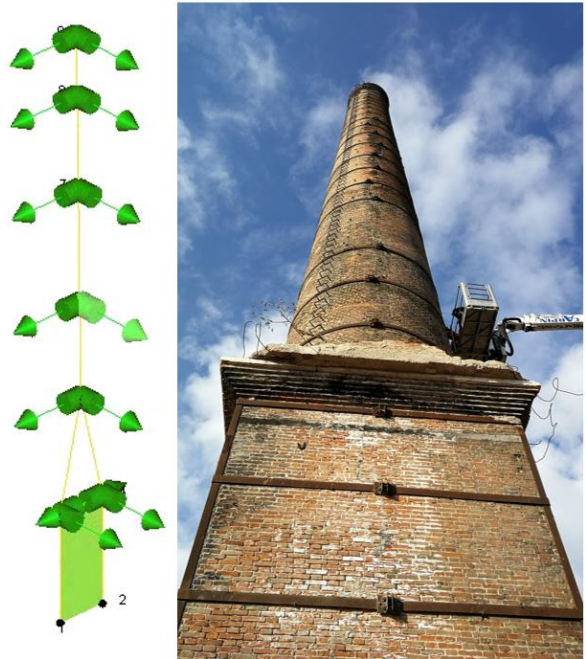


Figura 7. Indicazione del set-up di acquisizione e vista esterna della ciminiera.

4.2 Risultati

L'identificazione dinamica della struttura ha consentito l'estrazione dei parametri modali a partire dai picchi di risonanza della matrice dei cross-spettri (Figura 8).

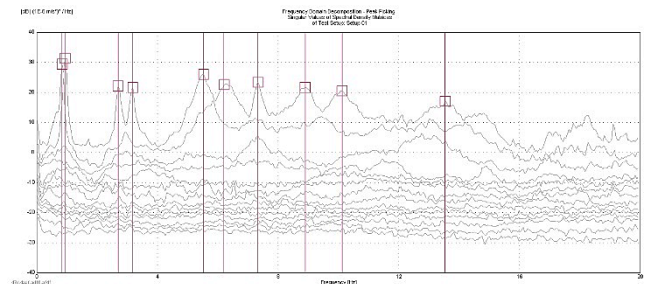


Figura 8. Spettro nel campo delle frequenze ed identificazione dei modi.

Tabella 2. Frequenze identificate tramite identificazione dinamica.

n.	Freq. [Hz]	Tipo modo	n.	Freq. [Hz]	Tipo modo
1	0.83	I flex - x	5	5.52	III flex - x
2	0.93	I flex - y	6	6.20	III flex - y
3	2.87	II flex - x	7	7.32	I tors
4	3.17	II flex - y	8	8.89	IV flex - x

In Tabella 2 sono riportati i modi principali della struttura identificati sperimentalmente. Poiché la ciminiera è costituita da un corpo isolato con elevata simmetria in pianta, i modi di vibrare risultano a due a due accoppiati a frequenze estremamente ravvicinate (*closely-spaced modes*) e con forme modali tra di loro ortogonali. I primi

sei modi identificati corrispondono alle forme modali di tipo flessionale di 1°, 2° e 3° ordine nel range 0.8-6 Hz, seguite da un modo torsionale a 7.3 Hz e da un'ulteriore coppia di modi flessionali (4° ordine) tra 9-10Hz.

5 MODELLAZIONE

5.1 PROBLEMI DELLE STRUTTURE SNELLE

Il caso studio in esame appartiene alla categoria delle torri snelle in muratura che presentano una serie di criticità strutturali legate principalmente a:

- problemi di instabilità;
- elevata deformabilità;
- variabilità delle sollecitazioni lungo l'altezza;
- vulnerabilità influenzate dallo stato di danneggiamento e dall'interazione con il terreno o con le strutture adiacenti ad esse collegate;
- risposta dinamica dominata dai modi superiori che possono innescare meccanismi di collasso locali delle parti sommitali.

Per tali tipologie di strutture, pur con le dovute cautele, anche i modelli lineari possano fornire indicazioni utili ed attendibili, in quanto la redistribuzione delle sollecitazioni in una struttura sostanzialmente isostatica è sempre modesta. Inoltre il modello viene principalmente utilizzato per estrarre le azioni sollecitanti sulle sezioni che vengono confrontate con quelle resistenti calcolate a mano. Ciò consente l'utilizzo dell'analisi dinamica, in particolare di quella modale, particolarmente importante per comprendere gli aspetti di amplificazione del moto (Linee Guida BC 2010). In quest'ottica l'utilizzo combinato di procedure sperimentali e numeriche per la corretta identificazione della risposta dinamica (in campo lineare) appare una corretta strategia per la valutazione della vulnerabilità di tali strutture.

Nel caso della ciminiera, i parametri modali estratti sperimentalmente sono stati impiegati per la calibrazione e validazione dei modelli numerici, utili alla comprensione del comportamento sismico, alle verifiche di vulnerabilità allo stato di fatto e al progetto di eventuali interventi di miglioramento sismico.

5.2 FEM

Il modello è stato generato con l'uso di elementi bidimensionali a *plate* seguendo gli assi della

muratura. Particolare attenzione è stata posta alla modellazione della doppia canna dove si è tenuto conto dei setti radiali che connettono la canna sottile interna a quella esterna di maggior spessore (Figura 9).

L'analisi modale ha evidenziato nei primi sei modi la presenza dei tre modi flessionali disaccoppiati ed il settimo modo rappresentato da un modo torsionale (Figura 10). Dall'accoppiamento dei modi si evidenzia uno scambio di posizione del terzo modo flessionale tra il modello FEM ed i valori ottenuti dall'identificazione.

5.3 Confronto tra identificazione e modello

Nel modello si è partiti da una densità del materiale di ρ pari a 1800 kg/m^3 e da un modulo elastico di 4800 MPa. Successivamente, a seguito di una calibrazione manuale delle frequenze si è ottenuto un valore del modulo elastico pari a 3600 MPa e un valore del modulo di taglio pari a 1800 MPa che conduce ad un errore medio tra le frequenze pari al 3% e che può considerarsi soddisfacente per una calibrazione manuale. I parametri modali ottenuti sono riportati in Tabella 3 e Figura 11.

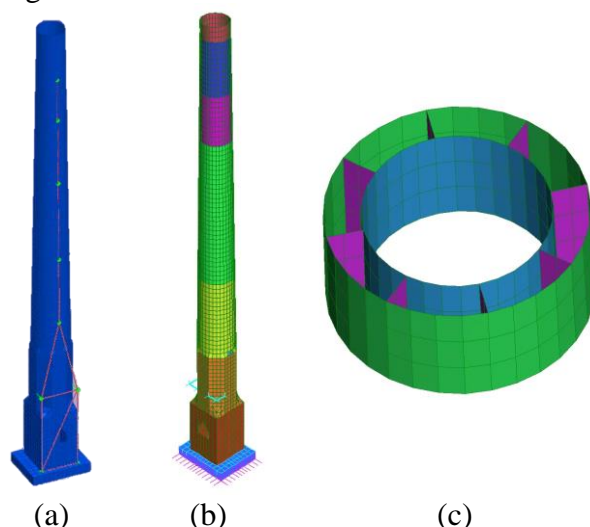


Figura 9. Vista del modello per il confront con l'ID (a) vista del modello FEM (b) e dettaglio della mesh (c).

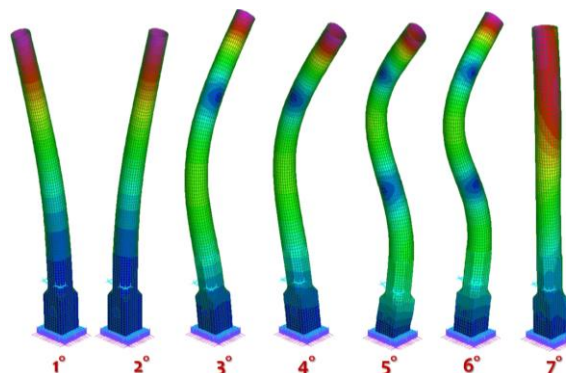


Figura 10. Modi di vibrare risultanti dall'analisi modale.

Tabella 3. Valori dinamici relativi al modello FEM e comparazione.

m.	Freq. Exp [Hz]	Freq. FEM [Hz]	ε_f [%]	MAC [%]	% massa	S_d [g]
1	0.83	0.80	-4	77	30	0.145
2	0.93	0.82	-12	81	29	0.162
3	2.87	2.98	4	70	24	0.388
4	3.17	3.03	-4	65	26	0.388
5	5.52	6.33	15	67	19	0.388
6	6.20	6.15	-1	54	15	0.388
7	7.32	7.64	4	95	36	0.378
8	8.89	11.06	24	54	8	0.348

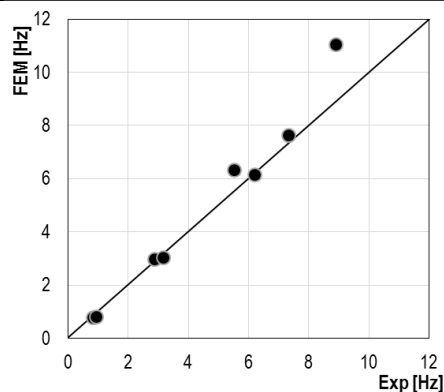


Figura 11. Comparazione grafica tra le frequenze identificate e del modello FEM.

Si ritiene comunque auspicabile un ulteriore updating automatico, in particolare per valutare se la riduzione del modulo elastico rispetto a quella del martinetto è dovuta ad un'interazione con il terreno o ad un valore medio minore lungo l'altezza dove le caratteristiche meccaniche della muratura in quota possono risultare più ridotte. Un secondo aspetto riguarda il disaccoppiamento tra i modi nelle direzioni X ed Y dove si vede che l'errore nel campo delle frequenze mantiene uno scarto costante tra le due direzioni. Inoltre, per migliorare la calibrazione è auspicabile una riduzione globale dell'errore e non solo del valore medio.

5.4 Analisi strutturale della ciminiera

L'analisi delle frequenze e dei modi di vibrare ha permesso di valutare anche le masse percentuali attivate da ciascun modo e le relative accelerazioni dovute allo spettro di progetto (Tabella 3). La sovrapposizione dei modi sullo spettro (Figura 12) evidenzia come i modi superiori, in particolare il II ed il III flessionale siano localizzati sul plateau e quindi sottoposti alla maggiore accelerazione.

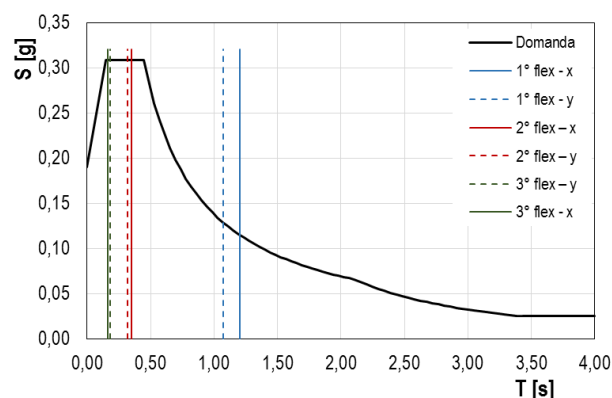


Figura 12. Posizione dei modi di vibrare nello spettro.

Essendo la struttura snella, anche le masse partecipanti non sono trascurabili portando la forza sismica complessiva, tenuto conto dello spettro e della massa partecipante, ad essere maggiore e per il secondo modo e per il terzo rispetto al primo modo, usualmente utilizzato per le verifiche semplificate lineari e non lineari delle strutture semplici.

La valutazione della sicurezza della struttura viene eseguita confrontando domanda e capacità della struttura. La prima mostra una concentrazione di forza sismica nel terzo superiore della struttura mentre la capacità, tenuto conto della forza assiale agente presenta momenti resistenti via via crescenti verso la base della struttura.

Da un punto di vista delle verifiche quindi, sebbene complessivamente la sezione più sollecitata sia quella di base si ottiene che sezione meno sicura è posta ad una quota di 34.5 m dal piano campagna.

Nell'eseguire le verifiche si considera, come riportato dalle NTC2018 un periodo di calcolo basato su un valore dimezzato dei moduli elastici in fase sismica. Va tenuto conto che questa riduzione riduce parzialmente l'azione totale in quanto i II e III modi rimangono nel plateau e vi è una riduzione per il primo modo.

La sezione in esame presenta un'azione normale di 434 kN. Il momento resistente della sezione in muratura è pari a M_{Rd} 587 kNm mentre l'agente è pari a M_{Ed} 1144 kNm che quindi risulta non verificata di 1.54 volte. Analizzando la curva delle pressioni l'eccentricità risulta pari a 2.08 m, maggiore del raggio pari a 1.48 m. La sezione non risulta pertanto in equilibrio e richiede pertanto di essere rinforzata flessionalmente.

Data la particolare distribuzione delle forze agenti il taglio subisce un repentino incremento fino ad un terzo dell'altezza per poi crescere quasi linearmente. Il rapporto di verifica risulta quindi

peggiore nelle sezioni più in alto della ciminiera in quanto la forza assiale assume un ruolo determinante nel determinare la resistenza a taglio.

Per la verifica di resistenza a taglio si è adottata la formula della circolare per le murature regolari (1).

$$V_{Rd} = \frac{lt}{b} \left(\frac{f_{v0d}}{1+\mu\phi} + \frac{\mu}{1+\mu\phi} \sigma_0 \right) \quad (1)$$

Assumendo $f_{v0d} = 0.13$ MPa e $\mu = 0.5$. Data la geometria dei mattoni di altezza 55 mm e una lunghezza del giunto attritivo pari a 70 mm si ottiene un valore ϕ di 0.79.

La sezione con un coefficiente di verifica più basso è posta in sommità ad una quota di 40 m con un valore V_{Rd} di 100 kN e un valore agente V_{Ed} di 98 kN. Pertanto si può ritenere che sebbene molto sollecitata la struttura risulti verificata nei confronti delle azioni taglianti agenti.

6 CONCLUSIONI

L'analisi e la verifica di sicurezza di strutture snelle in muratura deve necessariamente tenere conto degli effetti dinamici dovuti alla composizione dei modi.

Lo studio presentato mostra nel dettaglio tali effetti e le particolarità di questa tipologia di strutture. Nella fattispecie si evidenzia la necessità di eseguire interventi di rinforzo per garantirne l'adeguamento sismico e in particolare la parte più debole risulta essere l'ultimo terzo in elevazione sia nei confronti del taglio che della stabilità flessionale.

L'identificazione dinamica ha permesso di ottenere dei valori di frequenza e modi di vibrare di riferimento che sono stati indispensabili ai fini del controllo e della calibrazione del modello di calcolo agli elementi finiti.

Le altre indagini eseguite durante la fase della conoscenza hanno permesso di incrementare l'affidabilità delle analisi in corso conoscendo nel dettaglio sia le esatte geometrie che le proprietà meccaniche e chimico-fisiche dei materiali.

Rimangono auspicabili ed in fase di elaborazione l'automatic modal updating e gli interventi da eseguire.

La fase di updating permetterebbe di migliorare la conoscenza sulle proprietà meccaniche della muratura posta più in alto che potrebbe risultare di minore qualità.

La definizione degli interventi permetterebbe invece di aumentare il livello di sicurezza della struttura nei confronti degli utenti futuri.

REFERENCES

- Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., 2000. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials* 14(4):199-233
- Binda, L., Cantini, L., Cardani, G., Saisi, A., Tiraboschi, C., 2007. Use of Flat-Jack and sonic tests for the qualification of historic masonry. 10th North American Masonry Conference. St. Luis, Missouri, USA
- Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P., 2000. Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, in *Proceedings of the IMAC 18, International Modal Analysis Conference*, San Antonio, USA.
- Brincker, R., Ventura, C., Andersen, P., 2001. Damping estimation by frequency domain decomposition, in *Proceedings of the IMAC 19, International Modal Analysis Conference*, Kissimmee, FL, USA.
- Cescatti, E., Dalla Benetta, M., Modena, C., Casarin, F., 2016. Analysis and evaluations of flat jack test on a wide existing masonry buildings sample. In: Modena, da Porto & Valluzzi (eds) *Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges*, Taylor & Francis Group, London, pp. 1485-1491.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 2019. Circolare Ministeriale n.7 del 21 gennaio 2019.
- Deiana, R., 2019. Indagini Georadar per l'analisi della struttura muratura della ciminiera dell'Ex-Zuccherificio di S. Bonifacio (VR). Report prove dBC UniPD.
- DPCM-NTC2008, 2010. Ministero dei Beni e le Attività Culturali. Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 14/01/2008). Circolare 26/2010.
- Ivorra, S., 2014. Old industrial masonry chimneys: repairing and maintenance. *9th International Conference on Structural Analysis of Historical Construction*. Mexico City October 2014.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018). DM 17 gennaio 2018 Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni.
- Mighini, F., Milani, G., Tralli, A., 2014. Seismic risk assessment of a 50 m-high masonry chimney using advanced analysis techniques, *Engineering Structures*, 69, pp. 255-270.
- Rainieri, C., Fabbrocino, G. 2011. Il periodo elastico delle torri in muratura: correlazioni empiriche per la previsione. Atti XIV Convegno ANIDIS L'ingegneria sismica in Italia, Bari, 18–22 settembre 2011
- RILEM Recommendation MDT.D.4: In-situ stress tests based on the flat-jack - MDT.D.5: In-situ stress-strain behaviour tests based on the flat-jack.
- Secco, M., 2017. Caratterizzazione mineralogica, microstrutturale e microchimica di malte. Report prove Circe UniPD.