

# Scienza

ANNO XX - N. 4/2012

Trimestrale del Collegio  
degli Ingegneri del Trentino

# & Mestieri

Poste Italiane Spedizione in A. P. - DL 353/2003 conv. L. 27/02/2004 - n. 46 art. 1 D.C.B. Trento - Tassa Pagata

La ciminiera storica all'interno  
del comparto ex Manifattura  
Tabacchi in Rovereto

Regolamentazione tecnica  
antincendio

Il fondo patrimoniale,  
strumento di protezione del  
patrimonio del professionista

Il Trentino in Mozambico -  
Water & sanification



# La ciminiera storica all'interno del comparto ex Manifattura Tabacchi in Rovereto: monitoraggio, identificazione dinamica e processo di aggiornamento del modello strutturale (model updating)

di  
ing. Alessio Bonelli  
ing. Matteo Tomaselli

## PREMESSA

Con il termine monitoraggio strutturale comunemente si intende l'effettuazione di misure di varia natura ad intervalli di tempo prestabiliti. A seconda dell'ambito di impiego e delle finalità che si prefigge esso si differenzia per metodologie e tempi. In ambito civile ed architettonico-monumentale la conoscenza del comportamento strutturale nelle condizioni di esercizio e durante eventi sismici di varia origine è diventata, negli ultimi tempi, la base per l'adozione di misure efficaci in grado di mitigare gli effetti delle sollecitazioni.

Con il termine generico di monitoraggio dinamico o, qualora le misure si protraggano solo in un periodo limitato, di prove dinamiche o analisi vibrazionali, si intende l'effettuazione di misure ad intervalli di tempo (e precisione) sufficientemente piccoli da cogliere fenomeni caratterizzati da variazioni continue quali gli effetti inerziali delle strutture.

I dati acquisiti dal monitoraggio permettono di verificare direttamente (*on line*) il livello delle vibrazioni (tipicamente le vibrazioni ambientali) di una struttura. Mediante l'impiego di post elaborazioni dipendenti dalla natura delle sollecitazioni impresse e dalla tecnica d'acquisizione impiegata, si può caratterizzare dinamicamente il comportamento del manufatto studiato. I dati rielaborati infine, se associa-

ti ad un'analisi strutturale dettagliata della struttura oggetto di indagine, possono permettere di valutarne la sicurezza strutturale a valle di un processo di aggiornamento del modello della struttura stessa, ad esempio un modello FEM (processo comunemente identificato con il termine inglese *Model Updating*).

Nel presente contributo si descriveranno sinteticamente le operazioni e le analisi dei risultati relativi al monitoraggio dinamico della ciminiera storica posta all'interno del comparto ex Manifattura Tabacchi di Rovereto, eseguite dalla società TASQ s.r.l. su incarico di Trentino Sviluppo s.p.a.

## DESCRIZIONE DELL'OPERA

L'opera è un esempio di ciminiera in laterizio, facente parte di una famiglia di realizzazioni sorte nell'Italia settentrionale fra la fine del XIX° e i primi anni del XX° secolo.

E' da sottolineare la grande maestria dei costruttori dell'epoca che, in altezza, andavano rastremando lo sviluppo del fusto in modo continuo all'esterno ed eventualmente con riseghe interne corrispondenti ad intervalli di circa 4 m al fine di contenere il numero delle diverse tipologie di mattoni.

La struttura in esame possiede forma tronco conica; il foro ricavato al suo interno si presenta cilindrico (diametro variabile in funzione dell'altezza) e lo spessore di muratura risulta va-

riabile. La struttura è dapprima appoggiata ad un collare, sempre in muratura, e successivamente a un plinto, anch'esso in muratura e cavo, all'interno del quale era posto il forno.

La ciminiera ha un'altezza totale fuori terra di 38 m ca., un diametro alla base di 3,8 m e di 2,4 m in sommità. Essa è rinforzata per tutta l'altezza da anelli anulari in acciaio e presenta sulla faccia lato est una frattura chiusa da graffe metalliche lungo il suo sviluppo lineare.

In genere i problemi che si constatacono per questo tipo di strutture sono di due ordini:

- geometrico, legato sostanzialmente alla verticalità dell'opera che non è più tale, denunciando una deviazione dovuta principalmente alle azioni cicliche del vento e allo stato dei materiali;
- stato di conservazione dei materiali, legato a più fattori, tra i quali l'età, gli agenti atmosferici, le condizioni di lavoro (alte temperature, fumi aggressivi). L'azione congiunta di questi modifica inevitabilmente il comportamento meccanico della muratura e in particolare della malta che funge da legante.

A tal proposito preventivamente alle analisi di seguito descritte si è condotto un rilievo di dettaglio, eseguito mediante dispositivo elettro-ottico (laser scanner), al fine di conoscere la

geometria dell'opera in esame. Tale metodologia è dotata, rispetto ai metodi di rilievo tradizionali, dei seguenti vantaggi:

- velocità di esecuzione in loco: le operazioni di rilievo sono completamente esauribili in una giornata;
- cristallizzazione dello stato di fatto alla data del rilievo, attraverso la fornitura di una nuvola di punti, con eventuale possibilità di confronto puntuale della stessa con futuri rilievi realizzati con la stessa metodologia;
- rilievo dell'intero volume di ogni elemento strutturale, con le relative singolarità e con la possibilità di cogliere la presenza di eventuali rastremazioni lungo l'asse;

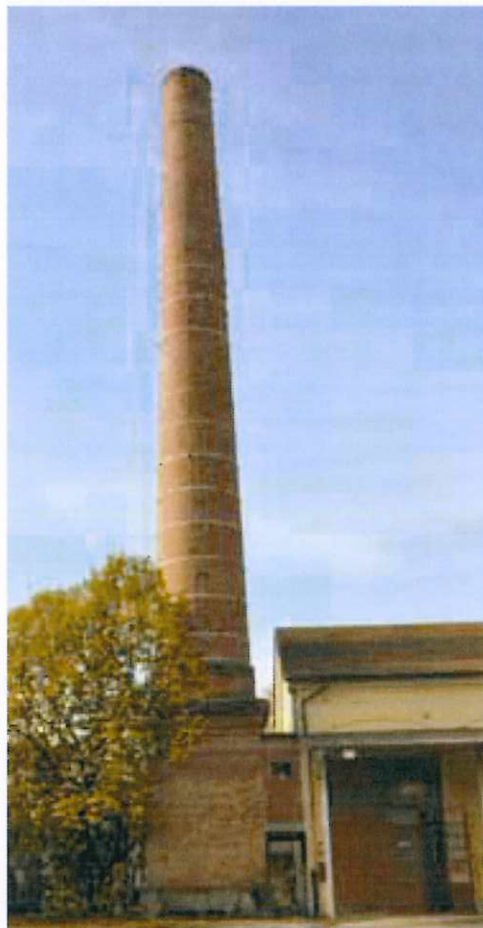


Fig. 1: ciminiera – lato est (sx) e lato sud (dx)

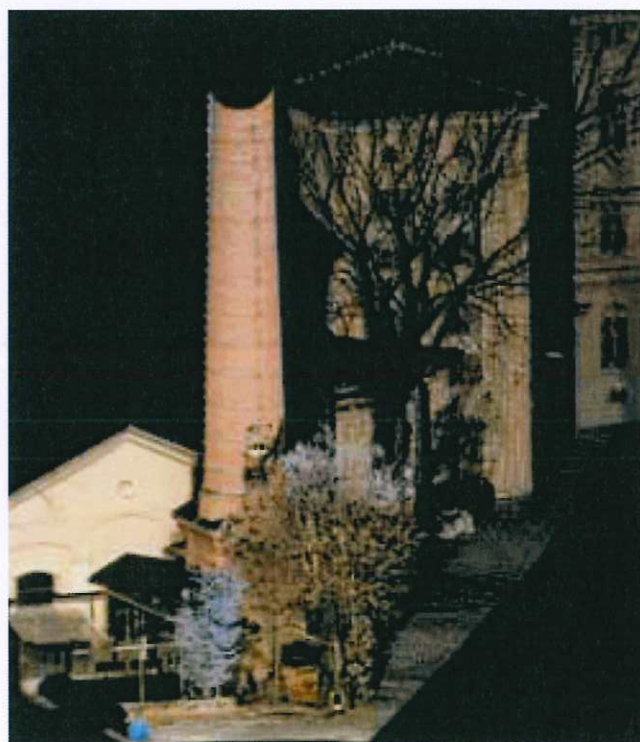


Fig. 2: Rilievo laserscanner

**MODELLO FEM E ANALISI PRELIMINARI**

In base al rilievo ricavato mediante laser scanner si è definito un modello agli elementi finiti a mezzo del programma di calcolo Midas Gen della MIDAS Information Technology Co.Ltd, utilizzando elementi solidi a 4 nodi con l'infillimento rappresentato in Fig. 3: punti rilevati mediante laser scanner e modello FEM realizzato (totale di 120000 gradi di libertà). L'analisi è stata condotta simulando la struttura con un modello agli elementi finiti in campo elastico, con materiale isotropo e perfettamente resistente a trazione e compressione.

Prima della campagna di identificazione dinamica della struttura è stato eseguito uno studio numerico sulle possibili caratteristiche dinamiche della struttura al fine di condurre in modo più accurato possibile la campagna di monitoraggio.

Non avendo dati precisi sulla muratura costituente la ciminiera in esame si sono assunti diversi valori sia del modulo elastico che del peso specifico al fine di valutarne l'incidenza sulle caratteristiche dinamiche della struttura. In particolare, basandosi sulla definizione analitica del primo periodo principale per una torre con massa variabile linearmente mediante la formula

$$T_0 = \frac{2\pi H^2}{\Omega} \sqrt{\frac{p}{gEI}}$$

dove:

$I = 12.40 \text{ m}^4$  (momento di inerzia della sezione netta alla base)

$H = 38.3 \text{ m}$  (altezza del fusto)

$W = 5.20$  (parametro dipendente dal rapporto tra diametro alla base e in sommità in funzione del rapporto tra spessore alla base e spessore in sommità)

$g = 9.806 \text{ m/s}^2$  (accelerazione di gravità)

$p = \text{è il peso per unità di altezza [kN/m]}$

Variando il peso specifico del materiale tra  $15 \text{ kN/m}^3$  e  $19 \text{ kN/m}^3$  e il modulo elastico tra  $1000$  e  $5000 \text{ MPa}$  si

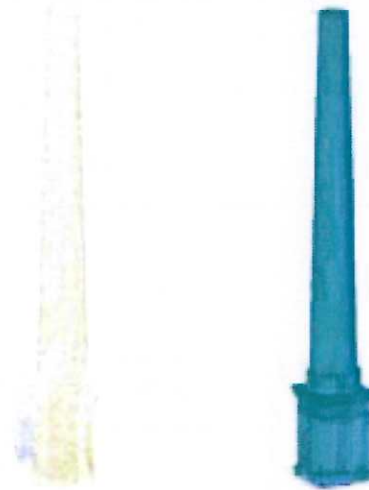


Fig. 3: punti rilevati mediante laser scanner e modello FEM realizzato

è ricavato un range di variazione del primo periodo proprio della struttura fra  $0.72$  e  $1.81 \text{ s}$ . Tali risultati sono stati confermati anche dal modello FEM con uno scarto massimo pari allo  $0.1\%$  ca. Stante la simmetria geometrica della struttura i primi tre modi corrispondono in realtà ai primi 6 modi essendo i modi simmetrici nelle due direzioni principali a due a due.

Si è anche provveduto a verificare

l'incidenza del modulo di Poisson sulle caratteristiche dinamiche della ciminiera, imponendo per esso una variazione tra  $0$  (sezione fessurata) e  $0,20$  (sezione non fessurata). E' stato verificato come quest'ultimo abbia un'influenza marginale sui primi modi di vibrare e pertanto nelle fasi successive non è stato preso in considerazione.

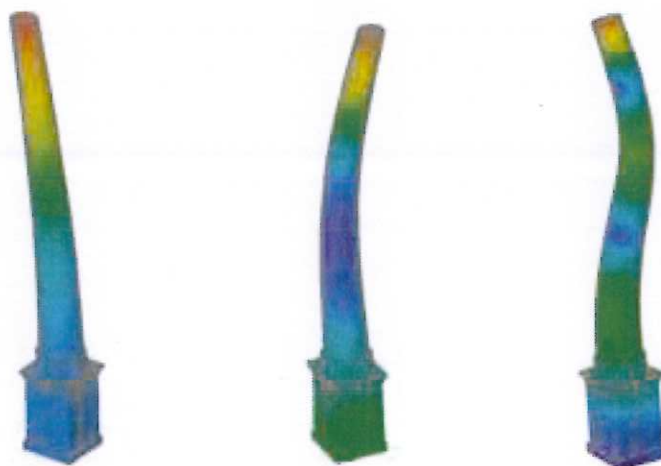


Fig. 4: I, II e III modo di vibrare; vista prospettica

## CAMPAGNA MONITORAGGIO DINAMICO

Data la geometria e la sostanziale simmetria del manufatto è stata decisa l'installazione di 4 accelerometri monoassiali disposti in due direzioni lungo il fusto della ciminiera. Tale scelta permette infatti di determinare il livello delle vibrazioni causate dal forzamento eolico e dal traffico (rumore ambientale) e consente di stimare la forma e la frequenza dei primi modi di vibrare della struttura. In dettaglio sono stati posizionati n. 2 accelerometri orizzontali mutuamente perpendicolari posizionati in prossimità dell'apice della struttura (a una quota pari a 37 m dal pc) e n. 2 accelerometri (a quota pari a 25.3 m) poco oltre la metà dello sviluppo in altezza della ciminiera. Al fine di verificare eventuali gradienti termici sono state inoltre monitorate la temperatura e l'umidità interna al manufatto.

Il sistema di acquisizione è stato implementato secondo le seguenti caratteristiche:

1. i segnali di temperatura e umidità sono stati acquisiti in modo continuo con una frequenza pari a 0,1 Hz.
2. Al fine di analizzare il comportamento della struttura in modo distribuito nell'arco della giornata e coglierne il comportamento dinamico principale, ogni 4 ore è stata effettuata un'acquisizione dei 4 accelerometri, con frequenza pari a 1666 Hz per una durata di 79 s circa.
3. Con lo scopo di verificare eventuali vibrazioni improvvise è stata effettuata un'acquisizione a soglia sugli accelerometri. In particolare è stata impostata una soglia sufficientemente bassa, pari a  $0.1 \text{ m/s}^2$ , in modo da poter cogliere con dettaglio il comportamento della struttura. In tali eventi è stato impiegato un intervallo di acquisizione, con frequenza pari a 1666 Hz, pari a 110 s circa.

Le acquisizioni sono state condotte tra il 12 e il 21 settembre 2012.

Il monitoraggio a soglia e l'osservazio-



Fig. 5: Accelerometri monoassiali posizionati a quota +25.3 m.

ne dei tracciati ottenuti hanno evidenziato come alcuni degli eventi fossero riconducibili a fenomeni vibrazionali istantanei quali effetto di tuoni improvvisi (nella settimana di monitoraggio si sono manifestati alcuni temporali) o passaggio di mezzi pesanti in prossimità del manufatto. La maggior parte degli eventi è al contrario stata determinata dall'effetto del forzamento eolico. L'accelerazione massima registrata è stata pari a  $0.357 \text{ m/s}^2$ .

### IDENTIFICAZIONE DELLE PRIME PULSAZIONI E FORME MODALI

Dall'analisi diretta delle trasformate di Fourier sia delle acquisizioni effettuate ogni 4 ore che quelle a soglia si sono direttamente evidenziati dei picchi nei range 1-1.2 Hz e 4.1-4.8 Hz.

La geometria del problema comporta una difficoltà "matematica" a causa della simmetria e conseguente possibile presenza di autovalori dotati di molteplicità non unitaria e/o valore ravvicinato. Va sottolineato inoltre

che l'identificazione è problematica anche per il comportamento non lineare della muratura e la non proporzionalità dello smorzamento. Infatti a causa della non linearità di comportamento meccanico la struttura risponde in modo diverso se eccitata a livelli energetici diversi, mentre la non proporzionalità dello smorzamento comporta uno sfasamento nelle oscillazioni dei vari punti legate allo stesso modo di vibrare.

Per una stima delle pulsazioni e forme modali si è impiegata la tecnica FDD (Frequency Domain Decomposition) impiegabile in casi di monitoraggio/prove di tipo *output only* (ossia prove nelle quali è sconosciuta la forzante); nel caso in esame infatti le registrazioni sono state effettuate in regime di vibrazione ambientale. In tali situazione la forzante è assimilabile ad un rumore bianco. Il metodo opera nel dominio delle frequenze ed è basato sulla decomposizione ai valori singolari della matrice di densità spettra-

le della risposta ad ogni frequenza. A differenza di altre metodologie un vantaggio operativo della FDD consiste nell'ottenimento diretto di un grafico (valori singolari vs frequenza) che tiene conto di tutti i canali acquisiti contemporaneamente, e permette l'individuazione di modi di vibrare anche vicini tra loro.

N°	Frequenza [Hz]
1	1.08
2	1.14
3	4.32
4	4.62

Tabella 1: Frequenze relative ai picchi della densità spettrale

Dalle analisi si sono evidenziati i picchi di Tabella 1. Per ognuna delle frequenze proprie ricavate sono anche state stimate le relative forme modali.

### STUDIO DI SENSITIVITÀ

Non disponendo di dati relativi alle proprietà fisico-meccaniche dei materiali costituenti la ciminiera si è effettuato uno studio sulla sensitività del modello FEM rispetto ai parametri di rigidezza e massa.

#### 1. Variazione modulo elastico

Si è eseguita un'analisi di sensitività del modello alla variazione del modulo elastico E mantenendo costante la densità. Visti i risultati del monitoraggio si è ristretto il range di variazione del modulo elastico tra 3000-5000 (E1 - E4) MPa; il peso specifico considerato è pari 18 kN/m<sup>3</sup> (γ<sub>1</sub>).

MODO	Reale		Modello FEM		
	f [Hz]	f(E <sub>1</sub> ; γ <sub>1</sub> ) [Hz]	f(E <sub>1</sub> ; γ <sub>2</sub> ) [Hz]	f(E <sub>1</sub> ; γ <sub>3</sub> ) [Hz]	f(E <sub>1</sub> ; γ <sub>4</sub> ) [Hz]
1	1.08	1.09	1.08	1.06	1.05
2	1.14	1.10	1.08	1.07	1.05
3	4.32	4.30	4.24	4.18	4.12
4	4.62	4.31	4.25	4.19	4.13

Tabella 2: Sensitività delle prime frequenze modali alla variazione del modulo elastico.

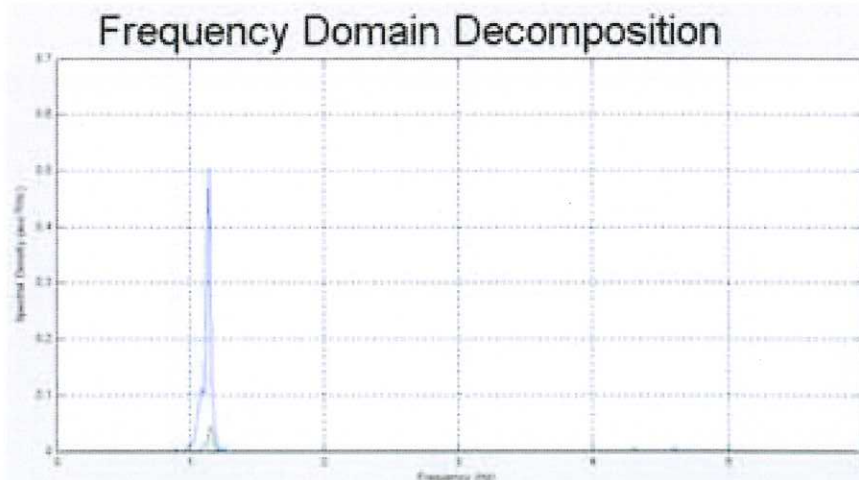


Fig. 6: Ampiezza della densità spettrale (si riporta in blu il primo valore singolare, in verde il secondo) nell'intervallo 0-6 Hz; suddivisione in 60 segmenti con sovrapposizione pari a 0.98.

#### 2. Variazione peso specifico

Si è eseguita un'analisi di sensitività del modello alla variazione del peso specifico mantenendo costante il modulo elastico.

Visti i risultati del monitoraggio si è ristretto il range di variazione del peso specifico tra 17 e 18 (γ<sub>1</sub> - γ<sub>4</sub>) kN/m<sup>3</sup>; il modulo elastico considerato è pari a 3500 MPa (E<sub>1</sub>).

MODO	Reale	Modello FEM			
	f [Hz]	f(E <sub>1</sub> ; γ <sub>1</sub> ) [Hz]	f(E <sub>2</sub> ; γ <sub>1</sub> ) [Hz]	f(E <sub>3</sub> ; γ <sub>1</sub> ) [Hz]	f(E <sub>4</sub> ; γ <sub>1</sub> ) [Hz]
1	1.08	0.98	1.06	1.14	1.27
2	1.14	0.99	1.07	1.14	1.27
3	4.32	3.87	4.18	4.47	4.99
4	4.62	3.88	4.19	4.48	5.01

Tabella 3: Sensitività delle prime frequenze modali alla variazione del peso specifico.

### AGGIORNAMENTO DEI PARAMETRI DI MASSA E RIGIDEZZA NEL MODELLO FEM

A causa della non semplice e univoca definizione dei modi di vibrare sperimentali, dovuta ai problemi in precedenza illustrati, per la determinazione dei parametri di rigidezza e massa si è focalizzata l'analisi esclusivamente sulle frequenze identificate.

Per la stima dei parametri si è considerata la dipendenza della frequenza dai parametri di rigidezza e massa,  $f = f(E; \gamma)$  e minimizzata la funzione obiettivo basata sugli errori in frequenza, del tipo:

$$f_{obj} = \sum_{i=1}^{n_{modi}} \frac{(f_{FEM} - f_{reale})^2}{f_{reale}^2}$$

I dati relativi alla massa e al modulo elastico che meglio approssimano i dati sperimentali sono risultati i seguenti:

$$E_1 = 3600 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_1 = 17.50 \text{ kN/m}^3$$

Si riportano in Tabella 4 le frequenze a valle dell'updating del modello numerico.

MODO	Reale	Modello	Variazione
	f [Hz]	f [Hz]	
1	1.08	1.09	1.28%
2	1.14	1.10	3.89%
3	4.32	4.30	0.53%
4	4.62	4.31	6.75%

Tabella 4: frequenze sperimentali vs frequenze modello aggiornato.

La stabilità della soluzione trovata è stata testata in modo da poter verificare che ulteriori soluzioni, seppur tali da portare a frequenze prossime a quelle identificate, comportano valori dei parametri non realistici o troppo elevati per il caso in esame.

A seguito della definizione dei parametri di massa e rigidità globali determinati si è verificata l'influenza su detti parametri della fessura visibile sul lato est della ciminiera e graffiata in modo continuo sul suo sviluppo.

La fessura è stata modellata modificando i parametri di rigidità degli elementi finiti adiacenti ai lembi della fessura. Si è rilevato come la presenza della fessura non comporti conseguenze sulle caratteristiche dinamiche globali del manufatto alle frequenze investigate. A frequenze maggiori potrebbero comparire modi propri influenzati dalla fessura.

## CONCLUSIONI

Dalla campagna di identificazione dinamica del manufatto e dalla realizzazione di un modello agli elementi finiti calibrato opportunamente sulle caratteristiche dinamiche sperimentali possono essere ricavate le seguenti conclusioni/considerazioni:

- nel periodo di monitoraggio, pur non manifestandosi eventi di carattere estremo, si sono susseguiti vari episodi atmosferici associati ad un forzamento ventoso non trascurabile che ha comportato accelerazioni massime di ridotta entità (max 0.04 g).
- il processo di identificazione ha evidenziato la presenza di due frequenze principali nel range 1.0-1.2 Hz e ulteriori due frequenze nell'intervallo 4.3-4.6 Hz. Tali risultati possono essere un'utile parametro di riferimento per valutare eventuali danneggiamenti futuri della struttura in seguito ad eventi estremi oppure agli effetti del degrado.
- le differenze fra la frequenza sperimentale e la frequenza associata all'applicazione di un modulo elastico di 3600 MPa e di una densità pari a 17,5 kN/m<sup>3</sup>, sono contenute; se ne evince un comportamento del manufatto in linea con le aspettative teoriche e corrispondente a murature dalle buone risorse di elasticità equivalente;
- i risultati ottenuti dei parametri di rigidità e massa permettono di escludere possibili degradi dei materiali, legato a più fattori, tra i quali l'età, gli agenti atmosferici, le condizioni di lavoro (alte temperature, fumi aggressivi).
- tramite i dati ricavati è infine possibile, effettuando ulteriori analisi, determinare la sensibilità dell'opera alle azioni aerodinamiche indotte dal vento.

Da molti anni ormai, e soprattutto in seguito all'ampliamento delle competenze degli organismi dell'Unione Europea, i quali intervengono anche nel settore della sicurezza in generale e della prevenzione degli incendi<sup>1</sup>, si discute nel nostro paese quale debba essere l'approccio nei confronti della materia "sicurezza in caso d'incendio". In sostanza si possono individuare due correnti di pensiero: quella più tradizionale, che vuole privilegiare il ricorso ad una puntuale regolamentazione da parte dell'ente pubblico, e quella che invece chiede maggior libertà progettuale e di valutazione, seppure in presenza di limiti definiti. Il secondo indirizzo risulta maggiormente caldeggiato dall'Unione, anche se non imposto, e deriva da una concezione tipica dei paesi nordeuropei ed anglosassoni. In ogni caso, indipendentemente dal tipo di approccio, nei paesi UE i requisiti di sicurezza antincendio costituiscono parte essenziale della normativa sulle opere di costruzione. In Italia siamo in presenza d'un sistema misto, in quanto non tutte le fattispecie sono regolate, ma con una spiccata tendenza per la concezione tradizionale, confermata anche da disposizioni di legge del passato, le quali prevedevano l'emanazione di regole tecniche di tipo verticale<sup>2</sup> a copertura di tutte le attività soggette

1 La cornice regolamentare più generale, a livello europeo, è costituita dal Regolamento UE 305/2011 del 09/03/2011, chiamato CPR, che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e sostituisce la famosa CPD (Direttiva 89/106/CEE). In particolare, l'Allegato I definisce il criterio di sicurezza in caso d'incendio, inserendolo tra i requisiti di base delle opere di costruzione. Tale requisito di base si ritiene soddisfatto nel caso in cui l'opera sia conforme ad un regolamento riferito al requisito medesimo. Nel caso non esistano regolamenti applicabili, la valutazione è effettuata dal progettista.

2 La regola tecnica è una disposizione cogente emanata da un organismo pubblico al quale è riconosciuta potestà legislativa o regolamentare. Ha lo scopo di stabilire un livello di sicurezza e l'affidabilità generale del sistema al quale si riferisce, in conformità a scelte d'ordine pubblico e d'interesse generale. È bene ribadire che la regola tecnica, essendo una disposizione che ha valore di legge, dev'essere applicata obbligatoriamente. I decreti