

Professione

Indagini strutturali sulla Torre Civica di Trento

di Ing. Alessio Bonelli, Ing. Matteo Tomaselli e Ing. Gianluca Battorti



NELL'AGOSTO 2015 LA SOMMITÀ DELLA TORRE CIVICA DI TRENTO È STATA OGGETTO DI UN INCENDIO CHE HA COMPORTATO IL DANNEGGIAMENTO DELLA CELLA CAMPANARIA LIGNEA E LA CADUTA PER PARECCHI METRI DELLA CAMPANA ESISTENTE [1].



Preliminarmente alla progettazione dell'intervento di recupero e restauro il Comune di Trento ha ritenuto necessario affidare la realizzazione di una **campagna diagnostica finalizzata alla verifica dello stato di salute strutturale del manufatto** nella zona colpita ed in particolare:

- la valutazione della resistenza e della rigidità della muratura;
- la verifica di danneggiamento in corrispondenza di alcune cerchiature metalliche perimetrali interne esistenti;
- la qualità muraria nello spessore della muratura;
- la misurazione delle sezioni residue delle travature lignee della struttura campanaria;
- la valutazione del danneggiamento di alcune catene metalliche esistenti.

Contestualmente è stata richiesta anche l'esecuzione di un **monitoraggio dinamico** della torre stessa.

Le indagini, hanno previsto l'esecuzione di:

- n° 3 prove con martinetti piatti doppi sulle murature;
- n° 12 prove di trazione su ancoraggi nuovi ed esistenti;
- n° 11 indagini endoscopiche;
- n° 35 prove resistografiche su travi in legno;
- n° 2 analisi di laboratorio su campioni in acciaio prelevati in opera;
- monitoraggio in vibrazione ambientale della torre con identificazione delle frequenze proprie della stessa.

Risultati eterogenei

PROVE CON MARTINETTI PIATTI

L'esecuzione di dette prove ha comportato la necessità di realizzare delle opere di protezione delle murature della torre e dei livelli sottostanti a quelli di esecuzione delle prove: ciò a fini di cautela dal percolamento idrico connesso alle operazioni di taglio delle murature con strumentazione idraulica a circa 30m di altezza dal piano viario sottostante [2].

Si è ottenuta per la muratura una resistenza di compressione media pari a 3,53MPa.

PROVE DI TRAZIONE SU ANCORAGGI

Sono stati testati in particolare:

- 4 ancoraggi esistenti di collegamento tra una fasciatura metallica di cerchiaggio interna alla torre alla quota +26.00 dal piano strada al fine di verificarne l'eventuale danneggiamento da incendio (Fig.3);
- 8 ancoranti chimici nuovi, messi in opera >





PROVE CON MARTINETTI PIATTI DOPPI

> su elementi lapidei massicci con controllo della distanza minima dal bordo degli stessi; tali indagini sono state eseguite al fine di fornire un ausilio alla progettazione degli ancoraggi per le strutture metalliche di prevista realizzazione all'interno della torre [4].

Le prove sugli ancoraggi esistenti hanno fornito risultati decisamente eterogenei, con resistenze a rottura variabili da 0,98kN a 20,81kN, a riprova del verosimile danneggiamento di alcuni di essi. Le prove di trazione sui nuovi ancoranti hanno permesso di stimare il carico a rottura degli stessi per installazioni di tipologia controllata (ancoranti M12, profondità di ancoraggio 110mm, resina epossidica bicomponente, distanza dal bordo dell'elemento lapideo pari a 55mm). A fronte di valori di rottura compresi tra 22,11kN e 23,80kN, si è potuto individuare in 22kN il valore di resistenza media a rottura per l'ancorante tipo così come installato. Tale valore ha fornito un valido ausilio proget-

tuale per la progettazione delle connessioni a parete delle strutture metalliche interne di prevista realizzazione.

ENDOSCOPIE

Le prove endoscopiche eseguite hanno permesso di evidenziare la consistenza muraria interna della porzione di torre indagata. Si è evidenziato quanto segue:

- alla percezione di un paramento interno alla torre realizzato con conci lapidei regolari non corrisponde altrettanta regolarità interna alla muratura, ove si evidenziano cavità talvolta di significativa ampiezza ed elementi lapidei di piccola pezzatura;

30

Metri di altezza dal
piano viario sottostante.

- la malta si presenta come mediamente aderente agli elementi lapidei in corrispondenza del paramento interno, meno presente ed aderente all'interno (cavità);
- nessun danneggiamento a seguito di incendio.

Alcune indagini endoscopiche sono state eseguite in corrispondenza dell'estradosso dei gradini in pietra di una scala interna permettendo di quantificare in 6,5-7,0 cm l'ammorsamento murario degli stessi nella muratura.

PROVE SU CAMPIONI IN ACCIAIO

Si è proceduto al prelievo in opera di due campioni metallici al fine di poterne qualificare, attraverso prove di laboratorio, le relative caratteristiche di resistenza e saldabilità.

In particolare è stato prelevato un tratto di tirante danneggiato, posto a quota +37 m dal piano strada, ed una porzione del >



Spessori di carbonatazione



hanno permesso di individuare gli spessori di carbonizzazione da incendio e di quantificare la sezione resistente residua, che in tutti i casi si è rivelata di ottima consistenza, in assenza di marcescenze o ammaloramenti interni.

MONITORAGGIO DINAMICO

Il comportamento dinamico della torre è stato analizzato sfruttando la vibrazione ambientale mediante l'installazione di n.5 accelerometri monoassiali ad alta sensibilità fissati sul lembo interno della muratura in pietra della torre nelle seguenti posizioni:

- n° 3 accelerometri sono stati collocati alla quota delle celle campanaria, a circa 37,00m dal piano strada: due sensori sono stati posti con asse nord-sud ed est-ovest, un terzo con asse verticale;
- n° 2 accelerometri sono stati posti nella sala espositiva a quota +8.00m circa dal piano strada; entrambi i sensori sono stati posti con asse nel piano orizzontale in direzione nord-sud ed est-ovest.

Si è contestualmente eseguito un rilievo in continuo di temperatura e umidità ambientale.

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

- i segnali di temperatura e umidità sono stati acquisiti in modo continuo con

una frequenza pari a 0.033 Hz (1 dato ogni 30 secondi) (Monitoraggio statico orario);

- al fine di analizzare il comportamento della struttura in modo distribuito nell'arco della giornata e coglierne il comportamento dinamico principale, con cadenza oraria è stata effettuata un'acquisizione dei 5 accelerometri, con frequenza pari a 333.33 Hz per una durata di 397 s circa (Monitoraggio dinamico orario);
- con lo scopo di verificare eventuali vibrazioni improvvise è stata effettuata un'acquisizione a soglia sugli accelerometri. In dettaglio è stata impostata una soglia sufficientemente bassa e pari a 0,01 m/s². In tali eventi è stato acquisito un intervallo di circa 159 s con frequenza pari a 333.33 Hz. (Monitoraggio dinamico a soglia).

Il monitoraggio a soglia e l'osservazione dei tracciati ottenuti hanno evidenziato valori di accelerazioni massime istantanee estremamente contenuti nonostante i fenomeni ventosi registrati durante il periodo di monitoraggio. Le accelerazioni massime riscontrate sono sempre risultate inferiori a 0.07m/s².

Dall'analisi diretta delle trasformate di Fourier sia per le acquisizioni orarie che a soglia si sono evidenziati dei picchi nei range 1.53-1.55Hz e 3.94-5.04Hz. >

> piatto di cerchiatura interna alla torre, a quota + 26 m. Per entrambi i provini si è rilevata la sufficienza statica e la saldabilità (tensioni di snervamento di pari a 347 -365MPa, tensioni di rottura pari a 631 - 477MPa).

PROVE RESISTOGRAFICHE

Per la qualificazione della sezione resistente residua delle travi aggredite dall'incendio si è proceduto, su quelle per le quali era previsto il mantenimento in opera di una funzione strutturale, all'esecuzione di alcune prove resistografiche. Dette prove



Fig.3: Prova di trazione in opera su ancoraggio esistente

Fig.4: Prova di trazione in opera su nuovo ancoraggio

MODELLAZIONE DELLA TORRE
PER ELEMENTI FINITI

➤ L'identificazione delle frequenze proprie di vibrazione non è risultata semplice a causa del comportamento non lineare della muratura e la non proporzionalità dello smorzamento [5]. 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.

Si è proceduto inoltre alla stima della pulsazioni e delle forme modali mediante l'impiego della tecnica FDD (Frequency Domain Decomposition) impiegabile in casi di monitoraggio di tipo output only (ossia prove nelle quali è sconosciuta la forzante, come nel caso in esame). Le frequenze di vibrazione e le forme modali identificate hanno fornito la fotografia dinamica della torre alla data di esecu-

zione delle prove. La riesecuzione delle medesime prove in futuro, eventualmente anche in occasione di interventi in grado di modificare massa e/o rigidità della torre, permetterà di stimare per la torre la presenza di un eventuale danneggiamento o di validare dal punto di vista dinamico gli interventi eseguiti.

Un futuro auspicabile sviluppo del monitoraggio dinamico consiste nella modellazione della torre per elementi finiti solidi, nella realizzazione di un aggiornamento iterativo del modello strutturale (Model Updating) al fine di assecondare gli esiti strumentali dalle misurazioni dinamiche per fornire un modello matematico idoneo alla valutazione della sicurezza strutturale anche in chiave antisismica.

Gianluca Battortti



Alessio Bonelli



Matteo Tomaselli

