

Ing. Sante Tombolini

Ing. Gianmarco Massucco - CDM DOLMEN Srl

Consolidamento e restauro della torre campanaria di Agugliano

Di seguito si descrive il progetto di restauro e consolidamento della torre campanaria situata ad Agugliano (AN) in località Castel D'Emilio. La torre fa parte del complesso dell'ex Convento San Francesco, bene tutelato dalla Soprintendenza ai sensi del Decreto Legislativo 22 gennaio 2004 n. 42. Il convento e la chiesa per la gran parte non esistono più, se non per alcune parti perimetrali, e il campanile è attualmente isolato rispetto al convento; le sue dimensioni esterne in pianta sono di 3,65 x 3,65 m, l'altezza all'imposta della copertura è di 21,20 m e quella complessiva è di 23,50 m.

La struttura portante è costituita da pareti perimetrali realizzate in muratura di mattoni pieni e malta di calce, con spessore pari a 80 cm. L'unico solaio presente allo stato attuale è quello della cella campanaria, posta a quota 17 m, con struttura in legno. Un tempo erano presenti anche altri tre solai, sempre con struttura in legno.



Figura 1 - Campanile e ex convento

Il progetto di consolidamento è stato messo a punto dall'ing. Sante Tombolini e dall'arch. Maurizio Volpini di Ancona insieme ai tecnici della Soprintendenza, con riferimento al D.p.c.m. 9/2/2011 e coerentemente con il fatto che per un bene culturale non è prescritto il raggiungimento di un prefissato livello di sicurezza. Come ribadito al punto 2.2 del suddetto D.p.c.m. per i beni culturali tutelati (come nel caso di specie) è possibile derogare rispetto all'adeguamento.

Dal punto di vista operativo si è operato come segue:

1. Valutazione del coefficiente di sicurezza in condizioni sismiche nella situazione attuale;
2. Valutazione del coefficiente di sicurezza in condizioni sismiche al quale il manufatto viene portato con gli interventi di progetto, compatibili con le esigenze di tutela.

Quanto sopra in piena coerenza con il principio che, nel caso di beni culturali, è spesso opportuno accettare consapevolmente un livello di rischio sismico più elevato rispetto a quello delle strutture ordinarie, piuttosto che intervenire in modo contrario ai criteri di conservazione del patrimonio culturale (cfr. punto 2.2 del D.p.c.m. 9/2/2011).

Progetto delle opere di consolidamento della torre campanaria

I progettisti hanno stabilito alcuni interventi al fine del consolidamento, in particolare la posa in opera, in corrispondenza degli spigoli verticali interni delle murature della torre campanaria, di 4 profili LU180x15 in acciaio S275 ancorati alle murature ogni 50 cm con barre \varnothing 12 in acciaio ad aderenza migliorata per una profondità di 30 cm, con ancorante chimico ad iniezione.

In corrispondenza delle quote dove erano presenti i solai in legno (compreso il solaio della cella campanaria, unico solaio attualmente presente che verrà riproposto ex novo), è stata stabilita la posa in opera di una cerchiatura perimetrale sul lato interno delle murature, costituita da profili UPN160 in acciaio S275 ancorati alle murature ogni 50 cm con barre \varnothing 12 in acciaio ad aderenza migliorata per una profondità di 30 cm, con ancorante chimico ad iniezione. La cerchiatura sarà vincolata anche ai profili verticali LU180x15. Per irrigidire l'orizzontamento saranno posti in opera anche un tirante-puntone diagonale costituito da un piatto rettangolare di acciaio S275 6.5x1 mm ancorato alle UPN160.

In corrispondenza delle chiavi degli archi delle monofore della cella campanaria saranno ripristinati i 4 tiranti aventi diametro 20 mm con capochiave costituito da piastra in acciaio S275, geometria ellittica e asse maggiore pari a 36 cm, asse minore 25 cm e spessore 25 mm.

All'imposta della piccola volta della copertura della cella campanaria sarà realizzata una cerchiatura interna con piatto rettangolare di acciaio S275 6.5x1mm, ancorata alle murature ogni 50 cm, con barre \varnothing 12 in acciaio ad aderenza migliorata per una profondità di cm 30, con ancorante chimico ad iniezione.

Infine è prevista la sostituzione del solaio in legno della cella campanaria con un altro in legno lamellare incollato classe GL24h, avente travi di sezione 80x160 mm.

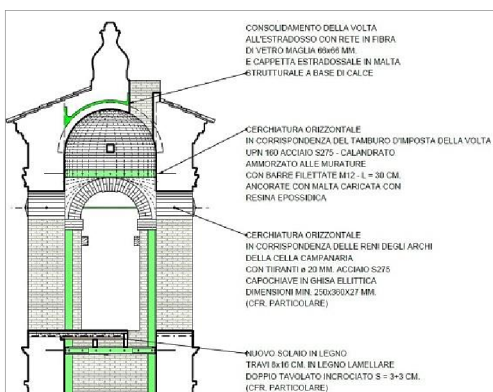


Figura 2 - Consolidamenti e rinforzi

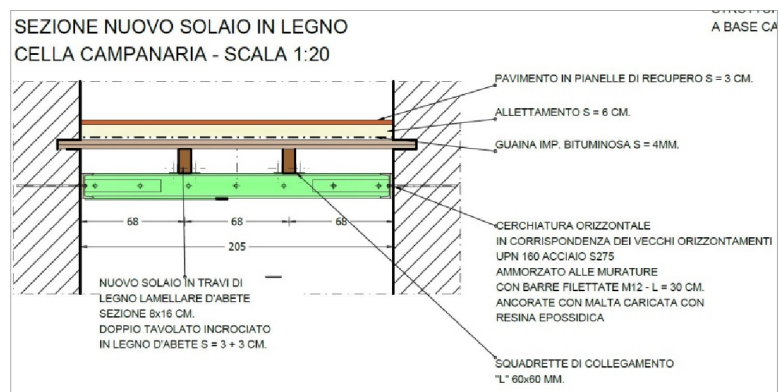


Figura 3 - Nuovo solaio in legno lamellare

Modellazione della struttura

La struttura è stata modellata con il metodo agli elementi finiti con il programma di calcolo strutturale DOLMEN, prodotto e distribuito da CDM DOLMEN di Torino. Il software permette di svolgere un'analisi dettagliata del comportamento dell'intera struttura in campo elastico lineare, tenendo conto del

comportamento irrigidente di setti anche complessi e di solai considerati con la loro effettiva rigidezza. DOLMEN consente, inoltre, di scegliere il grado di affinamento dell'analisi di elementi complessi, impiegando mesh via via più dettagliate.

Gli elementi utilizzati sono sia monodimensionali (trave con eventuali sconnessioni interne), che bidimensionali (piastre e membrane triangolari e quadrangolari). I vincoli sono considerati puntuali ed inseriti tramite le sei costanti di rigidezza elastica, oppure come elementi asta poggianti su suolo elastico.

Il calcolo sismico è stato effettuato tramite analisi dinamica modale, utile per comprendere gli effetti di amplificazione del moto.

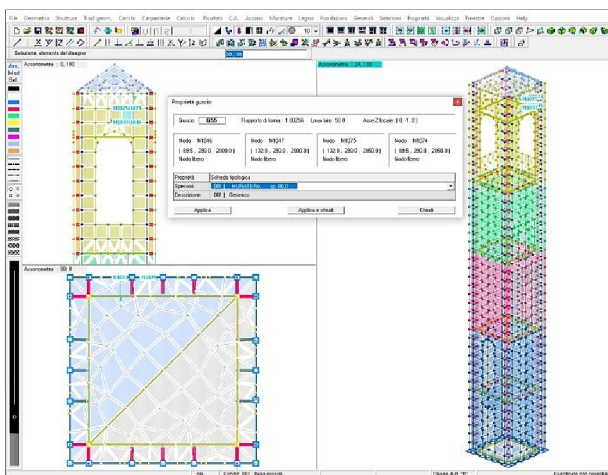


Figura 4 - Modello ad elementi finiti in DOLMEN

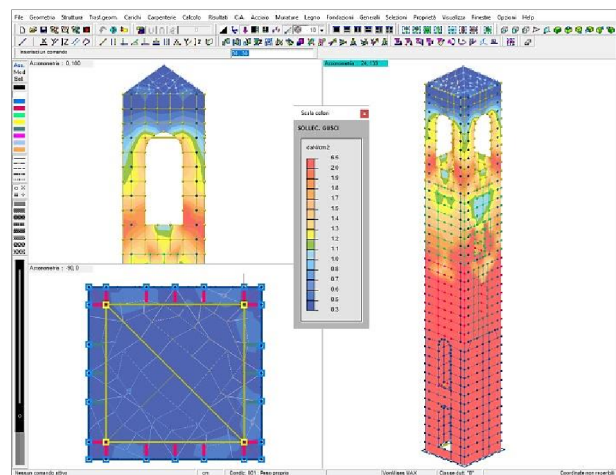


Figura 5 - Sollecitazioni nei gusci

Muratura

Dall'analisi della muratura sul posto e dai rilievi geometrici effettuati si è ricavato che la tipologia della muratura della torre campanaria è coerente con la tabella della Circolare delle NTC (C8.5.I). Si tratta di muratura in mattoni pieni e malta di calce e si stabilisce un livello di conoscenza LC1. Sotto tale ipotesi la resistenza viene assunta come valore minimo degli intervalli tabellati e il modulo elastico come valore medio degli intervalli, pertanto si ottiene:

- f_m = resistenza media a compressione 240 N/cm²
- τ_0 = resistenza media a taglio 6 N/cm²
- E = valore medio del modulo di elasticità normale 1500 N/mm²
- G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale 500 N/mm²

Dato che la muratura presenta caratteristiche migliori, quelle utilizzate sono ottenute a partire dai valori precedenti applicando coefficienti migliorativi, come di seguito riportato:

- Malta di buone caratteristiche: si applica il coefficiente 1,5
- Connessione trasversale: si applica il coefficiente 1,3
- Giunti minori di 1 cm: si applica il coefficiente 1,5

Pertanto le caratteristiche della muratura sono le seguenti:

- f_m = resistenza media a compressione 240 N/cm² x 1,5 x 1,3 x 1,5 = 702 N/cm²
- τ_0 = resistenza media a taglio 6 N/cm² x 1,5 x 1,3 x 1,5 = 17.6 N/cm²
- E = valore medio del modulo di elasticità normale 1500 N/mm² x 1.50 = 2250 N/mm²

- $G =$ valore medio del modulo di elasticità tangenziale $500 \text{ N/mm}^2 \times 1,5 = 750 \text{ N/mm}^2$
- $W =$ peso specifico della muratura = 1800 kg/m^3

Verifiche

La verifica pre-intervento, effettuata con il software di calcolo DOLMEN, dà coefficienti di sicurezza piuttosto bassi in alcuni punti della struttura, ciò conferma la necessità di eseguire degli interventi.

Le catene vanno sottoposte a due diverse verifiche, da un lato si deve controllare che la tensione in esse generata dalla forza di trazione sia compatibile con le caratteristiche meccaniche del materiale di cui sono composte, dall'altro si deve, invece, verificare che lo sforzo trasmesso dalla catena tramite il capo chiave non superi la resistenza a taglio della sezione di muratura su cui agisce.

Per quanto riguarda la verifica della muratura si ipotizza come meccanismo di rottura quello per strappo con il conseguente distacco del solido murario, in cui la base minore è costituita dall'area del capochiave e la base maggiore, sulla faccia interna della muratura, è definita dall'involuppo delle linee divergenti secondo l'angolo di 45 gradi dell'area della base minore. Lo sforzo massimo di trazione della catena dovrà essere allora minore o uguale alla tensione ammissibile a trazione nella muratura moltiplicata per la superficie di distacco.

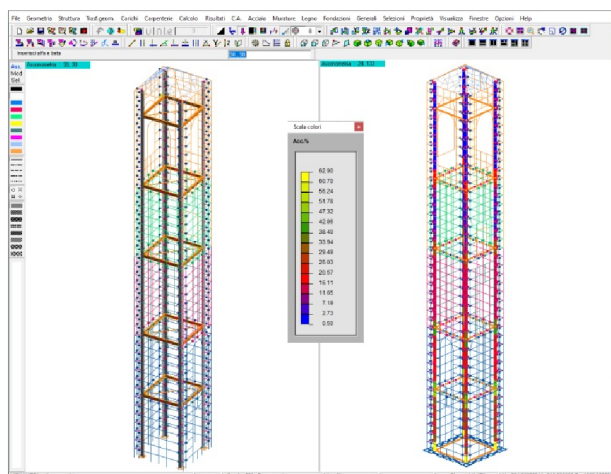


Figura 6 - Angolari in acciaio

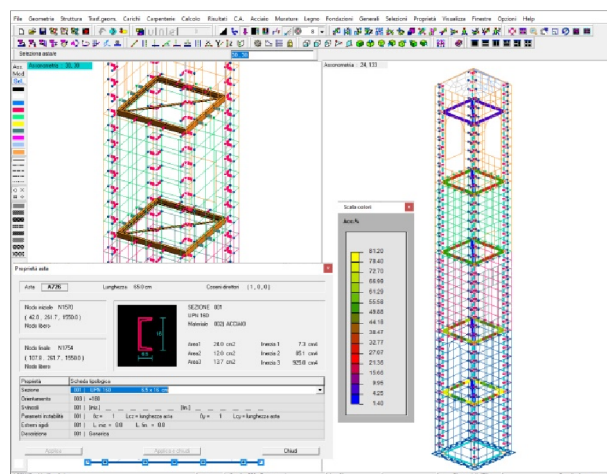


Figura 7 - UPN verifica acciaio

Conclusioni

Il progetto esecutivo è stato approvato dalla Soprintendenza e si è in attesa dell'accREDITAMENTO del finanziamento ministeriale, ottenuto il quale i lavori potranno essere eseguiti in coerenza al progetto prima descritto.