

# Le analisi e gli interventi strutturali

*Dario Foppoli, Emanuele Moretta*

L'edificio del Teatro Sociale è il risultato di successive trasformazioni che partendo dalla conformazione originaria (1824), hanno portato a modifiche negli anni dell'uso del teatro, sia in sede di ristrutturazione (1946) che nel corso dei più recenti adeguamenti funzionali (1980). Particolarmente i lavori effettuati nel 1946 hanno comportato significative variazioni dell'edificio, quali per esempio la demolizione dei palchi e la realizzazione della galleria in cemento armato. Questa articolata evoluzione all'assetto, anche strutturale, ha richiesto in fase progettuale una particolare attenzione per conoscere a fondo non solo quella che era la concezione strutturale originale del fabbricato (in termini di schemi e materiali costitutivi), ma anche e soprattutto quello che era lo stato attuale, frutto di tali profonde trasformazioni.

Per affrontare il problema della sicurezza delle costruzioni esistenti è essenziale conseguire un adeguato livello di conoscenza dell'edificio, in modo da evidenziare le eventuali carenze strutturali, assumere opportuni parametri di calcolo e orientare nella successiva scelta di efficaci interventi di conservazione [1] [7]. Per raggiungere un appropriato livello di conoscenza risulta perciò fondamentale:

- ricostruire il processo di realizzazione del manufatto e le successive modifiche che lo stesso ha subito nel tempo, nonché gli eventi (quali per esempio quelli meteorici, bellici, sismici) che lo hanno interessato;
- disporre di informazioni geometrico-strutturali sufficientemente dettagliate, in particolar modo individuando l'organismo resistente della costruzione, i dettagli costruttivi ed il quadro generale del suo stato fessurativo e deformativo;
- conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro stato di conservazione sulla base della documentazione disponibile, di verifiche visive in situ e di indagini sperimentali.

Tale processo viene propriamente definito, dalla normativa applicabile al patrimonio culturale [5], come "percorso della conoscenza" e può essere sviluppato fino a raggiungere differenti livelli di conoscenza dei parametri coinvolti nel comportamento strutturale dell'edificio e conseguentemente a definire adeguati fattori di confidenza.

Le strutture corrispondenti al nucleo ottocentesco del Teatro Sociale di Sondrio sono state costruite in muratura di pietra e malta, apparecchiata in modo caotico come è tipico del contesto valtellinese e quelle realizzate nell'ambito delle modifiche novecentesche sono in cemento armato. Per pervenire ad un adeguato livello di conoscenza è stato quindi necessario sviluppare una campagna diagnostica riferita a murature di fondazione, murature in elevazione ed orditura in cemento armato dei solai e della galleria.



Foto 1 a)



Foto 1 b)



Foto 1 c)



Foto 1 d)

*Fasi di esecuzione della prova con martinetto piatto singolo:*

*1 a) Lettura prima dell'esecuzione del taglio*

*1 b) Lettura della deformazione dopo l'esecuzione del taglio*

*1 c) Inserimento del martinetto*

*1 d) Fase di ripristino del carico*

Allo scopo di analizzare i materiali costituenti gli elementi fondazionali, di determinarne la geometria, la quota e la larghezza del piano di imposta sono stati realizzati sondaggi meccanici a carotaggio continuo in direzione sub-verticale e le carote estratte sono state descritte attraverso le stratigrafie di dettaglio. Per migliorare le informazioni acquisite sono stati inoltre effettuati rilievi con video-endoscopio a colori che hanno reso possibile anche individuare e dimensionare le discontinuità e le cavità presenti nella struttura.

Le murature in elevazione sono state oggetto di prove con martinetto piatto [3], che hanno consentito di rilevare puntualmente lo stato di sollecitazione (Foto 1), misurando la variazione dello stato tensionale provocata nella muratura da un taglio piano di limitate dimensioni. L'inserimento di un secondo martinetto piatto parallelo al primo ha poi consentito di proseguire la prova [4] determinando anche le caratteristiche di deformabilità della muratura e stimando il valore della resistenza a compressione.

Le strutture in cemento armato sono state invece analizzate mediante prelievo di carote, poi assoggettate a prove di compressione [8], prove sclerometriche [9] e misure della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici [10] (Foto 3). L'interpretazione delle prove mediante il metodo combinato Son-Reb, ha consentito di incrementare la precisione dei risultati. L'identificazione degli elementi strutturali "moderni" è

stata completata effettuando il rilievo dei ferri di armatura con strumentazione magnetometrica [11] (Foto 2-4).

L'indagine realizzata ha consentito di conseguire il livello di conoscenza più approfondito (LC3), definito esaustivo dalla norma [6]; con le informazioni acquisite è stato quindi possibile procedere con la verifica di vulnerabilità sismica operando al livello di valutazione più accurato, definito LV3 dalla norma [5], come viene prescritto per interventi strutturali che incidono in modo rilevante sul comportamento complessivo del manufatto. L'analisi è stata basata sui seguenti parametri:

- tipo di costruzione: 3 (opera di importanza strategica)
- classe d'uso in presenza di azioni sismiche: III (costruzione il cui uso prevede affollamenti significativi)
- zona sismica: 4 zonazione amministrativa (con il recente D.G.R 21 luglio 2014, n. 2129 la zonazione amministrativa è stata modificata ed attualmente il territorio del Comune di Sondrio risulta classificato in zona sismica 3).
- L'analisi strutturale è stata condotta costruendo un modello numerico tridimensionale ottenuto schematizzando le murature con elementi finiti guscio/piastra (Foto 5-6) ed effettuando la verifica sismica mediante analisi lineare; gli effetti di non linearità tipici del comportamento strutturale della muratura sono stati computati inserendo nel modello le discontinuità, individuate dalle fessure, per mezzo di un procedimen-



Foto 2  
Prove magnetometriche per il rilievo delle barre di armatura sulle travi in cemento armato della galleria

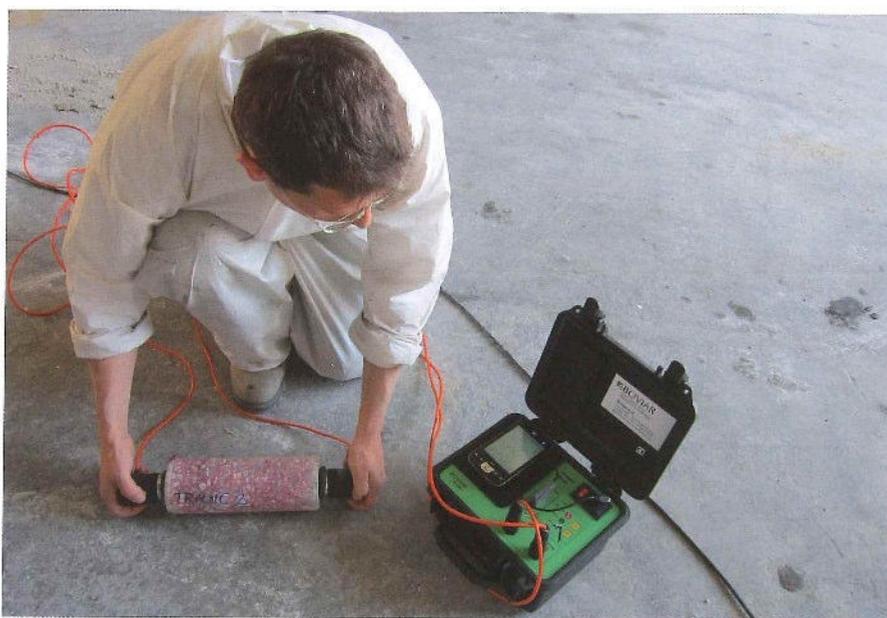


Foto 3  
Misure della velocità degli impulsi ultrasonici su carote estratte dalle travi in cemento armato

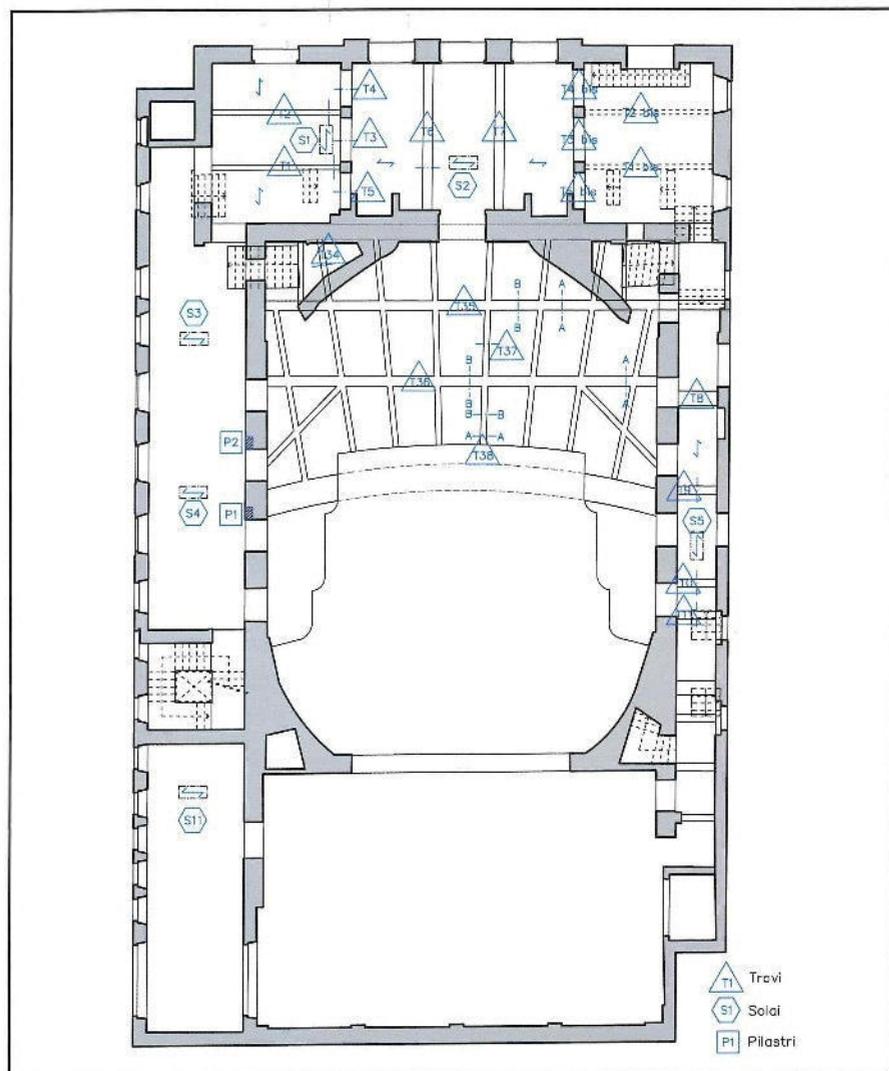


Foto 4  
Pianta della galleria con indicati i punti di indagine sulle strutture in cemento armato

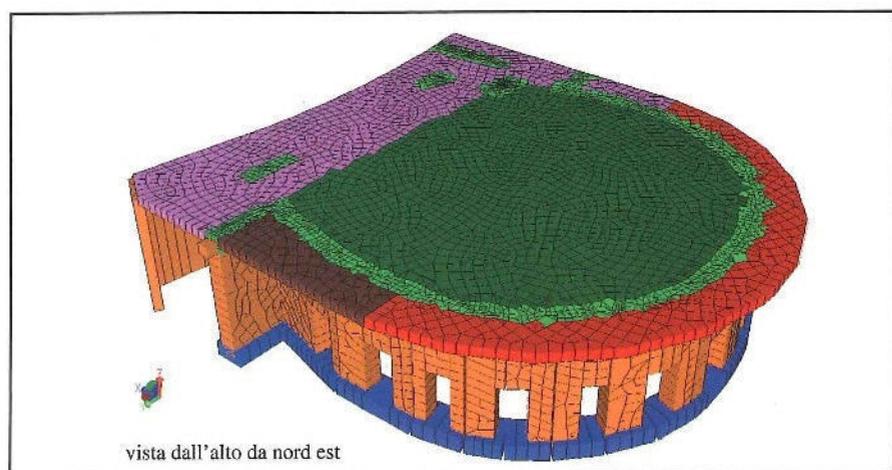


Foto 5  
Modello numerico tridimensionale ad elementi finiti delle muraure ottocentesche dell'interrato e del solaio della platea

to iterativo di confronto tra la posizione rilevata delle lesioni e le sollecitazioni calcolate [2]. Il modello è stato inoltre validato in campo statico confrontando i risultati da esso forniti con gli stati di sollecitazione ottenuti sperimentalmente dalle prove con martineti piatti.

- L'analisi effettuata ha consentito di mettere in evidenza in modo puntuale le specifiche carenze strutturali: sono stati quindi progettati gli interventi necessari e sufficienti a conseguire, secondo le specifiche richieste del committente, quello che la norma [6] definisce "adeguamento" alle sollecitazioni di origine sismica.
- Per migliorare il comportamento complessivo dell'edificio è stato previsto il consolidamento delle murature, delle travi e dei solai realizzato mediante materiali fibrorinforzati (FRCM) ed il loro reciproco collegamento per migliorare la risposta della struttura alle sollecitazioni orizzontali.
- Le strutture di copertura esistenti risultavano inadeguate sia per il loro stato di conservazione che per la loro conformazione geometrica, per cui sono state realizzate nuove travi reticolari in legno lamellare (Foto 7), che ripropongono la sagoma delle strutture esistenti senza comportare significativi incrementi dei carichi e consentono di riprendere l'azione sismica con opportuni collegamenti alla muratura sottostante e mediante controventi di falda.
- In progetto sono state inoltre previste le lavorazioni speci-

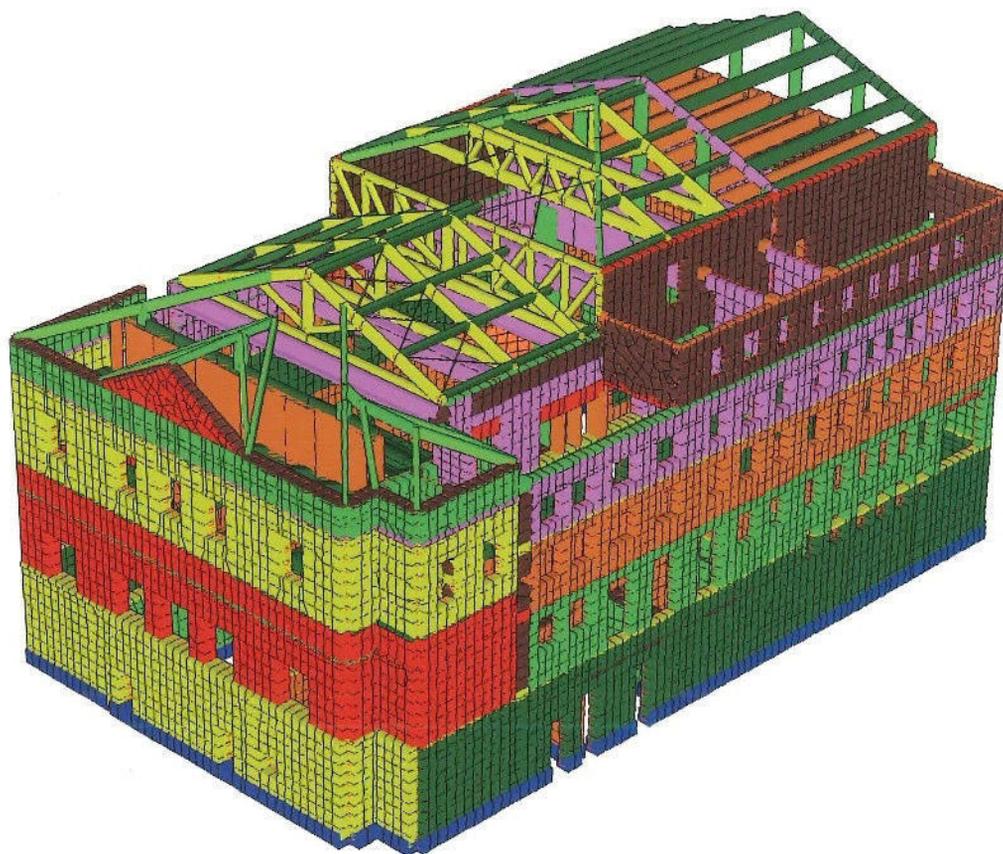


Foto 6  
Modello numerico tridimensionale ad elementi finiti dell'intero edificio

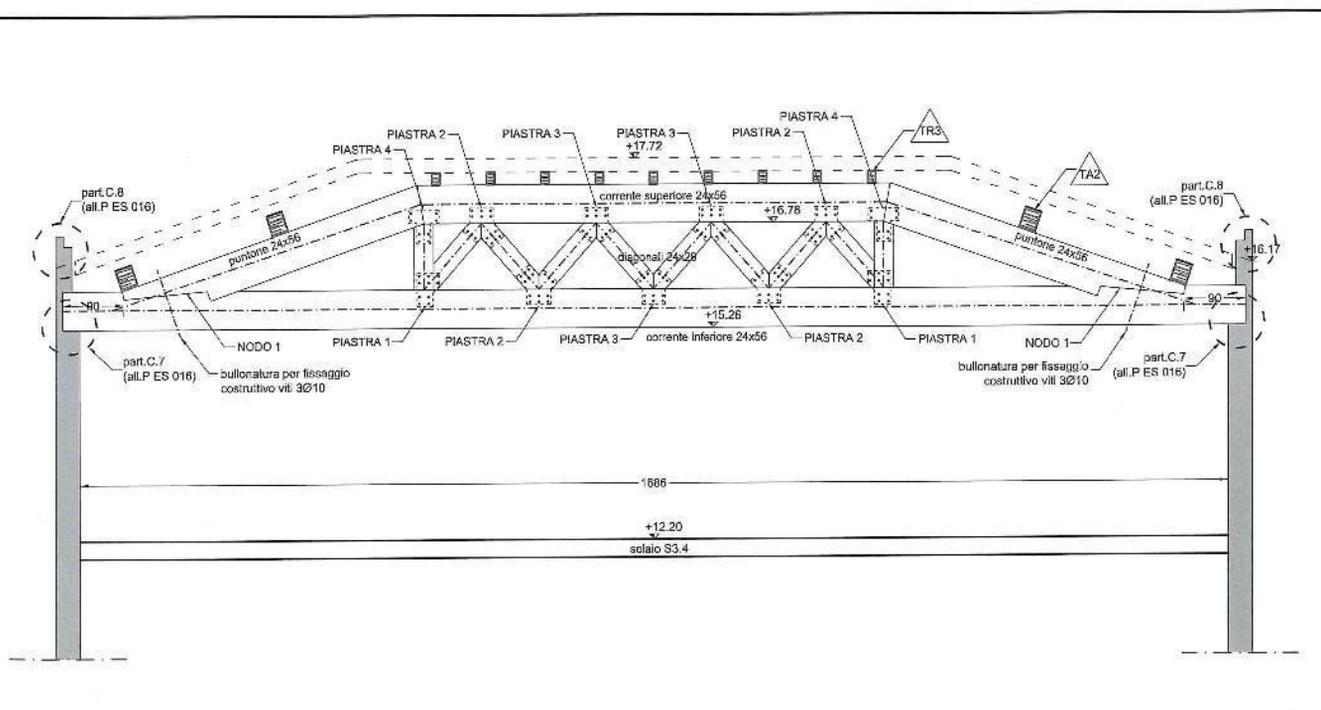


Foto 7  
Strutture reticolari in legno della copertura con controventature per riprendere le azioni sismiche

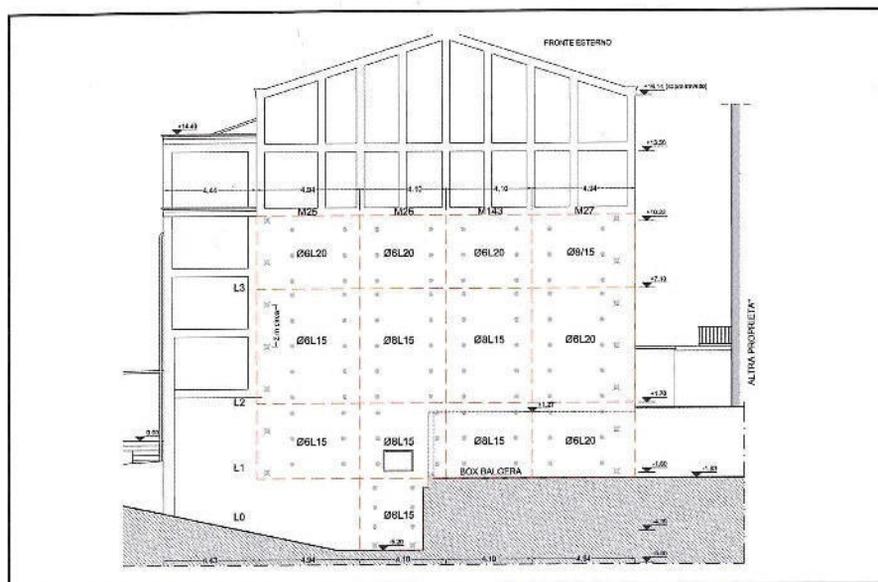


Foto 8  
Consolidamento della torre scenica mediante placcaggio  
con paretina armata



Foto 9  
Ricostruzione dell'arco scenico mediante portale sismo-resistente  
in cemento armato

ficatamente destinate a migliorare la funzionalità della struttura quali:

- sottofondazione delle murature al piano interrato e realizzazione della soletta a piastra della platea sostenuta dalle murature stesse;
- ricostruzione dell'arco scenico in quanto i piedritti portanti esistenti risultavano inadeguati e fondati ad un livello incongruente rispetto all'assetto generale dell'edificio e conseguente realizzazione di un portale sismoresistente in cemento armato (Foto 9);
- rinforzo delle travi in cemento armato esistenti al piano sottotetto mediante inserimento di nuove travi tralicciate in acciaio, ed irrigidimento orizzontale della struttura mediante realizzazione di un piano che consente l'alleggerimento degli impianti tecnologici;
- ricostruzione della graticcia in legno a supporto della macchina scenica.

Il palcoscenico progettato presenta infine due tipologie distinte correlate alla sua funzionalità: in parte risulta realizzato in acciaio e legno non è sbotolabile al 100% per le esigenze di scena, ed in parte presenta un impalcato fisso a copertura del magazzino al piano interrato ed è realizzato con soletta collaborante in acciaio - cemento armato e pavimento in legno.

Tutte le strutture sono state progettate per rispondere alla prescrizione di resistenza al fuoco R-RE-REI 90.

