

# INGEGNERI ARCHITETTI COSTRUTTORI



**inarcos**

ANNO LXIV - APRILE 2009 (3)

Spedizione in A.P. - 45% - Art. 2 Comma 20/b - Legge 662/96 - Fil. Bologna - € 3,30  
BOLOGNA - STRADA MAGGIORE, 13

**698**

mensile di tecnica e informazione dell'associazione ingegneri e architetti  
e del collegio costruttori della provincia di bologna  
notiziario del collegio regionale ingegneri e architetti dell'emilia-romagna  
notiziario della federazione degli ordini degli ingegneri della regione emilia-romagna



**Res.In.Tec. Italia**  
Ricerca Innovativa Tecnologica



■ pag 249

Convegno del 18 febbraio 2009: "La nuova normativa sulla radioattività naturale, il gas radioattivo Radon nelle abitazioni, quali implicazioni sull'attività dei progettisti"



■ pag 261

La rete di stazioni fisse GPS della Regione Emilia Romagna: implicazioni sulle operazioni di rilievo topografico



■ pag 282

Un primo approccio al fotovoltaico: la guida del GSE e le ultime novità legislative

■ Intervento di restauro conservativo e miglioramento strutturale del teatro Stignani di Imola *ANDREA BENEDETTI, ALESSANDRO BETTINI, ALESSANDRO BATTAGLIA* ■ Convegno del 18 febbraio 2009: "La nuova normativa sulla radioattività naturale, il gas radioattivo Radon nelle abitazioni, quali implicazioni sull'attività dei progettisti" ■ La rete di stazioni fisse GPS della Regione Emilia Romagna: implicazioni sulle operazioni di rilievo topografico *MARCO PASQUINI* ■ L'impiego delle tecnologie FRP nel recupero strutturale di Edifici Storici *LINO CREDALI* ■ Dall'Istituto di Istruzione Professionale Edile ■ Efficienza energetica e certificazione ■ NOTIZIARI: Associazione Ingegneri e Architetti della Provincia di Bologna - Ordine Ingegneri della Provincia di Bologna - Ancebologna - Asso ■ RUBRICHE: Corsi&Convegni

# Intervento di restauro conservativo e miglioramento strutturale del teatro Comunale "Ebe Stignani" di Imola

*Andrea Benedetti*

Dipartimento DISTART, Università di Bologna

*Alessandro Bettini*

Architetto, Progettista e Direttore Lavori Architettonici, Coordinamento generale

*Alessandro Battaglia*

Direttore Tecnico Impresa Res.In.Tec. Italia

## INTRODUZIONE

Il teatro di Imola intitolato ad Ebe Stignani, è un raro esempio di teatro a pianta ellittica tra quelli esistenti in Italia; inoltre, particolarità nella particolarità, è ricavato all'interno di una chiesa gotica, la chiesa superiore di San Francesco realizzata nel XIV secolo e requisita, insieme a gran parte dei beni ecclesiastici, in epoca napoleonica. La chiesa era realizzata sul lato sud del chiostro del convento dei frati francescani, insolitamente vicina al convento dei domenicani poco più in là, oltre l'attuale via Quarto.

Lunga 50 metri, larga 18 ed altrettanto alta, era a navata unica con abside a est di cinque lati (ancora quasi intatto all'esterno) di cui si può ammirare il magnifico coronamento di copertura. Il tetto era a due falde e poggiava su 17 capriate a doppia catena con luce libera di ben quindici metri. Ai due lati della navata della chiesa inferiore erano invece realizzati due ambulacri che si affacciavano l'uno sulla via Emilia, a sud a formare un portico, e l'altro sul cortile interno a nord.

Si accedeva alla chiesa superiore dall'attuale piazza Abate Ferri attraverso un grande scalone esterno a due rampe contrapposte collocato sulla facciata principale orientata a ovest, chiaramente delineato nella stessa mappa di Leonardo che mostra anche una scala a rampa unica a fianco dell'abside tangente alla via Emilia. Sul lato opposto, a fianco dell'abside, svettava un massiccio campanile coevo di cui si può vedere ancora oggi la sagoma, purtroppo scapitozzata.

La facciata sud sulla via Emilia era scandita dai 9 grandi pilastri, con 8 arcate che ancora si intravedono, corrispondenti alle campate che definivano lo spazio della chiesa, dall'aula al transetto, prima dell'abside.

## ORIGINI DEL TEATRO NELLA CHIESA

All'inizio dell'ottocento a Imola c'era tanta voglia di Teatro e così alcuni facoltosi imolesi, nel 1810, si associa-

## SOMMARIO

L'estensione delle zone a rischio sismico e soprattutto i recenti avvenimenti nazionali impongono una rivisitazione critica dei livelli di rischio associati alle varie tipologie di edifici e una decisione in merito al rischio accettabile e a quali interventi siano necessari per raggiungerlo. Sempre maggiore importanza hanno assunto soluzioni di ultima generazione nel campo del restauro e dell'adeguamento sismico e normativo che consentono sistemi progettuali non invasivi, rapidi da installare e durevoli nel tempo. Dall'evoluzione dei compositi frp nascono sistemi compositi in acciaio al carbonio che offrono ulteriori vantaggi quali la resistenza al fuoco, la traspirabilità e la possibilità di un facile pretensionamento. Nell'articolo seguente viene esposto in dettaglio la procedura seguita nel rinforzo ed adeguamento normativo con certificazione 600 Kg. di carico e R90 di resistenza al fuoco del "Teatro Ebe Stignani" di Imola (BO), che per situazioni analoghe può essere utilizzata come guida.

## SUMMARY

*The broad expanse of the seismic areas and the recent national events impose upon us the need for a critical review establishing the risk levels for different types of buildings in order to make a decision on that which is to be considered an acceptable risk and which actions are necessary to achieve it. Latest generation solutions in the restoring and compliance to the seismic rules have become more and more important as they allow projects that are not invasive, quick to install and durable. From the evolution of the frp composites come new carbon steel composite systems that offer further advantages such as fire-proofing, perspiration and the possibility of easy early retirement. The following article shows in detail the procedure for the reinforcement in compliance to the rules with Certification of 600 kgs of peak load and R90 of fire-proofing of the "Ebe Stignani Theatre" of Imola - Bologna. This procedures could be used as a guideline for similar situations.*





1



2

rono e diedero il via alla realizzazione del "Teatro dei Signori Associati" o "Teatro di Cerere".

Non è il teatro di Cosimo Morelli, l'architetto che tanta parte aveva avuto nel "rinnovo" architettonico e urbanistico del settecento imolese; il magnifico teatro a tre bocche del foro boario, costruito nella seconda metà del '700 per conto di sedici cavalieri associati, che era stato il suo orgoglio e per il quale aveva pubblicato in proprio un piccolo trattato in folio di architettura teatrale dedicato a sua eccellenza la Signora Marchesa Lilla Cambiaso, era già andato a fuoco la notte del 5 febbraio del 1797. Dopo vari tentativi di costruire un nuovo teatro, nel 1810 i Signori Associati, acquistano dalla Direzione Demaniale la chiesa soppressa di San Francesco per trasformarla in teatro. Il progetto venne affidato a Giuseppe Magistretti, imolese, che lo realizzò in due anni terminandolo nel 1812, e la vendita sulla carta dei palchi servì a sostenere l'impresa.

Con un'operazione tanto geniale quanto semplice, ma solo apparentemente, Magistretti, e non Morelli, realizza il nuovo teatro romantico, ricco di ori e di velluti, a pianta ellittica tagliando i due pilastri della quarta campata e scaricando poi le spinte conseguenti attraverso due grandi archi simmetrici posti tra i pilastri della terza e della quinta campata, come ben si vede ancor oggi dalla via Emilia e dal cortile interno.

L'opera di Magistretti è splendidamente documentata con una sua planimetria a colori, conservata presso la Biblioteca Comunale di Forlì, e con tre sue tavole, anch'esse colorate, conservate all'Archivio di Stato di Milano, che rappresentano rispettivamente la facciata e lo spaccato trasversale, lo spaccato longitudinale, tre piante ai piani terra, primo e secondo del "Nuovo Teatro della Città di Imola nella soppressa chiesa di S. Francesco".

L'ellisse che definisce la sala è una figura perfetta con asse da 16,60 metri in direzione est-ovest e 11,40 metri in direzione nord-sud, contornato da tre ordini di 19 palchi e soprastante galleria.

Il progetto della facciata era caratterizzata, al primo

ordine, arretrato rispetto al secondo, da un grande arco sull'ingresso principale affiancato da due simmetrici più piccoli ai lati e da tre grandi finestre con lunette sulla sala del ridotto, al secondo ordine, con quattro lesene e timpano superiore sormontato da tre figure ai vertici.

Il nuovo teatro, inaugurato nell'agosto del 1812 fu chiuso al pubblico poco dopo nel 1815, con Pio VII e la restaurazione, perché ricavato all'interno di un edificio sacro. Per sedici anni gli imolesi si adattarono, come già prima era avvenuto, ad un teatro provvisorio sistemato nella Sala del Consiglio Comunale. Solo nel 1831, grazie all'impegno di Cesare Codronchi Angeli, il papa Gregorio XVI ne permise la riapertura a condizione che venisse rimossa ogni apparenza di chiesa.

Furono avviati gli indispensabili lavori di restauro; in quell'anno il Magistretti elabora un ulteriore progetto della facciata principale (Pianta ed elevazione della facciata del nuovo teatro d'Imola - disegno acquerellato conservato presso la Biblioteca Comunale di Imola) per modificare la facciata e dotarla di una balconata, poco profonda con balaustra.

Il teatro riprende la sua attività e in breve tempo la sua fama si espande oltre i limiti del ristretto ambito regionale. Probabilmente a quel momento la facciata non era ancora stata del tutto completata, venne infatti eseguita più tardi con modifiche ed in particolare con l'aggiunta di un portico e sovrastante terrazza con accesso dal ridotto, come nell'uso dell'epoca e come ancor oggi vediamo dalla piazza Abate Ferri (figura 1).

Nel 1846 i Signori Associati vendettero il teatro al Comune, da quel momento divenne appunto Teatro Comunale, ma i palchi rimasero di proprietà privata. Vi furono rappresentate importanti opere liriche e si sparse la fama dell'ottima acustica del luogo; l'attività proseguì intensamente fino al 1852, quando il teatro venne temporaneamente chiuso per essere completamente restaurato.

L'opera fu condotta sotto la direzione dell'architetto Ricciardelli tra il 1853 e il '56. L'ingegnere comunale Antonio Cerchiarì si occupò della ristrutturazione del



3



4

coperto e del plafone. La decorazione pittorica fu affidata al pittore imolese Francesco Galassi e al figurista Paolo Sarti.

Il palcoscenico si affacciava sulla sala avanzando col proscenio a contenere il primo e l'ultimo palco dei tre ordini. La sala era di 122 m<sup>2</sup> circa e il palcoscenico, grandissimo, di circa 300 compresi gli spazi annessi fino all'abside. La volta leggera di sala era realizzata con una rigorosa orditura di centine e tambocchi in legno con superficie d'intradosso in incannicciato e gesso, poggiante al perimetro e sostenuta dalle due capriate in legno tangenti, raddoppiate per questo nei loro elementi componenti (figura 2-3 e 4). L'elegante e profondo arco scenico, con l'intradosso inclinato verso il palco e appoggiato su quattro grandi mensole con volute ai lati, venne realizzato con una struttura "scatolare" in travi di legno racchiusa verso il palco e verso la sala con incannicciati intonacati a gesso, per accogliere nella superficie le decorazioni pittoriche.

Il teatro riaprì nell'estate 1855; l'attività riprese da allora con regolarità se si esclude il periodo tra il 1859 e il 1866 tra fermenti risorgimentali e terza guerra d'indipendenza, nel 1931 il teatro offrì la sua ultima stagione di opera lirica poi venne chiuso dalle autorità perché non rispondeva alle nuove norme di sicurezza.

L'Amministrazione dell'epoca non ritenne di dare corso ai lavori di adeguamento; di lì a poco la guerra, poi gli anni della ricostruzione in cui occorreva rispondere ai bisogni primari della popolazione rimandarono nel tempo il recupero dell'edificio cui si mise mano solo nella metà degli anni '60 in uno stato di grave e generalizzato degrado.

Nel 1965 e '66 il Genio Civile avviò i primi lavori di recupero. Venne fatto l'impiantito del palcoscenico, che è quello attuale e l'impiantito grezzo in muratura della platea, un tempo con struttura in legno.

Venne rifatto il pavimento del ridotto del teatro con l'attuale veneziana, sostituendo il preesistente pavimento in listoni in legno, ancora presenti invece nelle due sale attigue. Furono rifatti parte dell'impianto elettrico e

degli intonaci. Fu l'avvio di una lenta operazione di recupero complessivo della struttura, che prese una decisa accelerazione a partire dall'inizio del 1970, dopo l'approvazione del progetto definitivo e portò, al suo termine, alla riapertura del teatro nel 1974.

Il problema più complesso fu quello delle uscite in quanto il teatro si trova al primo piano.

Furono allargate o rifatte quasi completamente le scale che portavano al loggione e quelle a fianco della sala. Furono demolite alcune superfetazioni aggiunte nel tempo alla facciata interna al cortile della biblioteca.

Quell'ala fatiscente fu sostituita con un nuovo fabbricato che ospita i camerini degli attori, i servizi di scena e di custodia. Furono costruiti ex novo i bagni, rimessi in ordine i palchi, ricavato il bar. Fu rifatta al piano terra l'abitazione del custode poi trasformata in uffici, furono rinnovate le coperture.

Non si intervenne invece sulle strutture principali del tetto, sostenute dalle poderose capriate in legno a doppia catena. L'intervento permise di riaprire il teatro ed anche di mettere in risalto alcuni elementi della chiesa trecentesca. Vennero messi in luce gli arconi superiori sulla facciata di via Emilia, si evidenziarono le finestre gotiche originarie chiudendo le forature di epoca successiva.

I lavori vennero portati a termine nel 1974 e nella primavera di quell'anno il teatro comunale, intitolato ad Ebe Stignani, venne riaperto al pubblico e riprese con regolarità la sua attività qualificandosi come uno dei più vivaci della regione (si vedano le piante e sezioni delle figure 5.a-5.f).

L'indispensabile restauro ha mantenuto la struttura e le decorazioni eseguite alla metà dell'800.

## GLI INTERVENTI IN CORSO DI ULTIMAZIONE

L'attuale progetto "2007-2009" degli interventi di conservazione e di recupero funzionale del Teatro Comunale "Ebe Stignani" di Imola si articola in più fasi temporali.



A



B



C

*Nelle pagine precedenti:*

- 1 - Vista del porticato d'ingresso del Teatro Stignani (anni '70).
- 2 - Decorazioni della cupola in gesso di copertura della sala.
- 3 - Vista dell'orditura in legno a sostegno della cupola in gesso.
- 4 - Decorazioni della cupola : vista dalla sala (anni '70).

*In queste pagine:*

- 5 - Piante e sezioni della configurazione attuale del teatro.
- 6 - Vista di una volta in pietra in foglio dei corridoi.
- 6.1 - Palchetto 17-19 del III° ordine.

L'intervento in corso è stato preceduto nel 2005-'06 da un'operazione preliminare molto impegnativa di "bonifica" generale delle protezioni antincendio contenenti amianto – prescritte negli anni '60-'70 dal ministero degli interni per la protezione antincendio in tutti i teatri - che interessavano la totalità delle strutture lignee di copertura, dalle principali fino ai più minuti travicelli della volta di sala.

Il progetto ora in corso di realizzazione si pone i seguenti obiettivi:

- l'abbattimento delle barriere architettoniche non solo per la fruizione da parte di persone diversamente abili che devono utilizzare sedie a ruote, ma anche per una più agevole accessibilità ai vari piani del teatro da parte persone di qualsiasi età e capacità motoria;
- il riassetto funzionale delle parti di servizio dell'edificio e delle vie di fuga;
- il restauro conservativo degli elementi storico-architettonici, pittorici e decorativi presenti;
- il rinnovo della "macchina scenica" teatrale e dei suoi arredi.

Si tratta di un progetto complesso su di un edificio articolato in più parti, di epoche diverse e trasformate in relazione alle funzioni assolte, connesse funzionalmen-

D



E



F







6



6.1

te tra loro a formare la struttura teatrale così come è giunta fino a noi.

La pregnanza formale e la rilevanza storico – architettonica delle parti risultano anch'esse differenziate e articolate dalla maestosità e raffinatezza del teatro ottocentesco calato nel volume ecclesiastico del trecento, fino alle modeste strutture di servizio degli anni '70, connotate da una certa povertà formale ed anche strutturale, passando per la dignitosa sobrietà del coevo edificio per gli uffici e i camerini.

In sintesi il progetto comprende:

- il consolidamento delle strutture lignee di copertura attualmente inadeguate, attraverso l'inserimento di capriate in acciaio,
- la messa in opera di nuovi impianti di trattamento aria e climatizzazione per gli ambienti della sala, palchetti, sala del ridotto e spazi annessi, al fine di ottenere un adeguato comfort ambientale sia in estate che in inverno. La climatizzazione sfrutterà i fluidi caldi e freddi prodotti dal sistema di teleriscaldamento e teleraffrescamento di HERA Imola Faenza Srl con macchine remote non in ambiente, lontane dalla struttura teatrale.
- Il restauro strutturale delle volte leggere d'incanniccio e gesso.
- Il consolidamento di voltine sottili in mattoni nei palchi e nei loro corridoi.
- La protezione passiva dal fuoco degli elementi strutturali e la dotazione di specifici elementi separanti e compartimentazioni antincendio; la protezione attiva attraverso la realizzazione di appositi impianti e dotazioni antincendio con la realizzazione di adeguate "vie di fuga".
- All'interno del cortile tra la Biblioteca ed il Teatro verrà realizzato un nuovo corpo di collegamento, con involucro a "facciata continua" in metallo e vetro, in luogo di quello preesistente in muratura.
- In sotterraneo, al di sotto della biglietteria esistente e del nuovo corpo di collegamento, 5 metri al di sotto della quota della via Emilia, verranno ricavati i nuovi servizi ed i vani tecnici della struttura.

– Al 2° livello verranno realizzati i servizi igienici dedicati privi di barriere architettoniche.

– Una sobria "torre ascensore" a pianta quadrata, collocata all'interno del cortile e dello stesso corpo di collegamento, metterà in comunicazione i livelli accessibili della struttura.

– Verranno adeguati e rinnovati gli spazi della biglietteria, degli uffici e dei camerini dell'edificio "anni '70" entro il cortile.

– Verranno restaurati attraverso operazioni di restauro scientifico gli ambienti costituenti il Teatro storico ottocentesco.

– La "macchina scenica" del palcoscenico e le dotazioni ed apparati e arredi di scena verranno integralmente adeguati e rinnovati nel rispetto dei caratteri storico-artistici ed architettonici dell'edificio.

L'intervento verrà completato con i restauri pittorici delle superfici decorate della volta e delle pareti di sala e del ridotto e dagli elementi d'arredo degli ambienti.

I lavori, avviati il 26 febbraio 2007, verranno terminati nel dicembre 2009.

## L'INTERVENTO STRUTTURALE

Le demolizioni dei pavimenti operate nel corso della prima fase di apertura del cantiere hanno mostrato l'esiguità delle strutture portanti del sistema dei palchi. Tale caratteristica è sicuramente derivata dall'aver eseguito il sistema dei palchi all'interno di uno spazio chiuso di dimensioni assegnate (figura 6).

Nella situazione precedente ai consolidamenti, l'organismo murario del teatro presenta una notevole vulnerabilità sismica, conseguente alla possibilità che nel corso di uno scuotimento sismico le volte realizzate con mattonelle di cotto disposte a pietra in foglio possano perdere la forma geometrica e cadere per annullamento dell'effetto ad arco.

A tale problematica si è cercato di dare risposta progettando e realizzando un sistema di rinforzo basato



7

7 - Vista dello schema di rinforzo mediante reticoli di strisce di rinforzo.

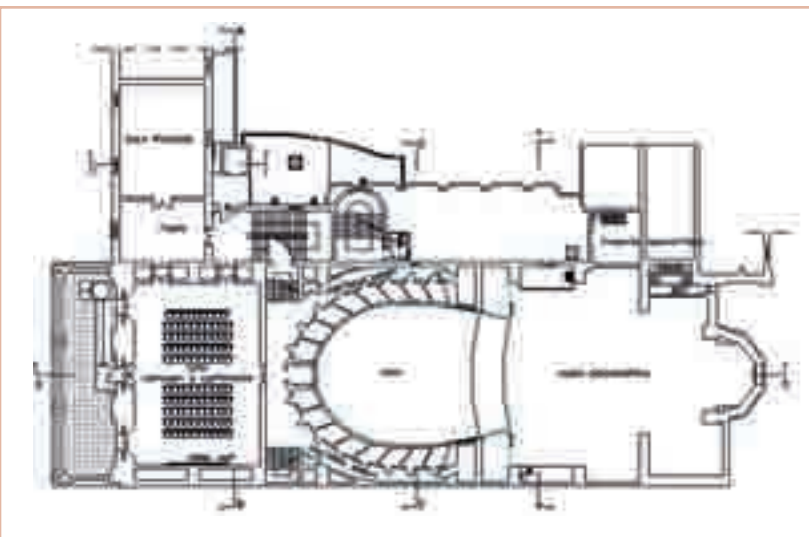
7.1 - Vista di sezione area di intervento.

8 - Vista degli elementi di rinforzo SRCM.

8.1 - Modellazione delle volte.

8.2 - Modello tridimensionale.

8.3 - Vista interna dei palchetti.



7.1

su di un reticolo di strisce di fili metallici unidirezionali applicati esternamente all'estradosso delle volte per mezzo di un legante idraulico (figura 7).

Gli impalcati dei corridoi comprendono le volte in muratura di circa 30 mm di spessore, un riempimento di ulteriori 10 mm in chiave e un pavimento seminato alla veneziana. La necessità di mantenere le quote esistenti, ha limitato lo spazio disponibile agli interventi ai 10 mm di spessore superiormente alle volte in muratura.

Gli interventi di consolidamento sono stati realizzati valutando lo stato di sollecitazione statica dell'edificio allo stato attuale, lo stato di sollecitazione statica dell'edificio con l'aumento di carico accidentale, lo stato di sollecitazione sismica dell'edificio ed i criteri e le tecniche di consolidamento e loro localizzazione spaziale.

Si è pertanto optato per l'applicazione all'estradosso delle volte di compositi SRCM (steel reinforced cement matrix) che consentissero di ottenere il sovraccarico utile netto di 600 kg./m<sup>2</sup> pur rispettando la condizione di resistenza al fuoco R90 per le strut-

ture portanti (figura 8). La soluzione prescelta, pur consentendo il passaggio degli impianti rispetto ai compositi in FRP realizzati con tessuto secco di carbonio rende accettabili le temperature che inevitabilmente si manifestano nelle volte in muratura in caso d'incendio.

Le volte dei palchi essendo dei padiglioni sono state modellate con degli archi incrociati lungo le diagonali dei palchi stessi, costituite da elementi beam in muratura di rigidità equivalente, quelle dei corridoi che sono di tipo a botte, sono state, invece, modellate con archi paralleli equidistanti.

Le strisce unidirezionali di micro trefoli di acciaio nichelato hanno una larghezza di 100 mm ed un'area specifica di 0,19 mm<sup>2</sup>/mm. Resistono a tensioni fino a valori di circa 2800 MPa, ma come è usuale per le armature applicate esternamente per incollaggio, la tensione critica risulta essere quella di de laminazione. Come accade per le strisce FRP, tale tensione dipende dall'energia di frattura specifica dell'interfaccia, e nel caso di mattoni di laterizio in generale si raggiungono alla de laminazione circa 1000 MPa di tensione.

I materiali SRCM consentono tuttavia una notevole miglioria rispetto alle soluzioni con C-FRP, in conseguenza della loro capacità di essere attorcigliati senza creare nessun danno alle fibre stesse. Nel caso in esame per ciascuna striscia di SRCM sono state eseguite due perforazioni a trapano nelle murature di confine delle volte, inserendo in tali fori due code attorcigliate ottenute dalla parte terminale della striscia. Attraverso tale accorgimento la tensione di de laminazione effettiva può essere anche notevolmente superiore al valore teorico.

## METODO DI ANALISI

Per determinare le sollecitazioni si è adottata un'analisi dinamica modale di tipo lineare con spettro di risposta. Di fatto sono stati considerati 200 modi di



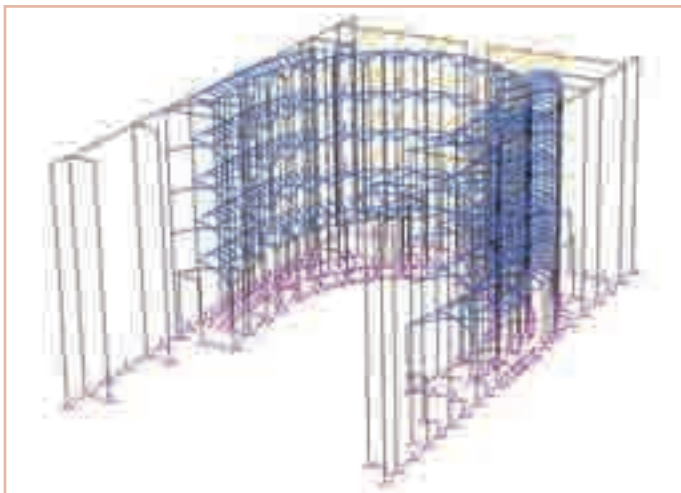
8



8.3



8.1



8.2

vibrare riuscendo ad eccitare l'85% della massa in entrambe le direzioni X e Y.

La combinazione dei modi, al fine di calcolare sollecitazioni e spostamenti complessivi, è stata effettuata adottando una combinazione quadratica tipo CQC avendo rispettato la condizione che il periodo di vibrazione differisca di almeno il 10% da tutti gli altri.

Le analisi di tipo elastico lineare costituiscono un buon compromesso per la modellazione delle strutture murarie fornendo risultati nel complesso attendibili senza pregiudicare il costo computazionale dei calcoli

e garantendo un controllo ottimale dei parametri di modellazione; tale tipo di analisi infatti è previsto dalle più aggiornate normative antisismiche. Con questo modo di procedere naturalmente, si riesce a valutare il comportamento della struttura nel suo complesso, rimandando l'indagine su problematiche locali e di tipo particolare, a tecniche diverse e più appropriate alla risoluzione del singolo problema.

Il progetto è stato svolto predisponendo un modello agli elementi finiti per l'analisi sismica del complesso murario e definendo il sistema di rinforzo sulla base dei valori delle azioni interne e delle direzioni principali di trazione e compressione.

In particolare la resistenza a flessione di una volta si esplica attraverso l'incurvamento della curva delle pressioni fino a toccare le superfici superiore o inferiore della volta. La presenza di un rinforzo all'estradosso è in grado di incrementare la capacità a sostenere momenti negativi della volta attraverso la traslazione verso l'alto della zona ove il passaggio della curva delle pressioni risulta ammissibile.

### DESCRIZIONE DELL'AZIONE SISMICA

Il modello di riferimento per la descrizione del moto sismico in un punto della superficie del suolo è costituito dallo spettro di risposta elastico. Lo spettro di riferimento è quello indicato nella Norma vigente D.M. 14/09/2005. Inoltre il moto orizzontale è consi-



- 9 - Piante delle griglie di rinforzo disposte ai tre piani strutturali.
- 10 - Vista dello schema di rinforzo della galleria.
- 11 - Particolare di un rinforzo dei parapetti della galleria.

In ultima pagina:

- 12 - Vista della sala dal palcoscenico (anni '70).
- 13 - Vista della sala dal palco reale (anni '70).

derato composto da due componenti orizzontali indipendenti, caratterizzate dallo stesso spettro di risposta.

Per definire correttamente tale spettro è necessario valutare il tipo di terreno presente. Nel caso in studio è stata adottata la seguente categoria di profilo stratigrafico del suolo di fondazione:

categoria C - depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o di argille di media consistenza.

### PROGETTO DEL RINFORZO

La lunghezza ottimale di ancoraggio è stata valutata considerando

$$l_f = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{tm}}} = \sqrt{\frac{260000 \cdot 0,19}{2 \cdot 1,50}} = 129 \text{ mm}$$

Dove:

$E_f$  è il modulo di elasticità normale della fibra in direzione della forza;

$f_{tm}$  è la resistenza media a trazione della muratura.

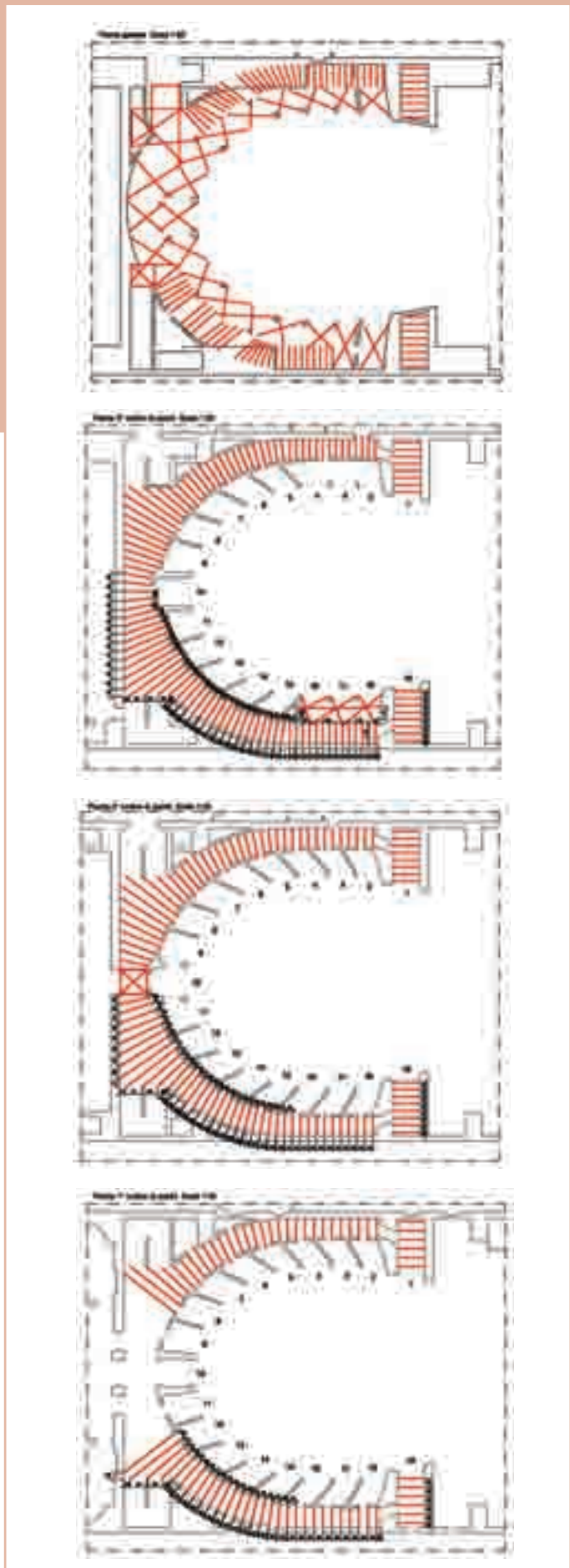
L'energia specifica di frattura del legame di aderenza rinforzo-muratura è definita come:

$$F_{fa} = 0,01 \cdot f_{cm} = 0,01 \cdot 15,0 = 0,15 \text{ MPa}$$

nella quale  $f_{cm}$  è la resistenza media a compressione della muratura.

Il valore di progetto della massima forza, trasmissibile da un rinforzo di lunghezza pari o superiore a quella ottimale di ancoraggio dipende dalle caratteristiche geometriche e meccaniche del rinforzo stesso e dalle caratteristiche dell' interfaccia in accordo con la relazione:

$$F_{max} = \frac{k_s}{\gamma_{red}} \cdot b_f \cdot \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot F_{fa}} = \frac{0,83}{1,2} \cdot 100 \cdot \sqrt{2 \cdot 260000 \cdot 0,19 \cdot 0,15} = 8420 \text{ N}$$





10



11

Dove:

$\gamma_{R,d}$  il coefficiente parziale di sicurezza del modello di resistenza (aderenza);

$k_m$  è un coefficiente correttivo di natura sperimentale.

Al quale corrisponde la seguente tensione:

$$f_{adm} = \frac{F_{max}}{b_f \cdot t_f} = \frac{8420}{100 \cdot 0,19} = 443 \text{ MPa}$$

Allo scopo di prevenire il meccanismo di delaminazione, è stato possibile ricorrere ad una procedura semplificata consistente nel verificare che allo SLU la tensione nel composito fibrorinforzato non ecceda un valore massimo,  $f_{fd,2}$ , fornito dalla seguente relazione:

$$f_{fd,2} = k_m \cdot f_{adm} = 3,0 \cdot 443 = 1329 \text{ MPa}$$

Come precedentemente detto nella fase di descrizione del modello, i solai delle volte a botte dei corridoi e dei padiglioni dei palchi sono stati modellati con delle "beam" disposte ad arco per cogliere le caratteristiche della sollecitazione della porzione di orizzontamento compresa tra due archi consecutivi. Ogni arco è stato approssimato con una poligonale di sei lati.

In questo modo è stato possibile cogliere lungo lo sviluppo di ciascun arco il valore dello sforzo assiale e del momento flettente.

Dallo studio d'insieme della struttura e dalla successiva analisi dei risultati si è appurato che le condizioni di carico più svantaggiose sono quella agli stati limite ultimi e quelle con azione sismica dominante agente in direzione ortogonale all'asse di simmetria del teatro.

Infatti questa azione sismica produce degli effetti torsionali nella struttura a seguito dell'elevata eccentricità tra il centro di massa e quello di taglio per ogni impalcato.

Tuttavia, sempre nel caso di carico sismica descritta, le sollecitazioni prodotte sugli orizzontamenti resta-

no appena inferiori a quelle ottenute con la combinazione agli SLU.

Nei calcoli di progetto dei rinforzi che seguono per le aree sopra descritte, i valori delle caratteristiche delle sollecitazioni sono state riferite al filo con la muratura di appoggio dei solai, evitando di essere eccessivamente pessimisti nella scelta delle sollecitazioni di progetto, considerando le sollecitazioni delle travi di solaio in corrispondenza degli assi delle pareti.

Considerando che l'intervento è stato eseguito all'estradosso di ogni solaio, non potendo rinforzare per il momento positivo, ma solo per i negativi di estremità, il diagramma del momento flettente è stato opportunamente traslato verso l'alto per considerare la plasticizzazione della sezione centrale.

Nelle successive figure sono illustrate le distribuzioni di strisce di rinforzo adottate per i differenti impalcati a servizio dei palchi (figure 9.a-9.c).

Nel caso di volte a crociera, il sistema strutturale si comporta come una griglia composta di due archi incrociati, e dunque la capacità portante può essere aumentata disponendo croci di tessuti d'acciaio (figura 10)

Lo schema a tirante d'estradosso si presta a molte soluzioni e consente notevoli risparmi per raggiungere un miglioramento della resistenza di strutture curve. Jurina (2004) ha presentato una notevole varietà di soluzioni per eseguire rinforzi con catene curve anche pretese.

Attraverso lo schema adottato si raggiunge una notevole connessione tra il sistema delle volte e le pareti perimetrali, impedendo di fatto l'allontanamento delle pareti stesse e la perdita di appoggio delle volte.

Lo stesso schema di rinforzo è stato adottato anche per i parapetti dei palchi, utilizzando un composito di assi di legno con interposto un tessuto di fili d'acciaio per realizzare il sistema resistente alle forze orizzontali del pubblico.



12



13

## CONCLUSIONI

Nella nota si è descritta la storia costruttiva e gli interventi di protezione sismica attualmente in corso presso il teatro Comunale Ebe Stignani di Imola.

Il teatro è un'importante costruzione del tessuto edilizio del Centro Storico di Imola, e in quanto tale ha sempre svolto una funzione di spazio pubblico formale nelle attività della città.

Attualmente, i gravi problemi sismici e le problematiche di sicurezza dei luoghi pubblici ne hanno richiesto un adeguamento strutturale, che fermi restando i vincoli architettonici e tecnologici non poteva essere risolto se non facendo ricorso ad una tecnica di consolidamento basata su materiali compositi innovativi.

Proprio per le problematiche di resistenza al fuoco la scelta è caduta sui tessuti unidirezionali di fili metallici che mostrano una notevole versatilità nella realizzazione di interventi geometricamente complessi nei quali la resistenza anche in caso d'incendio possa essere una delle richieste qualificanti.

Il progetto delle reti di strisce necessarie a garantire la sicurezza in caso di sisma è stata svolta con tecniche di calcolo tradizionali ma introducendo concetti di consolidamento appropriati per la tecnica adottata. Il risultato ha mostrato le notevoli potenzialità di tecniche di rinforzo basate sulla scelta di traiettorie di tensione come griglia portante del sistema di rinforzo. La scelta di rinforzi SRCM ha evidenziato la possibilità di soddisfare contemporaneamente esigenze di tipo sismico con esigenze di resistenza alle alte temperature, sebbene ad oggi un metodo di calcolo per la resistenza al fuoco dei rinforzi non sia ancora assodato.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano la ditta RES.IN.TEC Italia Srl di Calderara di Reno, la ditta CESI Impresa Generale

Costruzioni di Imola e l'ing. Gianfranco Zoli per aver messo a disposizione gran parte del materiale fotografico e progettuale relativo agli interventi effettuati sul Teatro Ebe Stignani; in tale modo è stato possibile presentare un esempio di realizzazione che può essere di qualche utilità anche in altri casi analoghi.

## BIBLIOGRAFIA

1. CNR, (2005), *Guidelines for Design, Execution and Control of Strengthening Interventions by Means of Fibre-reinforced Composites*, Bulletin DT 200/2004, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italy (english version).
2. Benedetti A., (2003), "Composite Innovative Materials in Structural Repairing", *CDS 2 - The Conceptual Design of Structures*, CI Premiere Ltd, Singapore.
3. Benedetti A., Mangoni E., Montesi M., Steli E., "Verifiche di sicurezza ed interventi di consolidamento della chiesa di S. Martino in Casola", *INARCOS*, LXII(680), Bologna.
4. Aprile A., Benedetti A., Cosentino N., "Seismic Reliability of Masonry Structures Strengthened with FRP Materials", 100th Anniversary Earthquake Conference, San Francisco, April 18-22, 2006, paper n° 1677
5. Benedetti A., Steli E., "Analytical Solution of the Shear - Displacement Curve for Reinforced Masonry Panels", The Tenth North American Masonry Conference, St. Louis, Missouri - June 3-6, 2007, ISBN 1-929081-28-6
6. Benedetti A., Camata G., Mangoni E., and Pugi F., "Out of Plane Seismic Resistance of Walls: Collapse Mechanisms and Retrofit Techniques", The Tenth North American Masonry Conference, St. Louis, Missouri - June 3-6, 2007, ISBN 1-929081-28-6
7. Poggi C., Fava G., (2008), "Il controllo di accettazione dei materiali fibrorinforzati per il rinforzo strutturale", *I Quaderni Tecnici di Assocompositi*, 1, Milano.