

IL RESTAURO ED I PROBLEMI DI ACUSTICA DEI TEATRI STORICI

R. Pisani⁽¹⁾, F. Duretto⁽²⁾

⁽¹⁾ Studio di ingegneria Acustica - Rivoli (TO)

⁽²⁾ Arpa Piemonte

PREMESSA

Il restauro dei teatri storici pone numerosi problemi di consolidamento strutturale del fabbricato e della sala, problemi di adeguamento alle normative di sicurezza per i luoghi di pubblico spettacolo nonché problemi di adeguamento degli impianti scenici alle esigenze degli allestimenti. Un restauro pienamente conservativo, inteso come ripristino delle strutture preesistenti, non trova concordi coloro che sono preposti alla sicurezza del pubblico: il restauro conserva le forme ma muta, a volte, radicalmente la sostanza che è, nel nostro caso, la struttura interna dei solai, delle travi, delle fondazioni etc. Il messaggio per la progettazione acustica del restauro che gli autori forniscono è quello della attenzione alla propagazione del suono nelle strutture che delimitano lo spazio teatrale e non allo studio della propagazione del suono nell'aria in quanto è la risposta acustica delle strutture che può essere notevolmente e irreparabilmente compromessa. I metodi di indagine acustica ed i criteri progettuali sono, quindi, molto diversi da quelli che vengono comunemente utilizzati e coinvolgono la propagazione delle vibrazioni sonore dalla sorgente alle superfici più lontane, la resa di irraggiamento acustico dei materiali di rivestimento, dei parapetti, dei pavimenti e dei tramezzi dei palchi in sala, e la risposta delle opere murarie in mattoni con il confronto di questi dati con quelli dedotti dell'utilizzo di strutture in cemento armato ed in impalcati di acciaio.

Il lavoro che si propone è una sintesi dei metodi di progettazione e di verifica messi a punto dagli autori nei diversi anni di attività professionale nel campo dell'acustica con particolare riferimento al restauro dei teatri d'opera.

Si espongono i mezzi di indagine seguiti per caratterizzare la propagazione del suono nei materiali utilizzati in passato per la costruzione dei teatri; si affronterà il problema della volta delle sale teatrali e la sua risposta al suono, il problema del palcoscenico, del pavimento e delle strutture dei palchi tipici del teatro d'opera italiano. I risultati delle indagini eseguite sulle strutture esistenti prima del restauro forniscono indicazioni per il ripristino delle stesse in adeguamento alle normative e non in contrasto con le regole di acustica.

L'attenzione è quindi rivolta alle strutture ed alle tecniche acustiche di indagine della loro risposta.

INTRODUZIONE

L'acustica dei teatri, come si legge nelle numerosissime pubblicazioni e nei diversi testi redatti dai più illustri cultori della materia, ha per oggetto lo studio del campo sonoro in tutta la sala, le correlazioni del campo con la percezione

binaurale dell'attore, del musicista e dell'ascoltatore, il ruolo delle forme e dei materiali di rivestimento nella distribuzione del suono. Tutti gli argomenti trattati, i modelli di previsione implementati, le verifiche analitiche e di ascolto in simulazione forniscono scarsi mezzi al professionista di acustica che affianca il progettista del restauro.

Gli argomenti che sostengono la tesi esposta nel settore del restauro dei teatri storici sono numerosi e tutti traggono origine dalla definizione stessa di restauro che, per i più è una operazione che porta al recupero e ripristino del bene culturale come esso originariamente è stato concepito e realizzato dall'architetto. Agli acustici, quindi, non viene chiesto di cambiare le forme, di agire con specchi e diffusori di suono, di utilizzare materiali appropriati per l'assorbimento del suono e la correzione del tempo di riverberazione etc. ma viene chiesto esclusivamente il parere sulle scelte di natura strutturale che devono essere effettuate in adeguamento alla normativa riguardante la sicurezza e la prevenzione incendi. I problemi pratici di acustica nel campo del restauro sono altri e ben lontani dalla impostazione mentale e dal bagaglio di conoscenze dei professionisti.

L'acustica, come normalmente è intesa e che fornisce validi mezzi per la progettazione del nuovo, non fornisce invece i mezzi pratici di progettazione a chi si occupa di restauro. Infatti, in questo campo, il professionista di acustica deve guardare maggiormente alla propagazione del suono nel mezzo solido (le strutture) perché è in tale sistema che si producono le più incisive trasformazioni e le più preoccupanti devastazioni. Un teatro da restaurare, quindi, non subirà variazioni di forma, non verrà tappezzato di pannelli fonoassorbenti, non verrà sottoposto a variazioni di pendenza della platea etc, ma verrà cementificato e consolidato con putrelle di acciaio che sostituiranno le vecchie impalcature lignee facile preda dei tarli e del fuoco. Le normative sulla sicurezza dei locali di pubblico spettacolo possono essere interpretate in modo talmente restrittivo dal professionista incaricato il quale, privo delle conoscenze di acustica e di propagazione del suono nel mezzo solido utilizzerà i materiali e le soluzioni che contrastano con le più elementari regole utilizzate in passato. Ovviamente le opere di consolidamento adottate non si vedono, sono nascoste da uno strato ligneo di rivestimento che ricoprono le solide strutture in cemento con la massima resistenza al fuoco: il palcoscenico sapientemente costruito in strutture lignee legate al pavimento ed al guscio della sala sarà, ora, una soletta in cemento armato rivestita con tavole di legno che perderanno le caratteristiche elastiche di un palco mettendo a dura prova le caviglie dei ballerini oltre, naturalmente, a produrre sbarramenti assurdi alla propagazione del suono attraverso le strutture.

Il lavoro che si propone è una sintesi dei metodi di progettazione e di verifica messi a punto dagli autori nei diversi anni di attività professionale nel campo dell'acustica con particolare riferimento al restauro dei teatri d'opera.

Si espongono i mezzi di indagine seguiti per caratterizzare la propagazione del suono nei materiali utilizzati in passato per la costruzione dei teatri; si affronterà il problema della volta delle sale teatrali e la sua risposta al suono, il problema del palcoscenico, del pavimento e delle strutture dei palchi tipici del teatro d'opera italiano. I risultati delle indagini eseguite sulle strutture esistenti

prima del restauro forniscono indicazioni per il ripristino delle stesse in adeguamento alle normative e non in contrasto con le regole di acustica.

IMPOSTAZIONE PROGETTUALE

L'obiettivo comune a tutti i professionisti nel caso di restauro conservativo e funzionale è quello di riportare il teatro al suo antico uso, ripristinando il più fedelmente possibile l'architettura, le forme, i decori dell'edificio e mantenendo le caratteristiche acustiche originali, che definiscono per ogni teatro antico, una propria personalità, una propria voce come se si trattasse di un vero e proprio strumento musicale. A questo proposito è importante sottolineare che le norme vigenti a tutela della sicurezza dei locali di pubblico spettacolo sono per lo più incompatibili con le modalità costruttive e i materiali utilizzati in passato. La prima grossa difficoltà quindi consiste proprio nel coniugare la sicurezza dell'edificio e del pubblico con le esigenze di tipo acustico, che richiedono una risposta delle strutture e dei materiali di rivestimento ottenibile seguendo generalmente criteri diversi da quelli utilizzati per la prevenzione incendi.

Il progetto di acustica si sviluppa, quindi, cercando il compromesso ottimale fra le due esigenze, ricercando insieme ai progettisti strutturali soluzioni alternative, magari insolite, o addirittura sperimentali, per risolvere problemi facilmente affrontabili oggi ad esempio con il cemento armato (non accettabile dal punto di vista acustico) e individuando le strutture che, anche irrigidite a seguito del consolidamento, non avrebbero compromesso l'antica risposta acustica dell'edificio nel suo insieme.

Se lo stato di degrado di un teatro da restaurare lo consente occorre eseguire uno studio connesso con la propagazione del suono nelle strutture che restano ancora disponibili utilizzando la stessa impostazione mentale che è tipica dei restauratori e degli archeologi. In sintesi, l'impostazione progettuale del restauro deve partire dall'analisi della situazione attuale per la caratterizzazione dei principali elementi acustici; essa si articola nei seguenti due punti:

- risposta delle strutture;
- risposta dello spazio architettonico.

ANALISI DELLE LE STRUTTURE DI UN TEATRO

Lo stato di fatto di un teatro viene analizzata nel suo aspetto strutturale considerando anche il fatto che, sovente, un teatro oggi in disuso può essere stato in passato utilizzato anche come cinema. Sovente si rileva che mancano completamente gli arredi e che le strutture stesse sono in parte rovinate, lasciando intravedere gli elementi portanti, i travetti, il cannicciato della volta e dei palchi etc. Tale stato di fatto e di abbandono deve suggerire al professionista di acustica il metodo strumentale di indagine per avvicinarsi, studiare, comprendere e descrivere "l'impronta acustica" del teatro. Per i teatri lirici italiani, ad esempio, si rilevano caratteristiche costruttive comuni che vengono di seguito descritte:

Il palco

Il palco, di solito, è costituito da un praticabile in legno, sovente inclinato verso la sala, che poggia su alti pali di sostegno in legno. Le norme di sicurezza prevedono un divisorio tra palco e sottopalco che deve resistere al fuoco specie nei casi in cui è presente una fossa d'orchestra. Ovviamente l'idea di uno strutturalista si orienta verso la realizzazione di un solaio in cemento armato sia pure realizzando sopra di esso un praticabile in legno. Questo elemento, di estrema importanza strutturale, costituisce un primo diaframma che impedisce la propagazione delle vibrazioni acustiche verso altri elementi architettonici che collaborano alla generazione del campo sonoro in sala (pareti della fossa d'orchestra, pavimento della sala, balaustre dei palchi etc).

La fossa d'orchestra

La fossa d'orchestra, normalmente per i piccoli teatri lirici, si apre piuttosto stretta a filo del boccascena ed è utilizzabile solo per un esiguo numero di orchestrali. Si chiede sovente un allargamento della fossa, ovvero una sua estensione sotto il palco. Questo può creare considerevoli problemi di acustica che devono essere affrontati e risolti sin dalla prima fase progettuale.

La platea

La platea presenta normalmente una pavimentazione in legno inchiodata su traverse e travi appoggiate su pilastri in mattoni pieni. Il progettista delle strutture ama prevedere, di solito, un solaio in cemento armato che lega strutturalmente le pareti laterali della sala e che è proposto rivestito in listelli di legno incollati. Anche in questo caso la diversa velocità di propagazione del suono nel legno e nel cemento crea degli squilibri di natura acustica che impediscono al pavimento di reirradiare il suono nei posti più lontani dal palco.

I palchi

Nei teatri minori la platea, di solito, è delimitata dal piano delle baracche e da un numero d'ordine di palchi da 2 a 5. Di solito i palchi sono realizzati con una struttura portante in travi di legno. Gli orizzontamenti dei palchi sono di solito costituiti da un praticabile in legno sostenuto da una serie di travi che si diramano a raggiera innestandosi dal lato verso il corridoio sulla struttura portante in muratura e dal lato verso la platea sulla struttura portante in legno dei palchi stessi.

Al di sotto delle travi portanti in legno è sospesa la copertura del palco sottostante, costituita da un cannicciato intonacato sull'intradosso (**Fig.1**). Ogni palco è separato dagli altri mediante setti realizzati con tavole di legno massiccio oppure mediante un divisorio in mattoni.. La balaustra dei palchi è costituita da due paramenti di legno con interposta una intercapedine d'aria ed è arricchita sul lato verso la platea da decori e fregi lignei e in gesso con funzione decorativa.

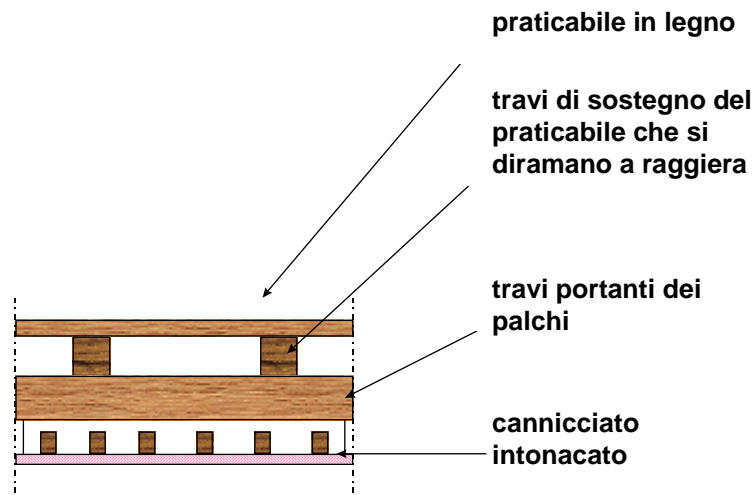


Fig. 1 - SEZIONE PAVIMENTAZIONE PALCHI

La volta

La volta della sala è di solito realizzata con una serie di nervature in legno a cui è fissata una maglia di correntini trasversali e longitudinali a sostegno del cannicciato. Strutturalmente è sostenuta da grandi capriate in legno su cui appoggia la copertura in coppi. E' una struttura elastica, che risponde molto bene alle sollecitazioni del suono prodotto nel teatro e che partecipa in modo importante alla sonorità complessiva dell'ambiente.

In sintesi da un primo esame della struttura del teatro gli elementi architettonici più importanti dal punto di vista acustico risultano, in ordine di importanza:

- 1. la volta**
- 2. la balaustra dei palchi**
- 3. la pavimentazione e il soffitto dei palchi**
- 4. i tramezzi dei palchi.**

Tali elementi devono essere caratterizzati in termini di risposta acustica e vibrazionale con una serie di prove e misure realizzate sul posto.

PROTOCOLLO DI MISURA

Questo tipo di misure devono essere mirate all'individuazione della risposta vibrazionale delle strutture in rapporto alla sollecitazione sonora; a questo scopo durante l'emissione in sala di un segnale sonoro di riferimento vengono misurati contemporaneamente il livello sonoro in prossimità della struttura esaminata e l'accelerazione indotta sulla struttura dalla stessa energia sonora. Si può utilizzare sia un suono di tipo stazionario sia un suono di tipo impulsivo. In questo secondo caso si determina meglio anche la risposta della struttura all'impulso.

Per analizzare il comportamento delle strutture che normalmente collaborano in maggior misura alla risposta acustica di un teatro si attivava una sorgente di rumore rosa sul palco e si misurano contemporaneamente il livello sonoro in prossimità della struttura in esame e il valore dell'accelerazione prodotta dalla stessa sorgente, ponendo l'accelerometro sulla struttura da analizzare (setti divisorii, nervature di pavimentazioni e soffitti etc.). Se si vuole studiare l'interazione tra campo sonoro e struttura occorre fare in modo che l'altoparlante non sia appoggiato direttamente sul palco ma separato elasticamente da questo mediante un tappetino resiliente.

I valori sono stati acquisiti sui due canali di un registratore digitale DAT stereo e sono stati successivamente analizzati in laboratorio in forma di spettrogrammi, mediante l'analizzatore di spettro in tempo reale.

Vengono ricavati i seguenti dati:

- autospettro del rumore che investe la struttura;
- autospettro delle vibrazioni (accelerazione) della struttura indotte dal rumore;
- funzione di trasferimento tra eccitazione sonora e risposta vibratoria della struttura;
- funzione di coerenza;
- cross-spettro tra rumore e vibrazioni.

Il concetto di base di questo tipo di misura deriva dalla seguente considerazione: le opere di consolidamento per la loro propria natura possono irrigidire parti della struttura del teatro che attualmente non sono rispondenti alle norme di sicurezza o che risultano fatiscenti. Interventi strutturali di questo tipo, se non opportunamente calibrati, possono creare delle incompatibilità acustiche tra i diversi materiali; ci si riferisce in particolare alle proprietà che gli stessi hanno di trasmettere il suono sotto forma di vibrazione. La scelta degli opportuni materiali e soprattutto delle opportune modalità di ancoraggio possono garantire il mantenimento delle condizioni preesistenti. L'analisi effettuata consente di stabilire dove un intervento di consolidamento non adeguato rischia di compromettere l'ascolto, ovvero dove si può intervenire più liberamente senza modificare eccessivamente la risposta acustica complessiva del teatro.

Le misure di acustica, effettuate analizzando nello stesso punto e contemporaneamente il rumore e le vibrazioni prodotti dalla sorgente sonora, grazie ad opportune correlazioni consentono di dedurre il comportamento attuale della struttura. Questi cicli di misure hanno l'obiettivo di individuare i punti della struttura che partecipano maggiormente alla risposta acustica e quelli meno sensibili, per i quali l'opera di consolidamento risulta meno critica.

Per "partecipazione acustica" della struttura di un teatro e dei suoi elementi di arredo o funzionali si intende la capacità di trasmettere ed assorbire il suono attraverso la vibrazione delle sue parti, anche attraverso un re-irraggiamento dell'energia sonora.

Quanto detto deve essere considerato come un ulteriore approfondimento delle conoscenze dell'acustica classica a proposito degli spazi teatrali. L'approccio classico affronta infatti unicamente il problema dell'assorbimento del

suono attraverso gli arredi e i materiali di rivestimento (riverberazione) e, nei casi più accurati, affronta il problema del buon ascolto legato alla spazialità del campo sonoro. Non risulta a chi scrive che siano mai stati effettuati studi correlati di rumore e vibrazione quali quelli descritti nella presente relazione. Si può stimare peraltro che gli aspetti strutturali menzionati concorrano con una percentuale del 30% all'acustica complessiva della sala.

Terminata l'analisi, per evidenziare il fenomeno vengono costruite con i dati rilevati delle curve che descrivono la distribuzione della "irrigidibilità" delle strutture.

Autospettro di rumore e vibrazioni

La determinazione dell'autospettro del rumore e delle vibrazioni consente di ricavare una pseudo funzione di trasferimento in modulo semplicemente effettuando la differenza fra gli spettri. Si possono individuare in questo modo particolari risonanze della struttura.

Funzione di trasferimento

La funzione di trasferimento reale è definita dal rapporto (frequenza per frequenza) fra il segnale in uscita dal "sistema struttura" e l'eccitazione. La funzione di trasferimento in modulo e fase può anche essere ricavata dal rapporto tra funzione di cross-spettro e funzione di autospettro del segnale di ingresso. Tale funzione rappresenta in pratica il rapporto fra l'energia uscente dal sistema (nel nostro caso viene considerata l'accelerazione) e l'energia in ingresso (nel nostro caso viene considerato il rumore che eccita la struttura) nella stessa struttura.

Nel sistema elementare suddetto il rapporto energetico fra uscita e ingresso risulta inferiore all'unità in quanto buona parte dell'energia sonora viene dissipata all'interno della struttura. Solo in particolari casi di risonanza si può avere una esaltazione (non amplificazione energetica) di alcuni componenti rispetto ad altri. Se le indagini acustiche rivelano una maggiore energia in uscita rispetto all'energia di ingresso significa che buona parte dell'energia in uscita (vibrazioni secondarie aggiuntive) proviene dalle strutture vicine, sollecitate a loro volta dalla stessa emissione sonora di riferimento.

Questa strada secondaria di trasferimento di energia può essere meglio indagata attraverso la misura della funzione di coerenza tra vibrazione della struttura e campo sonoro vicino. Perdite di coerenza tra i segnali denotano immissioni di energia da altri rami: i canali di propagazione sono da ricercarsi nelle strutture di collegamento che realizzano dei ponti acustici efficienti.

La funzione di trasferimento coerente con il segnale di ingresso viene ottenuta attraverso la pesatura con la funzione di coerenza. In questo modo si evidenzia l'aliquota di segnale che proviene direttamente dal campo acustico rispetto a quella che proviene attraverso la vibrazione delle strutture trasmesse nel punto di misura da superfici recettive poste molto più distanti.

Se la funzione di trasferimento coerente assume valori importanti significa che l'energia vibratoria è unicamente determinata dal campo acustico ad esso adiacente e poca energia viene trasmessa da altri punti di ricezione. L'elemento

architettonico considerato può essere un ricettore di energia sonora importante che trasmette strutturalmente ad altri elementi coinvolgendoli nel fenomeno, per cui un eventuale irrigidimento sarebbe molto dannoso.

Se invece la funzione di trasferimento coerente è bassa significa che la superficie non partecipa sensibilmente al campo acustico per cui l'irrigidimento della struttura non dovrebbe compromettere il suono complessivo.

Funzione di coerenza

La coerenza è rappresentata da un numero puro compreso tra 0 e 1, basato su calcoli statistici, e indica quanto l'energia in uscita sia correlata all'energia in ingresso. Una coerenza pari a 1 indica che tutta l'energia in uscita è correlata all'energia in ingresso; viceversa una coerenza pari a 0 indica che l'energia in uscita non è per niente correlata all'energia in ingresso. Più la coerenza è alta, più suono e vibrazione sono correlati, cioè concorrono ad una migliore resa acustica complessiva a quella frequenza.

Funzione di trasferimento coerente

E' un ulteriore parametro che si calcola utilizzando la funzione di trasferimento corretta *gamma* e la coerenza secondo la seguente relazione:

$$T(\omega) = 10 \cdot \log \left(10^{\left(\frac{F(\omega)}{10} \right)} \cdot \Gamma(\omega) \right) \quad [\text{dB}]$$

dove

$T(\omega)$ = funzione di trasferimento coerente

F = funzione di trasferimento espressa in unità logaritmiche

Γ = funzione di coerenza

Le misure di accelerazione e di rumore associate sono state effettuate sulle seguenti strutture:

- pavimento e soffitto dei palchi
- balaustra dei palchi
- setti divisorii dei palchi
- volta del teatro

Risultati dell'analisi

Il risultato dettagliato dell'analisi è riportato in schede e grafici. Come si è detto, se la funzione di trasferimento assume dei valori elevati significa che a quella frequenza la vibrazione è importante nel bilancio complessivo di irradianza di energia sonora, quindi un'azione di consolidamento che comporti un irrigidimento della struttura porterebbe ad un impoverimento del suono complessivo a quella frequenza. Gli stessi valori sono riassunti in tabella.

TAB.I

Funzione di trasferimento per diversi elementi dei PALCHI

elemento	Funzione di trasferimento [dB]	
	media basse frequenze [50 - 250 Hz]	media alte frequenze [315 - 2500 Hz]
setto divisorio fra i palchi	36.1	34.6
soffitto palchi	32.5	31.1
correntino soffitto palchi	33.5	32.0
travetto soffitto palchi	32.9	35.1
trave di sostegno pavimento palchi	33.6	29.5
balastra palchi	37.0	39.1

TAB.II
Funzione di trasferimento per diversi elementi della VOLTA

elemento	Funzione di trasferimento [dB]	
	media basse frequenze [50 - 250 Hz]	media alte frequenze [315 - 2500 Hz]
nervatura principale sostegno cannicciato	19.5	12.5
primo correntino estradosso	19.0	7.9
correntino trasversale centrale	19.5	13.5
correntino longitud. centrale	16.6	6.1
nervatura centro campata	69.6	6.2
trave di sostegno praticabile	13.8	13.6

Per quanto riguarda gli elementi dei palchi si osservano dei valori abbastanza elevati in tutto il campo delle frequenze. Ciò significa che tutta la struttura lignea dei palchi svolge un ruolo importante nella risposta acustica della sala. Le vibrazioni indotte dal suono emesso sul palco reirradiano energia sonora in sala, rendendo i toni più pieni e ricchi. In particolare, i valori della funzione di trasferimento relativi alla balastra dei palchi risultano i più elevati, indicando che questo elemento, già importante per la presenza dei decori in grado di diffondere il suono, è presumibilmente di grande efficacia anche per migliorare la sonorità dell'ambiente.

Per quanto riguarda la volta, la partecipazione alla reirradiazione delle alte frequenze risulta abbastanza contenuta, mentre si evidenzia il fortissimo contributo alle basse frequenze della nervatura di centro campata. Data l'estensione della superficie in esame e considerato il diverso comportamento

degli elementi che la compongono, sembra opportuno esprimere graficamente il risultato mediante curve di “equi-irrigidibilità”. In pratica il valore della funzione di trasferimento viene equiparato ad un grado di irrigidibilità. Il termine sta ad indicare quanto i diversi settori della volta, a seconda della propria natura costruttiva, sono suscettibili di essere irrigiditi senza per questo compromettere l’elasticità complessiva originaria. Tale elasticità è di fondamentale importanza per la risposta acustica di questo elemento che, per la sua estensione e posizione costituisce nei teatri un’area di grande resa per il rinforzo del suono prodotto sul palco e per la colorazione del suono in sala.

CONCLUSIONI

L’analisi attenta dei risultati ottenuti dall’indagine descritta consente di valutare la tipologia dell’intervento di consolidamento proposto dallo strutturalista.

Gli irrigidimenti con eventuali putrelle in acciaio possono essere eseguiti nei nodi strutturali ove minore è la collaborazione acustica delle strutture. Per il consolidamento del teatro portato ad esempio possono essere tratte conclusioni del tipo sotto descritto:

volta - la partecipazione al campo sonoro degli elementi portanti è fondamentale per cui è estremamente sconsigliato intervenire con consolidamenti che irrigidiscono la struttura. Le condizioni della volta presa ad esempio sono sufficientemente buone e consentono di non intervenire in alcun punto con azioni di tipo strutturale. La volta potrà quindi essere semplicemente rivestita sull’estradosso con fibre minerali spruzzate ai fini della prevenzione incendi.

palchi - la balastra dei palchi, il pavimento, il soffitto ed i setti divisorii hanno una grossa rilevanza nella generazione del campo sonoro. I consolidamenti necessari vengono quindi ridotti al minimo, anche considerando le buone condizioni di parte delle strutture. La pavimentazione e il soffitto dei palchi vengono ripristinati mantenendone la struttura lignea originaria con sostituzione dei travi fatiscenti con altri. L’assito del pavimento può essere sostituito con una lastra di legno unica. L’intercapedine a pavimento viene riempita con schiume: la lana di vetro non è infatti accettabile per la protezione incendi perché non risulta sufficientemente compatta e tra le sue fibre rimane incapsulata dell’aria.