Correzione acustica di ex-chiese riadattate per utilizzo concertistico: un esempio di progettazione di interventi non Sabiniani con l'ausilio del calcolatore

Angelo Farina
Dipartimento Ingegneria Industriale
Università di Parma - Via delle Scienze - PARMA

Alessandro Cocchi
Istituto di Fisica Tecnica, Facoltà di Ingegneria
Viale Risorgimento 2 - Bologna

Sommario

La memoria riferisce su una esperienza di progettazione degli interventi di correzione acustica in una ex-chiesa, ristrutturata esplicitamente per l'utilizzo concertistico: la Basilica di S.Domenico a Foligno.

Il progetto di correzione acustica si basa sull'impiego di pannellature riflettenti, in grado di reindirizzare il suono verso l'unica superficie fortemente assorbente presente nella sala: la platea gremita di pubblico. In tal modo il campo sonoro diviene fortemente non Sabiniano, e si consegue una significativa riduzione della riverberazione rispetto al valore previsto in base alle teorie di acustica statistica.

I risultati conseguibili con le varie ipotesi progettuali sono stati previsti matematicamente mediante un nuovo software dedicato, la cui funzionalità è stata verificata mediante comparazione con i risultati di accurati rilievi sperimentali compiuti a più riprese nella basilica.

La precedente esperienza effettuata dagli autori nella ristrutturazione di ex-chiese (s.Lucia a Bologna) ha mostrato che gli interventi proponibili, affinchè vengano effettivamente realizzati, debbono essere compatibili dal punto di vista architettonico con i vincoli di conservazione degli edifici storici posti dalle autorità; altrimenti si rischia di proporre soluzioni sicuramente molto efficaci dal punto di vista acustico, ma che di fatto non vengono messe in opera, facendo sì che la sala venga impiegata ugualmente in assenza di qualsiasi correzione.

Pertanto in questo lavoro gli interventi correttivi proposti sono limitati, sia dal punto di vista della superficie complessiva, sia dal punto di vista dell'interazione con le strutture esistenti.

Ciononostante, la simulazione computerizzata dei risultati ottenibili mostra che, in alcune delle configurazioni proposte, si ottiene un deciso miglioramento delle condizioni di ascolto musicale nella sala.

1. La problematica del riutilizzo di ex-chiese

Accade sovente nelle città italiane che si renda disponibile come contenitore polifunzionale la navata di un edificio religioso sconsacrato. Vista la notevole difficoltà incontrata nell'edificare ex-novo tali complessi, l'impiego di tali spazi è inevitabile.

La presenza di stringenti vincoli architettonici e di protezione dei beni artistici rende tuttavia assai ardua la sistemazione acustica di sale così grandi, che sono generalmente afflitte da eccessivo tempo di riverbero, echi ed insufficiente chiarezza del suono.

L'intelligibilità della parola è molto scarsa, ma essa può venire migliorata significativamente da impianti di diffusione sonora ben concepiti, basati su un elevato numero di piccoli altoparlanti direttivi, collocati a breve distanza dagli spettatori.

Le prestazioni nel caso dell'ascolto della musica sono invece solitamente disastrose: mancano riflessioni precoci provenienti dalle pareti laterali, e sono viceversa presenti echi ritardati che emergono dalla pur imponente coda riverberante. Questi tre aspetti sono fra loro mutuamente legati: le pareti laterali delle chiese sono solitamente dotate di cappelle, o ancor peggio di navate laterali; questi spazi aumentano il volume della navata principale, aumentando l'energia riverberante. Il soffitto è molto alto, e usualmente è curvato oppure a cupola: le riflessioni che provengono da esso sono dunque molto tardive, e non uniformemente distribuite. La parete di fondo, infine, che solitamente corrisponde alla facciata della chiesa, è piatta e riflettente, e causa echi in gran parte della platea.

Le classiche tecniche di correzione acustica, basate sul rivestimento delle superfici con materiali fonoassorbenti, non sono appropriate in questi casi: le superfici da trattare sono infatti molto vaste, e questo rende proibitivi i costi, ed inoltre bisogna fare i conti con i vincoli posti dalle autorità relativamente alla conservazione degli edifici storici.

Peraltro, l'impiego di tecniche di correzione alternative, quale quella proposta dagli autori, ha il grosso difetto di non consentire una semplice valutazione dei risultati conseguibili mediante le ben note relazione dell'acustica statistica (formule di Sabine o di Eyring), poichè il campo sonoro viene volutamente reso non uniformemente diffuso.

Nasce pertanto l'esigenza di disporre di tecniche di previsione del campo sonoro in grado di prescindere dalle ipotesi di Sabine, pur consentendo la valutazione dell'intera coda sonora riverberante. Gli autori hanno sviluppato pertanto due codici di calcolo in grado affrontare questo problema: il primo è un classico Ray Tracing [1,2], mentre il secondo è un innovativo Pyramid Tracing.

2. Modelli di previsione numerica del campo sonoro

Stante la problematica suesposta, non sono applicabili allo studio della propagazione sonora in spazi riverberanti non sabiniani i modelli ibridi oggi più diffusi, quali Modeler, Odeon o Epidaure [3,4,5]: essi infatti aggiungono ad una prima parte della risposta all'impulso, calcolata più o meno deterministicamente, una coda sonora tardiva ottenuta da relazioni di tipo statistico.

Gli autori hanno in passato già affrontato questo problema, realizzando un modello numerico basato sulla tecnica del Ray Tracing: come è noto tale tecnica prevede che dalla sorgente venga lanciato un grande numero di raggi, privi di divergenza, che vengono seguiti per alcune centinaia di rimbalzi sulle pareti della sala. I ricevitori sono costituiti da sfere di appropriato diametro, all'interno delle quali si valuta il contributo di ogni singolo raggio che interseca il volume del ricevitore, in termini di densità sonora (J/m^3).

Il codice Ray Tracing è stato impiegato con successo nello studio dell'acustica della ex-chiesa di S.Lucia a Bologna, trasformata in Aula Magna dell'Università in occasione delle celebrazioni per IX Centenario della fondazione [1,2]. In effetti le risposte all'impulso previste numericamente sono risultate molto simili a quelle rilevate sperimentalmente con sorgente

impulsiva, e la successiva elaborazione ha consentito di definire un intervento di correzione basato su superfici riflettenti molto estese, che purtroppo non è ancora stato messo in opera.

Il principale problema del Ray Tracing è costituito dal tempo di calcolo, causato a sua volta dalla necessità di lanciare centinaia di migliaia di raggi, onde prevedere correttamente anche la parte estrema di code riverberanti lunghe 4-5 secondi. Ogni configurazione studiata richiedeva infatti decine di ore di elaborazione!

E' stato pertanto sviluppato un nuovo codice di calcolo, denomimato provvisoriamente "Ramsete", basato sul tracciamento di piramidi: la superficie sferica della sorgente sonora viene suddivisa in un certo numero di triangoli, cui corrisponde l'emissione di un fascio di energia di forma piramidale, come mostrato dalla fig. 1.

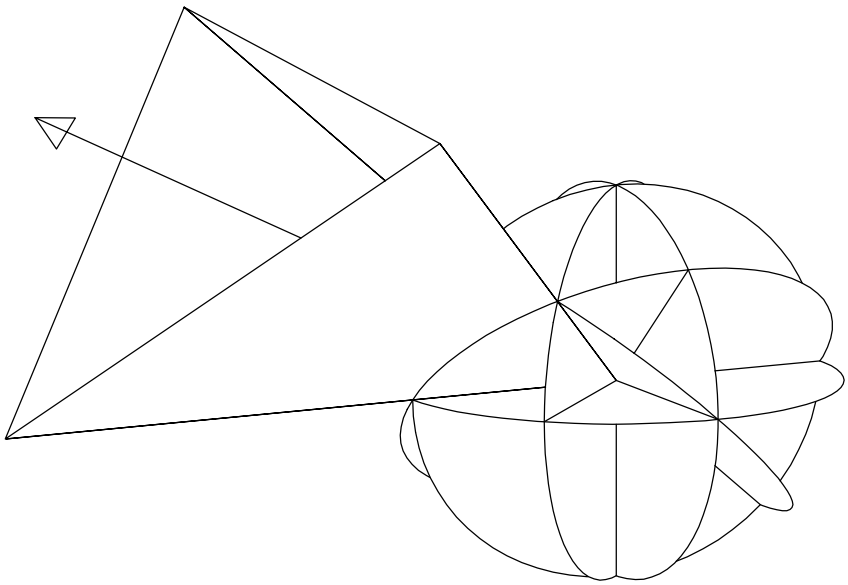

Fig. 1 - Emissione di fasci piramidali da una sorgente sferica.

La traiettoria dell'intero fascio viene assimilata a quella del raggio centrale dello stesso, ma l'ampiezza del fascio va ovviamente allargandosi man mano che lo stesso si propaga. Inoltre il ricevitore è un punto, e scompare così il problema di definire correttamente il volume della sfera ricevente.

Poichè la base della piramide si allarga via via sempre più, nella coda riverberante si ottiene un numero molto elevato di arrivi di energia nell'unità di tempo anche lanciando un numero abbastanza ristretto di piramidi. Pertanto il tempo di elaborazione discende di alcuni ordini di grandezza rispetto al Ray Tracing.

Il problema del Pyramid Tracing (comune peraltro anche agli altri tracciatori di fasci divergenti) è che un certo numero di sorgenti immagine di ordine elevato non viene riconosciuto, poichè il tracciamento si basa sempre e soltanto sulla storia del raggio centrale del fascio, e trascura le riflessioni prodotte da superfici che, pur investite dal fascio stesso, non vengono interessate dal raggio centrale (fig. 2).

Si osserva pertanto una sistematica deviazione fra la coda sonora prevista dal Pyramid Tracing e quella ottenuta con il Ray Tracing, con una sottostima del campo riverberante. E' pertanto necessario procedere ad una correzione della coda riverberante, onde ripristinarne la corretta energia. Nel software qui impiegato, tale correzione è di tipo moltiplicativo: l'energia sonora viene moltiplicata per il rapporto fra il numero teorico di arrivi di energia nell'unità di tempo (che cresce con il quadrato del tempo di arrivo) e quello effettivo, che non viene ottenuto

da stime basate sulle ipotesi di campo diffuso, ma viene valutato direttamente dal codice di calcolo in base alla analisi statistica delle storie dei raggi emessi.

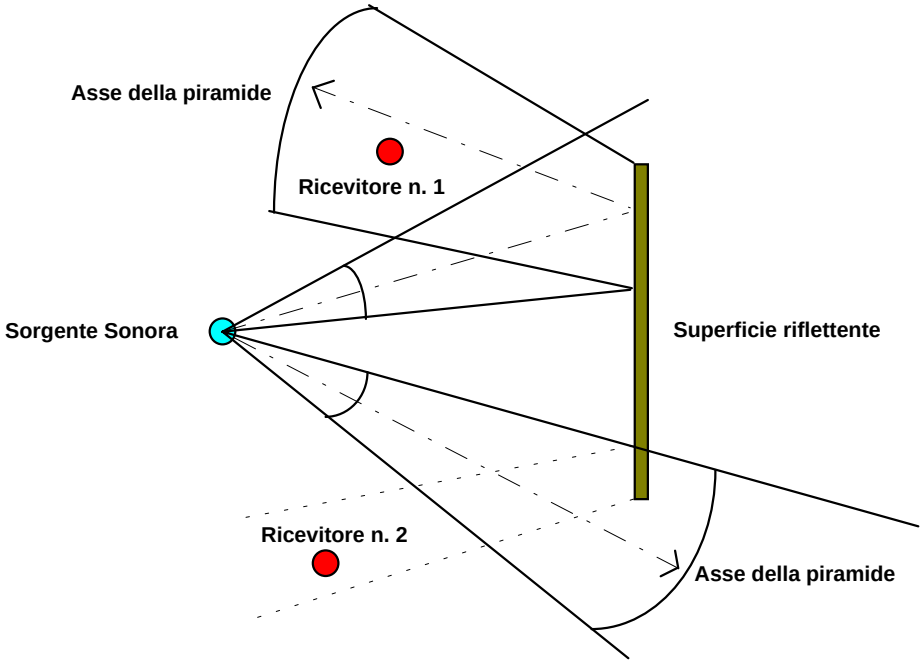

Fig. n. 2 - Meccanismo di mancato rilevamento di una riflessione nel ric. 2

La fig. 3 illustra l'andamento nel tempo del numero di riflessioni per ms, ottenuto in base alla teoria delle sorgenti immagine e dal Pyramid Tracing. Si osserva che l'andamento di quest'ultimo è in prima approssimazione governato da una legge analoga a quella trovata da Maercke e Martin nel caso del Conical Beam Tracing [5]:

$$n(t) = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{t_c^2}{t^2} \right) \right] \qquad (1)$$

L'andamento teorico secondo la teoria delle sorgenti immagine è invece costituito semplicemente dal primo fattore della relazione suddetta, senza il termine fra parentesi.

La correzione della coda riverberante viene dunque eseguita semplicemente dividendo l'energia sonora per il termine fra parentesi, che va diminuendo progressivamente al crescere di t. La stima del corretto valore di tc viene effettuata punto per punto, come intersezione della parabola estrapolata dal primo tratto del diagramma e della retta orizzontale corrispondente alla pressochè uniforme densità temporale di riflessioni ottenuta nella parte destra dello stesso.

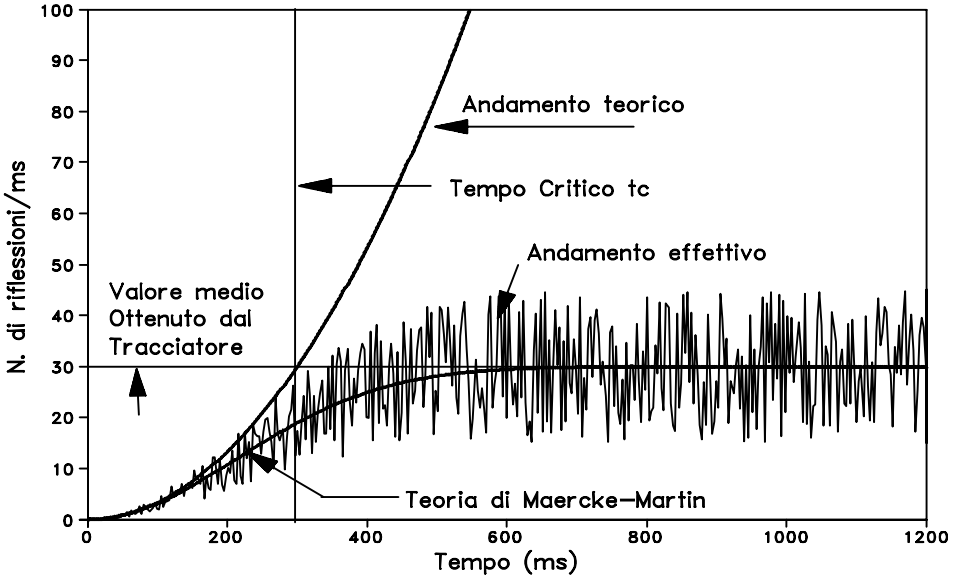

Fig. 3 - Andamento nel tempo del numero di intercettazioni / ms.

L'intero metodo è pertanto applicabile anche a casi in cui le ipotesi di campo diffuso non sono valide, come appunto quelle qui volutamente introdotte. La coda riverberante può dunque essere diversa da punto a punto, e presentare una pendenza non uniforme, come accade ad esempio in sale costituite da ambienti accoppiati di diversa riverberazione.

3. La basilica di S.Domenico a Foligno

La basilica di S.Domenico era sconsacrata ormai da molti anni, ed il suo recupero e restauro è stato operato recentemente su progetto dell' arch. Antonelli di Foligno. Oggi la sala è perfettamente ripristinata dal punto di vista architettonico ed impiantistico, ma è completamente priva di arredi ed allestimenti interni.

Le figure 4 e 5 mostrano una pianta e le sezioni della sala nella situazione attuale: si osserva una serie di peculiarità che rendono la situazione di questa chiesa un po' meno gravosa dal punto di vista acustico di quanto accade solitamente in questo genere di ambienti.

In particolare le pareti laterali sono completamente prive di cappelle, e presentano ben poche aperture, peraltro sempre ostruite da serramenti: non esistono dunque volumi laterali dannosi, tranne i due transetti posti ai lati dell'abside. Inoltre la copertura è a doppia falda, sostenuta da una complessa struttura lignea a capriate: pertanto sono da escludersi echi e focalizzazioni provenienti dall'alto, tranne che ovviamente nella zona absidale.

Infine la parete di fondo è movimentata dalla bussola di accesso, che si estende fino a quasi metà altezza della parete: anche questa condizione è potenzialmente benefica, poichè riduce gli echi provenienti dal fondo della sala (che è comunque molto lunga). In ogni modo, la forma stretta e lunga della sala promette abbondanza di riflessioni laterali precoci, e pertanto l'impiego per l'ascolto di musica sinfonica, una volta risolto il problema dell'eccessiva riverberazione, dovrebbe risultare gradevole.

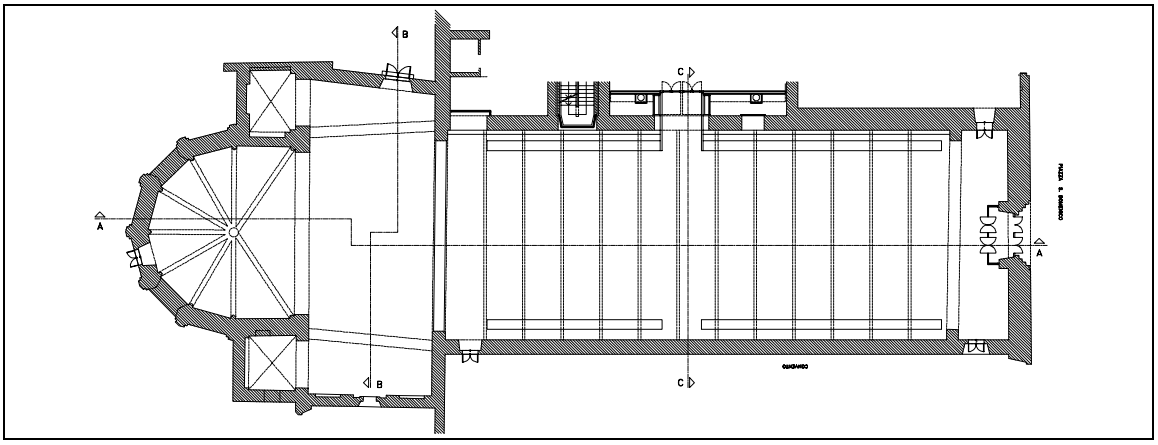

Fig. 4 - Pianta della Basilica di S. Domenico (Foligno) - Stato Attuale

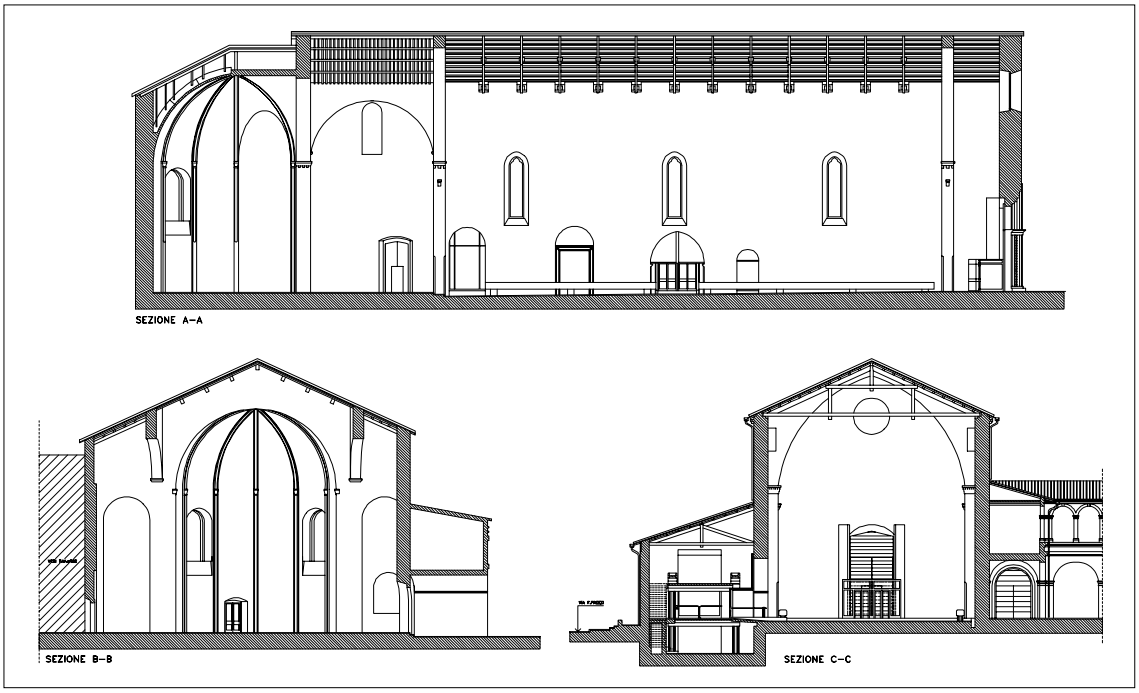

Fig. 5 - Sezioni della Basilica di S.Domenico (Foligno) - Stato Attuale

4. Determinazione sperimentale delle caratteristiche acustiche attuali.

Onde valutare oggettivamente la situazione attuale sono stati eseguiti accurati rilievi nella sala: è stata impiegata una sorgente sonora omnidirezionale di tipo impulsivo (pistola a salve con diffusore), collocata al centro dei transetti, registrando gli impulsi a mezzo di un registratore digitale DAT, collegato ai due microfoni auricolari di una cuffia binaurale SONY DRW70, indossata da uno degli autori.

Sono state così ottenute le risposte all'impulso binaurali in 56 punti di rilievo, disposti come in fig. 6.

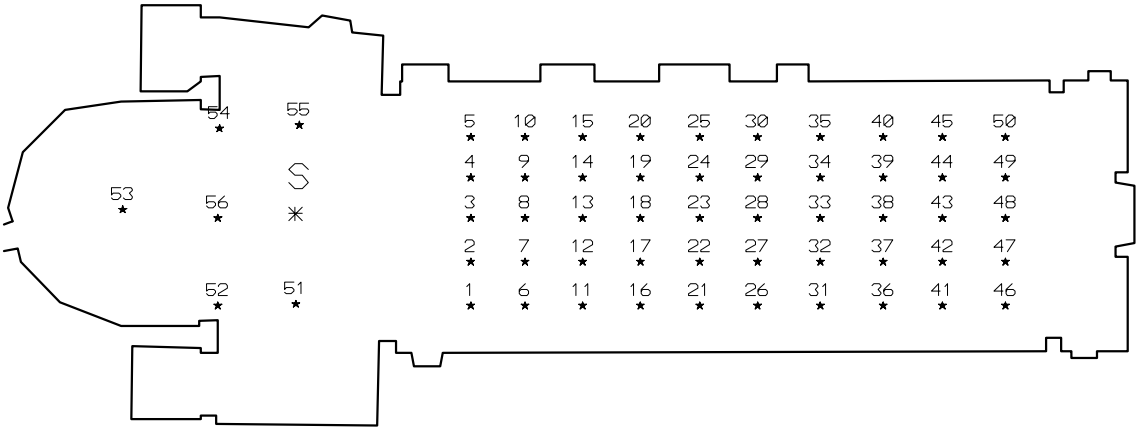

Fig. 6 - Posizione dei 56 punti di rilievo.

I segnali sono stati trasferiti su PC tramite una scheda A/D MLSSA, e memorizzati in risposte all'impulso lunghe 64k punti. Esse sono poi state elaborate con il software MLSSA, onde ricavare questi parametri acustici:

- Tempo di Riverbero in bande di ottava;
- Indice di Chiarezza C80;
- Tempo Baricentrico t_b;
- Speech Transmission Index (STI);
- Cross-Correlazione Inter Aurale (IACC);
- Tempo di Ritardo Iniziale (ITDG);
- Livello Sonoro relativo al Livello di potenza (G, Strenght).

Da questi parametri è possibile ottenere una valutazione soggettiva di qualità secondo la teoria di Ando [6], facendo opportune ipotesi sul livello di potenza della sorgente sonora e sulla ripetitività del brano musicale considerato [7].

Anche senza ricorrere a tale elaborazione, tuttavia, emergono chiaramente i problemi della sala: il tempo di riverbero è eccessivo, come mostrato dalla fig. 7. La chiarezza è molto scarsa, come mostra la mappa in fig. 8. L'indice STI denuncia una insufficiente intellegibilità del parlato (fig.9). Tuttavia sono presente riflessioni laterali forti e precoci, per cui ITDG risulta basso e così pure la IACC, indicando una buona sensazione di avvolgimento spaziale.

La situazione nella navata principale è risultata decisamente migliore di quanto accade nella zona absidale, è ciò è facilmente spiegabile con la differente forma geometrica delle due zone, che sicuramente causa focalizzazioni ed echi nella seconda.

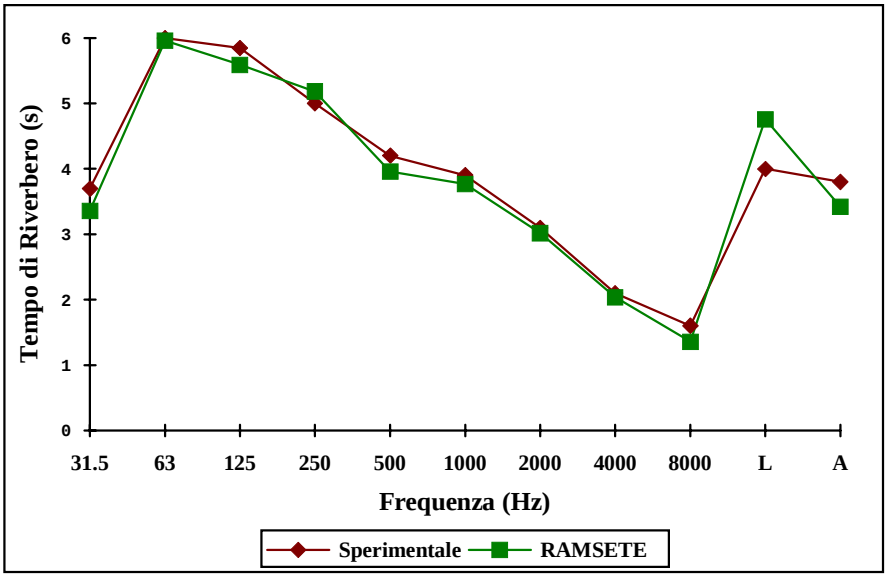

Fig. 7 - Tempi di riverbero sperimentali e previsioni numeriche con Ramsete

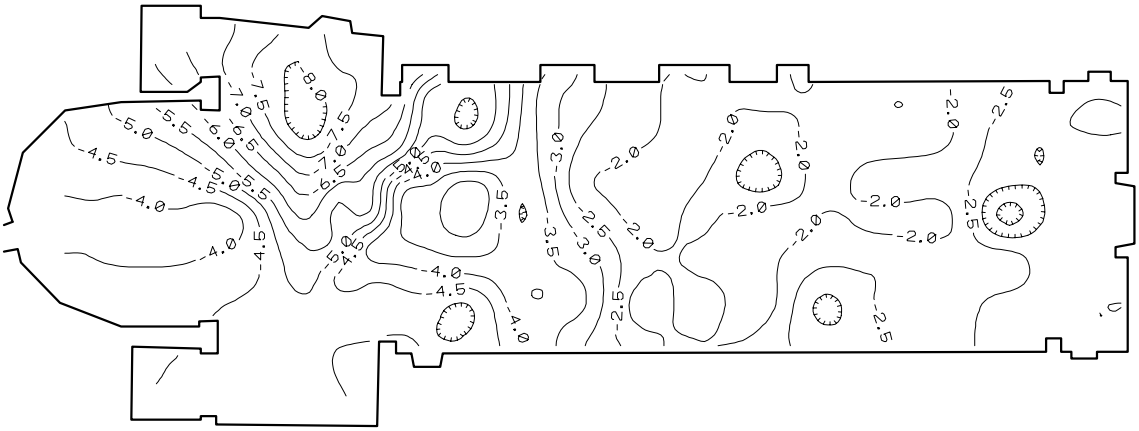

Fig. 8 - Mappa dell'indice di Chiarezza C80 sperimentale.

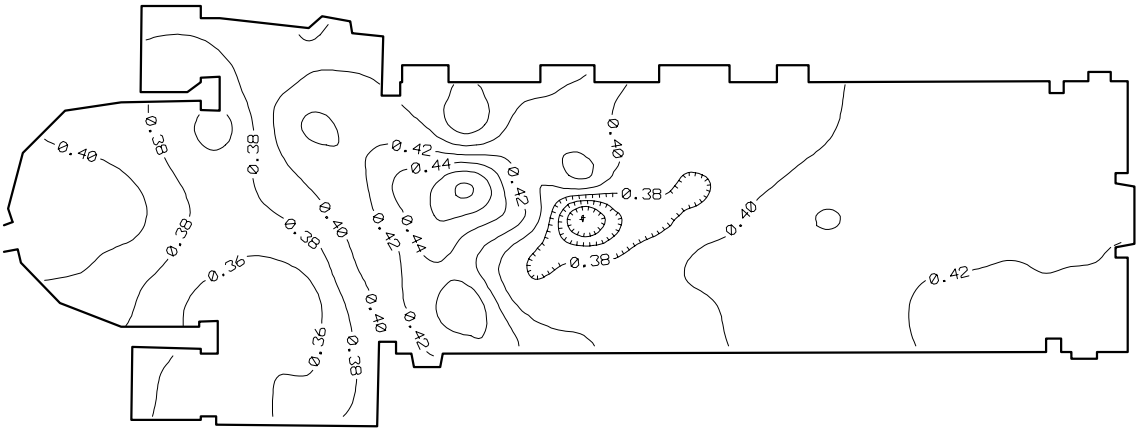

Fig. 9 - Mappa dello Speech Transmission Index sperimentale.

5. Verifica di corrispondenza delle previsioni numeriche con i dati sperimentali

La disponibilità dei rilievi acustici ha consentito poi una accurata taratura del modello di previsione numerica, sia in termini di tempo di riverberazione che degli altri principali parametri acustici. La taratura del tempo di riverbero è stata effettuata ritoccando leggermente i valori del coefficiente di assorbimento dei materiali di cui sono costituite la pareti della ex-chiesa (per lo più intonaco), ottenendo, come si vede dalla fig. 7, un ottimo accordo con i valori sperimentali.

La fig. 10 riporta invece la mappa dello STI calcolato da Ramsete nella attuale configurazione della sala: anche se il profilo delle linee di contorno non è molto somigliante con quello sperimentale, riportato in fig. 9, si deve osservare che i valori in ciascun punto sono abbastanza prossimi a quelli sperimentali.

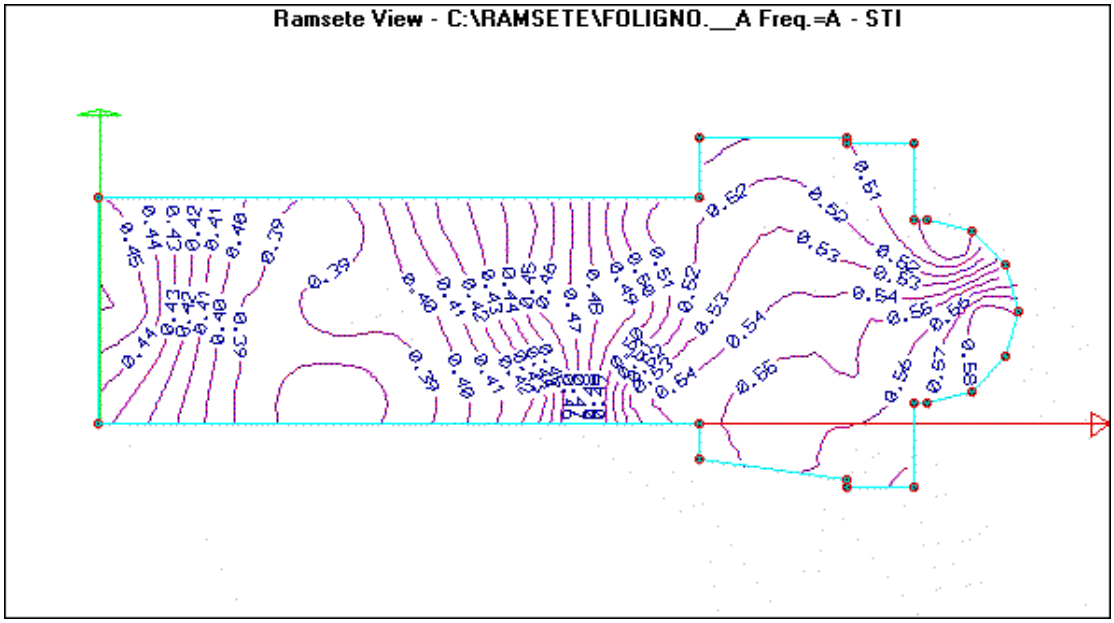

Fig. 10 - Mappa dello STI prevista da Ramsete - stato attuale

5. Ipotesi di allestimento della sala

Sono state sviluppate 5 diverse ipotesi di allestimento della sala per utilizzo concertistico alcune delle quali prevedono un utilizzo parziale della stessa, reso fattibile da un sistema di chiusura del volto che separa la navata principale dalla zona absidale e dai transetti.

Tale sistema di chiusura è costituito di 2 parti: una pannellatura trasparente a chiudere l'arco, ed una tenda insonorizzata avvolgibile a chiudere la parte sottostante. Il rullo avvolgitore della tenda è supportato da una struttura metallica reticolare, che attraversa l'arco stesso ad una altezza di circa 9m da terra. La stessa sostiene anche due pannelli riflettenti opportunamente inclinabili, incernierati in prossimità del rullo avvolgitore, in grado di reindirizzare il suono verso la superficie occupata dal pubblico sui due lati della cortina di separazione.

Sono pertanto state suggerite queste ipotesi di impiego della sala:

1 Caso "A" - solo abside

2 Caso "B" - solo navata principale

3 Caso "C" - Utilizzo completo - sorgente nella navata principale.

4 Caso "D" - Utilizzo completo - sorgente nel transetto

5 Caso "E" - Solo navata principale - sorgente nel transetto con quinte.

Le figg. 11-15, ottenute dal programma CAD di Ramsete, illustrano schematicamente la posizione delle superifici acusticamente attive nei 5 casi suddetti.

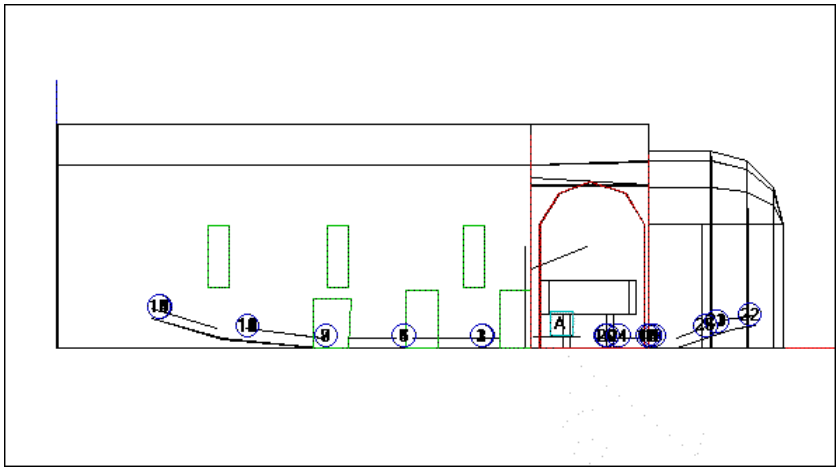

Fig. 11 - Caso "A" - vista in sezione longitudinale

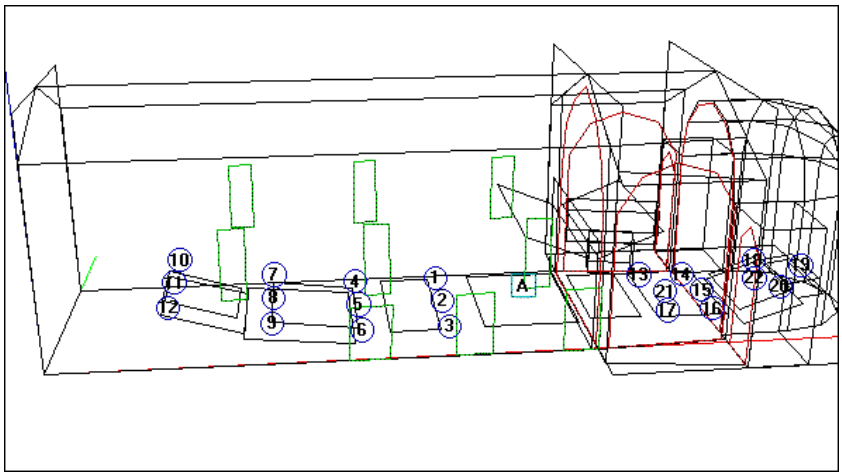

Fig. 12 - Caso "B" - vista prospettica

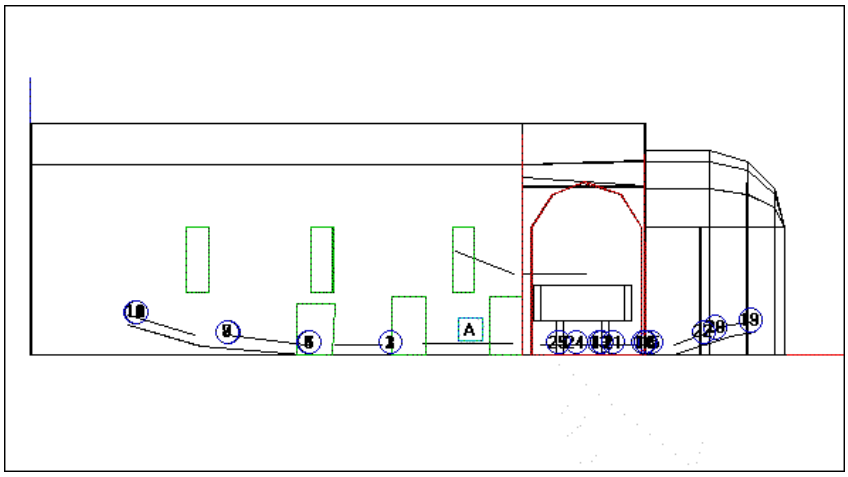

Fig. 13 - Caso "C" - sezione longitudinale

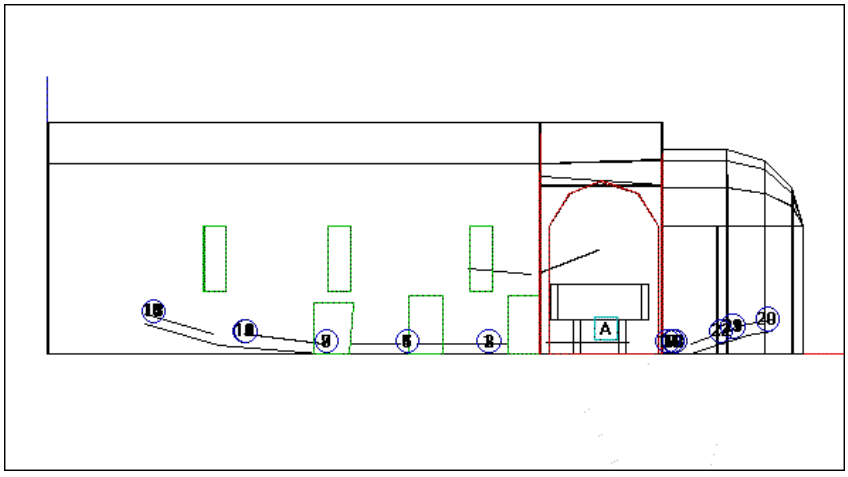

Fig. 14 - Caso "D" - sezione longitudinale

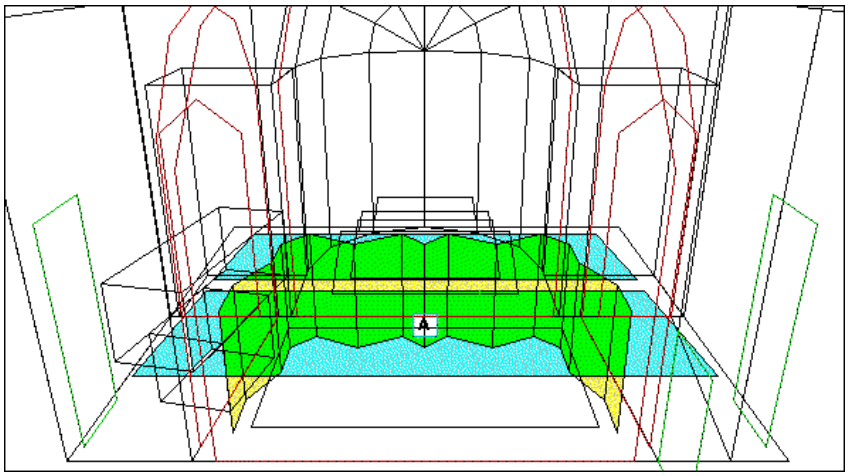

Fig. 15 - Caso "E" - vista prospettica dall'interno

In ciascuno dei 5 casi suddetti è stata operata la previsione del campo sonoro mediante il software Ramsete, impiegando i 25 punti riceventi che sono visibili, ad es., nella fig. 12.

Sono state ottenute le risposte all'impulso in tutti i punti di misura, e già dal confronto di esse si vede che alcune configurazioni sono migliori di altre. Ad esempio, in fig. 16 viene riportato il confronto fra la risposta all'impulso nel punto n. 4 ottenuta nel caso "B" (a sinistra) e nel caso "E" (a destra). Si osserva come in questo secondo caso vengano a mancare molte utili riflessioni precoci, che viceversa si verificano quando la sorgente è situata nella navata principale.

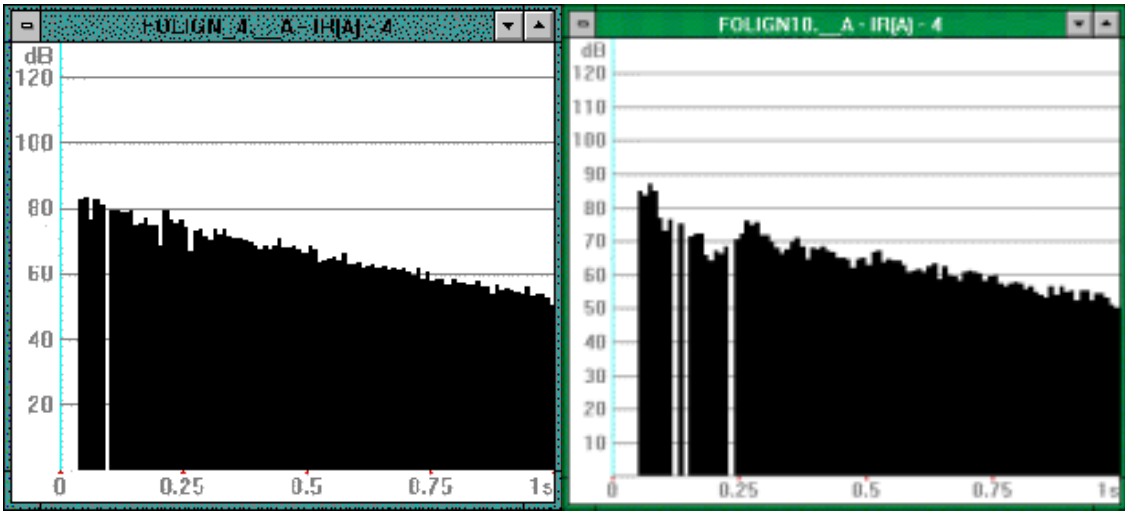

Fig. 16 - confronto fra risposte all'impulso nel caso "B" e "E" - pt. 4

Onde valutare in prima approssimazione la bontà delle diverse soluzioni, anzichè analizzare le risposte punto per punto si è preferito valutare ciascuna ipotesi nella sua globalità. Anzitutto è opportuno porre a confronto i tempi di riverbero previsti nelle 5 ipotesi. La fig. 17 riporta tale confronto in forma grafica.

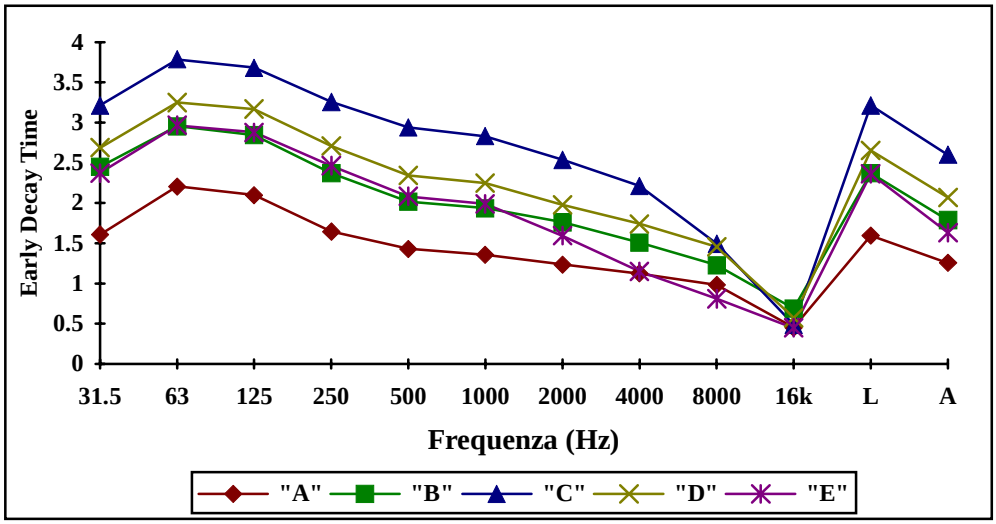

Fig. 17 - confronto fra i tempi di riverbero dei 5 casi studiati.

Si osserva che il caso "A" è decisamente il più favorevole. I casi "B" e "E" (solo navata principale) sono fra loro quasi eguali. Seguono poi il caso "D" ed infine il caso "C" che è il peggiore.

Il risultato è abbastanza ovvio, visto che il caso "A" è quello che interessa un volume più ridotto, ma che fornisce altresì il minor numero di posti utili per il pubblico. Il caso "E" è alla fine il più interessante: la capienza è buona, c'è molto spazio per l'orchestra, e la riverberazione viene ulteriormente contenuta dall'installazione dei paraventi che contribuiscono a delimitare meglio la disposizione dell'orchestra, evitando che il suono vada a riverberare nella zona absidale.

Si presentano dunque nel seguito solo i risultati relativi a quest'ultimo caso: la fig. 18 mostra la mappa del livello sonoro, la fig. 19 riporta la mappa dell'indice di chiarezza C80, e la fig. 20 la mappa dello Speech Transmission Index.

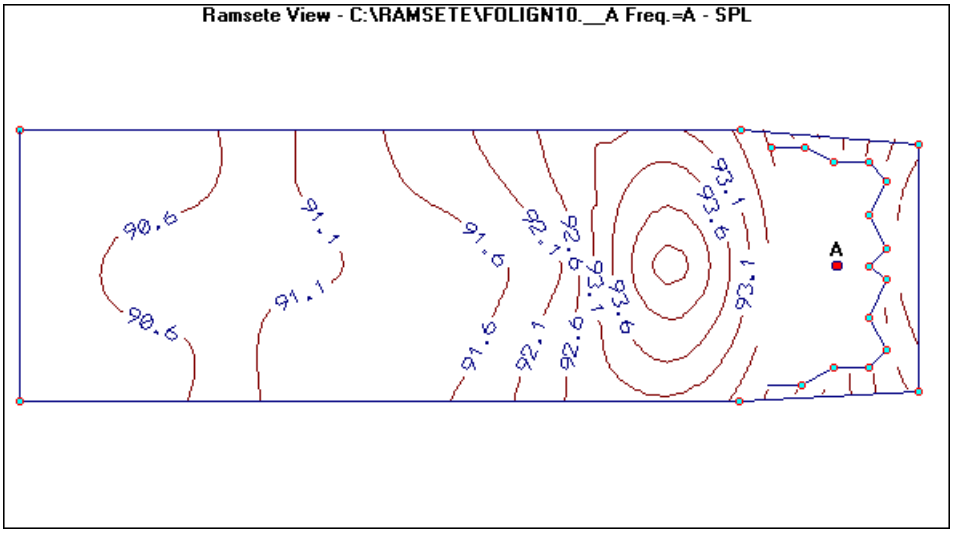

Fig. 18 - Mappa del Livello Sonoro - Previsione con Ramsete caso "E"

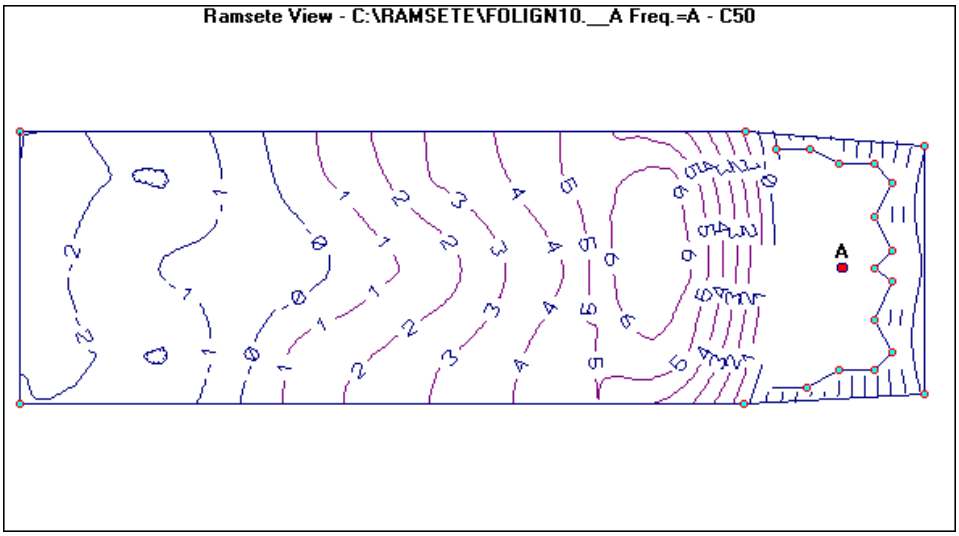

Fig. 19 - Mappa dell'indice di Chiarezza C50 - Previsione con Ramsete caso "E"

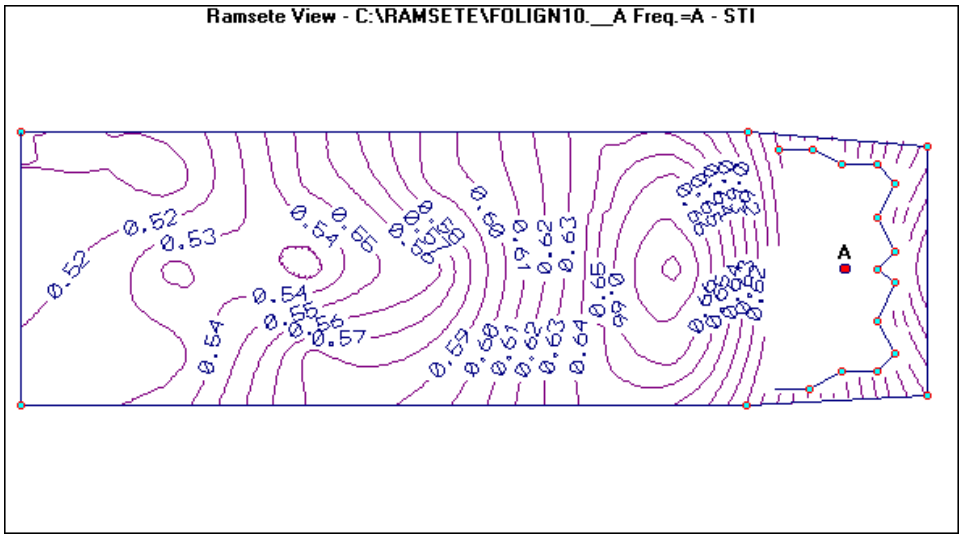

Fig. 20 - Mappa dello STI - Previsione con Ramsete - caso "E"

In tutte tre le mappe si osserva che i massimi valori dei parametri vengono raggiunti in corrispondenza della prima fila di poltroncine, e che la zona di ascolto peggiore è situata a circa 2/3 della navata, al centro. Tuttavia il miglioramento, rispetto allo stato attuale, è significativo, considerato che le uniche unità assorbenti introdotte sono quelle del pubblico.

E' infine interessante osservare un tracciato del decadimento sonoro, ottenuto mediante integrazione all'indietro della risposta all'impulso (Schroeder, [8]): la fig. 21 riporta tale tracciato relativamente al punto n. 11, e si osserva una marcata doppia pendenza, causata dal riverbero nella zona absidale che risulta decisamente più lungo di quello della navata principale. Tale comportamento non deve essere considerato un difetto, poichè in tal modo, nel corso dell'esecuzione musicale, quando le note si succedono a breve distanza temporale, viene percepita soltanto la prima parte della curva di decadimento (che ha riverberazione bassa).

Quando viceversa l'orchestra stacca, si avverte l'intera lunghezza della coda sonora, che in questo caso non è dannosa, ma anzi corrisponde alla sensazione di grande volumetria che si ha stando seduti nella sala.

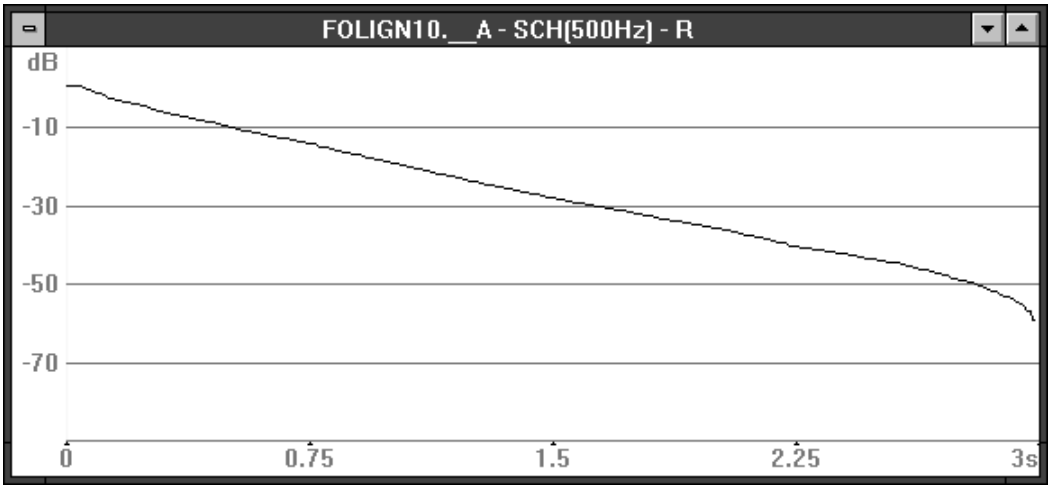

Fig. 21 - Curva di decadimento media - previsione con Ramsete caso "E"

6. Conclusioni

La metodologia di intervento proposta consta sostanzialmente nel reindirizzamento della energia sonora verso l'unica superficie assorbente esistente nella sala, costituita dal pubblico. Ciò viene ottenuto mediante l'inserimento di pannellature trasparenti e pesanti tendaggi insonorizzati, che pur non comportando un significativo incremento dell' assorbimento acustico, portano ad una riduzione del tempo di riverberazione, causata principalmente dalla non uniforme diffusione del campo sonoro.

Questo approccio comporta, come rovescio della medaglia, la difficoltà a valutare numericamente i benefici conseguibili mediante semplici relazioni di calcolo. E' stato pertanto necessario ricorrere ad un avanzato modello di previsione computerizzata, onde tenere conto degli effetti non sabiniani della propagazione.

Sebbene gli interventi attualmente proposti non possano essere considerati pienamente risolutivi della situazione acustica, essi consentono tuttavia un ascolto della musica sinfonica accettabile. Chiaramente, se ad essi venissero accoppiati anche interventi fonoassorbenti, soprattutto sulla parete di fondo della navata principale e sulle pareti curve dell'abside, si otterrebbero benefici ancora più marcati

Poichè i parametri acustici ottenuti dalla simulazione non danno appieno l'idea dell' effetto soggettivo di miglioramento ottenibile, e soprattutto sono di comprensione limitata agli esperti di acustica delle sale, si propone di impiegare le risposte all'impulso ottenute dalla previsione numerica per riverberare digitalmente alcuni brani di musica anecoica: l'ascolto di tali brani dovrebbe convincere tutti dell'utilità del trattamento acustico della basilica.

Bibliografia

[1] Farina A., Cocchi A. - "Utilizzo di ex-chiese come sale polifunzionali: la chiesa di S.Lucia a Bologna" - Atti del XVIII Convegno Nazionale AIA, L'Aquila, 18-20 aprile 1990.

[2] Farina A., Cocchi A., Garai M., Semprini G. - "Old Churches as concert halls: a non-sabinian approach to optimum design of acoustic correction" - Proc. of 14th. ICA, F5-7, Bejing 3-10 september 1992.

[3] K Jacob, T. Birkle, C. Ickler - "Microcomputer-Based Implementation of the Speech Transmission Index for Large Spaces" - J.Acous.Soc.Am., vol. 87, S1 (1990).

[4] Naylor G.M. - "ODEON - Another Hybrid Room Acoustical Model" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 131 (1993).

[5] D. van Maercke, J. Martin - "The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 93 (1993).

[6] J. Ando - "Concert Hall Acoustics" - Springer-Verlag - Berlin, 1985.

[7] Cocchi A., Farina A. - "Rilevamento sperimentale delle caratteristiche acustiche dei teatri e delle sale da spettacolo" - Atti del XVI convegno Nazionale AIA, Milano, 28-30 marzo 1988.

[8] Schroeder M.R. - "New method of measuring reverberation time" - Journ.Ac.Soc.Am., vol. 37, pag. 409 (1965).