

Miglioramento acustico della Chiesa di Santo Stefano al Ponte Firenze

Marco Franchini^{a*} | Carlo Baistrocchi^a | Veronica Amodeo^a

^a Dipartimento di Architettura,
Università degli Studi di Firenze,
Via della Mattonaia, 8, 50121 Firenze

* Autore di riferimento:
m.franchini.frinco@gmail.com

Ricevuto: 27/2/2025

Accettato: 3/4/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa19495

ISSNe: 2385-2615

Il presente lavoro riguarda il miglioramento acustico della chiesa di Santo Stefano al Ponte, situata nel centro storico di Firenze, sconsacrata dal 1986 e oggi convertita in sala per fini culturali. Nello specifico, è utilizzata come auditorium dall'Orchestra da Camera Fiorentina. L'intervento di miglioramento acustico è necessario poiché le caratteristiche acustiche richieste da una sala concerti sono differenti rispetto a quelle proprie di un edificio religioso. Il percorso progettuale inizia con la misurazione in loco dei parametri acustici e la loro analisi allo stato attuale attraverso la modellazione virtuale dell'ambiente. Successivamente viene proposto un ventaglio di possibili interventi che sono analizzati sia sotto l'aspetto acustico che architettonico. Particolare attenzione è stata posta al loro inserimento nel contesto architettonico e artistico della chiesa. Le valutazioni progettuali hanno portato alla definizione di una serie di interventi, tra cui una camera acustica da posizionare attorno all'orchestra per migliorare l'acustica a beneficio dei musicisti oltre che del pubblico.

Parole chiave: caratterizzazione acustica, progetto acustico, patrimonio edilizio, misurazione acustica, auditorium, chiesa

Acoustic Improvement of Santo Stefano al Ponte Church

The present work concerns the acoustic improvement of the Santo Stefano al Ponte church, located in the historic centre of Florence. The church has been deconsecrated since 1986 and immediately converted for cultural purposes. It is currently used as an auditorium for the Orchestra da Camera Fiorentina. The acoustic enhancement is necessary because the acoustic requirements of a concert hall differ significantly from those of a religious building. The design process begins with on-site measurements of the acoustic parameters and their current analysis through the virtual modelling of the environment.

Subsequently, a range of possible interventions is proposed and analysed from both acoustic and architectural perspectives. Particular attention is directed toward integrating these interventions within the architectural and artistic context of the church. The evaluation process led to the design of a series of interventions, including an acoustic shell to be placed around the orchestra.

Keywords: acoustic characterization, acoustic design, building heritage, acoustic measurements, auditorium, church

1 | Introduzione

Le città contemporanee sono ricche di edifici abbandonati, basti pensare alle chiese sconsacrate o alle fabbriche delle prime periferie, che oggi sono compresi nel tessuto urbano consolidato. Tutti questi edifici hanno perso la loro funzione iniziale per diversi motivi, ma visto il loro valore artistico e testimoniale è importante valorizzarli con nuove destinazioni d'uso. Queste sono spesso di carattere culturale come musei, centri congressi, archivi e sedi di associazioni o enti.

L'inserimento di queste nuove funzioni richiede necessariamente un adeguamento delle caratteristiche proprie dell'ambiente originale. Per quanto riguarda la qualità acustica, spesso si crea un contrasto tra quello che è l'involucro storico

e quelle che sono le esigenze dovute alla nuova funzione in esso contenute. Il presente lavoro riporta il caso studio del progetto di miglioramento acustico della chiesa di Santo Stefano al Ponte, oggetto di tesi di laurea magistrale in architettura. La chiesa, situata nel centro storico di Firenze, è stata sconsacrata nel 1986 e sin da subito è stata convertita per fini culturali. Attualmente è utilizzata come sala per eventi multimediali, prendendo il nome di "Cattedrale delle Immagini", e come auditorium per l'Orchestra da Camera Fiorentina diretta dal Maestro Giuseppe Lanzetta.

Le caratteristiche acustiche richieste da una sala concerti sono differenti rispetto a quelle proprie di un edificio religioso. L'ambiente di una chiesa appare ricco di riverbero, mentre la musica da camera richiede un ambiente più asciutto con tempi di riverbero (Tr) minori. Nello specifico il Maestro Lanzetta ha evidenziato la presenza di un eccessivo riverbero, soprattutto del suono degli strumenti più gravi, come ottoni

¹ Vincitore del premio "Giovani professionisti" edizione 2024.

e timpani, che risulta impastato, e la difficoltà di diffondere omogeneamente il suono in tutta la platea, in particolare il suono della voce del coro, che durante alcuni concerti accompagna l'orchestra.

1.1 | La Chiesa di Santo Stefano al Ponte

La chiesa di Santo Stefano al Ponte è una delle più antiche chiese del centro storico di Firenze. Fondata nella seconda metà del X secolo, ha acquisito nel tempo differenti epiteti. Essa sorge con la facciata parallela al cardo nelle vicinanze della "cerchia antica" delle mura fiorentine (erette tra il IX e X secolo) in prossimità della porta Santa Maria (odierna Via Por Santa Maria).

L'impianto della chiesa è stato sviluppato in tre fasi principali: romanica, gotica e barocca, riconoscibili nella struttura odierna. L'originale impianto romanico a tre navate, del quale rimane traccia solo nella parte inferiore della facciata con l'imponente ingresso centrale decorato con una bicromia di marmi e i due ingressi laterali sormontati da bifore, venne radicalmente modificato nel periodo gotico tra fine XIII secolo e inizio XIV secolo. In questa fase si consolida l'odierno impianto a navata unica, vengono realizzati il coro, tre cappelle e la nicchia con arco a sesto acuto nella parete di sinistra, mentre nella facciata sono inserite le tre monofore allineate ai portali. Nei secoli successivi vennero addossati sulle pareti laterali della navata diversi altari votivi dalle più importanti famiglie fiorentine che frequentavano la chiesa.



Fig. 1 – Interno della Chiesa di Santo Stefano al Ponte
Interior of Santo Stefano al Ponte's church

L'intervento più cospicuo e caratterizzante della chiesa di Santo Stefano al Ponte è di epoca barocca, finanziato

dal marchese Anton Maria Bartolommei (proprietario del palazzo adiacente alla chiesa) che probabilmente ne diresse anche i lavori. I lavori iniziarono nel 1631 e furono portati avanti dagli eredi anche dopo la morte del marchese nel 1641, fino al 1655 (Fig. 1). L'intervento, che mirava al completo rifacimento dell'apparato decorativo della chiesa, venne interrotto e realizzato solo nella zona presbiteriale, nel coro, nella tribuna; venne inoltre creata la cripta. La matrice stilistica distintiva e caratterizzante dell'intervento di epoca barocca è il rigoroso utilizzo della linea retta in sostituzione di ogni forma curva. Questa peculiarità è evidente nell'arco monumentale a tutto sesto di accesso alle cappelle, deliberatamente spezzato in sette segmenti rettilinei, e nella cupola che sormonta le cappelle, non emisferica ma frammentata in precise forme geometriche poligonali. L'utilizzo della linea retta di archi, lesene, pilastri e modanature è enfatizzato dall'utilizzo della pietra serena in contrasto con lo stucco bianco per ricercare l'ombra proiettata sugli elementi geometrici, obbligando lo spettatore ad una visione complessiva della facciata interna [1]. A questa fase risale anche l'originale altare centrale con bassorilievo in bronzo di Ferdinando Tacca, del 1656, raffigurante il martirio di Santo Stefano.

Gli elementi di maggior pregio artistico sono l'altare del Giambologna del 1594 e la scalinata con balaustra del Buontalenti del 1574 che vennero inseriti alla fine del XIX secolo a seguito di un profondo restauro stilistico delle rispettive chiese di provenienza, Santa Maria Nuova e Santa Trinita. I due elementi entrano in contrasto con la regolarità e rigidità dell'apparato decorativo della chiesa perché frutto di momenti culturali completamente differenti. L'altare maggiore del Giambologna in marmo richiama lo stile classico, mentre la scala balaustrata del Buontalenti è espressione dell'architettura manieristica fiorentina, con il disegno nervoso dello scalino in pietra serena che con le sue curve assomiglia alle valve di una conchiglia a spirale o all'ala di un pipistrello.

Nel corso del '900 la chiesa fu oggetto di più interventi di restauro, dapprima dovuti agli ingenti danni subiti nell'agosto del '44 (a causa dalla disperata ritirata delle truppe naziste che minarono l'intera zona attorno Ponte Vecchio) e successivamente all'alluvione del '66 (quando l'acqua dell'Arno ricoprì la parte rialzata dell'altare maggiore). I restauri terminarono solo all'inizio degli anni '80, ma a causa dello spopolamento del centro città, la chiesa fu abbandonata e sconsacrata nel 1986.

Attualmente la chiesa è utilizzata come sede di eventi principalmente di natura culturale, come mostre e concerti, e in particolare come auditorium per l'Orchestra da Camera Fiorentina diretta dal Maestro Giuseppe Lanzetta. L'orchestra è formata da circa 40 elementi divisi in tre principali sezioni: archi, fiati e percussioni, spesso accompagnata dal coro o da solisti. Il pavimento della navata si presenta rivestito di moquette. Nella chiesa sono presenti ingombranti strutture metalliche temporanee asservite agli spettacoli di video mapping.

2 | Metodo

2.1 | Parametri acustici

In letteratura i parametri acustici oggettivi ai quali si ricorre per l'analisi acustica delle sale da concerto sono vari. Tuttavia, non vi è un accordo unanime su quali e quanti parametri fisici oggettivi, e quali combinazioni tra essi, siano necessari per descrivere con sufficiente completezza la qualità del suono percepita in una sala da concerto.

Alla base dello studio dei principali parametri oggettivi che descrivono l'acustica di una sala da concerti ci sono gli attributi percettivi definiti da Leo Beranek [2]. In questo studio è stato scelto di considerare i parametri acustici relativi alla riverberazione, nitidezza e percezione del suono, che verranno spiegati nel seguito.

Il senso di riverberazione è l'attributo più evidente che si percepisce in un ambiente confinato. Il principale parametro utilizzato per descrivere la riverberazione è il tempo di riverbero (T_{60}), cioè l'intervallo di tempo necessario affinché il livello di pressione sonora all'interno di un ambiente decada di 60 dB. La difficoltà di misurare un decadimento di 60 dB ha evidenziato la necessità di ricorrere a intervalli più brevi (p.e. T_{20} , T_{30}). Durante l'esecuzione di un passaggio musicale articolato, è possibile che venga percepita soltanto la parte iniziale del decadimento dei picchi e che quella successiva rimanga mascherata; per questo motivo è utile fare riferimento all'Early Decay Time (EDT) che rappresenta il decadimento sonoro dei primi 10 dB.

È importante valutare anche il comportamento acustico alle basse frequenze, che contribuisce alla percezione del 'Calore' di un ambiente. Come descrittore oggettivo di questa qualità si utilizza il Rapporto tra Bassi (BR), definito come il rapporto tra il tempo di riverbero alle basse frequenze (125-250 Hz) e quello alle medie frequenze (500-1000 Hz).

$$BR = \frac{(T_{R125} + T_{R250})}{2 * T_{R500-1000}} \quad (1)$$

La nitidezza del messaggio sonoro è influenzata dall'energia che raggiunge l'orecchio dell'ascoltatore. Il suono diretto e quello delle prime riflessioni sono i suoni che maggiormente influenzano il suono percepito. Spesso la loro combinazione permette di rafforzare il suono che raggiunge l'ascoltatore. Per tenere conto di questo aspetto si utilizza il parametro della Chiarezza (C_{80}), cioè la relazione tra l'energia dei primi 80 ms e la componente di energia successiva.

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \right] \quad (2)$$

L'intensità percepita permette di giudicare se un suono è forte o debole e viene descritta dall'indice di robustezza (G), che mette in relazione la risposta all'impulso per una coppia sorgente/ricevitore all'interno della sala con quella che avrebbe in campo libero a una distanza di 10 m.

$$G = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \right] \quad (3)$$

Questo indice vuole rappresentare l'effetto di amplificazione della sala, infatti è anche definito come la differenza tra il livello di pressione sonora nel punto di osservazione e il livello di pressione sonora della sorgente.

2.2 | Misurazioni acustiche strumentali

La campagna di misurazione del TR è stata effettuata mediante la tecnica della risposta all'impulso, come previsto dalla norma UNI EN ISO 3382 [3], il 26 giugno 2023. La misurazione di questo parametro è servita sia per descrivere la qualità acustica dell'ambiente che per tarare il modello acustico virtuale della sala, dal quale sono stati ricavati i descrittori oggettivi dell'ambiente e che è stato utilizzato come base del progetto di miglioramento acustico.

La sorgente sonora impulsiva impiegata in tutte le posizioni è una pistola a salve di misurazione. In alcune posizioni, a questa misurazione è stata affiancata una seconda misurazione, che ha utilizzato come impulso lo scoppio di un pallone gonfiato ad aria. Per l'acquisizione del segnale sono state utilizzate due differenti strumentazioni, affiancate in tutte le misurazioni: un fonometro in Classe 1 e un registratore digitale.

Le misurazioni si sono concentrate nell'ambiente principale della chiesa, cioè la navata unica. Per simulare la percezione sonora degli ascoltatori, la sorgente è stata posta al centro dell'area presbiteriale rialzata, nella posizione dove normalmente è collocata l'orchestra, mentre i ricevitori sono stati collocati nella zona bassa dell'assemblea (platea). Successivamente l'analisi si è concentrata sull'area presbiteriale rialzata (orchestra), sia per determinare la percezione acustica reciproca dei musicisti durante l'esecuzione di un concerto, posizionando la sorgente e il ricevitore nella zona dell'orchestra, sia misurando l'eventuale interferenza degli ambienti retrostanti l'orchestra (cappelle e coro), ponendo la sorgente al loro interno e il ricevitore al centro dell'orchestra. Infine sono stati misurati i parametri dei singoli ambienti minori: la cappella laterale e il coro (Fig. 2).

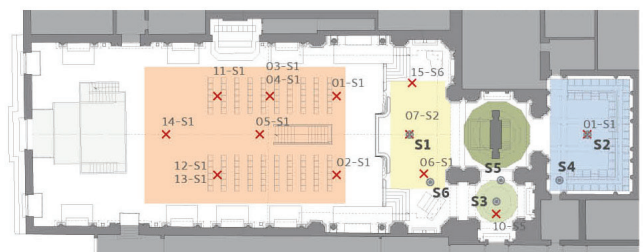


Fig. 2 – Planimetria della chiesa con posizionamento delle sorgenti e dei ricevitori

Plan of the church with positioning of sources and receivers

2.3 | Simulazione acustica mediante modello

Le misurazioni acustiche in loco rappresentano solo puntualmente l'ambiente [4], ma vista la complessità e l'articolazione della chiesa, risulta necessario analizzare l'intero complesso

basandosi su un modello tridimensionale virtuale che permetta di ottenere i descrittori acustici in qualsiasi punto. La simulazione è stata eseguita impiegando il software Ramsete®, basato sul metodo geometrico e in particolare sul sistema del Pyramid Tracing [5].

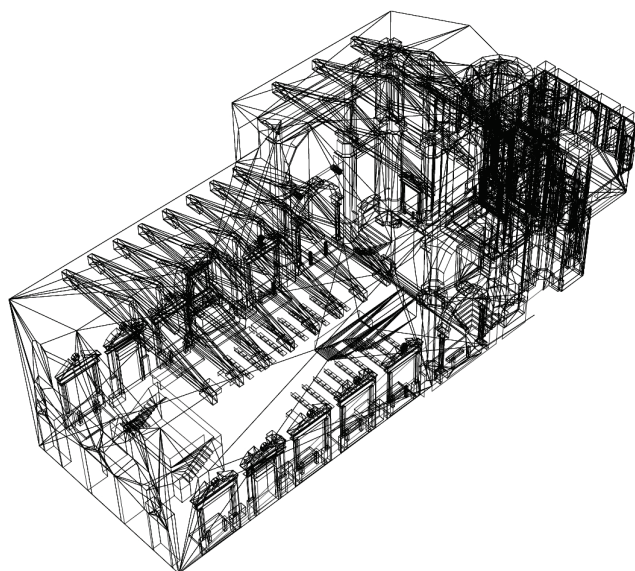


Fig. 3 – Modello tridimensionale dell'ambiente
3D model of the environment

La geometria dell'ambiente è stata semplificata, trascurando l'intero apparato decorativo (Fig. 3). Ad ogni superficie è stato attribuito un materiale con relativi coefficiente di assorbimento e coefficiente di scattering. Successivamente il modello è stato tarato sulla base delle misure del Tr eseguite in loco.

La simulazione ha permesso di analizzare in maniera dettagliata la distribuzione dei valori dei parametri, sia in maniera puntuale, inserendo i ricevitori nei punti più significativi dell'ambiente, sia in maniera grafica, creando attraverso una griglia di ricevitori una mappa cromatica. Oltre all'analisi dello stato attuale della sala, il modello acustico ha permesso di inserire all'interno dell'ambiente anche le soluzioni progettuali proposte, valutando il loro contributo al miglioramento della qualità acustica.

Dalla simulazione virtuale sono stati ricavati i parametri acustici fondamentali: tempo di riverbero (Tr), Early Decay Time (EDT), chiarezza (C80) e intensità sonora (G).

3 | Risultati delle analisi acustiche

3.1 | Confronto tra strumenti di misurazione

Il confronto tra le due differenti strumentazioni utilizzate come ricevitore, è servito per verificare l'accuratezza delle misure di Tr eseguite attraverso l'analisi del segnale registrato rispetto ai valori misurati direttamente con il fonometro. Quale strumento di riferimento è stato considerato il fonometro in quanto soggetto a regolare taratura e calibrazione. Il registratore ha acquisito file con estensione.wav che sono stati analizzati at-

traverso il software Audacity con plugin Aurora. Come riportato nel grafico (Fig. 4), il T30 presenta minime differenze tra le due strumentazioni a partire dalle frequenze medio-alte (bande maggiori di 500 Hz), mentre la differenza aumenta con la diminuzione delle frequenze a causa di una minore sensibilità del registratore alle basse frequenze. Il confronto tra le due differenti sorgenti serve per valutarne l'affidabilità. Lo scoppio di un pallone gonfiato ad aria è un metodo artigianale che, seppur comodo, non garantisce un'eccitazione costante dell'ambiente a tutte le frequenze e ha un'intensità sonora inferiore rispetto allo sparo della pistola a salve, che garantisce una maggiore riproducibilità. Nonostante queste differenze di strumentazione, si può notare dal grafico (Fig. 4) che le due sorgenti producono un'eccitazione simile dell'ambiente e permettono di ottenere valori simili del T30 per tutto lo spettro sonoro, ad eccezione delle frequenze più basse.

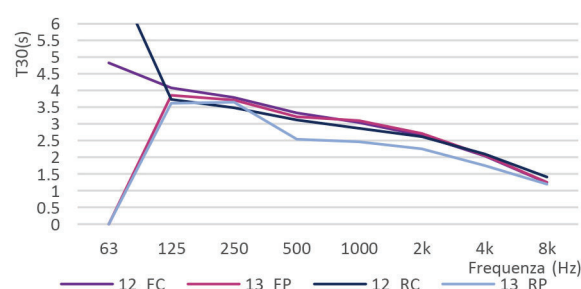


Fig. 4 – Confronto tra metodologie di misurazione in due punti.
F: fonometro; R: registratore; C: sparo; P: pallone
Comparison between measurement methodologies in 2 points.
F: sound level mete; R: recorder; C: gun shot; P: balloon

Al fine della caratterizzazione dell'ambiente e della misurazione dei parametri relativi alla riverberazione, sono stati considerati i parametri misurati utilizzando come strumento il fonometro e come sorgente lo sparo della pistola a salve.

3.2 | Caratterizzazione acustica

L'analisi evidenzia come i differenti ambienti della chiesa sono fortemente influenzati tra di loro a livello acustico, seppur funzionalmente e architettonicamente indipendenti. È possibile notare come le cappelle e il coro retrostanti la parte dell'orchestra siano accoppiati con l'ambiente principale della chiesa. Questo crea forti interferenze tra l'ambiente principale e gli ambienti retrostanti, come evidenziato dal grafico (Fig. 5). Il decadimento nella chiesa è descritto da una retta a pendenza costante, mentre i decadimenti nella cappella laterale e nel coro sono caratterizzati da una doppia pendenza: il primo tratto con una maggiore pendenza rappresenta il decadimento proprio del singolo ambiente retrostante, meno riverberante della chiesa; nel secondo tratto la pendenza è invece minore e risulta parallela al decadimento dell'ambiente principale. Questo dimostra che, nella seconda parte, la coda di riverbero che si crea nell'ambiente principale sovrasta il decadimento proprio dell'ambiente.

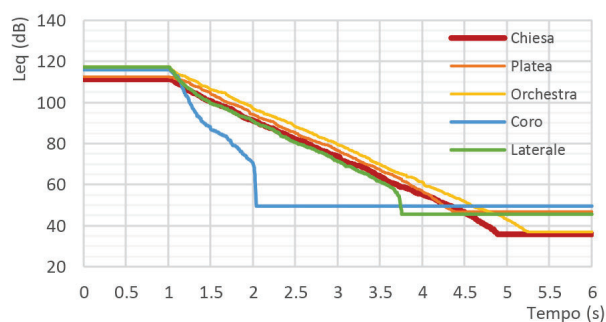


Fig. 5 – Decadimento sonoro delle singole zone
Sound decay of individual zones

L'interazione tra gli ambienti retrostanti e l'ambiente principale della chiesa si manifesta anche nella zona dell'orchestra, interposta tra la navata e le cappelle. In particolare questo si nota nell'effetto delle mancate riflessioni orizzontali che inizialmente si disperdono negli ambienti retrostanti, come evidenziato dalla differenza tra EDT e T30.

Il volume principale della chiesa, che costituisce la vera e propria sala concerti, è stato analizzato nel complesso e nelle due parti funzionali che lo compongono: la platea (navata) e l'orchestra (presbiterio). In generale l'ambiente risulta riverberante e caldo: il T30 è maggiore rispetto ai livelli ideali (1.40 s-2.30 s) con BR positivo, quindi l'ambiente è più riverberante alle basse frequenze. Il suono risulta nitido, ad eccezione delle basse frequenze, mentre l'intensità sonora percepita è lievemente inferiore ai livelli ottimali (9-13), dovuta alla dispersione del suono nel grande volume, essendo l'altezza non proporzionata alla superficie. Analizzando le riflessioni, il T30 risulta costante e uniforme, sia nella zona della platea che in quella dell'orchestra, in quanto il grande volume della sala principale permette di diffondere in maniera omogenea il suono e le riverberazioni. T30 a 500 Hz è pari a 3.20 s mentre a 125 Hz raggiunge i 3.95 s (Fig. 6a). Invece, come immaginabile, dall'analisi dell'EDT questo non risulta omogeneo nella platea, aumentando proporzionalmente all'aumentare della distanza dalla sorgente; ciò è comprensibile perché le riflessioni sono più concentrate nel tempo quando la distanza dalla sorgente è maggiore, oltre al fatto che la diffusione del suono nella platea è ostacolata dal ribassamento della copertura (Fig. 3) che riflette il suono verso la sorgente. Anche nella zona dell'orchestra, l'EDT risulta non uniforme, a causa della vicinanza con le superfici riflettenti e la concentrazione delle riflessioni in prossimità dell'arco d'ingresso alla cappella centrale (Fig. 6b).

Analizzando la chiarezza C80, la platea presenta una sua distribuzione progressiva al variare della distanza dalla sorgente. In particolare, nella parte centrale della chiesa (quella con altezza maggiore), la chiarezza risulta omogeneamente distribuita con un valore di poco positivo, mentre nella parte della chiesa prossima alla facciata la distribuzione non è omogenea ed emergono valori inferiori. Questo è causato dal ritardo con cui le riflessioni raggiungono tale zona, per la distanza dalla sorgente e per il sopra accennato ostacolo costituito dal ribassamento del soffitto. Alle basse frequen-

ze, che portano una maggior energia sonora delle riflessioni nell'ambiente, si nota un peggioramento della chiarezza dovuto al corrispondente minor assorbimento delle superfici. Nella zona dell'orchestra, C80 è fortemente influenzata dalla vicinanza del ricevitore alla sorgente e alle superfici riflettenti, per questo si creano dei picchi anomali (Fig. 6c).

Anche G è fortemente influenzato dalla posizione della sorgente e del ricevitore, evidenziando una progressiva diminuzione con l'aumentare della distanza reciproca. G non ha un andamento costante al variare delle frequenze, in particolare le basse frequenze risultano percepite più forti rispetto alle medio-alte frequenze, con una differenza di 3 dB tra la banda di frequenza centrata a 125 Hz e quella centrata a 2 kHz, in quanto l'assorbimento delle basse frequenze è inferiore rispetto a quelle medio-alte (Fig. 6d).

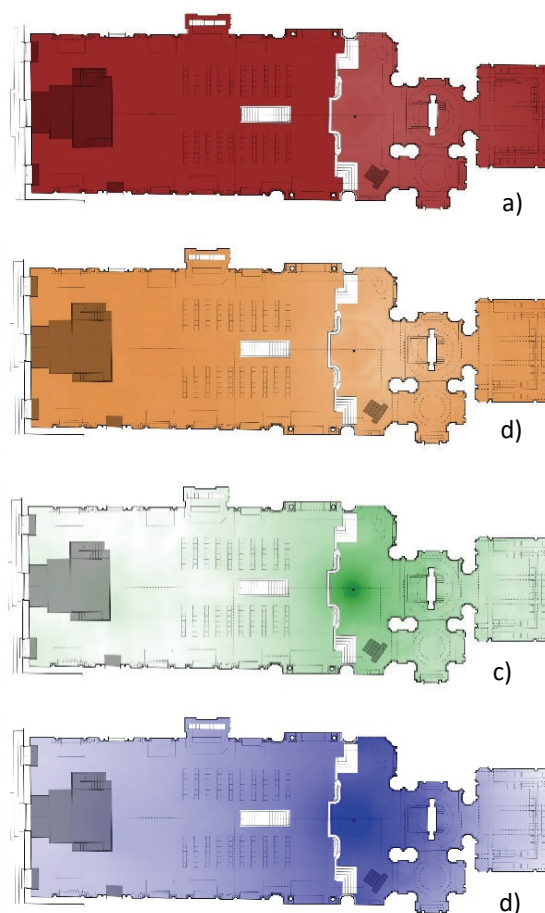


Fig. 6 – Mappatura dei parametri acustici dello stato attuale a 500 Hz: T30 (a), EDT (b), C80 (c), G (d)
Mapping of the acoustic parameters of the current state at 500 Hz: T30 (a), EDT (b), C80 (c), G (d)

4 | Progetto

4.1 | Obiettivi progettuali

La richiesta di miglioramento dell'acustica della chiesa nasce dall'esigenza dell'Orchestra da Camera Fiorentina. Il direttore Maestro Giuseppe Lanzetta sostiene che nella chiesa si sente

bene durante i concerti, anche se l'acustica è *abbondante*. Analizzando nello specifico le varie sezioni dell'orchestra, ha sottolineato che sia gli archi che il pianoforte non vengono penalizzati dall'acustica della chiesa, anzi questa migliora la loro percezione. Al contrario, gli ottoni e i timpani vengono penalizzati dall'eccesso di riverbero dell'ambiente facendo impastare i suoni e non rendendoli ben comprensibili, mentre i flauti e gli oboi non subiscono molte alterazioni e il loro suono rimane pulito. La voce del coro, che durante alcuni concerti accompagna l'orchestra, viene invece penalizzata in quanto non ha abbastanza potenza da raggiungere in maniera omogenea tutta la platea.

Le valutazioni soggettive del Maestro Lanzetta sono state confermate dall'analisi acustica dello stato attuale. L'ambiente presenta un tempo di riverbero superiore rispetto a quello ottimale indicato dalla letteratura [4]. Analizzando lo spettro si nota che alle basse frequenze il tempo di riverbero aumenta causando una minor chiarezza dei bassi nella platea. Le medie e alte frequenze risultano, al contrario, chiare per il pubblico [6]. La percezione dell'intensità del suono è inferiore rispetto ai valori ottimali per tutte le frequenze, in quanto esso si disperde liberamente nel grande volume e non è indirizzato verso la platea. L'intensità sonora percepita delle medio-alte frequenze è inferiore rispetto alle basse perché le prime sono assorbite dalle superfici dell'ambiente e dall'aria presente nel volume, mentre le seconde sono persistenti e difficilmente assorbite, visto la presenza di molte superfici riflettenti [2].

Questi difetti sono generalizzati nella platea, mentre la zona dell'orchestra presenta alcune riflessioni che disturbano e influenzano negativamente l'ascolto reciproco dei musicisti durante l'esecuzione. Queste riflessioni sono causate dalla conformazione della zona del presbiterio dove normalmente si colloca l'orchestra. In particolare, gli effetti negativi delle riflessioni sono causati dalle superfici riflettenti non omogenee vicine ai musicisti, dal grande volume sopra l'orchestra e dalla presenza del ribassamento nel tetto della chiesa che riflette il suono non verso la platea ma verso l'orchestra, oltre che dall'influenza degli ambienti retrostanti e dalla presenza dell'arco di accesso ad essi che focalizza le riflessioni sull'orchestra. I tre obiettivi del progetto sono:

- proteggere l'orchestra dai disturbi ed interferenze provenienti in particolare dagli ambienti retrostanti, parzialmente mitigati dalla presenza dell'altare del Giambologna;
- migliorare la diffusione del suono nella platea, evitando la dispersione nell'enorme volume;
- ridurre il riverbero in eccesso, in particolare quello relativo alle basse frequenze.

Per la valutazione del progetto di miglioramento acustico, gli obiettivi sono stati tradotti nei parametri oggettivi di riferimento (Tab. 1).

Nello specifico, si sono valutate le possibilità di proteggere l'orchestra attraverso sia la modifica della geometria dello spazio fisico in cui essa è collocata, privilegiando il suo-

no diretto, sia attraverso la modifica dei parametri acustici, cercando di ottenere un aumento di C80 e G e una diminuzione del tempo di riverbero. Il miglioramento della diffusione sonora in platea è stato analizzato attraverso la verifica dell'omogeneizzazione dei parametri e all'aumento di C80 e G. La riduzione del riverbero è stata analizzata attraverso la diminuzione del T30, prestando particolare attenzione alle basse frequenze attraverso analisi del BR.

Tab. 1 – Parametri di riferimento, 500 Hz
Reference parameters, 500 Hz

Parametro	Valore	Ob.1	Ob.2	Ob.3	
T30	1.40 – 2.30	X		X	[4]
EDT	1.60 – 1.80	X		X	[2]
C80	-2 – +2	X	X		[2]
G	9 – 13	X	X		[2]
BR	1.10 – 1.25			X	[6]

Il progetto è stato analizzato non solo dal punto di vista del miglioramento acustico, ma anche da quello estetico e architettonico, considerato che l'intervento si inserisce in un complesso apparato monumentale, frutto dello sviluppo della fabbrica in diversi periodi storici. Per questo è importante che l'intervento sia congruo con il contesto, pur mostrandosi come contemporaneo senza confondersi con le decorazioni della chiesa, evitando così la creazione di falsi storici. È stata inoltre valutata la reversibilità dell'intervento, al fine di garantire la sua completa rimozione e la possibilità di ripristino della chiesa in ogni momento.

L'analisi acustica e architettonica di ciascuna soluzione è stata schematizzata graficamente attraverso un grafico a radar, per facilitare il confronto tra le diverse soluzioni (Fig. 7).



Fig. 7 – Esempio di grafico di analisi delle singole soluzioni
Example of analysis graph of individual solutions

4.2 | Valutazione dei singoli interventi

Per valutare quale sia il miglior intervento applicabile per la correzione acustica della chiesa è stato realizzato un abaco delle possibili soluzioni. Quelle analizzate sono otto e si racchiudono in due tipologie: soluzioni studiate come schermatura verso gli ambienti circostanti e soluzioni che modificano il soffitto per migliorare la diffusione del suono. Tali soluzioni

sono state implementate all'interno del modello acustico di Ramsete®, che ha permesso di valutarne l'efficacia.

Schermatura dalle zone circostanti l'orchestra

La prima tipologia di interventi è indirizzata alla schermatura della zona dell'orchestra dalle interferenze e riflessioni degli ambienti retrostanti. Questi interventi hanno lo scopo di migliorare la percezione nell'area dell'orchestra, senza voler modificare la percezione sonora del pubblico. Una criticità di queste soluzioni è quella di intervenire nella zona presbiteriale dove si concentra l'apparato decorativo seicentesco, mutando la percezione visiva e architettonica dell'ambiente durante le esecuzioni dei concerti.

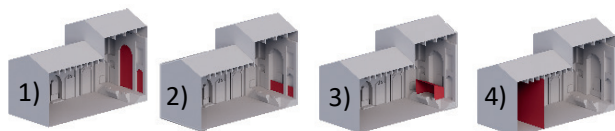


Fig. 8 – Schemi relativi agli interventi relativi alla schermatura delle zone retrostanti

Diagrams relating to shielding interventions

Gli interventi analizzati sono:

1. chiusura totale degli archi;
2. chiusura parziale degli archi;
3. posizionamento di un elemento di protezione attorno l'orchestra (guscio o *shell*);
4. posizionamento di una schermatura assorbente sul fondo della chiesa.

La chiusura completa degli archi di accesso agli ambienti retrostanti l'orchestra (Fig. 8.1) è l'intervento più diretto per ridurre ed eliminare interferenza delle cappelle e del coro [7]. Esso migliora l'ascolto nella zona dell'orchestra, omogeneizzando C80 e G, eliminando i picchi, senza però influire su T30, mentre non modifica la percezione da parte del pubblico; nessun parametro acustico della chiesa subisce variazioni significative. La chiusura degli archi impatta però fortemente a livello visivo; per questo vengono valutate tre differenti tipologie di materiali: tendaggi, pareti piene e vetro che, seppur con caratteristiche acustiche differenti, riescono a conseguire i medesimi risultati di miglioramento acustico, permettendo una differente percezione dell'ambiente e dell'intervento.

La chiusura parziale degli archi (Fig. 8.2), a differenza della chiusura completa, vuole permettere comunque la visione della cupola della cappella centrale durante l'esecuzione. Questa soluzione riesce a garantire i medesimi valori acustici della precedente. Risulta meno impattante a livello visivo, ma comunque fortemente impattante a livello architettonico. Anche per questa soluzione sono stati valutati differenti materiali (tendaggi, pareti piene e vetro) che risultano equivalenti dal punto di vista acustico, mentre il loro impatto è paragonabile a quello della chiusura completa degli archi.

Il posizionamento di un elemento di protezione posto attorno all'orchestra (Fig. 8.3) abbina la protezione di questa dagli ambienti retrostanti con la possibilità di indirizzare il suono direttamente verso la platea, creando una sorta di “gu-

scio”. Questo elemento è spesso montato all'interno della torre scenica nei teatri [2, 8]. L'inserimento di un guscio risulta indipendente dall'apparato decorativo fornendo un alto grado di reversibilità. L'intervento produce un lieve miglioramento del T30 nella chiesa, mentre l'EDT subisce una consistente diminuzione, dovuta al miglior direzionamento del suono verso la platea. Di conseguenza C80 e G aumentano. Questi miglioramenti sono enfatizzati nella zona dell'orchestra perché il suono vi viene circoscritto dall'involucro, lasciando libertà di propagazione dell'onda sonora solo in direzione della platea.

Il posizionamento di una schermatura assorbente sul fondo della platea (Fig. 8.4), lato facciata, serve a ridurre le riflessioni, specialmente dei bassi, e a diminuire il volume della platea. L'utilizzo a tale scopo di un tendaggio permette la facile rimozione dello schermo quando la chiesa non è utilizzata come sala da concerto e non produce alcun impatto visivo sull'ascoltatore durante le esecuzioni. Questo intervento, però, non porta un significativo miglioramento all'acustica dell'ambiente.

4.2.1 | Modifica del soffitto per migliorare la diffusione

La seconda tipologia di interventi è indirizzata a modificare le riflessioni, in particolare a correggere e uniformare quelle provenienti dal soffitto. Queste soluzioni risultano invasive a livello architettonico ma preservano la visione e l'aspetto monumentale dell'apparato decorativo presbiteriale. Le soluzioni analizzate sono:

5. inserimento di materiale fonoassorbente nella copertura;
6. posizionamento di un controsoffitto piano;
7. posizionamento di un controsoffitto sagomato;
8. posizionamento di pannelli appesi (clouds).

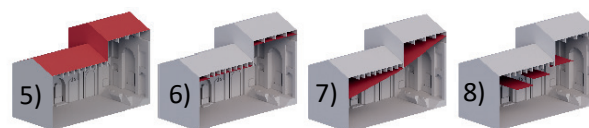


Fig. 9 – Schemi relativi agli interventi per la modifica del soffitto

Diagrams relating to interventions for modifying the ceiling

L'inserimento di materiale fonoassorbente nella copertura (Fig. 9.5) è l'intervento che modifica meno l'aspetto visivo della chiesa, in quanto non modifica il volume ma solamente la finitura del soffitto; il suo scopo è diminuire le riflessioni, soprattutto nella parte posta sopra l'orchestra. L'intervento produce effetti generalizzati sull'intero ambiente della chiesa: T30 e EDT diminuiscono, mentre C80 aumenta. G invece subisce effetti differenti: nella platea diminuisce, mentre nella zona dell'orchestra aumenta. Per mitigare l'impatto visivo e analizzare il comportamento delle singole parti della copertura sono state analizzate anche diverse soluzioni di posizionamento del materiale assorbente. Posizionando il materiale solo nelle falde inclinate, e non nella parete verticale di collegamento tra le due quote del tetto, vengono prodotti i medesimi risultati che con il soffitto completamente rivestito. Posizionando il materiale

solo nella parete verticale si ha, invece, un effetto acustico meno marcato, ad eccezione di G nella zona dell'orchestra, che aumenta dimostrando che la percezione dell'orchestra è influenzata dal suono riflesso da quella parete.

Il posizionamento di un controsoffitto piano (Fig. 9.6) posto all'intradosso delle capriate è un intervento che, attraverso la modifica del volume e l'utilizzo di materiali idonei, ha lo scopo di modificare l'andamento dell'onda sonora e le sue riflessioni, migliorando così la diffusione del suono in tutto l'ambiente; inoltre corregge la tendenza a focalizzare il suono nella parte centrale della chiesa, dovuta alla forma del tetto a due falde che è assimilabile a un piano concavo [9]. Analizzando i parametri acustici si nota, però, che non si genera nessun miglioramento sostanziale nell'acustica dell'ambiente. Al fine di mitigare l'impatto architettonico sono state valutate diverse soluzioni di materiali per il controsoffitto, come tendaggi, pannellature in legno, vetrate o materiale assorbente, le cui caratteristiche influiscono anche sull'acustica.

Un controsoffitto più articolato rispetto alla soluzione precedente (Fig. 9.7) fa sì che, anche visivamente, l'ambiente della chiesa non risulti come la somma di due volumi di altezze differenti, bensì come volume unico. L'inclinazione del nuovo soffitto direziona meglio il suono verso la platea ed elimina le riflessioni provenienti dalla parete verticale. Anche questo intervento risulta, però, molto invasivo rispetto all'apparato architettonico della chiesa, alterando notevolmente la percezione attuale della chiesa. Per questa soluzione sono stati analizzati due differenti materiali: pannelli fonoassorbenti e pannelli riflettenti in legno. L'utilizzo di un materiale fonoassorbente produce la brusca diminuzione dei tempi di riverbero e di conseguenza l'aumento della chiarezza, dovuta alla riduzione delle riflessioni provenienti dal soffitto e dalla loro minor potenza in quanto assorbite dal nuovo elemento. Il nuovo controsoffitto ligneo, invece, produce una piccola diminuzione dei tempi di riverbero generalizzata nella chiesa, dovuta alla miglior distribuzione delle riflessioni; questo migliora anche la percezione, misurabile attraverso un lieve incremento della robustezza.

Il posizionamento di pannelli sospesi in legno, denominati *clouds* (Fig. 9.8) riprende la soluzione alla base di molte delle moderne sale a geometria variabile [6] e ha lo scopo di direzionare meglio le riflessioni del soffitto. I pannelli modificano sicuramente la visione dell'ambiente, ma sono percepibili come elemento moderno aggiunto, senza entrare in contrasto con gli elementi architettonici e decorativi. La simulazione mostra che T30 e EDT diminuisce, mentre sia G che C80 aumentano, in quanto il percorso l'onda sonora riflette sui pannelli appesi e non si disperde nell'enorme volume della chiesa.

5 | Discussione

5.1 | Definizione della strategia progettuale

L'analisi delle varie soluzioni mostra la difficoltà di influenzare e migliorare il tempo di riverbero della platea, portandolo a valori ottimali, senza aggiungere molte superfici as-

sorbenti, impattanti sotto l'aspetto architettonico e visivo. Un compromesso è dato dall'inserimento puntuale delle superfici assorbenti sulla parete verticale di collegamento tra le due coperture o dai tendaggi posti all'ingresso della chiesa o dall'aggiunta di materiale fonoassorbente nelle soluzioni che come scopo principale hanno quello di direzionare il suono verso gli uditori (come i *clouds* o il guscio sull'orchestra).

L'analisi del BR evidenzia una difficoltà nel migliorare questo parametro: solo l'inserimento di *clouds* o di un guscio sull'orchestra garantisce un miglioramento della percezione delle basse frequenze.

Nello stato attuale C80 risulta accettabile. Le soluzioni che hanno lo scopo di direzionare meglio il suono ne producono un importante miglioramento, facendo sì che il suono diretto e delle prime riflessioni sia più intenso delle riflessioni successive. Anche le soluzioni che modificano l'assorbimento dell'ambiente sono migliorative, permettendo un bilanciamento tra suono iniziale e successivo. Come già evidenziato nella descrizione dello stato attuale, nella zona dell'orchestra C80 è molto alto, in quanto il suono diretto e delle prime riflessioni è predominante, vista la vicinanza tra sorgente e ricevitore.

In platea G aumenta rispetto allo stato attuale, approssimando i valori ottimali, in tutte le soluzioni che migliorano le riflessioni. Risultano invece inefficaci, o leggermente peggiorative, al riguardo le soluzioni con inserimento di materiale assorbente che attenua l'energia sonora delle riflessioni.

La scelta delle soluzioni di progetto ha tenuto conto, oltre che delle suddette valutazioni prettamente quantitative, anche della segnalata esigenza di proteggere l'orchestra dalle interferenze prodotte dai ritorni di suono dagli ambienti retrostanti. Inoltre si è cercato di far sì che l'intervento risulti poco invasivo e facilmente rimovibile, permettendo la comprensione totale dell'apparato decorativo della chiesa, mostrandosi come intervento moderno nel rispetto del pregio architettonico dell'edificio.

5.2 | Progetto di miglioramento

Il progetto di miglioramento acustico consiste nell'unione di tre soluzioni (Fig. 10).

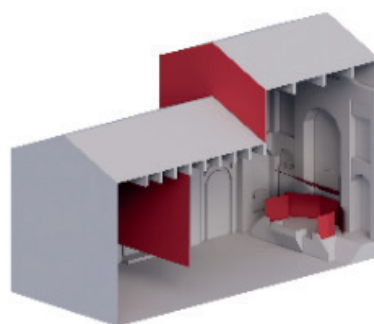


Fig. 10 – Modello 3d del progetto
3D model of the project

L'intervento principale è dato dall'inserimento di un elemento a protezione dell'orchestra, il guscio. Nello specifico, esso viene scomposto in due parti: gli elementi verticali e la copertura; questo serve per alleggerire l'elemento, che non appare come una "camera acustica" posizionata nel presbiterio, ma come un insieme di frammenti del guscio che si inseriscono in quello che è il complesso quadro dell'apparato monumentale, mostrandosi come un elemento autonomo. Gli elementi verticali sono disposti attorno all'orchestra, ma, come succede nelle decorazioni, non seguono una linea curva, bensì una spezzata, come il profilo degli archi. La funzione è quella di proteggere e schermare l'orchestra dagli ambienti retrostanti, circoscrivendo le riflessioni all'orchestra. Questi elementi sono formati da tre moduli di legno autoportanti che si assemblano verticalmente. Due di questi pannelli rigidi hanno la funzione di riflettere il suono, mentre quello centrale è un pannello sottile con intercapedine che sfrutta il principio della risonanza di membrana per assorbire le basse frequenze, in particolare quelle dei timpani e degli ottoni [10].

L'elemento di copertura dell'orchestra ha lo scopo di dirigere il suono verso la platea evitandone la dispersione negli ambienti retrostanti e nel grande volume della chiesa. La copertura è formata da pannelli rigidi sospesi che si ancorano a una struttura metallica sorretta, attraverso tiranti, da pali telescopici. Questo elemento permette la visione della cupola della cappella centrale retrostante, ma impedisce la visione completa dell'altare del Giambologna durante le esecuzioni concertistiche. Grazie alla sua modularità e alla sua divisione in elementi può essere installato solo quando è necessario, e smontato e tenuto a deposito negli ambienti annessi alla chiesa nel restante periodo.

Gli altri due interventi previsti hanno lo scopo di migliorare la distribuzione del suono; non entrano in relazione con l'apparato decorativo del presbiterio. Il primo consiste nell'applicazione di pannelli fonoassorbenti alla parete di collegamento tra le due differenti quote della copertura, con lo scopo di limitare le riflessioni dei suoni che riescono a raggiungere questa superficie. Sicuramente questo intervento non è di agevole rimozione, ma riguarda un punto nascosto della chiesa, e risulta quindi poco impattante a livello visivo.

Il secondo intervento prevede l'inserimento di una tenda mobile nella zona dell'ingresso della chiesa con lo scopo di diminuire le riflessioni che provengono dal fondo della chiesa, oltre a dividere e diminuire il volume dell'ambiente. La tenda è sorretta da rulli posti in prossimità della catena della capriata e si ferma a 2 m da terra così da non nascondere la visuale dell'apparato decorativo presbiteriale quando si entra nella chiesa e da non impedire il movimento all'interno di essa, lasciando libere le vie di fuga in caso di emergenza.

5.3 | Analisi acustica del progetto

L'analisi dei parametri acustici della chiesa risultanti dal progetto, mostra come gli obiettivi siano raggiunti (Tab. 2).

Tab. 2 – Parametri di progetto, 500 Hz
Project parameters, 500 Hz

Parametro	Platea	Orchestra	Rif.
T30	2.19 s	1.99 s	1.40 – 2.30
EDT	1.65 s	0.83 s	1.60 – 1.80
C80	2.60	9.77	-2 – +2
G	8.77	15.54	9 – 13
BR	1.33	1.33	1.10 – 1.25

La necessità di proteggere l'orchestra dai disturbi degli ambienti retrostanti è risolta grazie all'inserimento del guscio frammentato che direziona il suono e impedisce riflessioni dalle cappelle e dal coro. Il confinamento del suono attorno l'orchestra ne permette l'omogenea diffusione fra le diverse sezioni (Fig. 11).

Il miglioramento della diffusione del suono nella platea è ottenuto sia mediante la configurazione del guscio che vi indirizza il suono, sia mediante l'inserimento di materiale fonoassorbente che assorbe le riflessioni residue che si disperdono. Questo miglioramento è descritto dall'aumento di C80 e G che evidenziano l'aumento di intensità sonora delle prime riflessioni.

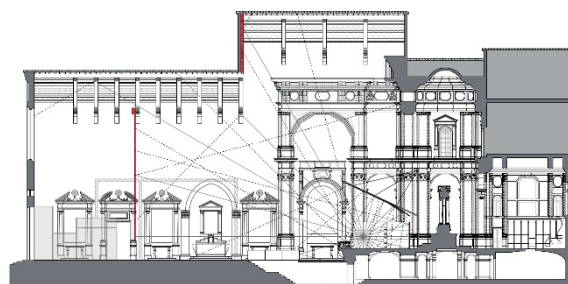


Fig. 11 – Analisi geometrica delle riflessioni
Geometric analysis of reflections

Il riverbero risulta diminuito grazie alla concentrazione delle prime riflessioni sulla platea, all'inserimento del materiale fonoassorbente in copertura e alla tenda all'ingresso, che asciugano l'ambiente assorbendo principalmente la coda sonora. Il riverbero delle basse frequenze è diminuito come mostrato dall'analisi di G, pur mantenendo costante BR.

Dall'analisi delle riflessioni si nota come i T30 risulta fortemente diminuiti dopo l'intervento rientrando nei parametri di riferimento (Fig. 12a).

Nella platea T30 rimane omogeneo su tutta la superficie, mentre EDT, seppur influenzato dalla distanza della sorgente, risulta maggiormente omogeneo rispetto allo stato iniziale grazie alla concentrazione delle prime riflessioni sulla platea. Nell'orchestra il T30 risulta inferiore rispetto alla platea (Fig. 14a). Questa differenza risulta accentuata analizzando EDT, perché le riflessioni vengono confinate attorno all'orchestra dal guscio. Tramite l'inserimento del guscio la distribuzione delle riflessioni risulta costante in tutta l'orchestra, al contrario della distribuzione delle riflessioni dello stato attuale che sono focalizzate sotto l'arco della cappella principale (Fig. 14b).

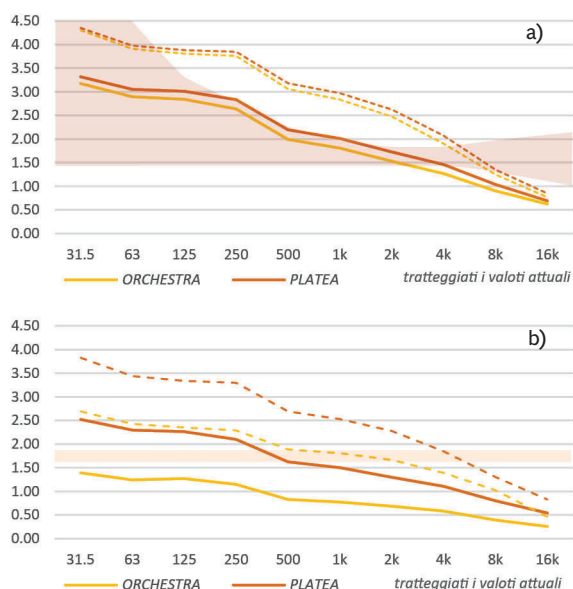


Fig. 12 – Grafico per banda di frequenza. T30 (a), EDT (b)
Graph by frequency band. T30 (a), EDT (b)

L'analisi della chiarezza mostra come C80 aumenti in tutto l'ambiente; questo è dovuto alla maggiore intensità delle prime riflessioni (Fig. 13a). Nello specifico, C80 nella zona della platea cresce superando il valore ottimale di riferimento pari a 2 dB. Il risultato è accettabile perché rientra nell'intervallo di valori previsti dalla norma UNI EN ISO 3382.

Nella platea l'andamento di C80 è costante e diminuisce progressivamente con l'aumento della distanza dalla sorgente; l'intensità sonora delle prime riflessioni diminuisce con l'aumentare della distanza del ricevitore dalla sorgente, mentre l'intensità della coda sonora rimane costante in tutto l'ambiente. C80 nell'orchestra, per quanto influenzata dalla vicinanza alla sorgente sonora, risulta omogeneamente distribuita (Fig. 14c).

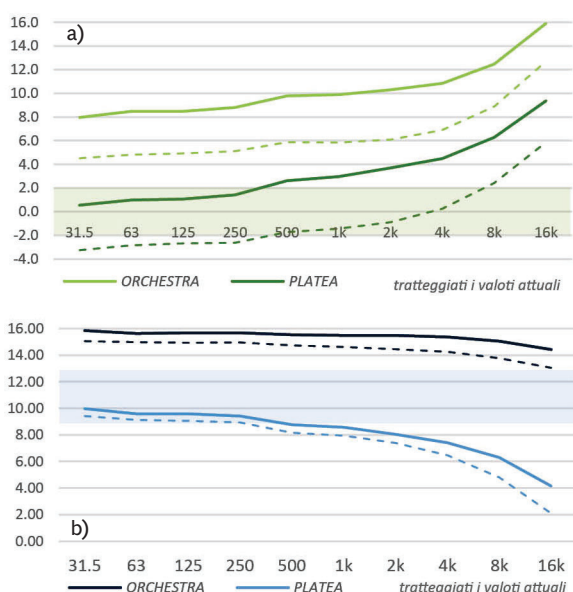


Fig. 13 – Grafico per banda di frequenza. C80 (a), G (b)
Graph by frequency band. C80 (a), G (b)

L'intensità sonora percepita, analizzata attraverso G, migliora grazie agli interventi di progetto che avvicinano il parametro ai valori ottimali. G è per sua natura condizionata dalla vicinanza tra ricevitore e sorgente. Nella platea, l'andamento risulta omogeneamente decrescente con l'aumento della distanza dalla sorgente (Fig. 14d). La differenza tra G filtrata alle diverse frequenze diminuisce rispetto a quanto misurato nello stato attuale. G relativa alle basse frequenze risulta maggiore di solo 1,50 dB rispetto a G alle medio-alte frequenze. Questo conferma il raggiungimento dell'obiettivo di percepire meno forti e persistenti le basse frequenze. G alle basse frequenze risulta costante rispetto allo stato attuale, mentre G alle alte frequenze aumenta allo stato di progetto. Questo significa che l'intensità sonora percepita appare più uniforme al variare delle frequenze, seppur il BR risulti corrispondente a quello analizzato allo stato attuale (Fig. 13b).

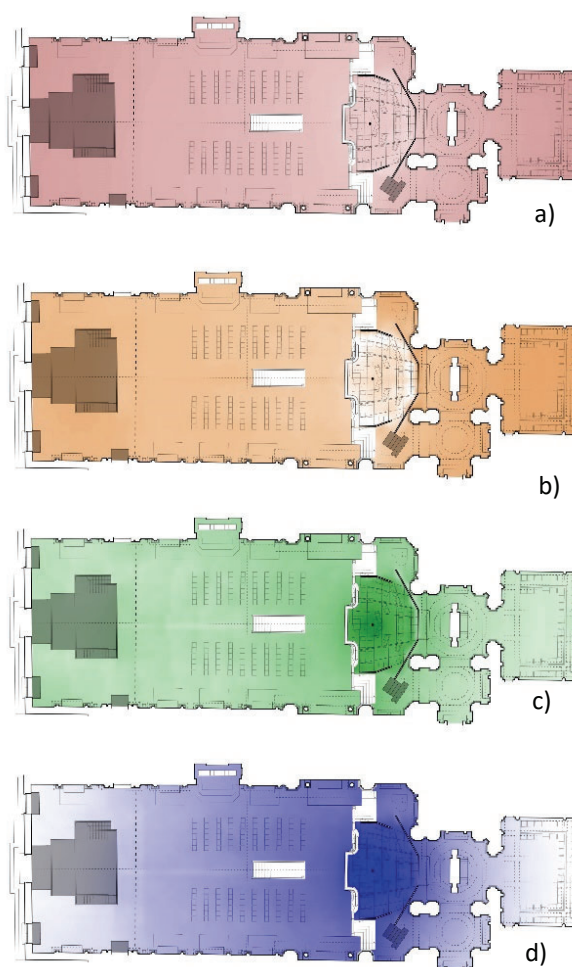


Fig. 14 – Mappatura dei parametri acustici del progetto a 500 Hz: T30 (a), EDT (b), C80 (c), G (d)
Mapping of the acoustic parameters of the project at 500 Hz: T30 (a), EDT (b), C80 (c), G (d)

6 | Conclusioni

Il progetto di riqualificazione acustica della chiesa di Santo Stefano al Ponte è finalizzato al miglioramento della diffusione del suono nella platea, alla riduzione dell'eccessivo riverbe-

ro presente nella chiesa, soprattutto alle basse frequenze, e alla protezione dell'orchestra dalle interferenze delle cappelle e del coro retrostanti, in accordo alle esigenze manifestate dal Maestro Lanzetta.

Il miglioramento è stato valutato attraverso l'analisi dei parametri oggettivi che descrivono il comportamento acustico dell'ambiente (T30, EDT, C80 e G), ricorrendo a misurazioni strumentali in loco e a simulazioni acustiche mediante software. Dall'analisi risulta come il progetto raggiunga gli obiettivi, conseguendo i valori ottimali dei parametri acustici per una sala da concerto.

La valutazione degli interventi progettuali non si è limitata all'analisi del comportamento acustico, ma ha preso in considerazione anche le interazioni tra le proposte progettuali e l'ambiente monumentale della chiesa, di enorme valore storico-artistico. Inoltre, le scelte sono state indirizzate verso soluzioni temporanee e facilmente removibili: la tenda posta all'ingresso della chiesa può essere raccolta all'altezza della catena della capriata, mentre il guscio modulare è scomponibile in elementi che possono essere conservati negli ambienti di servizio della chiesa, quando questa non è utilizzata come sala da concerto.

Conclusions

The acoustic enhancement project for the Church of Santo Stefano al Ponte aims to optimize sound diffusion in the audience area by mitigating excessive reverberation, especially at low frequencies, and to shield the orchestra from interferences originating from the chapels and the rear choir, as highlighted by Maestro Lanzetta.

The intervention's effectiveness is evaluated through the analysis of objective acoustic parameters (T30, EDT, C80, and G) by using virtual simulations. The results indicate that the project successfully meets its objectives and achieves optimal acoustic conditions for a concert hall.

The evaluation of the proposed interventions went beyond acoustic performance analysis, it also considered the interaction between the design solutions and the church's monumental setting, which is of great historical and artistic significance. Furthermore, the design choices prioritized temporary and easily removable solutions: the curtain at the church entrance can be retracted to the level of the truss chain, while the modular shell is composed of separable components, which can be stored in the church's service areas when not in use for concerts.



Fig. 15 – Foto-inserimento del progetto
Photoinsertion of the project

7 | Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare il Maestro Giuseppe Lanzetta, direttore dell'Orchestra da Camera Fiorentina.

La base del rilievo architettonico è dell'Arch. Antonio Fara.

Bibliografia

- [1] Spagnesi A., Pacciani S. (a cura di), *Santo Stefano al Ponte Vecchio*, Firenze, Edizioni della Meridiana, 1999.
- [2] Beranek L., *Concert Halls and Opera Houses: music, acoustics and architecture*, New York, Springer, 2010.
- [3] UNI EN ISO 3382-1, *Misurazione dei parametri acustici degli ambienti – Parte 1: Sale da spettacolo*, Milano, UNI, 2009.
- [4] Spagnolo R. (a cura di), *Manuale di acustica applicata*, Milano, Città Studi Edizioni, 2008.
- [5] Galaverna P., Giabbani M., Farina A., Truffelli G., *RAMSETE Software di previsione acustica – Manuale dell'utente e Manuale Teorico*, GENESIS Software e Consulenza Acustiche, 2002.
- [6] Cingolani S., Spagnolo R. (a cura di), *Acustica musicale e architettonica*, Milano, Città Studi, 2008.
- [7] Brasolin R., Ruggeri P., Peron F., Cattaneo P., Britton C., *Analisi e progettazione acustica per il riuso di una chiesa medioevale come sala da registrazione*, Atti del 43° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica, Alghero, 2016.
- [8] Farina A., Fausti P., Pompoli R., *The acoustical shell of the "nuovo teatro comunale" in Cagliari*, Atti del International IOA Conference "Opera and Concert Hall Acoustics", London Gatwick, 1995.
- [9] Barron M., *Auditorium acoustics and architectural design*, London, E & FN Spon, 1993.
- [10] Meyer J., *Acoustics and the Performance of Music*, New York, Springer, 2009.

