



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

**Corso di Laurea Architettura Costruzione e
Città**

A.a. 2025/2026

Sessione di Laurea Febbraio 2026

Tesi di Laurea Magistale

***La dimensione sonora dello spazio:
un modello sperimentale per la rappresentazione
fotorealistica e la simulazione acustica dello spazio
costruito.***

Il caso studio del Maneggio Alfieriano.

Relatore :

Chiar.ma Prof. Arianna Astolfi

Correlatori :

*Prof. Louena Shtrepi
Dott. LORENZO LAVAGNA
Dott. FILIPPO GABRIELE PRATTICO'
Dott. DAVIDE CALANDRA*

Candidata:

Giulia Sileo

Matricola:

S327311

Abstract	6
1. Introduzione	10
01.1 Contesto e motivazioni della ricerca	13
01.2 Obiettivi e domanda di ricerca	15
01.3 Struttura della tesi	17
01.4 Contesto legislativo di riferimento	24
2. Inquadramento storico	26
02.1 Inquadramento storico ed architettonico	29
02.2 Valore acustico e caratteristiche spaziali della sala Alfieriana	32
02.3 Potenzialità acustiche e motivazioni della scelta del caso studio	34
3. Analisi acustica preliminare	36
03.1 Spazio, materiali e comportamento acustico : analisi dello stato di fatto	39
03.2 Ipotesi preliminari sulla risposta sonora dello spazio	41
4. Metodologia	44

04.1	Strumentazione	51
------	----------------	----

04.2	Registrazioni in laboratorio	56
------	------------------------------	----

5.	Restituzione componente acustica	60
----	----------------------------------	----

05.1	Introduzione delle due metodologie	63
------	------------------------------------	----

05.2	Definizione dei materiali	65
------	---------------------------	----

05.3	Caso 1	67
------	--------	----

05.3.1	Sorgenti e ricevitori	69
--------	-----------------------	----

05.3.2	Configurazione dei job	73
--------	------------------------	----

05.3.3	Convolver e Mixer	75
--------	-------------------	----

05.3.4	Auralizzazioni	77
--------	----------------	----

05.4	Caso 2	80
------	--------	----

05.4.1	Sorgenti e ricevitori	82
--------	-----------------------	----

05.4.2	Configurazione dei job	86
--------	------------------------	----

05.4.3	Convolver e Mixer	88
--------	-------------------	----

05.4.4	Auralizzazioni	90
--------	----------------	----

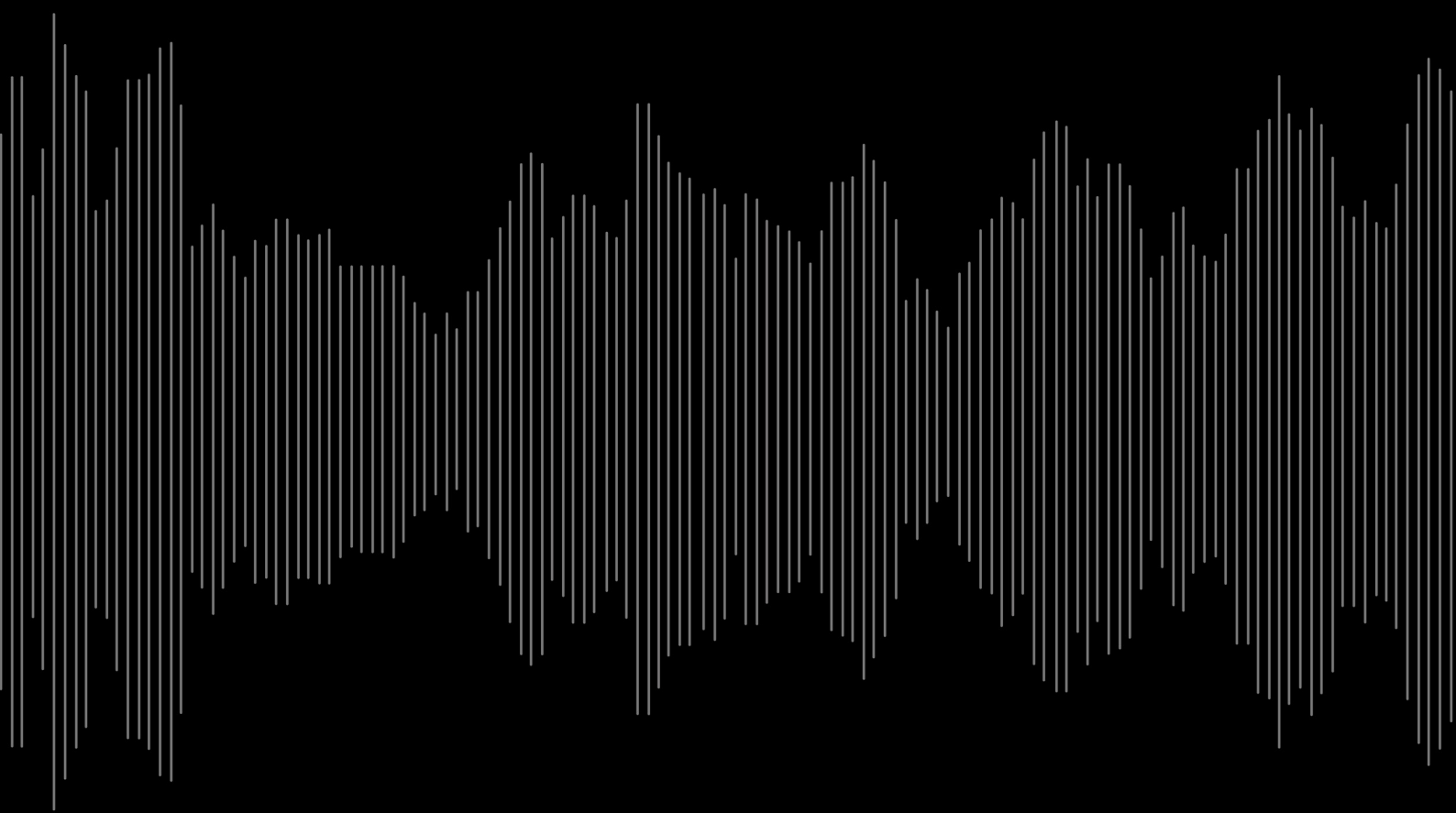
05.5	Confronto tra i due casi	92
------	--------------------------	----

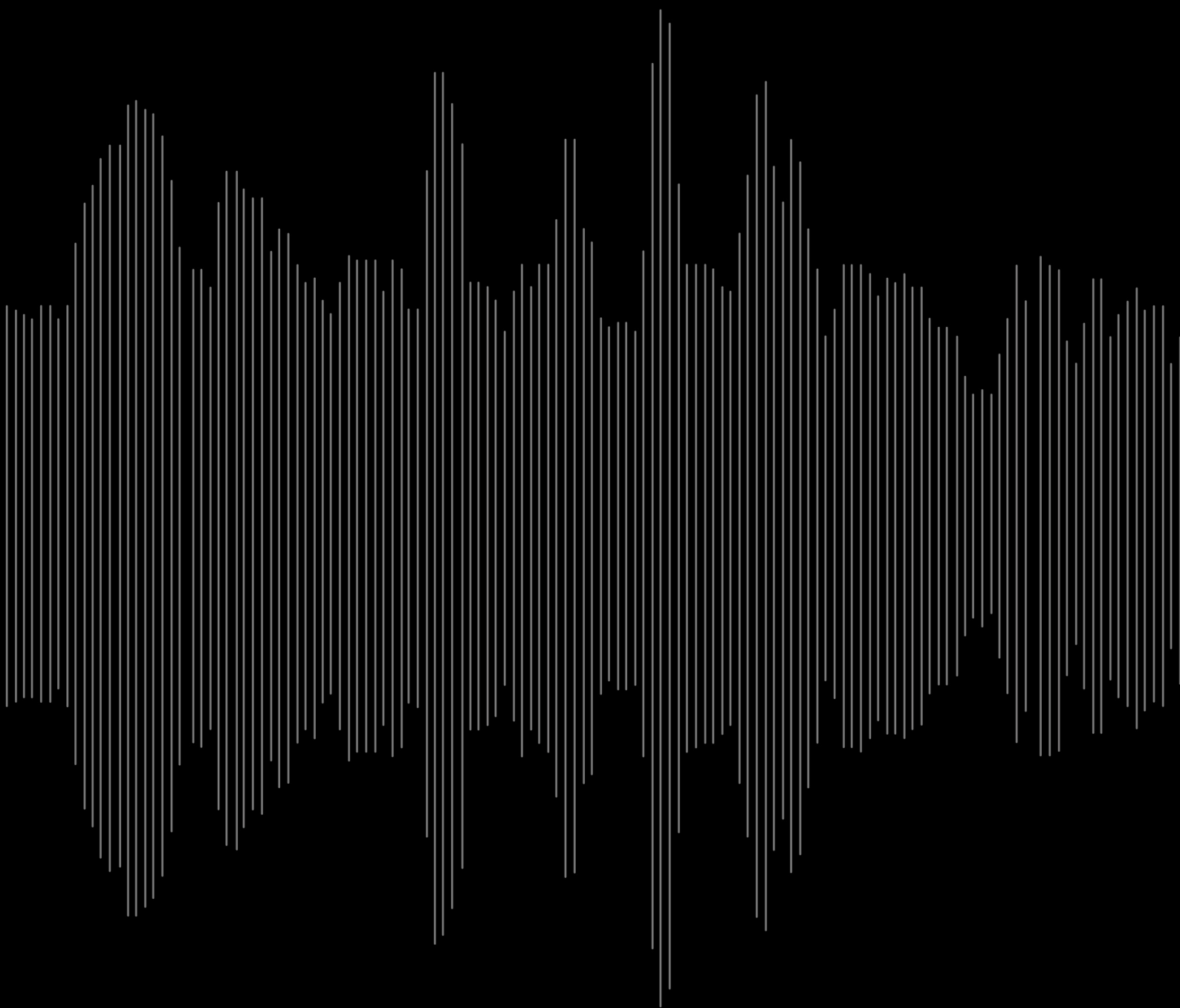
6.	Integrazione componente visiva	94
----	--------------------------------	----

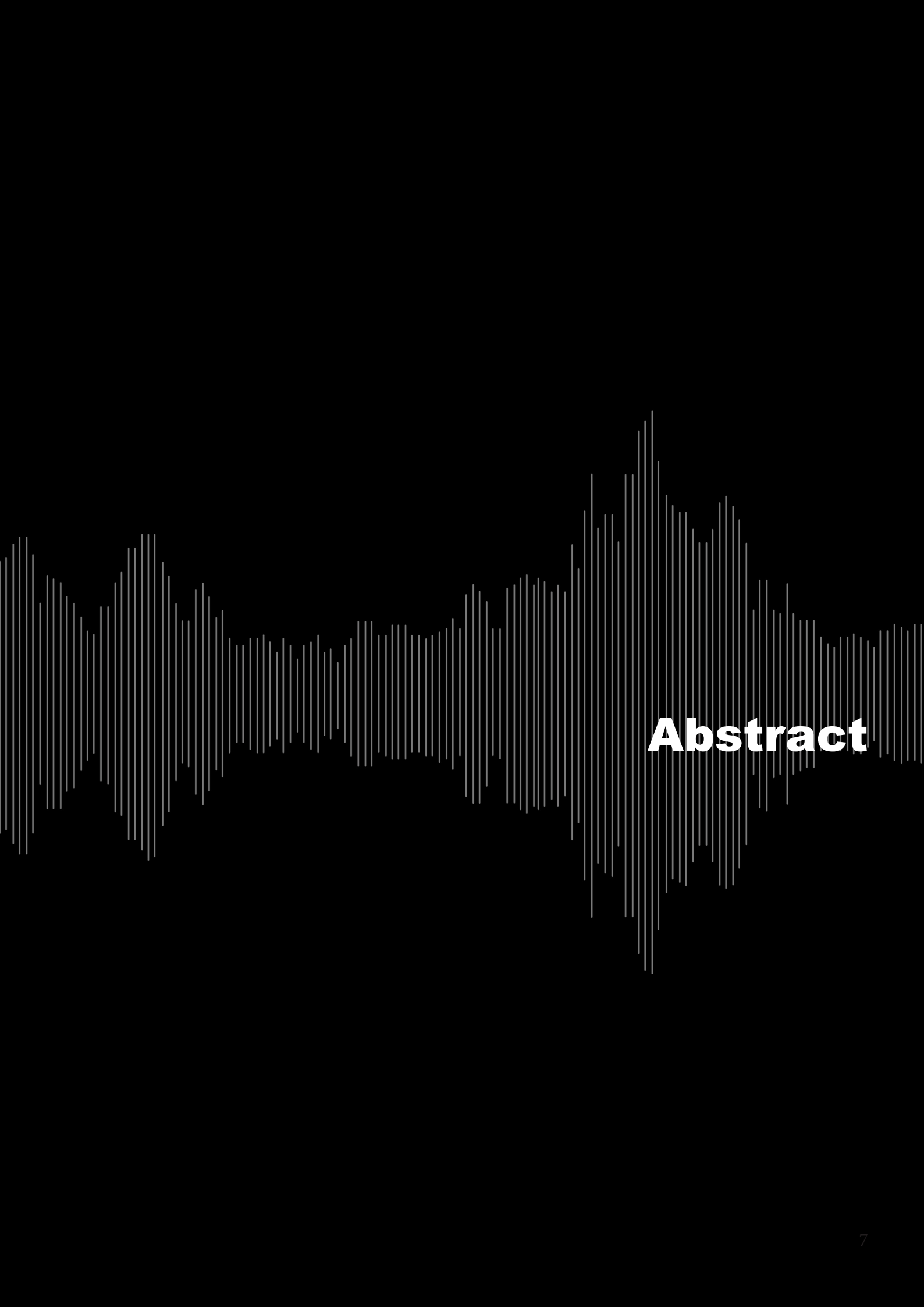
06.1	Rhinoceros	98
------	------------	----

06.2	Unreal Engine 5	100
------	-----------------	-----

06.3 Realizzazione violinista	104
06.4 VRPawn	108
06.5 Bidule	114
06.6 Impostazioni Oculus	116
7. Risultati	118
8. Discussione	122
9. Conclusioni e sviluppi futuri	126
Indice delle figure	132
Bibliografia	138







Abstract

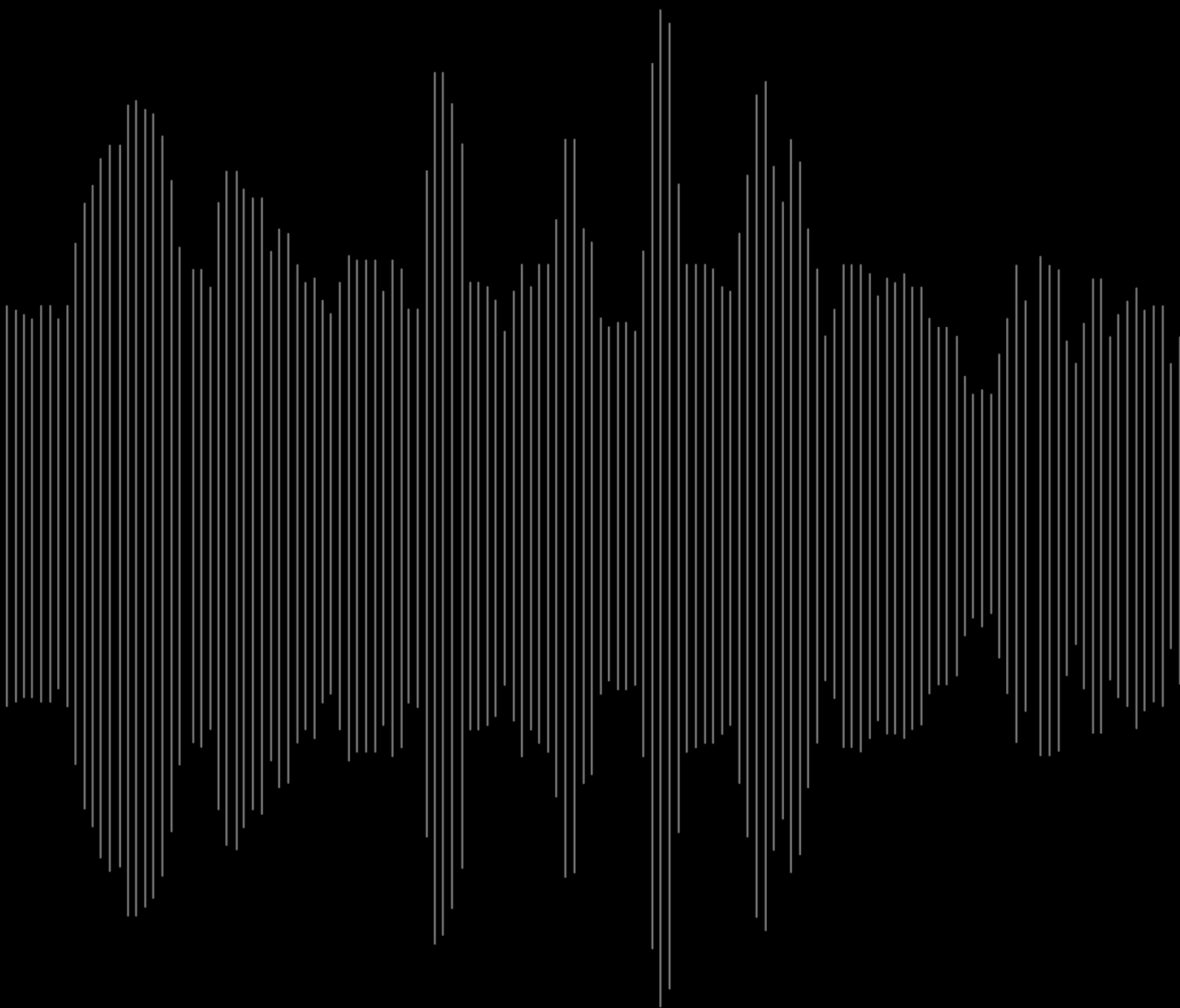
Domanda di ricerca :

In quale misura l'integrazione sinergica di auralizzazioni e visualizzazioni tridimensionali si configura come uno strumento efficace per ottimizzare la comunicazione progettuale e facilitare la comprensione delle proprietà acustiche di spazi architettonici complessi.

La ricerca si fonda sul principio secondo il quale l'integrazione audiovisiva rappresenta lo strumento elettivo per percepire in maniera realistica i risultati di un campo sonoro simulato all'interno di uno spazio. Attraverso lo sviluppo di due scenari acustici scientificamente validati tramite software specifici, è stato possibile ricostruire con fedeltà l'emissione sonora di un violinista impegnato nell'esecuzione dell'Allemanda di J.S. Bach all'interno del Maneggio Alfieriano della Cavallerizza Reale di Torino. Le tracce sonore così ottenute sono state successivamente implementate in un modello digitale realistico, progettato per consentire la visualizzazione del musicista da tre diverse prospettive, corrispondenti ad altrettanti punti di ascolto. Nelle tre posizioni, la perfetta sincronizzazione tra audio e video garantisce un'esperienza immersiva totale: l'osservatore può interagire dinamicamente con l'ambiente virtuale, decidendo in quale punto localizzarsi per verificare in tempo reale le variazioni della traccia sonora in funzione della posizione spaziale scelta.

Keywords :

Acoustic Simulation , Built Heritage , Auralization , Ambisonics,
Unreal Engine 5.7 , Virtual Reality , Virtual Reconstruction ,
Immersive Experience .





01

Introduzione

Il suono riveste un ruolo centrale nella percezione fenomenologica dello spazio e nella sua fruizione antropica, configurandosi come un elemento inscindibile dall'esperienza architettonica.

In fase progettuale, l'integrazione della componente acustica non deve essere considerata un mero adempimento formale, bensì un pilastro fondante per la vivibilità, la salubrità e il benessere psicofisico degli occupanti.

L'apporto del suono a livello architettonico si rivela multidimensionale: ogni elemento materico, geometrico e strutturale che compone l'organismo edilizio agisce come un filtro selettivo capace di alterare drasticamente la risposta sonora dell'ambiente.



1.1

Contesto e motivazioni della ricerca

La presente indagine, sviluppata con il Dipartimento di Energia (DENERG), del Politecnico di Torino, analizza un sito di rilevante valore storico e architettonico, oggetto di intervento di rifunzionalizzazione e riuso adattivo.

La riconversione del complesso in sala da concerto ha offerto la possibilità di sviluppare una metodologia funzionale alla verifica progettuale, basata sull'azione combinata tra modellazione architettonica e fisica acustica.

La ricerca propone alla progettazione tradizionale, una concezione dello spazio inteso come ambiente multisensoriale, superando la prospettiva puramente geometrica.

Lo spazio architettonico viene qui analizzato come un sistema dinamico in cui la componente sonora non è una risultante passiva, ma un elemento attivo e strutturante dell'esperienza utente.

In linea con i paradigmi del soundscape (paesaggio sonoro) definiti da Schafer [1], l'acustica viene assunta come variabile compositiva primaria, capace di determinare la qualità ambientale e la funzionalità stessa del volume architettonico.

L'obiettivo centrale del lavoro consiste nella validazione di un workflow capace di simulare l'impatto sensoriale di un ambiente ancora in fase di realizzazione. Tale finalità è perseguita attraverso l'integrazione di due strumenti tecnologici di simulazione: la VR, che attraverso l'impiego di visori ad alta risoluzione permette la navigazione tridimensionale all'interno del modello digitale garantendo la coerenza spaziale e percettiva del volume, e le Auralizzazioni, ovvero il processo di generazione di un campo sonoro udibile in un ambiente simulato [2] che consente di esperire la risposta acustica dello spazio (impulsi di risposta, riverberazione, chiarezza) in tempo reale.

Per garantire un elevato grado di fedeltà e accuratezza fisica, la simulazione non si limita a sorgenti tradizionali, ma integra sorgenti composte per simulare un violino,

Questo metodo implementa dati di direttività ad alta risoluzione acquisiti tramite tecniche di scansione microfonica avanzata [3].

L'integrazione audiovisiva determina un cambio nello sviluppo progettuale, permettendo una verifica percettiva ante-operam che garantisce la correlazione di parametri acustici oggettivi con le sensazioni soggettive e le risposte emotive dei fruitori.

Il progetto, dunque, non viene solo calcolato, ma esperito, unendo il rigore dell'analisi tecnica alla validazione empirica dell'esperienza sensoriale dell'utente.



1.2 Obiettivi e domanda di ricerca

L'obiettivo centrale dello studio risiede nell'analizzare come la componente sonora possa modificare la percezione dello spazio architettonico.

L'intento è dimostrare come la simulazione di ambienti reali, siano essi esistenti o in fase di progettazione, consenta di anticipare con estremo realismo l'esperienza fruitiva futura. Attraverso l'integrazione audiovisiva, il modello digitale cessa di essere soltanto rappresentazione visiva per trasformarsi in uno strumento percettivo immersivo.

Tale approccio permette di esperire le sensazioni ambientali e acustiche dello spazio fisico, validando l'efficacia del progetto.

La scelta di combinare due tecniche è funzionale, poiché la sola immagine tende a privilegiare un approccio puramente estetico, mentre l'apporto del suono consente di percepire dimensioni, distanze e densità in modo più completo [4].

Il fine della ricerca è indagare come l'interazione con le nuove tecnologie di realtà aumentata possa potenziare e integrare la fase progettuale di un elemento architettonico.

Questa integrazione si rivela un elemento migliorativo per l'esperienza del committente, il quale acquisisce la possibilità di interagire con lo spazio in modo dinamico. Attraverso l'uso della realtà aumentata, il cliente può definire quali elementi necessitino di ottimizzazione, simulando l'atmosfera concepita dal progettista.

In questo contesto, lo strumento tecnologico funge da mediatore tra l'idea progettuale e la sua futura realizzazione materiale.

In modo specifico, l'integrazione audiovisiva si configura come un supporto decisionale fondamentale nel caso di interventi su preesistenze antiche, spesso caratterizzate da complessi vincoli di tutela.

La possibilità di fornire un'anticipazione realistica delle prestazioni dell'ambiente costruito tramite un'adeguata correzione acustica costituisce una valida motivazione di intervento, specialmente nelle situazioni di scetticismo riguardanti la compatibilità di interventi successivi in contesti di elevato valore storico [5].

Tale approccio permette di vagliare preventivamente diverse ipotesi, garantendo una scelta progettuale consapevole e supportata da dati empirici prima dell'effettivo inizio delle attività di cantiere.

1.3 Struttura

La ricerca si è articolata secondo una sequenza gerarchica di fasi integrate, finalizzate alla creazione di una rappresentazione realistica del Maneggio Alfieriano.

Il processo ha avuto origine dalla definizione di modelli geometrici distinti, differenziati in base alle specifiche finalità di calcolo e visualizzazione:

1. Modello Acustico (SketchUp): Una versione semplificata, priva di eccessive complessità geometriche per ottimizzare il calcolo dei raggi sonori all'interno del software di simulazione Odeon.
2. Modello Architettonico (Rhinoceros): Un modello ad alta fedeltà, comprensivo di tutti gli apparati decorativi e dei dettagli materici, destinato a costituire la base visiva fotorealistica all'interno del motore di gioco Unreal Engine 5.

Definiti i modelli, la ricerca si è concentrata sulla comparazione di due diverse metodologie di calcolo scientifico.

L'obiettivo è stato verificare la divergenza tra i risultati e individuare l'approccio più idoneo per le simulazioni immersive.

Il supporto empirico a tale fase teorica è stato fornito da un sopralluogo tecnico (Figura 1,2,3) , fondamentale per rilevare dettagli spaziali e materici non deducibili dalla documentazione iconografica .



*Figura 1 ►
Immagine interna dei
degradi superficiali delle
componenti decorative*



Figura 2 ►

*Immagine dell'interno del
Maneggio alfieriano scattata
durante il sopralluogo*

*Figura 3 ►
Immagine interna del
Maneggio*



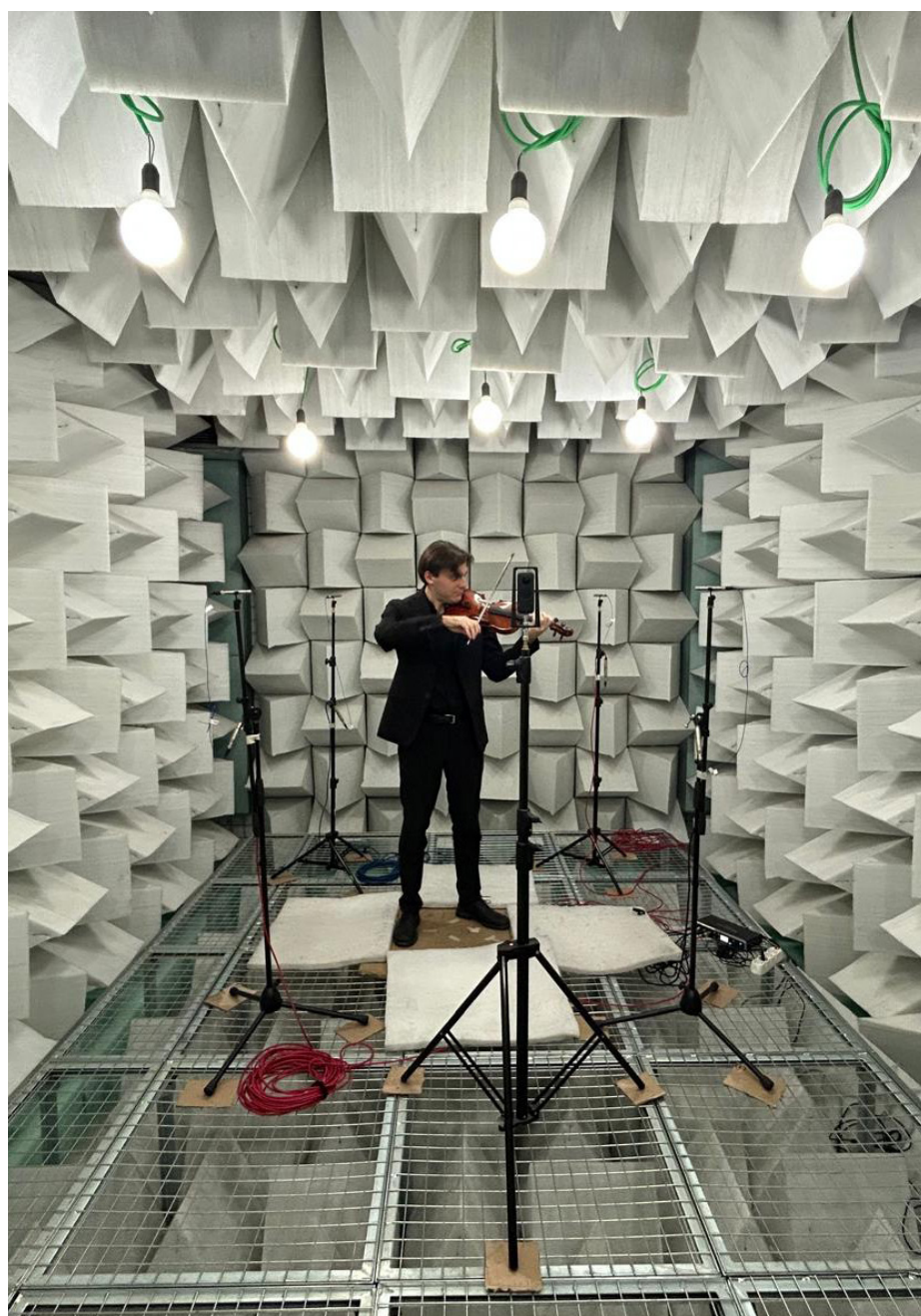
Durante il rilievo, sono state effettuate misurazioni fonometriche per calcolare i parametri acustici oggettivi, quali l'Indice di Chiarezza e il Tempo di Riverberazione, necessari per la successiva taratura del modello digitale.

Il fulcro dell'esperienza immersiva risiede nella fedeltà della sorgente sonora. A tal fine, è stato coinvolto il violinista Antonio Molle per l'esecuzione dell'Allemanda di J.S. Bach.

La sessione di acquisizione è stata strutturata in due fasi complementari presso i laboratori del Politecnico di Torino.

Nella Camera Anecoica (figura 4) sono state registrate tre performance, con orientamenti spaziali differenziati, essenziali per mappare la direttività pura dello strumento e alimentare l'algoritmo di auralizzazione. Altrettante riprese sono state svolte nel Visionary Lab, (figura 5) seguendo la medesima logica di rotazione, necessarie per integrare la componente visiva e garantire la coerenza prospettica del musicista nel mondo virtuale.

L'intero set di dati è stato infine implementato e sintetizzato attraverso l'integrazione di Odeon per la parte acustica e Unreal Engine per la simulazione VR, garantendo un'esperienza audiovisiva scientificamente fondata [6].



*Figura 4 ►
Musicista in camera
anecoica durante la
registrazione audio.*



*Figura 5 ►
Musicista nel VisionaryLab
durante la registrazione video.*



1.4 Normativa di riferimento

La progettazione deve analizzare scientificamente una pluralità di fattori determinanti per la qualità dell'edificio. Per la verifica acustica risultano particolarmente rilevanti aspetti come

- l'isolamento di facciata ($D_{2m,nT,w}$), preposto a schermare l'ambiente interno dal rumore esterno;
- il potere fonoisolante apparente (R'_w), che definisce la capacità delle partizioni verticali e orizzontali di isolare unità immobiliari distinte;
- il controllo del livello di rumore di calpestio ($L'_{n,w}$) essenziale per mitigare le perturbazioni generate da impatti diretti sulle strutture,
- l'analisi delle emissioni degli impianti a funzionamento continuo e discontinuo (L_{Amax} e L_{Aeq}), quali sistemi HVAC, scarichi idraulici e vani ascensore;
- il tempo di riverberazione (T_{60}), parametro strettamente dipendente dalla volumetria e dalle proprietà di assorbimento dei materiali, fondamentale per garantire l'intelligibilità del parlato e il comfort uditivo.

Le norme tecniche di riferimento atte a monitorare questi parametri sono molteplici e stratificate in un sistema articolato in: quadro legislativo cogente, procedure di misurazione in opera e protocolli di classificazione prestazionale.

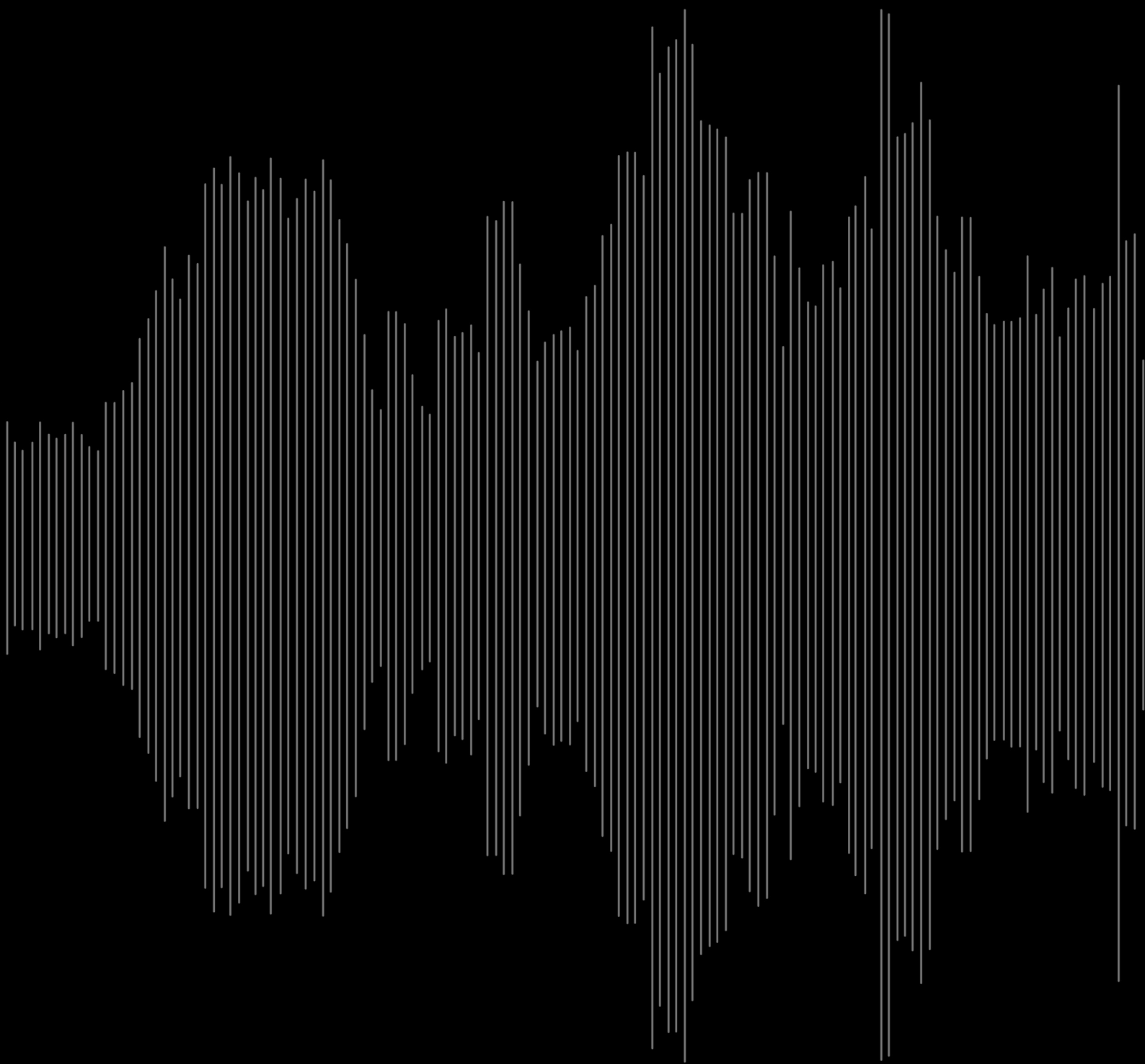
Il cardine della legislazione in materia è rappresentato dal D.P.C.M. 5 dicembre 1997 ("Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici") [7], il quale fissa i limiti minimi di isolamento e i massimi livelli di rumorosità ammissibili in opera, in funzione della destinazione d'uso. Successivamente l'evoluzione verso standard qualitativi superiori ha trovato espressione nei Criteri Ambientali Minimi (CAM), disciplinati dal D.M. 23 giugno 2022 [8].

Questo provvedimento, obbligatorio per l'edilizia pubblica e parametro di eccellenza per quella privata, impone il raggiungimento di classi acustiche più restrittive rispetto ai minimi fissati nel 1997.

Sul piano operativo e sperimentale, la verifica della conformità edilizia richiede l'applicazione di rigorose procedure di collaudo definite dalla serie UNI EN ISO 16283 (parti 1, 2 e 3).

A completamento del quadro, la norma UNI 11367:2023 definisce oggi lo strumento tecnico d'eccellenza per la classificazione acustica delle unità immobiliari, permettendo di certificare la qualità dell'immobile attraverso un sistema oggettivo.

Infine in ambienti che richiedono un controllo più specifico, come negli uffici o nei complessi scolastici, il quadro normativo è integrato dalla serie UNI 11532:2020, la quale disciplina i requisiti di riverberazione e l'indice di intelligibilità del parlato (STI), garantendo così la piena funzionalità e il comfort degli ambienti confinati.





02

**Inquadramento
storico**

In questo capitolo viene presentato il caso studio scelto per la ricerca, ovvero il complesso della Cavallerizza Reale di Torino, con un particolare approfondimento sul Maneggio Alfieriano. Nelle pagine che seguono, sono state presentate le vicende storiche e architettoniche del sito, evidenziando il legame tra le trasformazioni urbane della città di Torino e il progetto di architetti illustri come Castellamonte e Alfieri. Successivamente, l'attenzione si è concentrata sulle caratteristiche spaziali della sala, analizzando come la sua forma e i materiali costruttivi influenzino la propagazione del suono.

Ripercorrere la storia di tale monumento ha permesso di identificare le caratteristiche più interessanti ai fini della verifica acustica sfruttando tecniche di misurazione sonora avanzate.

*Figura 6 ▼
Cavallerizza Reale. Fotografia
di Paolo Mussat Sartor e
Paolo Pellion di Persano,
2010. © MuseoTorino*



2.1 Inquadramento storico ed architettonico

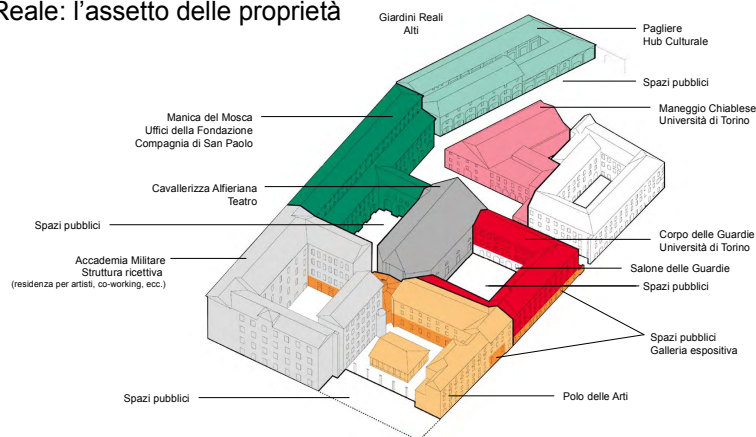
La Cavallerizza Reale di Torino rappresenta uno degli elementi architettonici più significativi della città e fa parte del complesso dei luoghi del potere sabauda, testimonianza del ruolo centrale che Torino ebbe come capitale del Regno.

Lo spazio analizzato in questo elaborato è quello del Maneggio Alfieriano, collegato al Duomo e al Palazzo Reale attraverso la manica della Segreteria Reale e del Teatro Regio [9] .

Figura 7 ►

Assonometria funzionale del complesso della Cavallerizza Reale, Presentazione della Fondazione Compagnia di San Paolo.

► Polo Culturale della Cavallerizza Reale: l'assetto delle proprietà



La costruzione vide il contributo di alcuni tra i più importanti architetti della corte sabauda, tra cui Amedeo di Castellamonte (figura 8), Filippo Juvarra e Benedetto Alfieri.

La Cavallerizza nacque nella seconda metà del Seicento, in concomitanza con l'ampliamento della città verso il Po, per ospitare attività equestri e accademiche legate alla formazione dei giovani aristocratici [10] .

La sala Alfieriana, in particolare, faceva parte dell'Accademia Reale ed era destinata alla pratica e all'addestramento equestre, mentre l'intero complesso comprendeva maneggi, scuderie e spazi di servizio articolati attorno a un grande cortile centrale collegato da una rotonda (figura 9). Sebbene il progetto originale non sia mai stato completato, l'edificio conserva elementi di grande valore architettonico e spaziale: la sequenza dei grandi archi trasversali, i volumi regolari e la decorazione essenziale; dettagli che contribuiscono a definire un ambiente di forte suggestione scenica.

È interessante notare come la monumentalità odierna sia solo una parte del progetto ambizioso di Benedetto Alfieri: alcuni dei suoi disegni di ampliamento prevedevano infatti di duplicare l'apparato costruttivo, raggiungendo dimensioni doppie rispetto a quelle attuali (figura 10).



Figura 8 ►

Il complesso dell'Accademia e della Cavallerizza secondo il progetto di Amedeo di Castellamonte, 1674 (da Theatrum Sabaudiae, I).

Figura 9 ►

Giuseppe Battista Piacenza,
Rilievo del piano terreno del
complesso della Cavallerizza,
1803 (Archivio di Stato di
Torino, Palazzi reali).

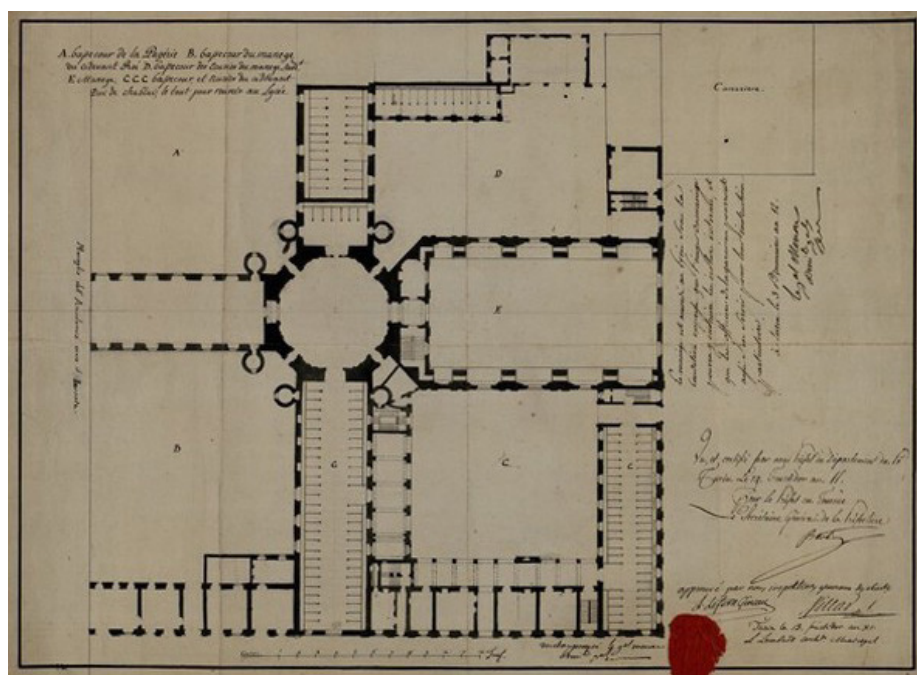
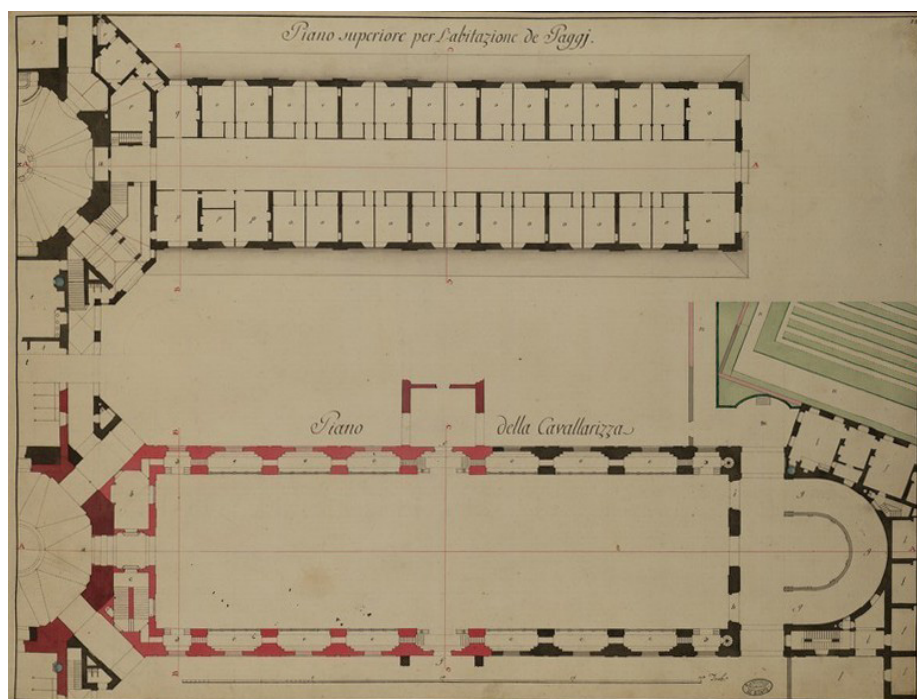


Figura 10 ►

Benedetto Alfieri, Pianta
e sezioni di progetto della
nuova Cavallerizza, 1763
(Archivio di Stato di Torino,
Palazzi reali).





2.2

Valore acustico e caratteristiche spaziali della sala Alfieriana

La propagazione sonora all'interno dello spazio costituisce il fulcro della ricerca condotta.

Il Maneggio Alfieriano si presenta come un volume di ampie proporzioni (9576 mq), coerente con l'originaria funzione equestre e sportiva per cui fu concepito. L'invaso principale è caratterizzato dalla presenza di due percorsi di camminamento sopraelevati, posti a circa 1.70 m dal piano di calpestio lungo i lati maggiori. Questi ambienti accessori, nati probabilmente come depositi per le attrezzature, sono stati successivamente rifunzionalizzati per ospitare le componenti impiantistiche.

Nel corso dei secoli la questa sala, ha subito numerose stratificazioni e trasformazioni, tra cui il tentativo di definire un nuovo apparato teatrale (figura 11).

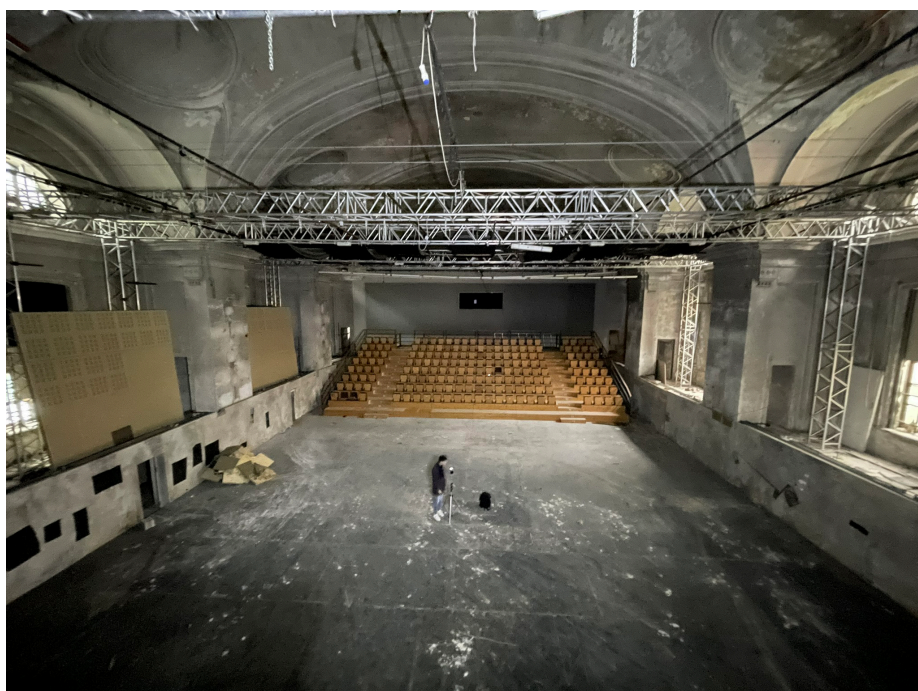


Figura 11 ►

*Sala del Maneggio Alfieriano
attrezzato come spazio
teatrale.*

Tuttavia, la volontà di trasformazione funzionale impone una valutazione acustica rigorosa, resa complessa dalla mancata definizione geometrica originaria dello spazio come sala teatrale. Di norma, l'architettura per lo spettacolo adotta configurazioni geometriche consolidate (come la pianta a ferro di cavallo o a ventaglio), progettate per indirizzare le riflessioni sonore e garantire un'esperienza uditiva ottimale per l'audience.

Nel caso del Maneggio, la sfida metodologica risiede nel completare un'analisi acustica dettagliata che permetta di individuare strategie di intervento capaci di garantire un'elevata resa sonora senza compromettere l'integrità del manufatto storico.

Un elemento critico emerso durante le fasi di sopralluogo riguarda l'estensione delle superfici trasparenti. A differenza degli auditorium tradizionali, caratterizzati da una chiusura verso l'esterno per il controllo della riverberazione e dell'isolamento, la sala Alfieriana presenta ampie aperture vetrate che influenzano pesantemente il comportamento acustico. Parallelamente, anche la rotonda di collegamento posta sul fondo della sala rappresenta un nodo spaziale che richiederebbe interventi correttivi mirati.

Queste prime osservazioni empiriche hanno permesso di delineare le opzioni più idonee per definire lo stato di fatto acustico indagato nella presente ricerca, ponendo le basi per la modellazione e la successiva auralizzazione.



2.3

Potenzialità acustiche e motivazioni della scelta del caso studio

La scelta del Maneggio Alfieriano della Cavallerizza Reale di Torino quale caso studio risponde alla necessità di indagare le dinamiche acustiche di uno spazio monumentale di elevato pregio storico-morfologico, attualmente interessato da processi di adaptive reuse [11] .

Situato nel tessuto urbano centrale di Torino, il manufatto rappresenta un paradigma della complessità insita nel recupero funzionale di grandi volumi storici, dove il progetto di rifunzionalizzazione deve necessariamente confrontarsi con la conservazione dell'integrità materica per l'adeguamento alle prestazioni contemporanee.

L'indagine si focalizza sulla valutazione dello stato di fatto, con l'obiettivo di caratterizzare la risposta sonora prima della ristrutturazione. Tale analisi si configura come uno strumento diagnostico per la comprensione dei fenomeni di propagazione sonora in un ambiente non originariamente destinato all'ascolto e propedeutica alla definizione di strategie di intervento coerenti con l'identità architettonica del sito.

Dal punto di vista dell'acustica architettonica, il Maneggio Alfieriano presenta criticità e potenzialità di estremo interesse. La configurazione volumetrica generosa, la prevalenza di superfici riflettenti e l'assenza di trattamenti fonoassorbenti determinano un campo sonoro caratterizzato da un elevato tempo di riverberazione (T_{60}) e da una distribuzione dell'energia sonora non uniforme.

La morfologia dello spazio, unita alla connessione con la rotonda di collegamento ad altre ali della Cavallerizza Reale, generano il decadimento dell'energia sonora, rendendo la sala un ambiente complesso.

Queste peculiarità rendono il Maneggio un laboratorio sperimentale ideale per l'applicazione di metodologie di Auralizzazione e Realtà Virtuale (VR).

La ricerca intende superare i limiti della rappresentazione tecnica tradizionale, esplorando come l'integrazione audio-visiva possa facilitare la comprensione del progetto anche per utenti non specialisti, traducendo dati acustici complessi in esperienze sensoriali immersive. In questo senso, il caso studio permette di testare l'efficacia delle tecniche di simulazione nel validare soluzioni di riuso, offrendo un contributo al dibattito sulla fruizione contemporanea dei grandi spazi storici [12], [13].





03

Analisi acustica preliminare

La fase analitica della ricerca ha adottato un approccio metodologico strutturato, passando da uno studio teorico dello spazio a una verifica sperimentale basata su simulazioni e rilievi diretti (figura 12).

Inizialmente, è stata formulata una stima del comportamento acustico del Maneggio Alfieriano analizzando le sue caratteristiche storiche e materiche. Considerando l'epoca di costruzione e la funzione originaria, lo spazio è stato identificato come un volume di grandi dimensioni in muratura in mattoni pieni rivestito di intonaco, pavimentazione non definita e ampie porzioni vetrate.

In tale fase preliminare, la scarsità di materiali fonoassorbenti, tipica delle scuderie storiche, ha indotto a prevedere un tempo di riverberazione estremamente elevato, caratterizzato da una persistenza marcata delle basse frequenze e da una ridotta intelligibilità del segnale sonoro, definendo lo stato di fatto come acusticamente critico per una fruizione musicale.



Figura 12 ►

Immagine interna scattata durante il primo sopralluogo



3.1 Spazio, materiali e comportamento acustico: analisi dello stato di fatto

Il Maneggio si configura come un volume caratterizzato da pochi materiali e non di particolare pregio, giustificato dalla precedente funzione dello spazio. Nonostante fosse un ambiente di esercitazione sportiva, all'interno del maneggio sono presenti molti elementi decorativi che esprimono la funzione di rappresentanza anche di ambienti accessori nella corte sabauda. Solo in epoca contemporanea l'edificio è stato oggetto di una rivalutazione che ne ha individuato il potenziale come sala da spettacolo, sebbene lo spazio conservi le caratteristiche costruttive originali di un ambiente di servizio.

La struttura portante è realizzata in muratura continua, coerentemente con il resto del complesso architettonico, mentre la copertura è definita da un sistema di capriate lignee rivestite da un sistema voltato di copertura della sala (figura 13).

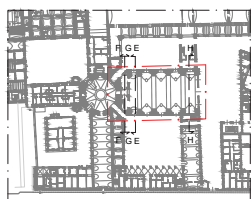
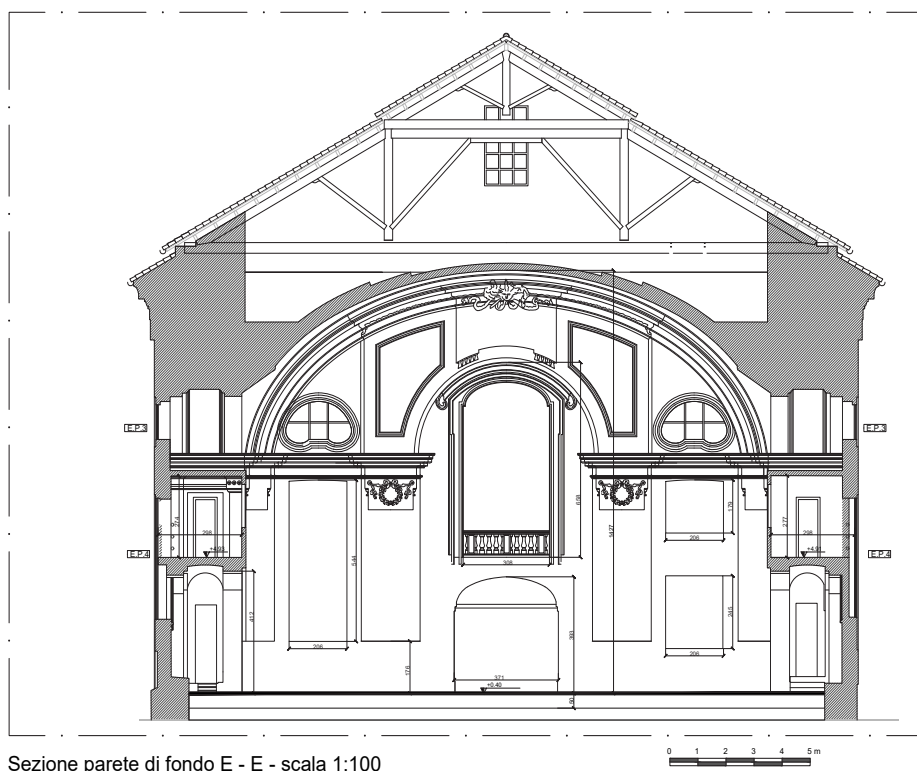


Figura 13 ►

Sezione interna del Maneggio alfieriano; Tavola di progetto depositata al comune AR 03 - G - Stato di fatto - sezioni trasversali



Sezione parete di fondo E - E - scala 1:100

All'interno, le superfici risultano interamente ricoperte da strati di intonaco che rivestono anche gli apparati decorativi paretali, con la presenza di integrazioni riconducibili a interventi manutentivi successivi (figura 14).

Il sistema delle aperture presenta un elevato degrado causato dall'usura nel tempo. Sono evidenti le successioni di interventi di manutenzione all'interno specialmente per le vetrate. Gli infissi sono in legno (figura 15), visibilmente provato dal tempo e alcune finestre sono state schermate con pannelli in legno. Le aperture della facciata principale al momento non assolvono alla funzione di schermatura dall'esterno essendo manchevoli del vetro e il portone assente.

Figura 14 ▼
Interno del Maneggio
Alfieriano, facciata di
collegamento alle altre
maniche del complesso



Figura 15 ▼
Interno del Maneggio
Alfieriano, facciata di accesso





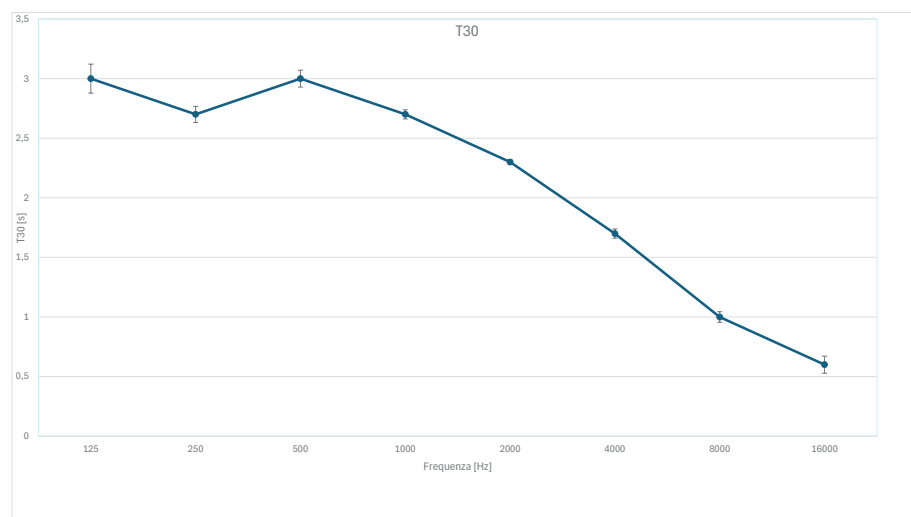
3.2 Ipotesi preliminari sulla risposta sonora dello spazio

Le prime ipotesi sul comportamento acustico dello spazio sono state fatte durante il sopralluogo svolto per raccogliere una serie di parametri oggettivi ambientali.

In questa sede sono stati misurati il tempo di riverberazione (T30) e la chiarezza (C50). Per fare queste prove è stata utilizzata la tecnica di eccitazione del campo sonoro tramite segnale impulsivo generato da una pistola a salve. Tale metodo ha permesso di sollecitare in modo uniforme lo spazio, permettendo di analizzare il decadimento sonoro catturato dai microfoni di misura posizionati in punti strategici, corrispondenti ai punti di ascolto sviluppati successivamente nel modello virtuale.

I tempi di riverberazione (T30) superano i 4 secondi alle basse frequenze (63-125 Hz), mostrando una decrescita progressiva verso le alte frequenze attribuibile all'assorbimento molecolare dell'aria e alla porosità intrinseca dei materiali storici (figura 16).

Figura 16 ►
Andamento del tempo di riverberazione T30 in funzione della frequenza, misurato nella sala



I dati raccolti sono stati quindi sintetizzati mediante strumenti di calcolo numerico per il confronto con i parametri definiti dalla normativa ISO 3382 (figura 17).

L'analisi si è focalizzata sui descrittori fondamentali per la qualità acustica di una sala da concerto, evidenziando per il tempo di riverberazione (T30) valori medi compresi tra 3,5 e 4,0 secondi nelle frequenze centrali (500-1000 Hz), dato che conferma un ambiente eccessivamente riverberante per sorgenti sonore complesse.

PARAMETRI ACUSTICI ISO 3382

		f [Hz]							
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
S1_R1	C50	-6,2	-4,0	-1,2	0,4	0,5	1,0	3,5	2,4
S1_R1	C80	2,7	2,3	1,9	2,2	2,6	2,6	7,1	10,6
S1_R1	D50	19,5	28,5	43,2	52,3	52,9	55,5	69,3	63,6
S1_R2	C50	-1,0	-5,1	-5,1	-2,0	-2,3	0,1	3,1	8,3
S1_R2	C80	0,2	-3,8	-3,9	-1,1	-1,0	1,6	5,6	12,1
S1_R2	D50	44,5	23,6	23,5	38,9	36,9	50,3	66,9	87,2
S1_R3	C50	-3,3	-3,4	-10,3	-7,0	-5,2	-2,5	0,4	5,0
S1_R3	C80	-1,8	-2,5	-7,7	-5,2	2,9	-0,8	3,0	8,6
S1_R3	D50	32,1	31,2	8,6	16,9	23,4	36,1	52,0	76,0
S2_R1	C50	-2,6	-7,4	-1,4	-3,3	-0,8	2,6	6,9	9,7
S2_R1	C80	-2,4	-6,4	-0,9	-2,1	-0,1	3,3	8,0	11,6
S2_R1	D50	35,7	15,4	42,3	31,7	54,3	64,5	83,0	90,3
S2_R2	C50	1,2	-5,4	2,1	2,1	1,7	3,8	3,6	11,5
S2_R2	C80	1,8	-3,4	2,8	2,9	2,6	4,9	5,2	14,1
S2_R2	D50	56,8	22,3	61,9	62,0	59,6	70,8	69,7	93,4
S2_R3	C50	-3,7	-4,8	-11,1	-4,1	-2,8	-1,1	0,9	5,7
S2_R3	C80	-2,9	-3,3	-8,3	-3,1	-0,9	0,8	3,5	9,8
S2_R3	D50	29,9	24,8	7,2	27,9	34,3	43,5	55,2	78,9

Figura 17 ►

Indicatori acustici energetici misurati secondo la norma ISO 3382 in diverse configurazioni sorgente-ricevitorie.

S= Sorgente
R= Ricevitore/microfono

Parallelamente, l'analisi della Chiarezza (C50) ha rilevato valori sistematicamente negativi, con punte a -6,2 dB e -10,3 dB nelle posizioni di prova, attestando una netta prevalenza dell'energia tardiva rispetto a quella diretta e una conseguente compromissione della definizione temporale del suono.

Alle basse frequenze i valori risultanti indicano una forte presenza di energia riflessa che tende quindi a mascherare il suono diretto, comportamento tipico dei volumi storici.

Alle alte frequenze invece la chiarezza aumenta significativamente, fino a +11,6 dB. Questo incremento è dovuto all'assorbimento naturale dell'aria e delle superfici che ad alta frequenza riducono la coda sonora tardiva.





04

Metodologia

Per rispondere alle diverse esigenze computazionali dei software impiegati, si è proceduto alla realizzazione di due modelli geometrici distinti.

Il modello acustico (Low-Poly) realizzato in SketchUp (figura 19), questo modello è stato volutamente semplificato, escludendo dettagli decorativi non influenti sulle lunghezze d'onda sonore per essere compatibile con l'algoritmo di calcolo di Odeon. Invece il modello visivo (High-Poly), sviluppato in Rhinoceros 7.0 (figura 20), presenta un elevato livello di dettaglio architettonico e decorativo, necessario per garantire la fedeltà fotorealistica nel motore grafico di rendering.

Figura 19 ►
Prospettiva modello acustico
realizzato in SketchUp.

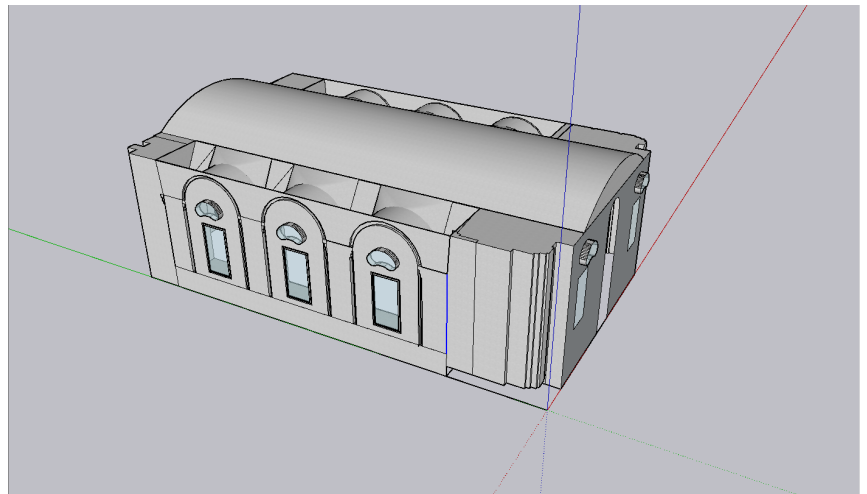
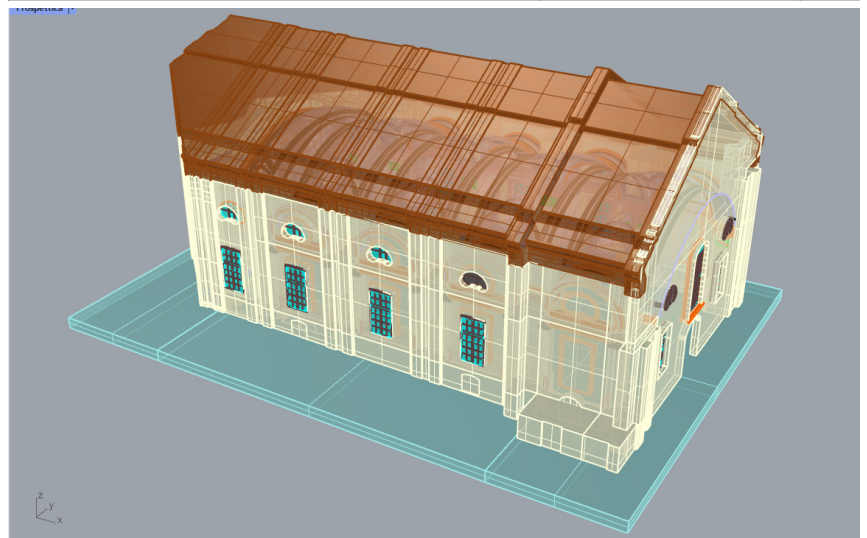


Figura 20 ►
Prospettiva modello visivo
realizzato in Rhinoceros 7.0



Tramite sopralluoghi in situ e l'analisi dei dati metrici della camera anecoica del Politecnico, sono state definite le posizioni della sorgente (violinista) e dei tre punti di ascolto (P1, P2, P3). Tali distanze sono state vincolate ai limiti fisici del setup di registrazione anecoica, per garantire la validità scientifica delle misurazioni (figura 21).

Planimetria piano terra (livello +1,50 m)

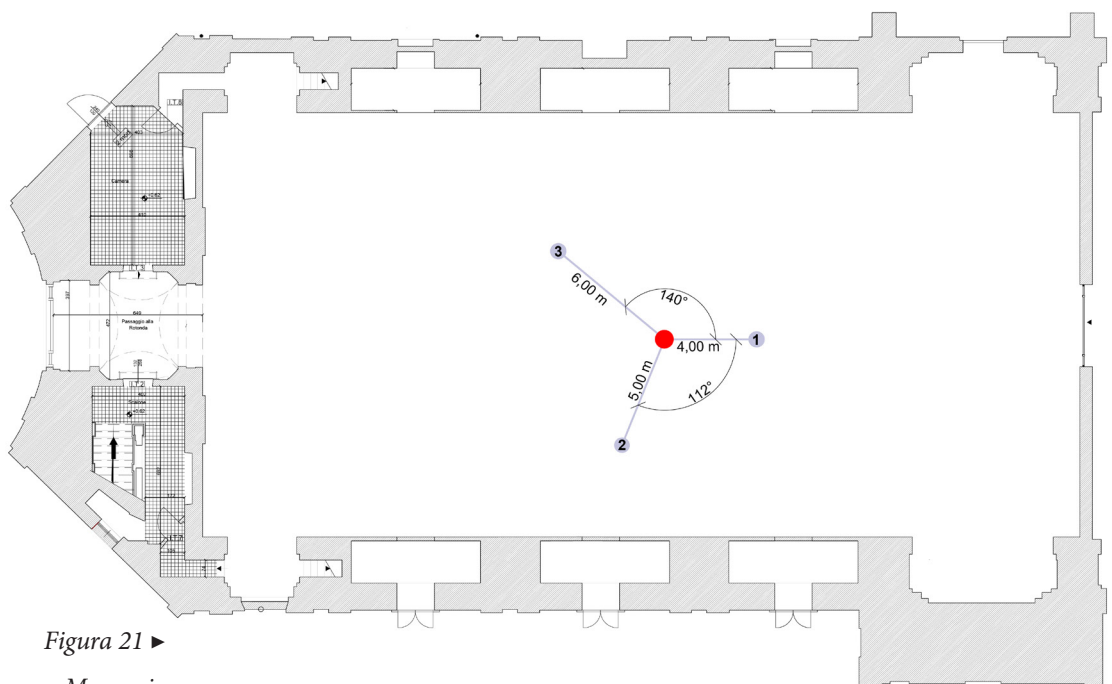
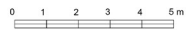


Figura 21 ►

*Planimetria Maneggio
Alfieriano con punti di ascolto
e sorgente*

L'implementazione sonora ha seguito due approcci paralleli per la generazione degli output audio (auralizzazioni):

Nel Caso 1 (Metodo Tradizionale) è stata utilizzata una sorgente Natural preimpostata in Odeon, caratterizzata da un diagramma di direttività ("balloon") specifico per il violino e convoluta con un'unica traccia anecoica mono (Canale 1 - Frontale).

Nel Caso 2 (Metodo a Sorgente Composita) la singola sorgente è stata implementata di un cluster di 4 sorgenti orientate a 90° l'una dall'altra, ciascuna rappresentativa di un quadrante di emissione.

In questo scenario, le registrazioni anecoiche dei 4 microfoni sono state combinate spazialmente per generare, per ciascuno dei 3 punti di ascolto, una traccia audio complessa e fedele alla variazione timbrica direzionale. Definiti gli output audio, il lavoro si è focalizzato sulla ricostruzione visiva in Unreal Engine.

Il modello architettonico dettagliato è stato importato in Unreal Engine, dove è stato applicato un trattamento materico realistico (Texturing PBR) basato sui dati raccolti durante i sopralluoghi.

Per inserire il violinista nell'ambiente virtuale senza appesantire il calcolo con modelli 3D animati complessi, si è optato per una tecnica di integrazione video su piani 2D chiamata Billboarding.

Il violinista è stato prima filmato su Green Screen mentre eseguiva il brano, orientandosi fisicamente verso la telecamera in modo coerente con le angolazioni previste per i punti P1, P2 e P3.

Successivamente in Post-produzione le riprese video sono state scontornate tramite la tecnica Chroma Key per generare tre video con canale Alpha (trasparenza), per poi passare all'implementazione in Unreal dove i video sono stati importati nel motore grafico e proiettati su piani bidimensionali orientati verso l'osservatore.

Infine, tramite il sistema di visual scripting Blueprints di Unreal Engine, è stata programmata la logica di interazione in cui il sistema gestisce

una telecamera virtuale che, al comando da tastiera dell'utente, trasla istantaneamente tra i tre punti di vista predefiniti (tasti 1,2 e 3 per le tracce del caso 1; 4,5 e 6 per il caso 2) .

Grazie a questa programmazione, il cambio di comando permette di trasportarsi nei 3 punti e garantisce simultaneamente la modifica della traccia audio (passando dall'auralizzazione del punto P1 a quella di P2 o P3) e del video corrispondente, garantendo una perfetta sincronizzazione audio-visiva, rendendo l'utente libero di navigare nel modello.

Il risultato finale è fruibile tramite visore per la Realtà Virtuale (VR), permettendo un'esperienza immersiva completa.

4.1 Strumentazione utilizzata

La ricerca è stata condotta attraverso un protocollo rigoroso suddiviso in fasi, avvalendosi di strumentazione scientifica ad alte prestazioni, fornita dal Politecnico di Torino, per garantire la massima fedeltà del dato acustico e visivo.

La fase di diagnostica preliminare presso il Maneggio Alfieriano, è stata finalizzata alla caratterizzazione del campo sonoro tramite l'impiego di microfoni a condensatore omnidirezionali da misura e una pistola a salve per la cattura delle risposte all'impulso.

La documentazione spaziale è stata affidata a una camera Insta360 (figura 22) per il rilievo di immagini di dettaglio, utili per la ricostruzione visiva .

*Figura 22 ▼
Immagine scattata con insta
360 durante il sopralluogo*



Successivamente, per l'acquisizione delle sorgenti anecoiche del violino, è stato impiegato un setup nella camera anecoica del laboratorio del Politecnico di Torino che prevedeva l'utilizzo di microfoni da 1/2 pollice PCB Piezotronics (modello 378A04) con risposta lineare in campo libero, interfacciati a un sistema di acquisizione dati multicanale e gestiti mediante il software Audacity.

Figura 23 (sinistra)►

Microfoni, supporti per aste, calibratore e cavi utilizzati per le misure in camera anecoica

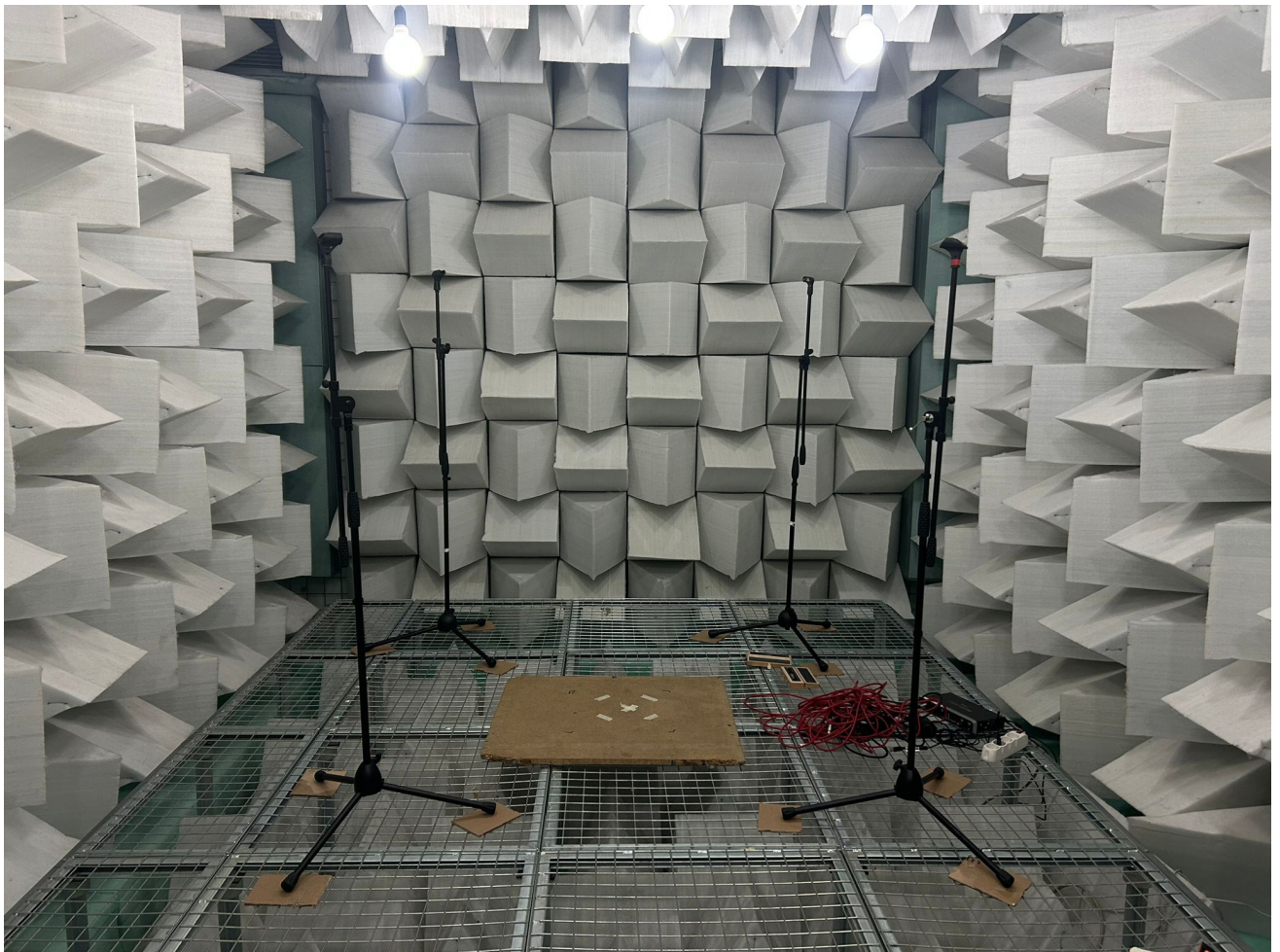
Figura 24 (destra)►

Microfoni utilizzati per le misure in camera anecoica



Il posizionamento dei microfoni è stato garantito da una livella laser, fissando l'altezza costante a 1,70 m (corrispondente alla statura del musicista) e mantenendo una distanza di 1 m dalla sorgente e 0,80 m dalle superfici per evitare interferenze prossimali.

Figura 25 ▼
Setup camera anecoica



La fase di produzione dei contenuti multimediali si è svolta presso il VisionaryLab.

Le riprese video sono state effettuate con una fotocamera Sony Alpha 7 Mark III, stabilizzata su un sistema professionale Manfrotto MVB525-519 e dotata di supporti SanDisk Extreme PRO per la gestione di flussi video ad alto bitrate. Parallelamente, la componente sonora è stata acquisita in formato spaziale tramite un registratore ambisonico ZOOM H3-VR/IFS, capace di mappare l'intero campo sonoro a 360°, per avere una traccia di riferimento per il montaggi in post produzione delle tracce auralizzate.

L'allestimento della scena ha previsto l'impiego di un fondale ChromaKey verde Neewer (6x3 m), illuminato da un sistema combinato di luci Roditec, DynaSun Fancier FL-455 (1300W) e unità Neewer RGB 660 (figura 26).

La resa visiva finale è stata ottimizzata attraverso un controllo rigoroso dei contrasti e delle ombre sul soggetto, ottenuto mediante l'uso di un riflettore multi-disco Neewer 5-in-1 da 110 cm, garantendo così la perfetta integrazione del musicista nell'ambiente virtuale ricostruito.

Figura 26 ►
Setup completo VIsionaryLab



4.2 Registrazioni in laboratorio

La fase operativa dedicata alla raccolta dei contributi audio e video si è svolta nella giornata del 12 novembre 2025, seguendo un cronoprogramma volto a garantire la coerenza tra le componenti del Digital Twin.

La strategia di ripresa è stata definita preventivamente attraverso la progettazione di setup speculari in entrambi i laboratori coinvolti, assicurando che i parametri di posizionamento e orientamento fossero identici per permettere la successiva fusione dei dati acustici e visivi.

La prima parte della giornata è stata dedicata alla registrazione in camera anecoica, finalizzata all'acquisizione delle differenti tipologie di sorgenti per il violino, necessari per il processo di auralizzazione.

Per mappare correttamente la direttività dello strumento, il musicista ha eseguito il brano selezionato per tre sessioni consecutive, precedute da una sessione di prova necessaria per abituare l'orecchio del violinista alla mancanza di suono di ritorno tipica della camera anecoica.

Durante le acquisizioni, l'orientamento rispetto all'array microfonico è stato variato sistematicamente: una prima esecuzione con naso del musicista diretto verso il microfono di riferimento (0°), una seconda con rotazione a 140° e una terza a 248° (figura 27).

Piante camera anecoica



Figura 27▲

Schema della variazione degli orientamenti in camera anecoica.

Questa procedura è stata fondamentale per documentare le variazioni timbriche e di intensità dello strumento in funzione dell'angolo di radiazione, fornendo i dati necessari per la calibrazione della sorgente complessa all'interno del software di simulazione.

Successivamente, le riproduzioni sono proseguite presso il VisionaryLab, dove è stata replicata la sequenza esecutiva con le medesime rotazioni del musicista (0°, 140°, 248°).

La scelta di registrare con diverse rotazioni del busto e dello strumento è stata dovuta alla necessità di allineare la visualizzazione del soggetto ai tre punti di ascolto e visione predefiniti nel Maneggio Alfieriano virtuale.

Piante VisionaryLab

- Videocamera
- Green Screen



- Posizione violinista
- Orientamento violinista



- Luci

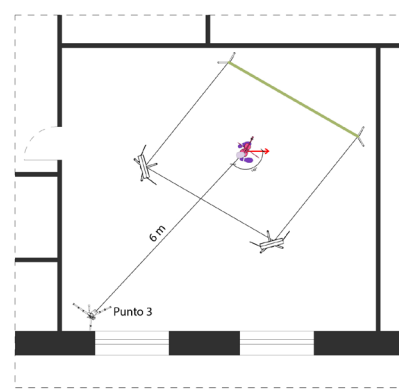
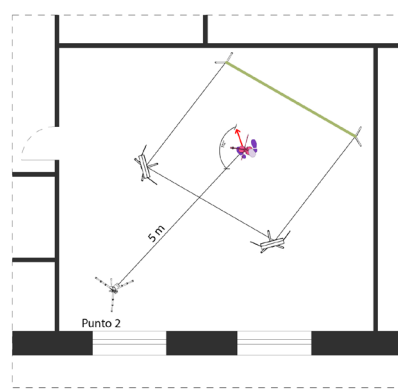
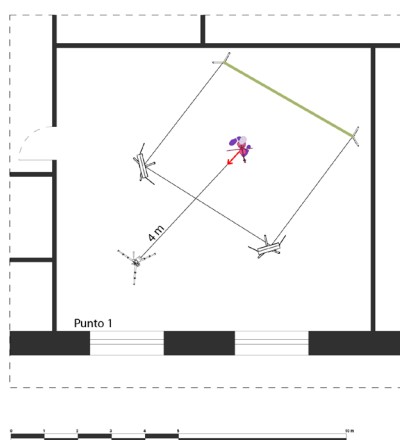


Figura 28 ▲
 Impostazione del set nel
 Visionary Lab

Tale espediente tecnico ha permesso di attuare una finzione scenica realistica: quando l'utente interagisce con il modello in Unreal Engine 5, la rotazione del musicista risponde correttamente alla posizione dell'osservatore, evitando l'effetto di una sagoma piatta e facendo percepire il violinista come un'entità tridimensionale fisicamente integrata nel volume architettonico.

L'intero protocollo ha quindi permesso di ottenere una perfetta sincronia tra la risposta acustica calibrata e la coerenza visiva dell'integrazione spaziale.





05

Restituzione componente acustica

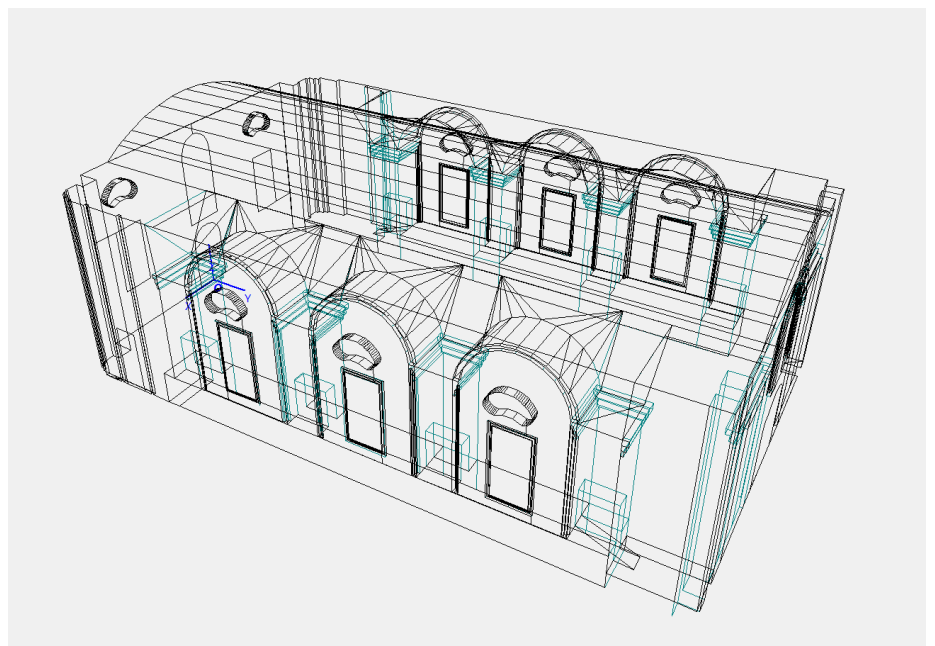
La fase di analisi acustica della Sala del Maneggio Alfieriano è stata condotta mediante l'utilizzo del software Odeon Room Acoustics.

Il flusso di lavoro ha previsto una fase preliminare di modellazione geometrica tramite il software SketchUp.

Per garantire la corretta interoperabilità tra l'ambiente di modellazione e quello di simulazione, ci si è avvalsi del plug-in dedicato SU2Odeon. Questo strumento permette l'esportazione diretta delle geometrie in formato compatibile (.par o .dxf ottimizzato), preservando la gerarchia dei layer necessaria per la successiva assegnazione dei materiali.

Figura 29 ►

Assonometria modello di SketchUp importato su Odeon



Come suggerito dalle linee guida per la modellazione acustica geometrica [5], si è operata una necessaria semplificazione del modello, poiché il motore di calcolo approssima i dettagli architettonici minori (come le modanature e le trabeazioni) attraverso coefficienti di diffusione (scattering) che comprometterebbero il risultato acustico.

Il modello importato in Odeon è costituito quindi soltanto dai volumi essenziali, che vengono caratterizzati nella fase di definizione dei materiali.



5.1 Introduzione delle due metodologie

La scelta di condurre la ricerca attraverso due diverse casistiche nasce dalla necessità di garantire una completezza di dati scientifici che una singola metodologia non avrebbe potuto fornire.

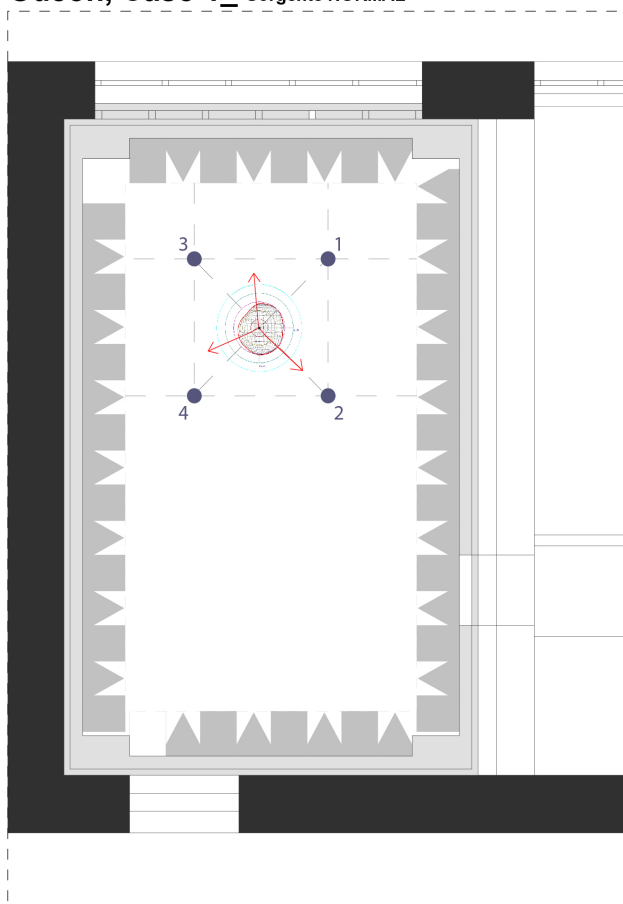
L'obiettivo finale è di riproporre fedelmente la percezione uditiva con precisione di calcolo all'interno dello spazio durante la simulazione immersiva, perciò comparare due metodologie garantisce un'analisi più approfondita.

L'adozione di due protocolli distinti, ovvero il Metodo Tradizionale e il Metodo Avanzato a Sorgenti Multiple risponde quindi a due obiettivi complementari:

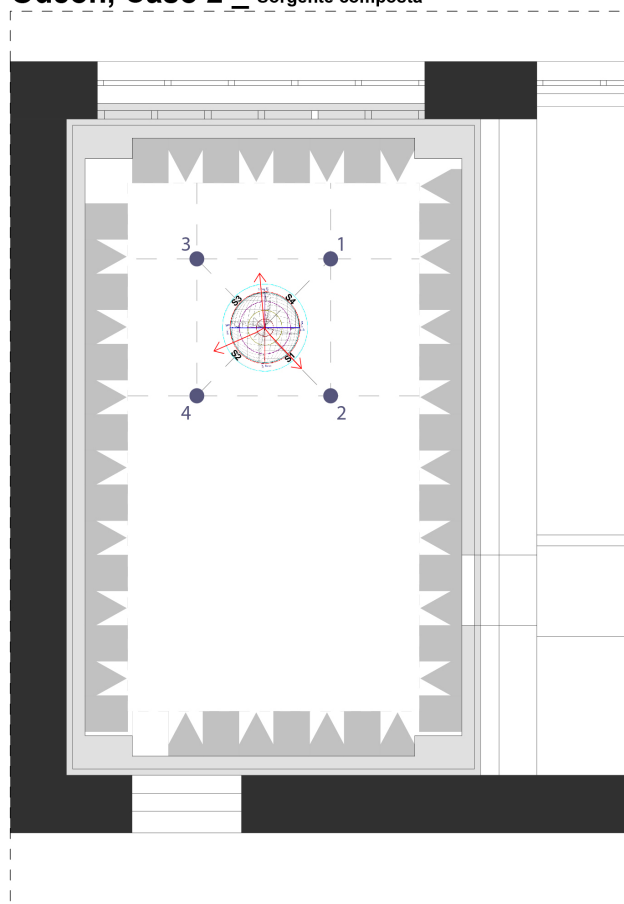
- la validazione di parametri qualitativi, attraverso il primo caso (metodo tradizionale) si ottiene una mappatura standardizzata dei parametri acustici come SPL e STI. Utilizza il modello a sorgente puntiforme e diagramma "balloon", ottimizzato per la gestione della potenza sonora totale ma limitato da errori di "doppia inclusione" spettrale durante l'ascolto critico
- il realismo dell'auralizzazione e risoluzione spaziale, nel secondo caso (metodo a sorgente composta) si riesce a mappare la complessità della radiazione di uno strumento musicale come il violino con una logica basata sullo spettro inverso e la ripartizione in angoli solidi. Questo permette di superare i limiti timbrici del primo caso.

Il confronto sistematico tra questi due modelli permette di validare la ricerca come una sperimentazione ad alta fedeltà. L'integrazione del modello avanzato consente infatti di confrontare i riflettogrammi e la densità energetica delle riflessioni precoci, offrendo un quadro scientifico esaustivo che unisce la solidità della procedura standard ODEON alla precisione delle tecniche di misurazione in camera anecoica [15].

Odeon, Caso 1_ Sorgente NORMAL



Odeon, Caso 2_ Sorgente composta



*Figura 30 ▲
Schema delle due metodologie
prese in esame, al centro le due
differenti sorgenti utilizzate*



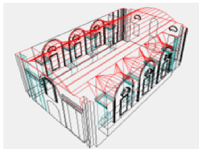
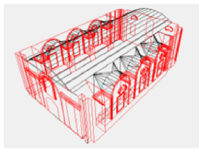
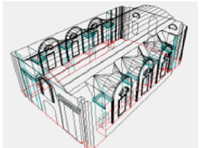
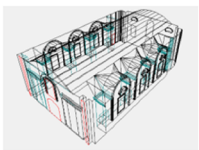
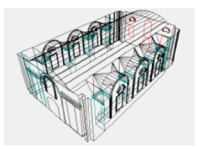
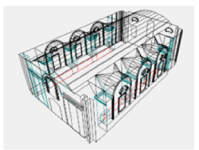
5.2 Definizione dei materiali

Verificata l'importazione geometrica, si è proceduto alla caratterizzazione materica delle superfici (figura 31).

Nello specifico, per le superfici voltate e le pareti verticali è stato adottato il profilo del “Painted plaster surface” basato sulle misurazioni di Kristensen (1984), coerente con l'intonaco storico presente. Per la pavimentazione, si è fatto riferimento ai dati di Bobran (1973) per il “Rough concrete”, simulando la risposta del massetto grezzo. I serramenti sono stati modellati differenziando il materiale ligneo del portone (“Solid wooden door”, Bobran 1973) dalle superfici vetrate delle finestre, per le quali si sono utilizzati i valori del vetro ordinario riportati da Harris (1991). Le aperture verso l'esterno o verso volumi non indagati sono state trattate come superfici totalmente assorbenti ($\alpha = 1.0$).

I coefficienti standard forniti dal database di Odeon restituivano un tempo di riverberazione T30 eccessivamente elevato rispetto allo stato di fatto rilevato, perciò è stata necessaria la calibrazione del modello: i valori dello spettro di assorbimento di alcuni materiali critici sono stati opportunamente modificati. Tale passaggio ha permesso di allineare la risposta acustica del modello digitale alla realtà fisica, garantendo l'attendibilità delle analisi successive.

Figura 31 ►
Tabella dei materiali utilizzati
in Odeon.

Layer	Nome materiale	Numero	Immagine
Soffitto	Painted plaster surface (Kristensen, 1984)	4002	
Intonaco	Painted plaster surface (Kristensen, 1984)	4002	
Pavimento	Rough concrete (Bobran, 1973)	100	
Vuoto	90% absorbent	90	
Portone	Solid wooden door (Bobran, 1973)	100007	
Finestre	Glass, ordinary window glass (Harris, 1991)	100006	

5.3 Caso 1

In entrambe le casistiche analizzate l'obiettivo è stato replicare fedelmente la performance musicale confrontando due metodi di simulazione acustica differenti.

Nel primo caso è stata utilizzata una Sorgente Naturale (Natural Source), configurata in ambiente Odeon secondo il protocollo di misurazione e rappresentazione direzionale descritto nello studio fondamentale di Otondo [14].

Per questo caso la metodologia per l'auralizzazione è quella tradizionale, ma il metodo prevede una particolare attenzione alla tipologia di sorgente. Solitamente per una misurazione acustica tradizionale la sorgente è approssimata a un punto attraverso una sorgente omnidirezionale o dotata di direttività statica che modifica l'intensità sonora ma non il contenuto spettrale. Tuttavia, come evidenziato in letteratura [15], gli strumenti musicali irradiano l'energia sonora in modo non uniforme, infatti le frequenze basse tendono a propagarsi omnidirezionalmente, mentre le frequenze alte sono proiettate in direzioni specifiche (in questo caso dal piano armonico del violino), perciò è stata scelta una sorgente che simuli il comportamento reale del violino nel Maneggio Alferiano, in modo da avere come tracce output una riproduzione reale dell'ascolto nei tre punti di vista.

Per garantire una simulazione realistica, la sessione di registrazione in camera anecoica è stata effettuata utilizzando un setup a quattro microfoni disposti attorno alla sorgente. Il musicista è stato posizionato al centro della configurazione, orientato frontalmente verso il microfono 2 (figura 32).

Odeon, Caso 1 _ Take 1

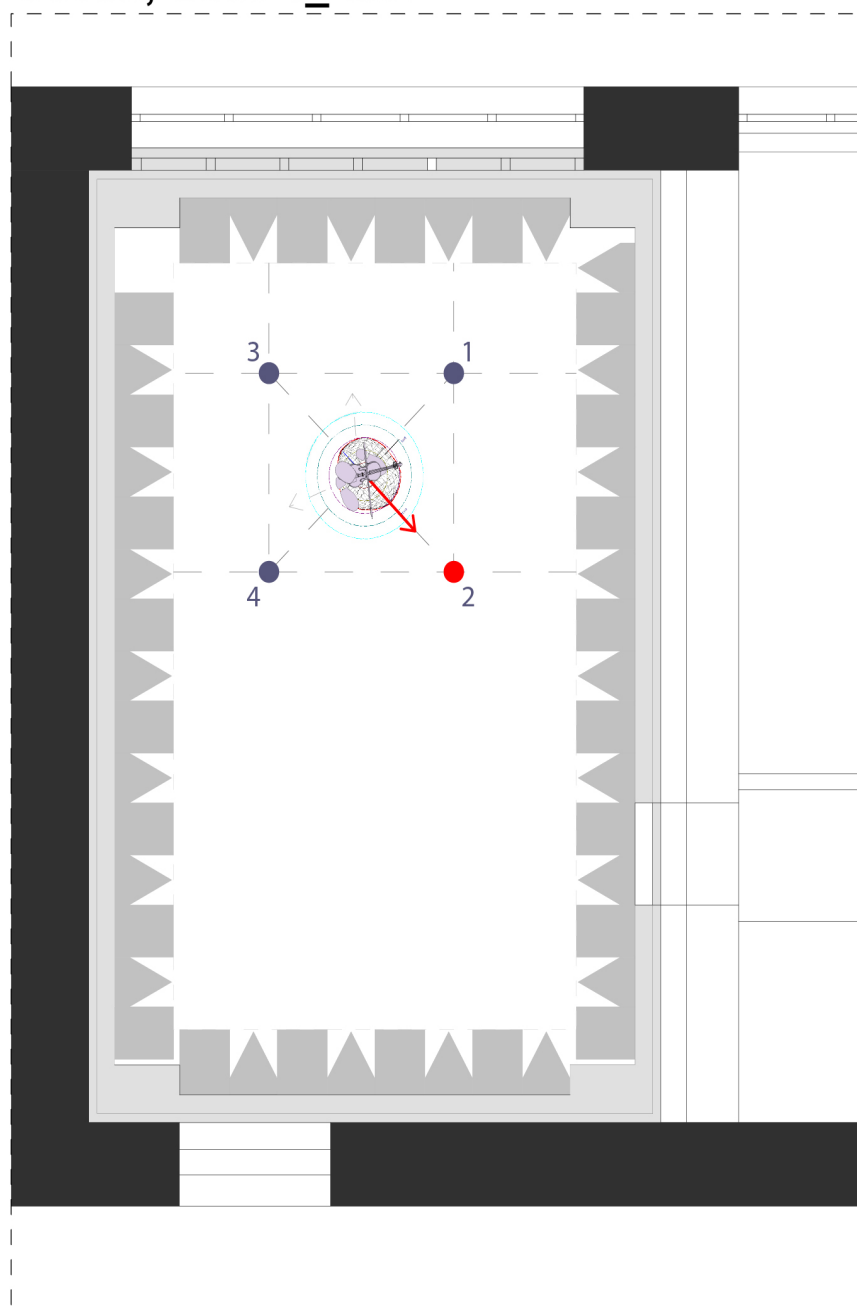


Figura 32 ►

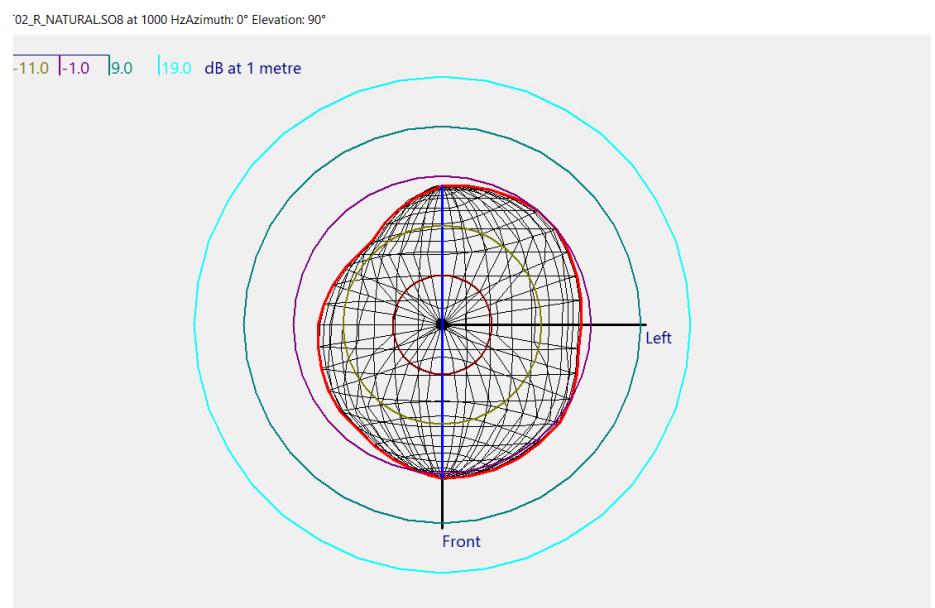
Schema caso 1, al centro del setup si evidenzia il pattern di direttività della sorgente scelta posta frontalmente rispetto al microfono 2.

5.3.1 Sorgenti e ricevitori

Nel primo metodo è stata utilizzata una Sorgente Naturale (Natural Source) preimpostata in Odeon, configurata secondo il protocollo di misurazione descritto nello studio fondamentale di Otondo, F., & Rindel [14].

La sorgente sonora, rappresentata da un violino, è stata modellata come una sorgente puntiforme direzionale. Per definirne il comportamento emissivo, è stato impiegato un file di direttività in formato standard .SO8 (Violin_Normal) (figura 33).

Figura 33 ►
*Sorgente Natural caso 1 in
pianta.*

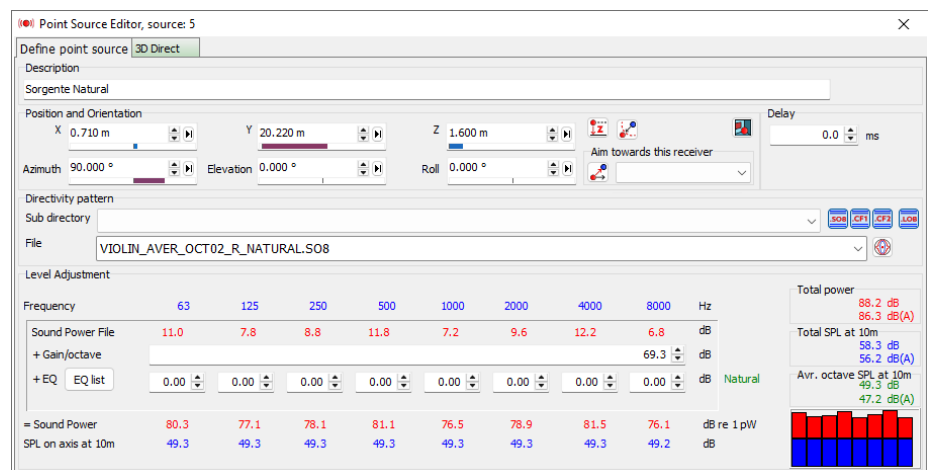


Per la calibrazione della sorgente virtuale, si è reso necessario convertire i rilievi fonometrici effettuati in camera anecoica in livelli di potenza sonora (L_w). Partendo dai livelli di pressione sonora (L_p) registrati dalla corona microfonica a distanza nota, si è proceduto alla determinazione della potenza tramite il calcolo dell'intensità media sulla superficie di misura. Il valore risultante di 88.2 dB è stato quindi assunto come parametro di input globale, lasciando al software il compito di spazializzare tale

energia in funzione del file di direttività .SO8 e delle distanze relative dei ricevitori.

Nell'immagine (figura 34) si può notare che lo spettro sonoro non è piatto; questo perché dopo aver impostato il valore globale di 88.2 dB, il software ripartisce quell'energia tra le varie bande d'ottava basandosi sulla firma spettrale contenuta nel file del violino.

Figura 34 ►
Schermata del Point Source Editor di Odeon relativa alla Sorgente Natural (Violino).



L'orientamento della sorgente è stato definito impostando un Azimuth di 90°, parametro necessario per allineare l'asse di emissione principale dello strumento corrispondente al naso del violinista con la geometria della sala e la posizione dei ricevitori. Questa configurazione garantisce che il Ricevitore 1 (frontale) percepisca il timbro diretto e brillante, mentre i ricevitori laterali ricevano un segnale caratterizzato da una colorazione spettrale differente, esattamente come avverrebbe in una performance reale.

La configurazione spaziale dei ricevitori (punti di ascolto) è stata determinata in funzione della geometria di ripresa utilizzata nella camera anecoica del Politecnico di Torino durante la registrazione delle tracce audio di riferimento:

- Ricevitore 1 (Frontale): posto a 4 metri dalla sorgente.
- Ricevitore 2 (Laterale Destro): posto a 5 metri.
- Ricevitore 3 (Laterale Sinistro): posto a 6 metri.

Parallelamente, per restituire il realismo acustico ambientale (soundscape), sono state modellate le sorgenti di disturbo basandosi sulle osservazioni effettuate in fase di sopralluogo considerando il rumore antropico, in corrispondenza delle finestre e del portone considerando il basso potere fonoisolante degli infissi storici a vetro singolo (figura 35).

No	Source description	Gain/octave	Delay	Sound power	Type specific information
1	S1_Musicista	74.50	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = ONE_QU
2	S2_Musicista	74.50	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = ONE_QU
3	S3_Musicista	74.50	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = ONE_QU
4	S4_Musicista	74.50	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = ONE_QU
5	Sorgente Natural	69.30	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = VIOLIN_
6	Brusio esterno	50.00	0.00		MSurf: Surfaces:36 37 1261 1295 1305 1348 Radiation type =

No	Receiver description	X	Y	Z
1	P1_Ascoltatore 1	0.750	24.220	1.200
2	P2_Ascoltatore 2	5.660	15.220	1.200
3	P3_Ascoltatore 3	-4.300	14.220	1.200

Figura 35 ▲
Pannello di controllo delle sorgenti e dei ricevitori. In rosso gli attori del caso 1.

Definito il setup fisico, la simulazione è stata gestita attraverso la creazione di una Job List. Nel lessico tecnico di Odeon, un Job definisce un set di parametri di calcolo specifici (sorgenti attive, ricevitori target, numero di raggi) che permette di discretizzare l'analisi acustica. Questa procedura è fondamentale per isolare i contributi delle singole sorgenti direzionali senza dover ricalcolare l'intera risposta della sala per ogni configurazione.

Il processo di auralizzazione finale è avvenuto tramite convoluzione, una tecnica di elaborazione del segnale che combina matematicamente la Risposta all'Impulso della Sala (RIR - Room Impulse Response) calcolata dal software con una traccia audio anecoica (priva di riverbero).

In coerenza con il metodo Otondo [14] è stata selezionata la traccia anecoica registrata dal microfono frontale (Canale 1) per la convoluzione principale, in quanto corrispondente all'orientamento 0° della sorgente naturale impostata.

L'output risultante, generato dalla combinazione dei Job con le tracce multicanale, ha prodotto i file audio spazializzati necessari per l'integrazione nel motore grafico Unreal Engine, permettendo una fruizione immersiva dell'ambiente virtuale.

5.3.2 Configurazione dei Job

Dopo aver configurato adeguatamente le sorgenti, la simulazione è stata gestita attraverso la creazione di una Job List dedicata.

Nel contesto del Caso 1, la procedura ha permesso di isolare e calibrare i contributi della sorgente naturale del violino (P5_Sorgente Naturale) e del chiacchiericcio di sottofondo (M6_Brusio esterno).

Nello specifico, per la sorgente naturale la risposta all'impulso è stata calcolata singolarmente per i ricevitori P1, P2 e P3 distribuiti in punti specifici della pianta del Maneggio.

Come evidenziato nella Job List (figura 36), per ogni istanza è stata attivata la funzione Single point response receiver, orientando la sorgente verso il ricevitore target per garantire la massima precisione nella riproduzione dei lobi di radiazione dello strumento. Parallelamente, il chiacchiericcio è stato introdotto come sorgente di superficie (MSurf), attivata nel Job insieme alla sorgente musicale per simulare una condizione di ascolto realistica e antropizzata.

L'interfaccia di Odeon ha permesso di monitorare i livelli di potenza sonora per banda di frequenza (Power/Band) e i valori globali in dB(A), assicurando che il brusio esterno non sovrastasse l'esecuzione ma contribuisse alla spazialità e al realismo dell'auralizzazione.

Questo approccio ha garantito che ogni elemento della scena sonora, dalla precisione timbrica del violino alla diffusione del rumore ambientale, fosse rappresentato correttamente.

Job list - BFormat mode

Active sources for job: 24

- ☒ P1 S1_Musicista - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☒ P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☒ P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☒ P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☐ P5 Sorgente Naturale - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☐ M6 Brusio esterno - MSurf, using surface: 36 37 1261 1295 1305 1348

Job	Description	Receiver pointing towards source	Grid	Multi	Single point response receiver
1	s1_p1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
2	S2_P1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
3	S3_P1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
4	S4_P1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
5	Brusio esterno_P1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
6	S1_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
7	S2_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
8	S3_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
9	S4_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
10	Brusio esterno_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
11	S1_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
12	S2_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
13	S3_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
14	S4_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
15	Brusio esterno_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
16	SORGENTE_P1	P5 Sorgente Naturale - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
17	BRUSIO_P1	P5 Sorgente Naturale - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
18	SORGENTE_P2	P5 Sorgente Naturale - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
19	BRUSIO_P2	P5 Sorgente Naturale - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
20	SORGENTE_P3	P5 Sorgente Naturale - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
21	BRUSIO_P3	P5 Sorgente Naturale - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
22	SORGENTE_COMPOSTA_P1	Direction towards main axis, -X	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
23	SORGENTE_COMPOSTA_P2	Direction towards main axis, -X	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
24	SORGENTE_COMPOSTA_P3	Direction towards main axis, -X	☒	☒	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
25		Direction towards main axis, -X	☐	☐	(none)

Figura 36 ▲
Interfaccia per la creazione
dei job in Odeon, in rosso il
caso 1.

5.3.3 Convolver e Mixer

L'elaborazione dei segnali audio è stata strutturata attraverso l'uso combinato dei moduli Convolver e Mixer di Odeon, strumenti indispensabili per integrare le tracce anecoiche con le proprietà spaziali del modello virtuale.

Nel modulo Convolver (figura 37) sono stati processati i segnali di ingresso relativi al violino, utilizzando la traccia "Ascolto 1 - Take 2", e al rumore antropico diffuso, impiegando il file "brusio esterno".

In una procedura standard, questa fase richiederebbe l'utilizzo della funzione automatica di calibrazione (calib) per uniformare i livelli sonori prima di procedere all'auralizzazione. Tuttavia, date le specifiche della sorgente e la natura del rumore di superficie, non è stato possibile ricorrere all'automatismo del software. Si è reso quindi necessario procedere manualmente in due fasi. In primo luogo è stata analizzata l'intera serie di auralizzazioni per individuare quella caratterizzata dal livello di picco più elevato, successivamente è stato applicato un guadagno (gain) al parametro rcl.level affinché il livello di uscita massimo (max out) non eccedesse lo 0 dBFS, garantendo l'assenza di distorsione digitale (clipping).

Il medesimo valore di guadagno è stato applicato uniformemente a tutte le auralizzazioni per preservare i rapporti energetici relativi tra le sorgenti definiti nel modello acustico.

Poiché il livello equivalente calibrato della traccia di riferimento (Take 1) era di 74.8 dB(A), i file sono stati successivamente elaborati in ambiente Audacity. In questa sede, i guadagni sono stati corretti per normalizzare il livello sonoro equivalente pesato sulla curva A, assicurando la fedeltà timbrica e dinamica del segnale.

La fase di sintesi è stata gestita tramite il Mixer, che ha permesso

la sommatoria dei segnali convoluti in un unico file di output per ogni punto di ascolto. Questa operazione è fondamentale per ricreare scenari acustici complessi con sorgenti multiple attive simultaneamente.

Per il Caso 1, sono stati definiti tre mix principali (denominati mix1, mix2 e mix3) corrispondenti ai tre ricevitori.

Questo processo ha consentito di sovrapporre la sorgente del violino al rumore di superficie, evitando artefatti o accumuli di eco indesiderati grazie alla gestione separata dei ritardi e dei guadagni per ogni canale. Il risultato finale è un segnale in formato Ambisonics (B-format) che restituisce una scena sonora immersiva, in cui la performance musicale naturale è inserita con precisione spaziale all'interno del contesto ambientale del Maneggio.

Figura 37 ▼
Interfaccia dei comandi
Convolver e Mixer, in rosso il
caso 1.

Job list - BFormat mode									
Conv. no.	Time	Channel	Calib.	Job no.	Receiver	Job descr.	Rcd. lev.	Max. out	
1	5:18'14	Average	☐	16	1 towards P5	SORGENTE_P1	-56.00	-1.88	
2	5:00'00	Average	☐	17	1 towards P5	BRUSIO_P1	-56.00	-35.14	
3	5:18'14	Average	☐	18	2 towards P5	SORENTE_P2	-56.00	-6.36	
4	5:00'00	Average	☐	19	2 towards P5	BRUSIO_P2	-56.00	-33.53	
5	5:18'14	Average	☐	20	3 towards P5	SORGENTE_P3	-56.00	-4.70	
6	5:00'00	Average	☐	21	3 towards P5	BRUSIO_P3	-56.00	-32.71	
7	5:18'14	Average	☐	1	1 towards P2	s1_P1	-56.00	-4.82	
8	5:18'14	Average	☐	2	1 towards P2	S2_P1	-56.00	-14.06	
9	5:18'14	Average	☐	3	1 towards P2	S3_P1	-56.00	-21.62	
10	5:18'14	Average	☐	4	1 towards P2	S4_P1	-56.00	-11.12	
11	5:00'00	Average	☐	5	1 towards P2	Brusio esterno_P1	-56.00	-35.14	
12	5:18'14	Average	☐	6	2 towards P4	S1_P2	-56.00	-14.94	
13	5:18'14	Average	☐	7	2 towards P4	S2_P2	-56.00	-7.35	
14	5:18'14	Average	☐	8	2 towards P4	S3_P2	-56.00	-19.66	
15	5:18'14	Average	☐	9	2 towards P4	S4_P2	-56.00	-13.46	
16	5:00'00	Average	☐	10	2 towards P4	Brusio esterno_P2	-56.00	-33.53	
17	5:18'14	Average	☐	11	3 towards P3	S1_P3	-56.00	-18.10	
18	5:18'14	Average	☐	12	3 towards P3	S2_P3	-56.00	-13.01	
19	5:18'14	Average	☐	13	3 towards P3	S3_P3	-56.00	-18.11	
20	5:18'14	Average	☐	14	3 towards P3	S4_P3	-56.00	-9.86	
21	5:00'00	Average	☐	15	3 towards P3	Brusio esterno_P3	-56.00	-32.71	
22	Average	☐	☐	(none)			0.00	-99.00	
23	Average	☐	☐	(none)			0.00	-99.00	
24	Average	☐	☐	(none)			0.00	-99.00	

Mix convolved wave results into one wave file				
Mix. no.	Rec.	Description	Convolved files	Max. out
1	1	c1_mix1	1/2/	-1.87
2	2	c1_mix2	3/4/	-6.33
3	3	c1_mix3	5/6/	-4.63
4	1	c2_mix1	7/8/9/10/11/	-2.05
5	2	c2_mix2	12/13/14/15/16/	-6.63
6	3	c2_mix3	17/18/19/20/21/	-7.49
7				-99.00
8				-99.00
9				-99.00
10				-99.00
11				-99.00
12				-99.00
13				-99.00
14				-99.00
15				-99.00
16				-99.00
17				-99.00
18				-99.00
19				-99.00
20				-99.00
21				-99.00
22				-99.00
23				-99.00
24				-99.00

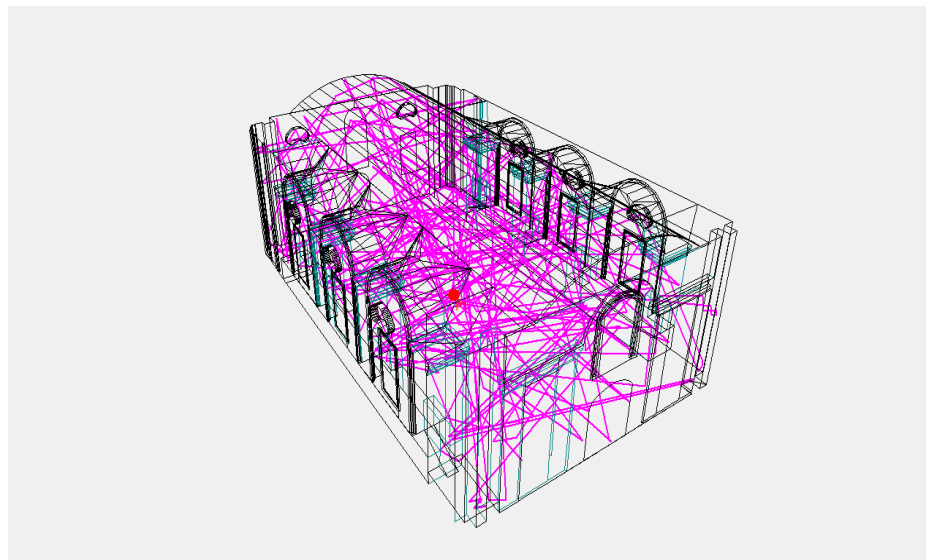
Convolutions in mix no. 1				
No.	Conv. no.	Mix. Lev.	Delay in sec.	Job descr.
1	1	0.00	0.00	SORGENTE_P1
2	2	0.00	0.00	BRUSIO_P1
3	(none)	0.00	0.00	
4	(none)	0.00	0.00	
5	(none)	0.00	0.00	
6	(none)	0.00	0.00	
7	(none)	0.00	0.00	
8	(none)	0.00	0.00	
9	(none)	0.00	0.00	
10	(none)	0.00	0.00	
11	(none)	0.00	0.00	
12	(none)	0.00	0.00	
13	(none)	0.00	0.00	
14	(none)	0.00	0.00	
15	(none)	0.00	0.00	
16	(none)	0.00	0.00	
17	(none)	0.00	0.00	
18	(none)	0.00	0.00	
19	(none)	0.00	0.00	
20	(none)	0.00	0.00	
21	(none)	0.00	0.00	
22	(none)	0.00	0.00	
23	(none)	0.00	0.00	

5.3.4 Auralizzazioni

L'auralizzazione rappresenta la fase finale del workflow , ed è il processo di rendere udibile un ambiente simulato per permettere all'ascoltatore di percepire un segnale sonoro all'interno di un contesto spaziale definito. Nel contesto del Maneggio Alfieriano, questa procedura è stata fondamentale per trasformare i dati numerici della simulazione in un'esperienza sensoriale realistica [5].

Figura 38 ►

Simulazione Ray Tracing (3D Investigate Rays) nel modello del Maneggio Alfieriano. Le linee fucsia indicano i cammini di riflessione calcolati da ODEON, necessari per generare la Risposta all'Impulso Binaurale (BRIR) e la successiva auralizzazione.

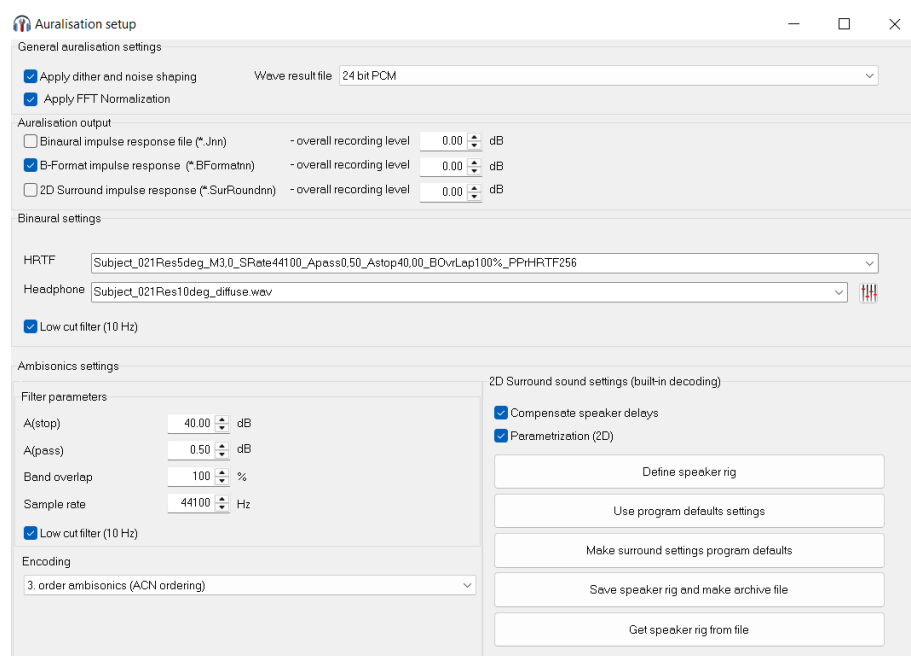


A differenza delle comuni auralizzazioni binaurali destinate all'ascolto in cuffia, per questo progetto è stata adottata una tecnica di rendering Ambisonics di terzo ordine (HOA), come configurato nel pannello di setup di Odeon che garantisce una risoluzione spaziale superiore lungo i piani orizzontale e verticale, preservando gli indici spaziali (spatial cues) necessari per una ricostruzione tridimensionale del campo sonoro accurata.

Le risposte all'impulso direzionali fornite dal software sono state codificate in formato B-format (.BFormatnn), generando tracce a 16 canali, confermando quindi l'ottenimento di un file di terzo ordine ambisonico.

Il segnale ambisonico lavora scomponendo il suono in armoniche sferiche, in cui il canale 1 è assimilabile alla informazione omnidirezionale, i canali due, tre e quattro rappresentano le coordinate geometriche e quindi il 1° ordine, mentre gli altri sono rappresentativi delle armoniche superiori, che servono a definire con precisione la provenienza angolare del suono.

Figura 39 ►
Configurazione dei parametri
di auralizzazione in ODEON.



In acustica il numero dei canali necessari per l'Ambisonics segue la formula:

$$(L+1)^2$$

Nella formula L rappresenta l'ordine, quindi in questo caso avremo:

$$(3+1)^2 = 16 \text{ canali}$$

Un'ulteriore verifica qualitativa è stata svolta all'interno del software Audacity, il quale ha permesso di visualizzare la struttura a 16 canali della traccia esportata da Odeon a seguito della convoluzione.

Grazie alla visualizzazione multicanale è stata verificata la gerarchia dei canali secondo lo standard Ambisonic Channel Numbering, necessaria per la corretta decodifica nel motore di gioco Unreal Engine.

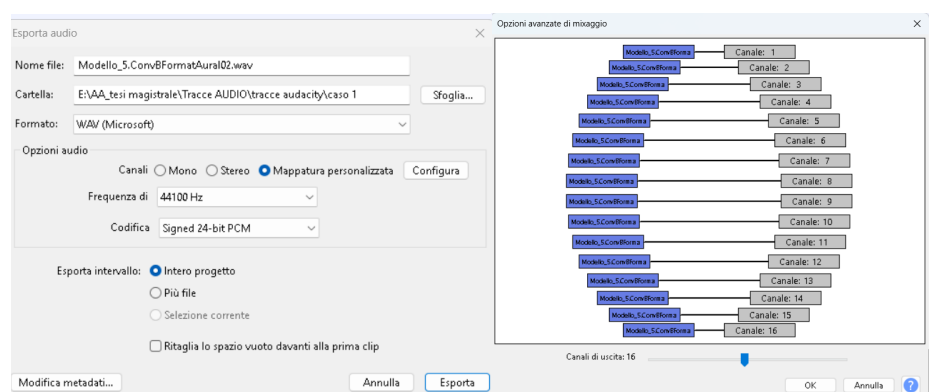
Il passaggio in Audacity è stato obbligato per la necessità di riprodurre per 22,05 secondi il momento di vuoto iniziale della traccia, corrispondente alla presentazione del violinista.

Dopo aver prolungato tutti i canali in maniera uniforme il file è stato esportato come file WAV tramite la mappatura personalizzata (Custom Mix) (figura 40,41).

I file in formato ambisonico sono stati necessari per la validazione del metodo all'interno del laboratorio Audio Space Lab.

*Figura 40 (sinistra)►
Impostazioni di esportazione
in Audacity per il formato
WAV multicanale.*

*Figura 41 (destra)►
Mappatura personalizzata dei
16 canali in Audacity.*



5.4 Caso 2

Il secondo scenario è stato analizzato attraverso un approccio sperimentale alternativo, definito a Sorgente Composita.

Mentre il primo caso si basa su una singola sorgente naturale dotata di una propria direttività intrinseca, questa metodologia propone una discretizzazione dello spazio di emissione dello strumento in quattro settori angolari distinti.

L'intento di tale configurazione è quello di tradurre virtualmente il setup utilizzato in camera anecoica all'interno del modello digitale (figura 42). In questo metodo, la complessità timbrica e spaziale del violino viene ricostruita attraverso quattro sorgenti collocate nella medesima posizione geometrica, ma con orientamento variabile di 90° all'interno del Maneggio Alfieriano.

Questa metodologia prevede una differenziazione spaziale del segnale basata su diverse caratteristiche. Ogni sorgente è configurata per irradiare energia esclusivamente in un quadrante specifico (un quarto di sfera) che garantisce una settorializzazione dell'emissione controllata. Questa suddivisione infatti è fondamentale per evitare sovrapposizioni energetiche indesiderate e per garantire che ogni porzione dello spazio acustico riceva correttamente l'informazione sonora di competenza. Per fare ciò le quattro sorgenti sono state ruotate progressivamente per coprire l'intero orizzonte uditivo a 360° . Questa disposizione permette di mappare con precisione le variazioni timbriche catturate dai quattro microfoni durante la sessione di registrazione anecoica [14].

In questo modello, la variabilità spettrale e la proiezione delle alte frequenze sono assicurate dall'integrazione simultanea dei quattro canali registrati. Ogni sorgente agisce come un diffusore indipendente di una porzione del campo sonoro totale.

Questa strategia permette di ottenere una riproduzione dell'ascolto nei punti di ricezione che tiene conto non solo della posizione del musicista, ma della reale eterogeneità dell'emissione sonora dello strumento nello spazio, offrendo un confronto metodologico diretto con il sistema a sorgente naturale descritto nel Caso 1.

Odeon, Caso 2 _Take 1, Take 2, Take 3

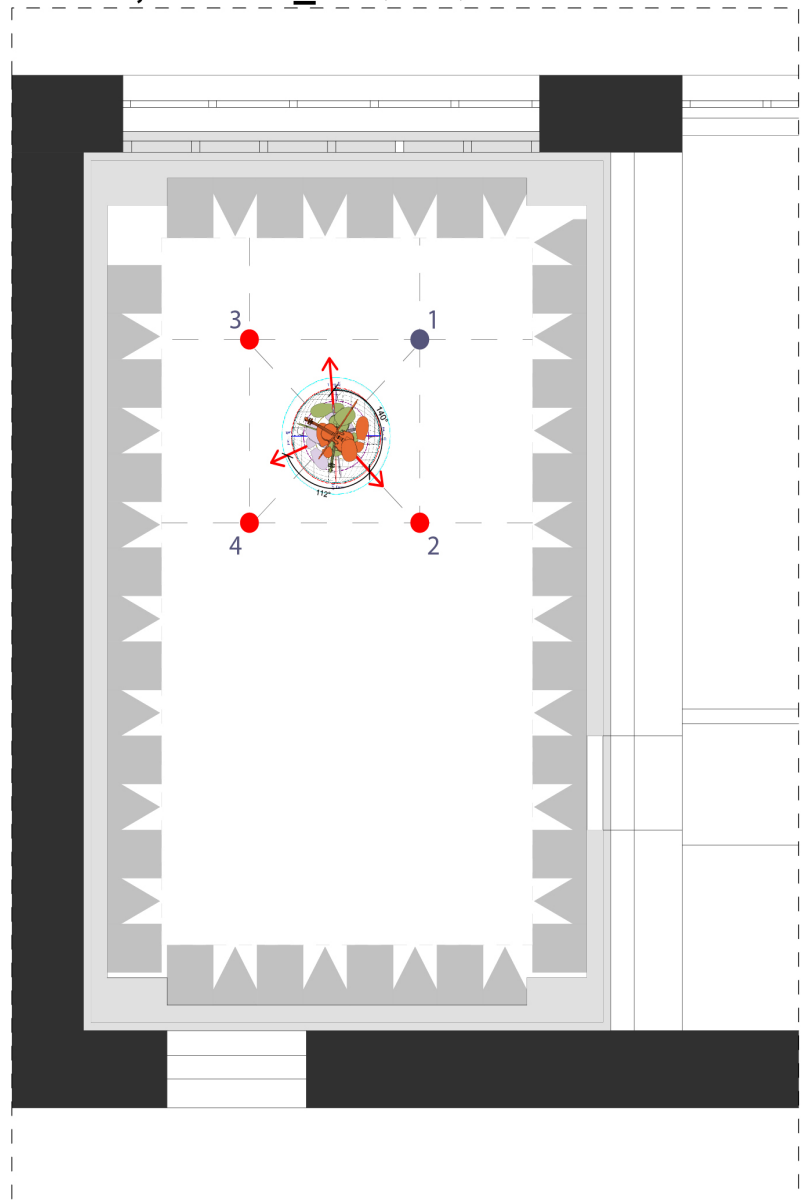


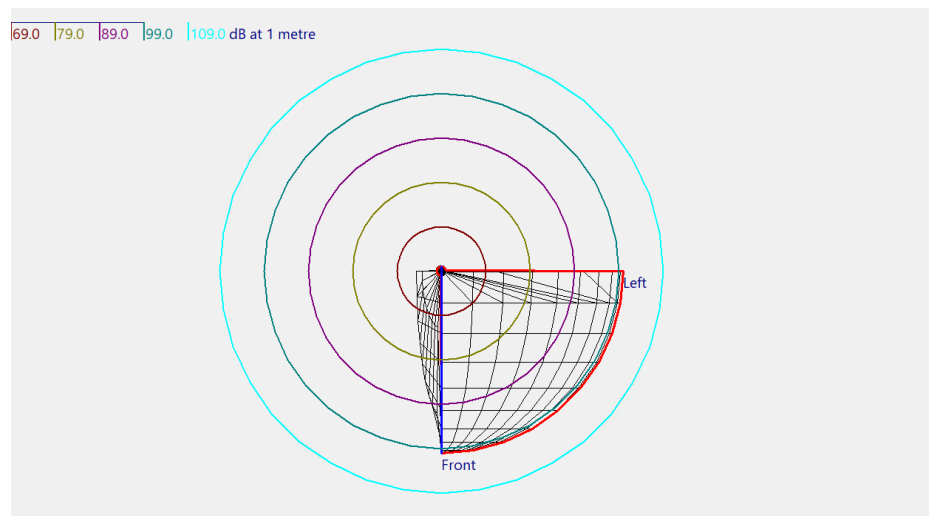
Figura 42 ►

Schema caso 2, al centro del setup si evidenzia il pattern di direttività delle sorgenti e la rotazione del violinista verso i punti predisposti.

5.4.1 Sorgenti e ricevitori

Per implementare questa logica in ambiente Odeon, nel punto geometrico corrispondente alla posizione del violinista ($x=0.710, y=20.220, z=1.600$), sono state collocate quattro sorgenti puntiformi distinte, coincidenti nello spazio ma differenziate per orientamento e contenuto informativo. La caratteristica fondamentale di questo setup risiede nella scelta del file di direttività utilizzato per ciascuna delle quattro sorgenti: ONE_QUARTER_OMNI_NO_BOTTOM.SO8 (figura 43).

Figura 43 ►
Sorgente ONE_QUARTER_OMNI_NO_BOTTOM caso 2 in pianta.



Come evidenziato dall'analisi del diagramma polare e dai parametri di input del software, questo file definisce una direttività geometrica “a spicchio”, limitando la radiazione sonora a un singolo quadrante sferico (un angolo solido di circa π steradiani, ovvero un quarto di sfera, escludendo l'emissione verso il basso) (figura 44).

L'utilizzo di direttività parziali permette di evitare sovrapposizioni energetiche (combining effects) tra segnali adiacenti, garantendo che ogni traccia audio registrata in anecoica venga proiettata esclusivamente nella direzione spaziale da cui è stata captata [5].

Figura 44 ►
Odeon, visualizzazione dello strumento Point Source Editor che gestisce la direttività della sorgente sonora creata.

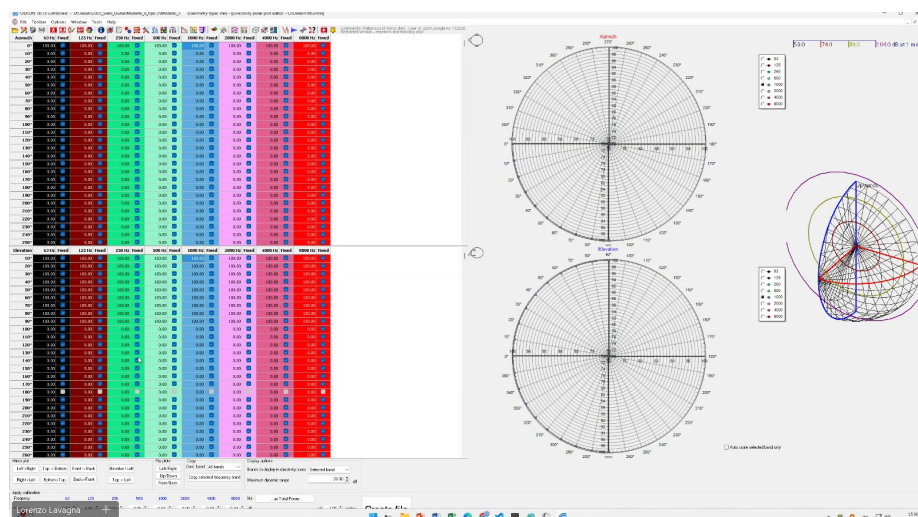


Figura 45 ▼
Pannello di controllo delle sorgenti e dei ricevitori. In rosso gli attori del caso 1.

La configurazione spaziale delle quattro sorgenti (figura 45) è stata definita ruotando progressivamente l'asse di emissione Azimuth secondo il seguente schema:

1. Sorgente 1: Azimuth impostato a 45° (come visibile nel setup di Point Source Editor), per coprire il quadrante frontale-destro.
2. Sorgente 2: Azimuth a 135° , per il quadrante posteriore-destro.
3. Sorgente 3: Azimuth a 225° , per il quadrante posteriore-sinistro.
4. Sorgente 4: Azimuth a 315° , per il quadrante frontale-sinistro.

Source-Receiver List					
No	Source description	Gain/octave	Delay	Sound power	Type specific information
1	S1_Musicista	74.50	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = ONE_QU
2	S2_Musicista	74.50	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = ONE_QU
3	S3_Musicista	74.50	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = ONE_QU
4	S4_Musicista	74.50	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = ONE_QU
5	Sorgente Natural	69.30	0.00		Point: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600) Directivity file = VIOLIN
6	Brusio esterno	50.00	0.00		MSurf: Surfaces:36 37 1261 1295 1305 1348 Radiation type =
No	Receiver description	X	Y	Z	
1	P1_Ascoltatore 1	0.750	24.220	1.200	
2	P2_Ascoltatore 2	5.660	15.220	1.200	
3	P3_Ascoltatore 3	-4.300	14.220	1.200	

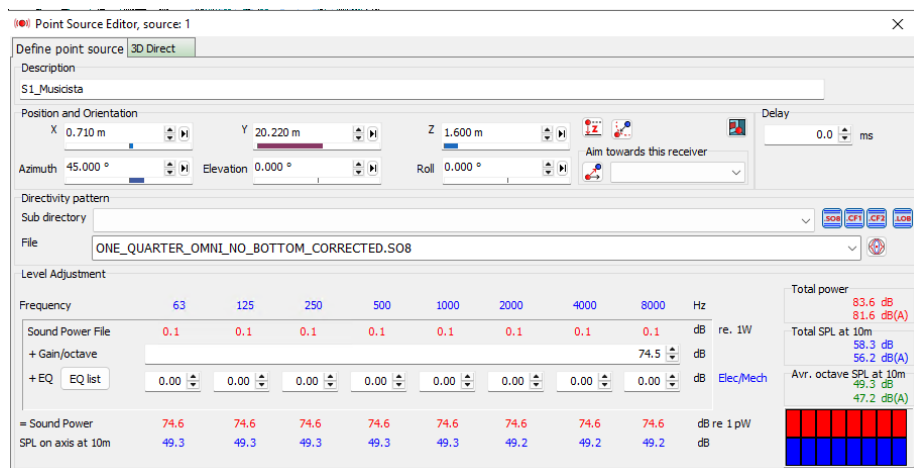
Al fine di garantire la coerenza metodologica tra i diversi scenari di simulazione, si è proceduto a equiparare il livello di emissione sonora complessivo del cluster composto dalle quattro sorgenti (“S1_Musicista”, “S2_Musicista”, “S3_Musicista”, “S4_Musicista”) alla potenza della sorgente naturale singola del Caso 1, pari a 88.2 dB.

Per determinare il livello di potenza sonora (L_w) da assegnare a ciascuna unità affinché la loro somma logaritmica risultasse equivalente al target prefissato, è stato applicato il principio di scomposizione dell'energia sonora. Il calcolo teorico prevede la conversione del livello totale in intensità lineare, la suddivisione per il numero di sorgenti ($n=4$) e la successiva riconversione in scala logaritmica:

$$L_{w,i} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{10^{\frac{L_{w,tot}}{10}}}{n} \right)$$

Secondo i parametri impostati nel software (visibili nel Point Source Editor)(figura 46) , ogni singola sorgente è stata configurata con un guadagno per ottava di 74.50 dB, che risulta in un valore di Sound Power costante di 74.6 dB per ogni banda di frequenza. Questo determina una potenza totale per singola sorgente di 83.6 dB (81.6 dB(A)).

Figura 46 ►
 Schermata del Point Source Editor di Odeon relativa a una delle Sorgenti Composte (Violino).



5.4.2 Configurazione dei Job

Una volta definita la geometria delle quattro sorgenti parziali tramite il Point Source Editor, la simulazione è stata strutturata all'interno della Job List di Odeon (figura 47).

La metodologia a sorgente composita ha richiesto un processo di calcolo discretizzato, mentre nel caso 1 la relazione tra sorgente e ricevitore è stata risolta in un unico passaggio.

Per ognuno dei tre punti di ascolto individuati nel Maneggio Alfieriano (P1, P2, P3), sono stati generati quattro Job indipendenti (identificati come S1, S2, S3 e S4), ciascuno dedicato a una specifica porzione dell'emissione del violino. Questa suddivisione ha permesso di calcolare le singole risposte all'impulso (RIR) relative a ogni quadrante, garantendo che le caratteristiche timbriche rilevate in camera anecoica venissero preservate nella corretta direzione.

Parallelamente, sono stati inclusi i Job relativi alla sorgente di disturbo ambientale del chiacchiericcio, trattati come variabili indipendenti per un controllo accurato del bilanciamento del soundscape finale.

Job list - BFormat mode

Active sources for job: 24

- ☒ P1 S1_Musicista - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☒ P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☒ P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☒ P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☐ P5 Sorgente Natural - Point source at: (x,y,z) = (0.710, 20.220, 1.600)
- ☐ M6 Brusio esterno - MSurf, using surface: 36 37 1261 1295 1305 1348

Job	Description	Receiver pointing towards source	☒ Grid	☒ Multi	☒ Single point response receiver
1	s1_p1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
2	S2_P1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
3	S3_P1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
4	S4_P1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
5	Brusio esterno_P1	P2 S2_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
6	S1_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
7	S2_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
8	S3_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
9	S4_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
10	Brusio esterno_P2	P4 S4_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
11	S1_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
12	S2_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
13	S3_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
14	S4_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
15	Brusio esterno_P3	P3 S3_Musicista - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
16	SORGENTE_P1	P5 Sorgente Natural - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
17	BRUSIO_P1	P5 Sorgente Natural - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
18	SORENTE_P2	P5 Sorgente Natural - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
19	BRUSIO_P2	P5 Sorgente Natural - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
20	SORGENTE_P3	P5 Sorgente Natural - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
21	BRUSIO_P3	P5 Sorgente Natural - Point source at: (x,y,z)	☐	☐	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
22	SORGENTE_COMPOSTA_P1	Direction towards main axis, -X	☐	☐	1 P1_Ascoltatore 1 (x,y,z) = (0.750, 24.220, 1.200)
23	SORGENTE_COMPOSTA_P2	Direction towards main axis, -X	☐	☐	2 P2_Ascoltatore 2 (x,y,z) = (5.660, 15.220, 1.200)
24	SORGENTE_COMPOSTA_P3	Direction towards main axis, -X	☒	☒	3 P3_Ascoltatore 3 (x,y,z) = (-4.300, 14.220, 1.200)
25		Direction towards main axis, -X	☐	☐	(none)

Figura 47 ▲
Interfaccia per la creazione
dei job in Odeon, in rosso il
caso 2.

5.4.3 Convolver e Mixer

Nel Caso 2, l'elaborazione dei segnali audio ha richiesto una struttura di calcolo più complessa rispetto al modello a sorgente singola. Anche in questo metodo il workflow è stato strutturato attraverso l'uso combinato dei moduli Convolver e Mixer (figura 48) per integrare le quattro tracce anecoiche indipendenti.

All'interno del modulo Convolver, per ognuno dei tre ricevitori (P1, P2, P3), non è stata considerata esclusivamente la traccia microfonica frontale, ma l'intero set di registrazioni effettuate in camera anecoica, in base alla direzione di riproduzione del musicista.

Per ogni punto di ascolto sono state considerate tutte e quattro le tracce registrate simultaneamente dai microfoni.

Questa scelta permette di includere nell'auralizzazione anche le emissioni non frontali (lati e retro dello strumento) che, pur non essendo dirette verso il ricevitore, contribuiscono in modo determinante alla creazione delle riflessioni precoci e del campo riverberato totale del Maneggio.

Ai fini di rendere l'auralizzazione corretta, come spiegato nel caso 1, non è stata attivata la funzione di calibrazione ma si è intervenuti solo sul Rcd. Lev con valori sempre pari a -56dB, per rendere la correzione omogenea su tutti i contributi ed evitare il clipping.

Job list - BFormat mode									
Convolve BFormat RIR with Signal file									
Conv. no.	Time	Channel	Calib.	Job no.	Receiver	Job descr.	Rcd. lev.	Max. out	
1	5:18:14	Average	☐	16	1 towards P5	SORGENTE_P1	-56.00	-1.88	
2	5:00:00	Average	☐	17	1 towards P5	BRUSIO_P1	-56.00	-35.14	
3	5:18:14	Average	☐	18	2 towards P5	SORENTE_P2	-56.00	-6.36	
4	5:00:00	Average	☐	19	2 towards P5	BRUSIO_P2	-56.00	-33.53	
5	5:18:14	Average	☐	20	3 towards P5	SORGENTE_P3	-56.00	-4.70	
6	5:00:00	Average	☐	21	3 towards P5	BRUSIO_P3	-56.00	-32.71	
7	5:18:14	Average	☐	1	1 towards P2	s1_p1	-56.00	-4.82	
8	5:18:14	Average	☐	2	1 towards P2	S2_P1	-56.00	-14.06	
9	5:18:14	Average	☐	3	1 towards P2	S3_P1	-56.00	-21.62	
10	5:18:14	Average	☐	4	1 towards P2	S4_P1	-56.00	-11.12	
11	5:00:00	Average	☐	5	1 towards P2	Bruso esterno_P1	-56.00	-35.14	
12	5:18:14	Average	☐	6	2 towards P4	S1_P2	-56.00	-14.94	
13	5:18:14	Average	☐	7	2 towards P4	S2_P2	-56.00	-7.35	
14	5:18:14	Average	☐	8	2 towards P4	S3_P2	-56.00	-19.66	
15	5:18:14	Average	☐	9	2 towards P4	S4_P2	-56.00	-13.46	
16	5:00:00	Average	☐	10	2 towards P4	Bruso esterno_P2	-56.00	-33.53	
17	5:18:14	Average	☐	11	3 towards P3	S1_P3	-56.00	-18.10	
18	5:18:14	Average	☐	12	3 towards P3	S2_P3	-56.00	-13.01	
19	5:18:14	Average	☐	13	3 towards P3	S3_P3	-56.00	-18.11	
20	5:18:14	Average	☐	14	3 towards P3	S4_P3	-56.00	-9.86	
21	5:00:00	Average	☐	15	3 towards P3	Bruso esterno_P3	-56.00	-32.71	
22		Average	☐	(none)			0.00	-99.00	
23		Average	☐	(none)			0.00	-99.00	
24		Average	☐	(none)			0.00	-99.00	

Mix convolved wave results into one wave file				
Mix. no.	Rec.	Description	Convolved files	Max. out
1	1	c1_mix1	1/2/	-1.87
2	2	c1_mix2	3/4/	-6.33
3	3	c1_mix3	5/6/	-4.63
4	1	c2_mix1	7/8/9/10/11/	-2.05
5	2	c2_mix2	12/13/14/15/16/	-6.63
6	3	c2_mix3	17/18/19/20/21/	-7.49
7				-99.00
8				-99.00
9				-99.00
10				-99.00
11				-99.00
12				-99.00
13				-99.00
14				-99.00
15				-99.00
16				-99.00
17				-99.00
18				-99.00
19				-99.00
20				-99.00
21				-99.00
22				-99.00
23				-99.00
24				-99.00

Convolutions in mix no. 1				
No.	Conv. no.	Mix. Lev.	Delay in sec.	Job descr.
1	1	0.00	0.00	SORGENTE_P1
2	2	0.00	0.00	BRUSIO_P1
3	(none)	0.00	0.00	
4	(none)	0.00	0.00	
5	(none)	0.00	0.00	
6	(none)	0.00	0.00	
7	(none)	0.00	0.00	
8	(none)	0.00	0.00	
9	(none)	0.00	0.00	
10	(none)	0.00	0.00	
11	(none)	0.00	0.00	
12	(none)	0.00	0.00	
13	(none)	0.00	0.00	
14	(none)	0.00	0.00	
15	(none)	0.00	0.00	
16	(none)	0.00	0.00	
17	(none)	0.00	0.00	
18	(none)	0.00	0.00	
19	(none)	0.00	0.00	
20	(none)	0.00	0.00	
21	(none)	0.00	0.00	
22	(none)	0.00	0.00	
23	(none)	0.00	0.00	

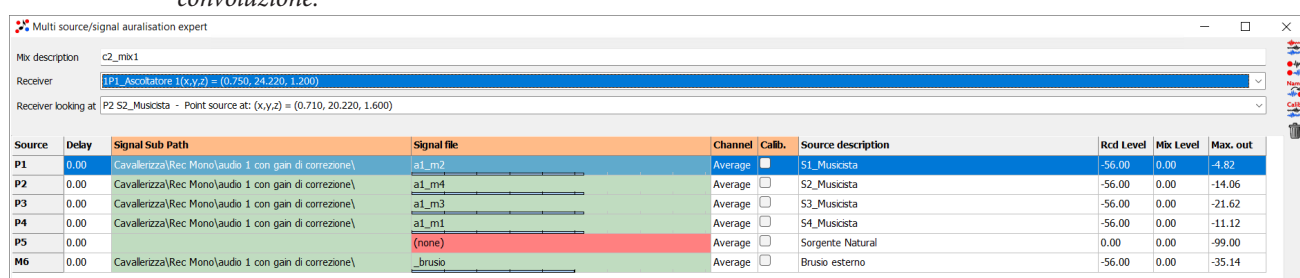
Figura 48▲
 Interfaccia dei comandi
 Convolver e Mixer, in rosso il
 caso 2.

5.4.4 Auralizzazioni

Il passaggio finale è avvenuto tramite il modulo Multi source/signal auralisation expert.

Come si evince dalla configurazione impostata per il punto di ascolto P1, la simulazione opera una vera e propria ricostruzione del campo sonoro tridimensionale, non si limita a una riproduzione statica,

Figura 49 ▼
Odeon, Interfaccia della
configurazione del mix per la
convoluzione.



Source	Delay	Signal Sub Path	Signal file	Channel	Calib.	Source description	Rcd Level	Mix Level	Max. out
P1	0.00	Cavallerizza\Rec Mono\audio 1 con gain di correzione\	a1_m2	Average	☒	S1_Musicista	-56.00	0.00	-4.82
P2	0.00	Cavallerizza\Rec Mono\audio 1 con gain di correzione\	a1_m4	Average	☐	S2_Musicista	-56.00	0.00	-14.06
P3	0.00	Cavallerizza\Rec Mono\audio 1 con gain di correzione\	a1_m3	Average	☐	S3_Musicista	-56.00	0.00	-21.62
P4	0.00	Cavallerizza\Rec Mono\audio 1 con gain di correzione\	a1_m1	Average	☐	S4_Musicista	-56.00	0.00	-11.12
P5	0.00		(none)	Average	☐	Sorgente Natural	0.00	0.00	-99.00
M6	0.00	Cavallerizza\Rec Mono\audio 1 con gain di correzione\	_brusio	Average	☐	Brusio esterno	-56.00	0.00	-35.14

L'analisi dell'interfaccia evidenzia i parametri che garantiscono il realismo dell'esperienza, infatti per il ricevitore P1, sono state attivate simultaneamente le quattro sorgenti del violino (S1, S2, S3, S4).

Ad ogni sorgente è stata assegnata la rispettiva traccia anecoica, garantendo che l'ascoltatore riceva il contributo frontale predominante insieme alle componenti sonore irradiate nelle altre direzioni.

Al segnale del violino è stato sommato anche il flusso relativo al brusio esterno; questo permette di calcolare una risposta acustica che includa il rumore di fondo reale della sala, fondamentale per la validazione in ambiente VR.

L'immagine mostra inoltre una calibrazione precisa del Rcd Level (impostato a -56.00 dB). Questa attenuazione preventiva è necessaria affinché il Max. out finale resti al di sotto dello zero digitale, scongiurando distorsioni da clipping durante la convoluzione simultanea di sei tracce diverse.

Una volta validato questo passaggio per le tre posizioni si è passati all'esportazione in formato HOA (High Order Ambisonics), nella modalità già esplicitata per il caso 1.



5.5 Confronto tra i due casi

In sintesi, la scelta di condurre la ricerca attraverso due diverse casistiche di calcolo risponde alla necessità di ottenere una visione completa del comportamento acustico della sala.

I due casi finora analizzati quindi hanno portato a delle valutazioni differenziate. La sfida di questa doppia metodologia voleva essere comprendere quale dei due casi risulti più adatto a una rappresentazione sonora come quella del Maneggio Alfieriano.

Il punto cardine di questa comparazione è stato comprendere come rendere le 5 sorgenti (una per il caso 1 e 4 per il caso 2) energeticamente compatibili. Infatti si è proceduti, prima della convoluzione, alla verifica dei parametri energetici in ingresso per ogni punto. Si è calcolata la risposta all'impulso della prima sorgente nei tre punti di ascolto e anche delle 4 sorgenti a spicchio negli stessi tre punti.

Figura 50
Confronto dei parametri acustici estratti tramite Single Point Response per i tre ricevitori, per entrambe le casistiche.

Single Point response - job 16 - WARNING 24 paramet...	Single Point response - job 18 - WARNING 24 paramet...	Single Point response - job 20 - WARNING 24 parameters coul...																																																																																																																																																
<table><tr><th>Reflection density</th><th>Reflectogram</th><th>3D Reflection paths/ Active sources</th></tr><tr><td>Dynamic diffusivity curves</td><td></td><td>Dietsch echo curves</td></tr><tr><td>Parameter bars</td><td>Energy parameters</td><td>Decay curves</td></tr><tr><td>Decay Roses</td><td></td><td></td></tr><tr><td>SPL(A)</td><td>67.1</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(Lin)</td><td>70.3</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(C)</td><td>69.9</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(A_Direct)</td><td>64.2</td><td>dB</td></tr><tr><td>STI(Male)</td><td>0.68</td><td>(good)</td></tr><tr><td>STIPA</td><td>0.68</td><td>(good)</td></tr><tr><td>STI(expected)</td><td>0.47</td><td>(poor)</td></tr></table>	Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources	Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves	Parameter bars	Energy parameters	Decay curves	Decay Roses			SPL(A)	67.1	dB	SPL(Lin)	70.3	dB	SPL(C)	69.9	dB	SPL(A_Direct)	64.2	dB	STI(Male)	0.68	(good)	STIPA	0.68	(good)	STI(expected)	0.47	(poor)	<table><tr><th>Reflection density</th><th>Reflectogram</th><th>3D Reflection paths/ Active sources</th></tr><tr><td>Dynamic diffusivity curves</td><td></td><td>Dietsch echo curves</td></tr><tr><td>Parameter bars</td><td>Energy parameters</td><td>Decay curves</td></tr><tr><td>Decay Roses</td><td></td><td></td></tr><tr><td>SPL(A)</td><td>62.3</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(Lin)</td><td>66.7</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(C)</td><td>66.3</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(A_Direct)</td><td>55.7</td><td>dB</td></tr><tr><td>STI(Male)</td><td>0.46</td><td>(fair)</td></tr><tr><td>STIPA</td><td>0.46</td><td>(fair)</td></tr><tr><td>STI(expected)</td><td>0.40</td><td>(poor)</td></tr></table>	Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources	Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves	Parameter bars	Energy parameters	Decay curves	Decay Roses			SPL(A)	62.3	dB	SPL(Lin)	66.7	dB	SPL(C)	66.3	dB	SPL(A_Direct)	55.7	dB	STI(Male)	0.46	(fair)	STIPA	0.46	(fair)	STI(expected)	0.40	(poor)	<table><tr><th>Reflection density</th><th>Reflectogram</th><th>3D Reflection paths/ Active sources</th></tr><tr><td>Dynamic diffusivity curves</td><td></td><td>Dietsch echo curves</td></tr><tr><td>Parameter bars</td><td>Energy parameters</td><td>Decay curves</td></tr><tr><td>Decay Roses</td><td></td><td></td></tr><tr><td>SPL(A)</td><td>64.7</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(Lin)</td><td>67.9</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(C)</td><td>67.5</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(A_Direct)</td><td>60.9</td><td>dB</td></tr><tr><td>STI(Male)</td><td>0.60</td><td>(fair)</td></tr><tr><td>STIPA</td><td>0.59</td><td>(fair)</td></tr><tr><td>STI(expected)</td><td>0.41</td><td>(poor)</td></tr></table>	Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources	Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves	Parameter bars	Energy parameters	Decay curves	Decay Roses			SPL(A)	64.7	dB	SPL(Lin)	67.9	dB	SPL(C)	67.5	dB	SPL(A_Direct)	60.9	dB	STI(Male)	0.60	(fair)	STIPA	0.59	(fair)	STI(expected)	0.41	(poor)																																													
Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources																																																																																																																																																
Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves																																																																																																																																																
Parameter bars	Energy parameters	Decay curves																																																																																																																																																
Decay Roses																																																																																																																																																		
SPL(A)	67.1	dB																																																																																																																																																
SPL(Lin)	70.3	dB																																																																																																																																																
SPL(C)	69.9	dB																																																																																																																																																
SPL(A_Direct)	64.2	dB																																																																																																																																																
STI(Male)	0.68	(good)																																																																																																																																																
STIPA	0.68	(good)																																																																																																																																																
STI(expected)	0.47	(poor)																																																																																																																																																
Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources																																																																																																																																																
Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves																																																																																																																																																
Parameter bars	Energy parameters	Decay curves																																																																																																																																																
Decay Roses																																																																																																																																																		
SPL(A)	62.3	dB																																																																																																																																																
SPL(Lin)	66.7	dB																																																																																																																																																
SPL(C)	66.3	dB																																																																																																																																																
SPL(A_Direct)	55.7	dB																																																																																																																																																
STI(Male)	0.46	(fair)																																																																																																																																																
STIPA	0.46	(fair)																																																																																																																																																
STI(expected)	0.40	(poor)																																																																																																																																																
Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources																																																																																																																																																
Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves																																																																																																																																																
Parameter bars	Energy parameters	Decay curves																																																																																																																																																
Decay Roses																																																																																																																																																		
SPL(A)	64.7	dB																																																																																																																																																
SPL(Lin)	67.9	dB																																																																																																																																																
SPL(C)	67.5	dB																																																																																																																																																
SPL(A_Direct)	60.9	dB																																																																																																																																																
STI(Male)	0.60	(fair)																																																																																																																																																
STIPA	0.59	(fair)																																																																																																																																																
STI(expected)	0.41	(poor)																																																																																																																																																
<table><tr><th>Reflection density</th><th>Reflectogram</th><th>3D Reflection paths/ Active sources</th></tr><tr><td>Dynamic diffusivity curves</td><td></td><td>Dietsch echo curves</td></tr><tr><td>Parameter bars</td><td>Energy parameters</td><td>Decay curves</td></tr><tr><td>Decay Roses</td><td></td><td></td></tr><tr><td>Diffusivity(ss) (dB)</td><td>4.6</td><td>3.0</td></tr><tr><td>Echo(Dietsch)</td><td>0.87</td><td>0.92</td></tr><tr><td>SPL(A)</td><td>67.0</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(Lin)</td><td>70.3</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(C)</td><td>69.9</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(A_Direct)</td><td>64.0</td><td>dB</td></tr><tr><td>STI(Male)</td><td>0.63</td><td>(good)</td></tr><tr><td>STIPA</td><td>0.63</td><td>(good)</td></tr><tr><td>STI(expected)</td><td>0.42</td><td>(poor)</td></tr><tr><td>EDT(Average)</td><td>2.19</td><td>s</td></tr><tr><td>T(20_Average)</td><td>2.85</td><td>s</td></tr><tr><td>T(30_Average)</td><td>2.96</td><td>s</td></tr></table>	Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources	Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves	Parameter bars	Energy parameters	Decay curves	Decay Roses			Diffusivity(ss) (dB)	4.6	3.0	Echo(Dietsch)	0.87	0.92	SPL(A)	67.0	dB	SPL(Lin)	70.3	dB	SPL(C)	69.9	dB	SPL(A_Direct)	64.0	dB	STI(Male)	0.63	(good)	STIPA	0.63	(good)	STI(expected)	0.42	(poor)	EDT(Average)	2.19	s	T(20_Average)	2.85	s	T(30_Average)	2.96	s	<table><tr><th>Reflection density</th><th>Reflectogram</th><th>3D Reflection paths/ Active sources</th></tr><tr><td>Dynamic diffusivity curves</td><td></td><td>Dietsch echo curves</td></tr><tr><td>Parameter bars</td><td>Energy parameters</td><td>Decay curves</td></tr><tr><td>Decay Roses</td><td></td><td></td></tr><tr><td>Diffusivity(ss) (dB)</td><td>6.7</td><td>4.2</td></tr><tr><td>Echo(Dietsch)</td><td>0.87</td><td>0.93</td></tr><tr><td>SPL(A)</td><td>64.9</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(Lin)</td><td>68.5</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(C)</td><td>68.0</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(A_Direct)</td><td>60.9</td><td>dB</td></tr><tr><td>STI(Male)</td><td>0.60</td><td>(fair)</td></tr><tr><td>STIPA</td><td>0.59</td><td>(fair)</td></tr><tr><td>STI(expected)</td><td>0.41</td><td>(poor)</td></tr><tr><td>EDT(Average)</td><td>2.86</td><td>s</td></tr><tr><td>T(20_Average)</td><td>2.96</td><td>s</td></tr><tr><td>T(30_Average)</td><td>3.06</td><td>s</td></tr></table>	Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources	Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves	Parameter bars	Energy parameters	Decay curves	Decay Roses			Diffusivity(ss) (dB)	6.7	4.2	Echo(Dietsch)	0.87	0.93	SPL(A)	64.9	dB	SPL(Lin)	68.5	dB	SPL(C)	68.0	dB	SPL(A_Direct)	60.9	dB	STI(Male)	0.60	(fair)	STIPA	0.59	(fair)	STI(expected)	0.41	(poor)	EDT(Average)	2.86	s	T(20_Average)	2.96	s	T(30_Average)	3.06	s	<table><tr><th>Reflection density</th><th>Reflectogram</th><th>3D Reflection paths/ Active sources</th></tr><tr><td>Dynamic diffusivity curves</td><td></td><td>Dietsch echo curves</td></tr><tr><td>Parameter bars</td><td>Energy parameters</td><td>Decay curves</td></tr><tr><td>Decay Roses</td><td></td><td></td></tr><tr><td>Diffusivity(ss) (dB)</td><td>7.1</td><td>4.9</td></tr><tr><td>Echo(Dietsch)</td><td>0.74</td><td>0.71</td></tr><tr><td>SPL(A)</td><td>64.3</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(Lin)</td><td>68.1</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(C)</td><td>67.7</td><td>dB</td></tr><tr><td>SPL(A_Direct)</td><td>59.4</td><td>dB</td></tr><tr><td>STI(Male)</td><td>0.56</td><td>(fair)</td></tr><tr><td>STIPA</td><td>0.55</td><td>(fair)</td></tr><tr><td>STI(expected)</td><td>0.41</td><td>(poor)</td></tr><tr><td>EDT(Average)</td><td>2.79</td><td>s</td></tr><tr><td>T(20_Average)</td><td>2.92</td><td>s</td></tr><tr><td>T(30_Average)</td><td>3.03</td><td>s</td></tr></table>	Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources	Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves	Parameter bars	Energy parameters	Decay curves	Decay Roses			Diffusivity(ss) (dB)	7.1	4.9	Echo(Dietsch)	0.74	0.71	SPL(A)	64.3	dB	SPL(Lin)	68.1	dB	SPL(C)	67.7	dB	SPL(A_Direct)	59.4	dB	STI(Male)	0.56	(fair)	STIPA	0.55	(fair)	STI(expected)	0.41	(poor)	EDT(Average)	2.79	s	T(20_Average)	2.92	s	T(30_Average)	3.03	s
Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources																																																																																																																																																
Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves																																																																																																																																																
Parameter bars	Energy parameters	Decay curves																																																																																																																																																
Decay Roses																																																																																																																																																		
Diffusivity(ss) (dB)	4.6	3.0																																																																																																																																																
Echo(Dietsch)	0.87	0.92																																																																																																																																																
SPL(A)	67.0	dB																																																																																																																																																
SPL(Lin)	70.3	dB																																																																																																																																																
SPL(C)	69.9	dB																																																																																																																																																
SPL(A_Direct)	64.0	dB																																																																																																																																																
STI(Male)	0.63	(good)																																																																																																																																																
STIPA	0.63	(good)																																																																																																																																																
STI(expected)	0.42	(poor)																																																																																																																																																
EDT(Average)	2.19	s																																																																																																																																																
T(20_Average)	2.85	s																																																																																																																																																
T(30_Average)	2.96	s																																																																																																																																																
Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources																																																																																																																																																
Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves																																																																																																																																																
Parameter bars	Energy parameters	Decay curves																																																																																																																																																
Decay Roses																																																																																																																																																		
Diffusivity(ss) (dB)	6.7	4.2																																																																																																																																																
Echo(Dietsch)	0.87	0.93																																																																																																																																																
SPL(A)	64.9	dB																																																																																																																																																
SPL(Lin)	68.5	dB																																																																																																																																																
SPL(C)	68.0	dB																																																																																																																																																
SPL(A_Direct)	60.9	dB																																																																																																																																																
STI(Male)	0.60	(fair)																																																																																																																																																
STIPA	0.59	(fair)																																																																																																																																																
STI(expected)	0.41	(poor)																																																																																																																																																
EDT(Average)	2.86	s																																																																																																																																																
T(20_Average)	2.96	s																																																																																																																																																
T(30_Average)	3.06	s																																																																																																																																																
Reflection density	Reflectogram	3D Reflection paths/ Active sources																																																																																																																																																
Dynamic diffusivity curves		Dietsch echo curves																																																																																																																																																
Parameter bars	Energy parameters	Decay curves																																																																																																																																																
Decay Roses																																																																																																																																																		
Diffusivity(ss) (dB)	7.1	4.9																																																																																																																																																
Echo(Dietsch)	0.74	0.71																																																																																																																																																
SPL(A)	64.3	dB																																																																																																																																																
SPL(Lin)	68.1	dB																																																																																																																																																
SPL(C)	67.7	dB																																																																																																																																																
SPL(A_Direct)	59.4	dB																																																																																																																																																
STI(Male)	0.56	(fair)																																																																																																																																																
STIPA	0.55	(fair)																																																																																																																																																
STI(expected)	0.41	(poor)																																																																																																																																																
EDT(Average)	2.79	s																																																																																																																																																
T(20_Average)	2.92	s																																																																																																																																																
T(30_Average)	3.03	s																																																																																																																																																

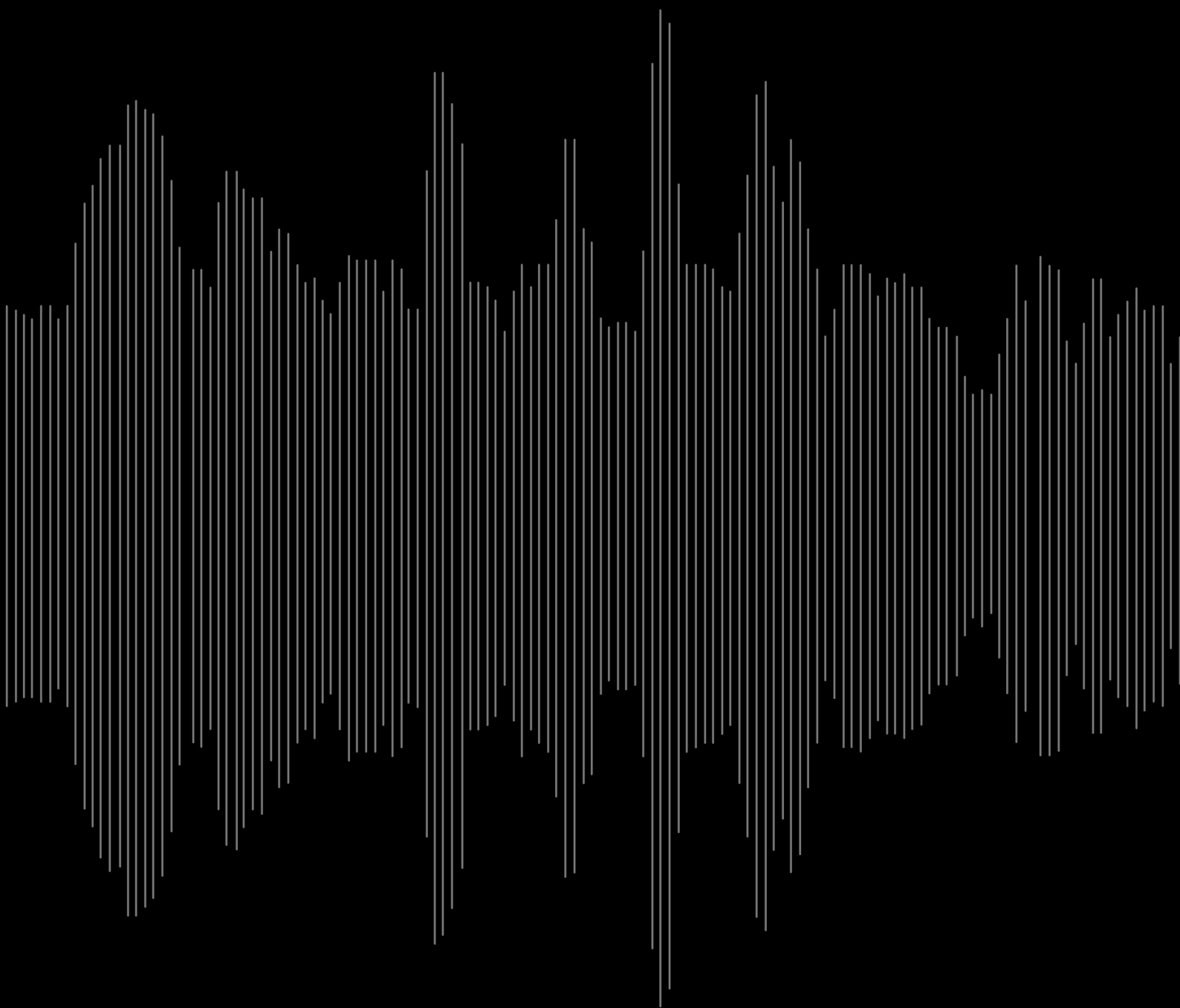
Seguendo il metodo tradizionale, si ha subito un risultato, evitando la complessa definizione della direttività, perché viene affidata direttamente a un balloon preimpostato.

Infatti con una sorgente singola di tipo Natural, il software è in grado di elaborare con precisione la potenza sonora complessiva dello strumento. Tuttavia l'associazione tra un segnale anecoico reale e un diagramma di direttività "balloon" che include già lo spettro dello strumento genera il fenomeno della doppia inclusione spettrale. Questo fenomeno produce una distorsione timbrica che non riflette correttamente la realtà sonora [16].

Per superare tale criticità, è stato implementato il Metodo Avanzato a Sorgente Composta, basato sulle ricerche di Otondo e Rindel [17].

In questa configurazione, la sorgente fisica viene scomposta in $N=4$ sorgenti puntiformi omnidirezionali, ciascuna delle quali copre uno specifico angolo solido misurato in steradiani (sr). La condizione necessaria per una corretta ricostruzione del campo sonoro è che la somma degli angoli solidi copra l'intero spazio di radiazione.

La direttività non è più affidata a un diagramma correttivo, ma è codificata direttamente nei segnali audio (.WAV) ottenuti tramite misurazioni ad alta risoluzione in camera anecoica.





06

**Integrazione
componente visiva**

L'obiettivo della ricerca consiste nella combinazione delle componenti acustiche e visive, configurandosi come un passaggio fondamentale per la verifica percettiva ante operam e la comunicazione del progetto architettonico.

La sfida metodologica risiede nel connettere il dato acustico rigoroso con la dinamicità dell'ambiente digitale, fruibile grazie alla realtà aumentata, superando i limiti della modellazione statica attraverso la creazione di un modello acustico-visivo capace di riflettere fedelmente le proprietà fisiche dello spazio storico.

In questa prospettiva, per la realizzazione del modello geometrico si è usato il software Rhinoceros 7.0, il quale garantisce un pieno controllo della modellazione degli apparati decorativi complessi (figura 51).

Successivamente il modello è stato importato in Unreal Engine 5 per completare la configurazione grafica e integrare, grazie alle sue caratteristiche di lavoro, anche la componente audiovisiva.

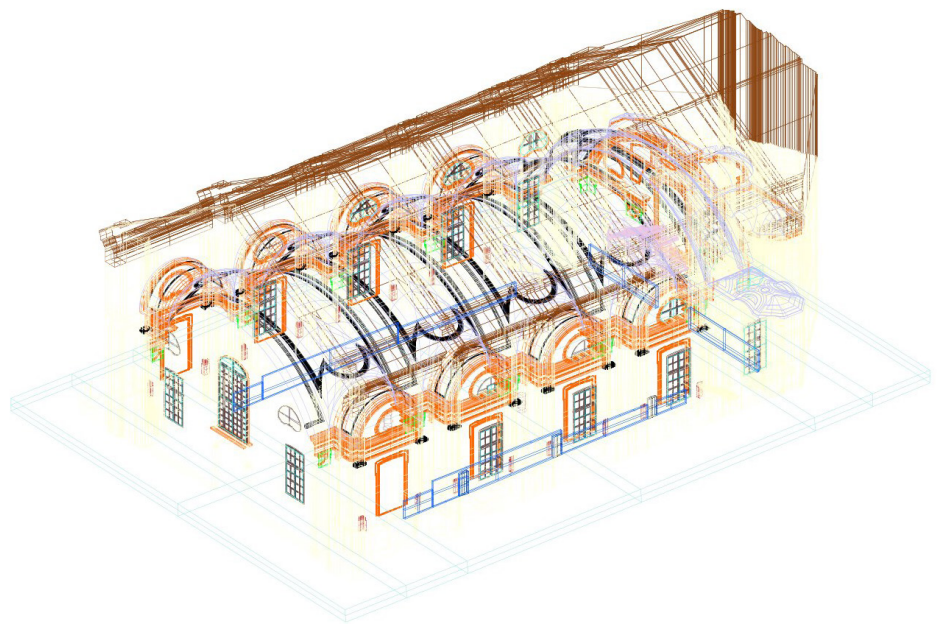


Figura 51 ►

Dettaglio della modellazione geometrica complessa in Rhino. La precisione del wireframe costituisce il fulcro per connettere il dato acustico rigoroso alla dinamicità dell'ambiente VR.

L'adozione di questo motore di rendering in tempo reale permette di sfruttare algoritmi di illuminazione globale e spazializzazione sonora che fino a pochi anni fa richiedevano tempi di calcolo offline, garantendo oggi un'interattività senza precedenti per i beni culturali.

All'interno di Unreal Engine è stata gestita la dinamicità dell'acustica e l'interattività dell'osservatore che assiste alla simulazione di una riproduzione musicale.

La validazione sensoriale è stata realizzata collegando una telecamera virtuale a un headset Oculus 2, gestendo l'interazione tramite Blueprint. La sincronia in tempo reale tra lo stimolo visivo e la risposta audio ambisonica è alla base dell'esperienza immersiva.

Recenti studi confermano che l'uso di motori di gioco per l'auralizzazione non solo migliora il coinvolgimento, ma fornisce risultati comparabili ai test acustici in situ, purché la calibrazione tra le HRTF e il movimento della testa (head-tracking) sia accurata. In conclusione, l'uso di Unreal Engine 5 come processore centrale permette di trasformare la geometria di Rhino in una esperienza sensoriale in cui la fedeltà del Real-Time Ray Tracing acustico garantisce una validità scientifica alla simulazione immersiva [5], [18], [19].

6.1 Rhinoceros

La prima fase di modellazione è stata eseguita utilizzando il software Rhinoceros, basato sulla tecnologia NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines).

A differenza dei software che utilizzano le mesh per la modellazione, Rhino sfrutta curve e superfici matematicamente precise, permettendo agli utilizzatori la creazione di forme complesse (figura 52) con un grado di accuratezza molto elevato [20].

Per queste ragioni, e per una maggiore fluidità nella modellazione, il software è stato utilizzato per creare un modello dettagliato dell'interno del Maneggio, partendo dall'importazione dei materiali di rilievo dello stato di fatto raccolti come fonti documentali.

Dopo aver definito gli elementi architettonici principali, sono stati riprodotti fedelmente tutti i dettagli decorativi interni, quali modanature, trabeazioni, cornici e apparati fitomorfi.

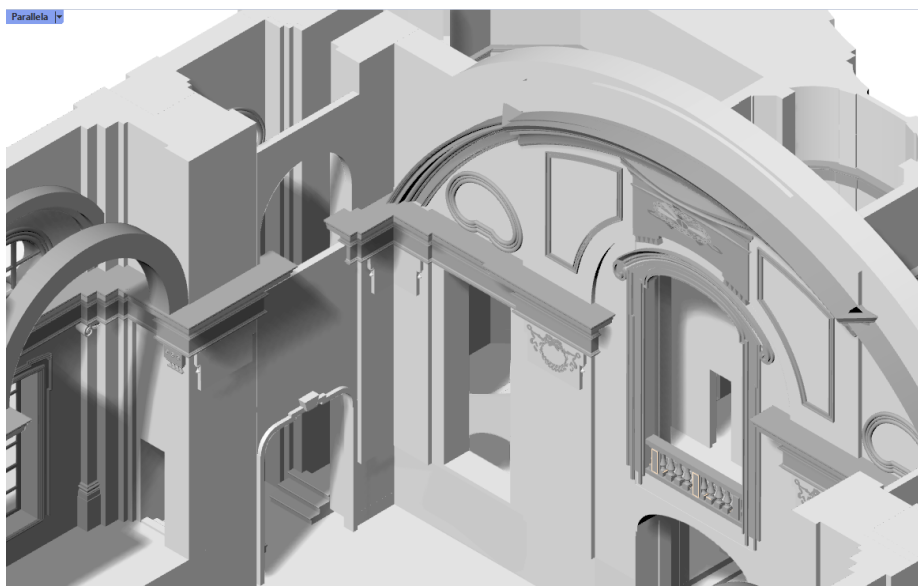


Figura 52 ►Immagine di dettaglio di Rhinoceros

L'ultimo passaggio svolto in Rhino è stato l'esportazione del modello tramite il plugin chiamato Datasmith Exporter nel formato .udatasmith [21].

Il workflow tra Rhino e Unreal Engine tramite Datasmith è considerato una configurazione di interoperabilità verticale. Questa si verifica quando i software coinvolti occupano fasi diverse dello stesso processo produttivo. In questo caso, Rhino agisce come strumento di creazione della geometria (modellazione NURBS), mentre Unreal Engine funge da piattaforma di visualizzazione e rendering in tempo reale.

Datasmith opera quindi da ponte che permette ai dati di fluire lungo la filiera (dalla progettazione alla presentazione) mantenendo intatte le informazioni complesse come la gerarchia dei layer, i blocchi e le proprietà dei materiali.

6.2 Unreal Engine 5

Il processo di sviluppo è iniziato con la configurazione di una scena tridimensionale all'interno di Unreal Engine 5.

Il ThirdPersonTemplate è stato adottato come framework di partenza integrato con i dati del VRTemplate [22] [23] per garantire la piena compatibilità con lo standard OpenXR [24] , [25].

Il modello architettonico è stato importato tramite plugin Datasmith, strumento integrato nell'engine che permette una trasposizione accurata della gerarchia geometrica e dei metadati [26], [27].

Dopo l'importazione degli elementi geometrici, si è proceduto alla definizione dei materiali, basandosi sui dati acquisiti durante il sopralluogo e sulla documentazione fotografica interna.

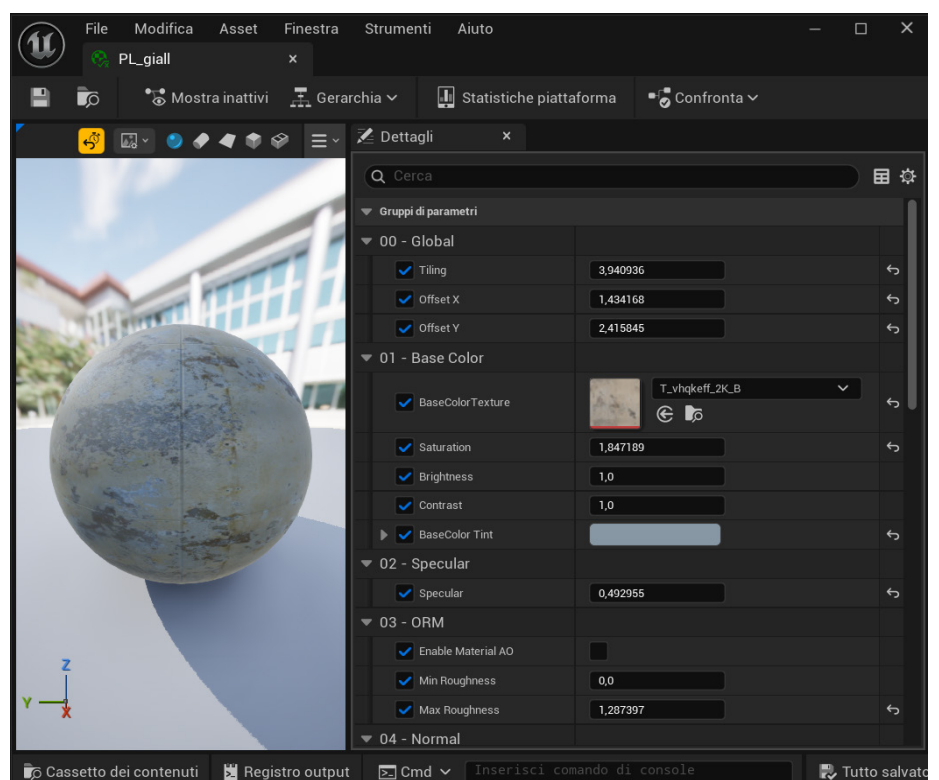


Figura 53 ►

*Esempio di materiale scaricato
dal Fab di Unreal Engine*

Il workflow ha previsto l'utilizzo delle librerie esterne per alcuni materiali attinti dal Fab ,il marketplace unificato di Unreal con archivi di materiali sia open-source che professionali(figura 53), mentre altri materiali sono stati realizzati ex novo attraverso la creazione di Blueprint [28], [29].

In Unreal Engine, un Blueprint è un sistema di programmazione visuale a nodi. Nel contesto dei materiali, permette di creare shader complessi collegando matematicamente texture, parametri di riflessione, rifrazione e mappe di normali, senza dover scrivere codice testuale.

Per simulare il degrado architettonico, sono stati selezionati materiali pre-danneggiati, intervenendo successivamente sul Base Color per accentuare la profondità cromatica dello spazio. Per rompere la ripetitività delle texture e aumentare il realismo nei punti di maggiore erosione, è stato applicato un sistema di Decalcomanie (Decals), che permette di proiettare strati di sporco, crepe o umidità direttamente sulle superfici esistenti.

Invece, per eliminare l'eccessiva regolarità dei modelli poligonali, come gli spigoli vivi dei pilastri, si è intervenuti in Modeling Mode [30] con due strumenti in particolare:

- Displacement: È stata utilizzata questa tecnica per generare irregolarità geometriche. Attraverso una Height Map (mappa di altezza) o algoritmi di Noise (rumore procedurale), la geometria è stata alterata fisicamente per simulare mattoni sbeccati e pietre erose.
- Voxel Wrap: Per garantire la solidità strutturale dopo le deformazioni, si è utilizzato lo strumento Voxel, che rigenera la superficie della mesh creando un guscio unico e solido.

Un passaggio cruciale ha riguardato la ricostruzione illuminotecnica, volta a replicare le condizioni atmosferiche rilevate il 29 luglio alle ore 13:00 a Torino (figura 54).

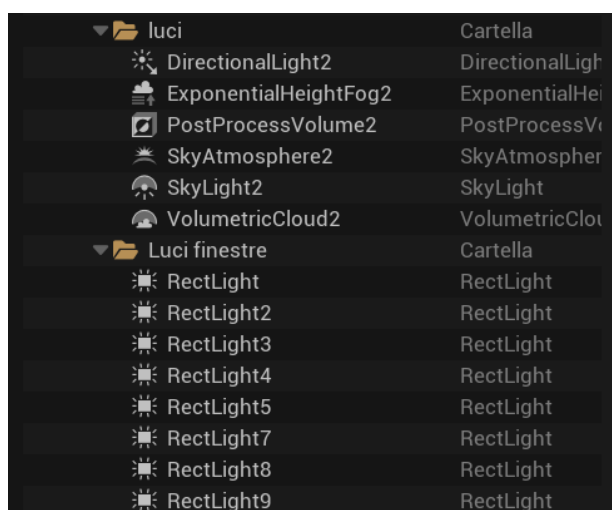
Figura 54 ►
*Immagine di riferimento per
l'illuminazione interna*



Il punto focale è stata la gestione della Directional Light, impostata con un'inclinazione zenitale (Pitch a -75°) per simulare il sole estivo. Questa configurazione genera ombre nette e contrastate. L'equilibrio tra luce diretta e indiretta è gestito dal sistema Lumen, che calcola l'illuminazione globale (Global Illumination) in tempo reale, simulando accuratamente il rimbalzo delle luci sulle superfici lapidee [31] (figura 55).

Per evitare un appiattimento visivo, l'intensità della SkyLight è stata calibrata per favorire una penombra naturale nelle aree non esposte direttamente, aumentando la profondità spaziale. L'integrazione di Exponential Height Fog e Volumetric Fog ha permesso la visualizzazione dei fasci di luce (God Rays) filtranti dalle aperture, supportando la percezione della scala architettonica e l'integrazione dell'ologramma del musicista nell'ambiente auralizzato.

Figura 55 ►
*Actor dell'illuminazione
 presenti nella scena di Unreal*



Infine, il controllo dell'esposizione è stato vincolato tramite un PostProcess Volume con esposizione manuale fissa. Questa scelta è stata determinante per eliminare le fluttuazioni automatiche del software, garantendo la stabilità percettiva necessaria per la validazione scientifica e sensoriale tramite l'headset Oculus 2.

Oltre all'illuminazione ambientale creata per riproporre le condizioni climatiche reali del giorno in cui sono state scattate le foto di riferimento del Maneggio Alfieriano, sono state aggiunte una serie di luci per permettere una maggiore illuminazione derivante dalle aperture laterali (figura 56).

Figura 56 ►
*Immagine interna soggetta
 all'illuminazione*





6.3 Realizzazione violinista

Prima di procedere all'integrazione delle componenti audio-visive, è stata necessaria una fase di modellazione e acquisizione del soggetto della riproduzione, ovvero il violinista.

In una fase iniziale della ricerca, è stata valutata la creazione di un MetaHuman personalizzato. Questa soluzione avrebbe garantito un elevato grado di realismo, ma avrebbe richiesto l'impiego di pipeline di produzione complesse e sistemi di tracciamento avanzati, quali tute e guanti per il motion capture [32] e un'infrastruttura di camere specifiche. Un'altra opzione sarebbe stata utilizzare MetaHuman preimpostati e parzialmente customizzabili, questi presentano spesso un livello di infedeltà anatomica e di movimento che non soddisfaceva i requisiti del progetto.

La prima strategia operativa ipotizzata prevedeva l'utilizzo di un MetaHuman standard a cui associare una serie di animazioni procedurali: movimenti del corpo e degli arti [33], [34], oltre alla gestione dinamica di oggetti (props) [35], necessaria per l'interazione con il violino. Tuttavia, tale approccio è risultato scarsamente controllabile poichè la complessità nel coordinare le animazioni meccaniche con l'espressività necessaria non avrebbe garantito il sincronismo perfetto con la traccia musicale.

Data l'impossibilità di assicurare una corrispondenza millimetrica tra l'esecuzione gestuale e l'audio, si è scelto di abbandonare la strada dei MetaHuman preimpostati a favore di una metodologia più rigorosa e gestibile.

Si è pertanto optato per una strategia alternativa presso il Visionary Lab, dove il musicista è stato registrato mentre eseguiva la traccia selezionata da tre angolazioni differenti, corrispondenti esattamente ai punti di vista prospettici che l'utente avrebbe esperito all'interno dello spazio reale [36].

Piante VisionaryLab

- Videocamera
- Green Screen



- Posizione violinista
- Orientamento violinista



- Luci

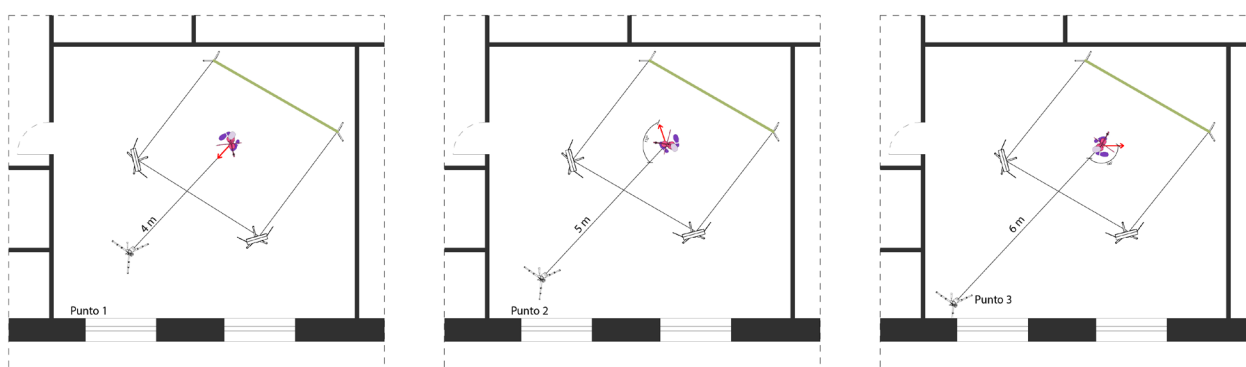


Figura 57 ▲
Schemi delle posizioni di
ripresa nel VisionaryLab.

Le riprese video sono state elaborate tramite Canale Alpha. Solitamente in ogni video i pixel sono composti da tre canali di colore (RGB), il Canale Alpha è un quarto canale aggiunto (RGBA) che indica al software quali parti dell'immagine devono essere visibili e quali devono essere completamente trasparenti o parzialmente traslucide.

Questa tecnica permette di isolare la figura dell'esecutore, integrando un quasi ologramma dinamico nello spazio simulato [37], [38].

Queste tre riprese con rotazioni distinte (figura 57,58) sono state necessarie per generare i contributi video da proiettare su piani geometrici (Static Mesh Planes) posizionati al centro della scena.

Per l'implementazione tecnica di tali ologrammi nel Maneggio Alfieriano, è stato adottato un workflow basato sul Media Framework [39] di Unreal Engine 5.

Il procedimento è iniziato con l'organizzazione sistematica degli asset nella directory Content suddivisa in tre sottocartelle per garantire l'indipendenza dei contributi e una corretta gestione del file system.

All'interno di ciascuna cartella è stato configurato un File Media Source (es. Ascolto_1_2), permettendo al motore di recuperare i dati video esterni (figura 59).

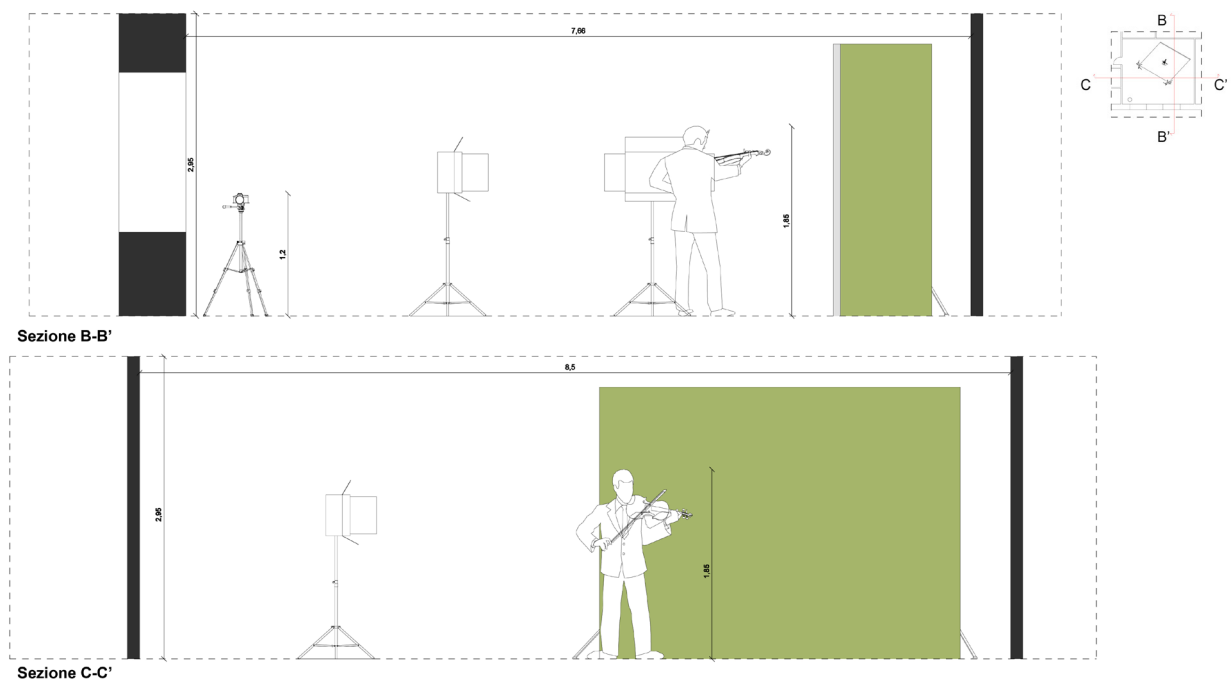


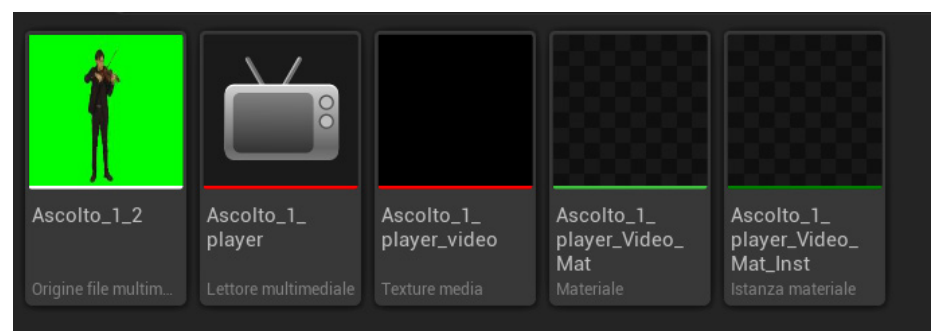
Figura 58 ▲

Sezioni del Visionary Lab.

Per rendere il video fruibile come elemento dinamico all'interno del motore grafico, sono stati creati i componenti logici necessari: un Media Player (Ascolto_1_player), che funge da motore di riproduzione, e la relativa Media Texture (Ascolto_1_player_video), che riceve i frame in tempo reale aggiornando costantemente il buffer di immagine durante l'esecuzione. La texture è stata quindi integrata in un Master Material (Ascolto_1_player_Video_Mat), collegato all'input Base Color tramite l'editor dei materiali basato su nodi [40].

Figura 59 ►

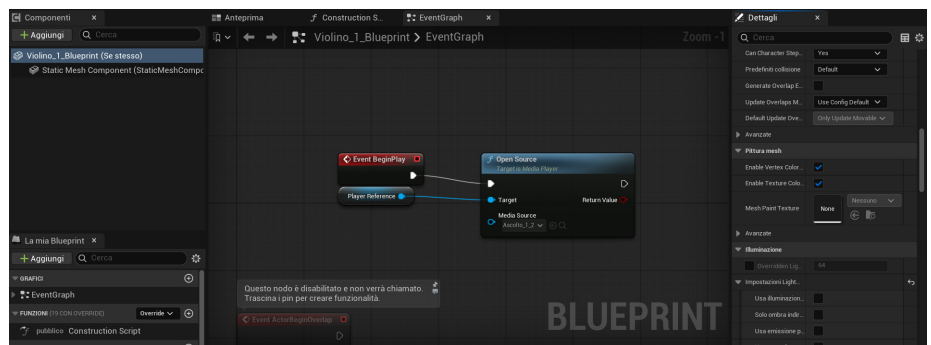
Contenuto di ogni cartella per la realizzazione della proiezione del video



Per garantire il massimo realismo cromatico, sono state generate delle Istanze di Materiale (Ascolto_1_player_Video_Mat_Inst), fondamentali per correggere il colorito distorto tipico dei file video grezzi quando processati dal sistema di illuminazione globale Lumen. Attraverso l'istanza è stato possibile calibrare con precisione parametri quali saturazione, contrasto e guadagno (Gain), restituendo al musicista un incarnato naturale e vibrante.

Infine, per ogni piano è stato sviluppato un Blueprint specifico (figura 60), concepito come l'interfaccia logica per collegare la componente visiva a quella acustica. All'interno dell'Event Graph, è stato implementato il nodo Open Source collegato all'evento BeginPlay, garantendo l'avvio automatico e sincronizzato del flusso video all'inizio della simulazione [28], [30], [29].

Figura 60 ►
Esempio di Blueprint relativo
al piano di riproduzione del
video



6.4 VRPawn

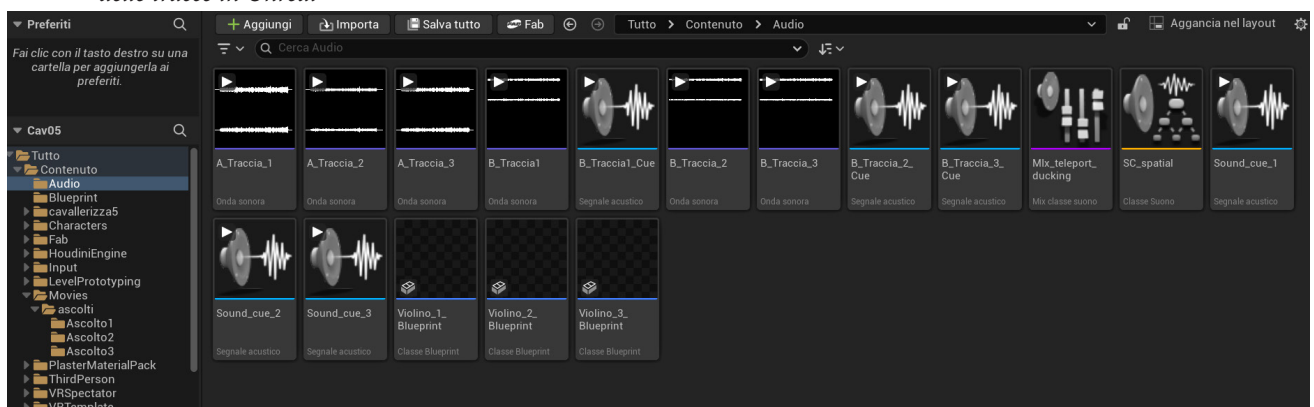
Nello sviluppo dell'ambiente virtuale per il Maneggio Alfieriano, il VRPawn è stato configurato come il fulcro operativo per la gestione della navigazione e della sincronizzazione.

L'actor Pawn è stato implementato come un'entità logica che coordina lo spostamento dell'utente tra diverse postazioni di osservazione fisse, ciascuna rappresentata da camere virtuali posizionate strategicamente nella scena.

In una fase preliminare, la validazione del sistema è stata verificata tramite tracce binaurali, poiché Unreal Engine 5 presenta dei limiti nella gestione del terzo ordine Ambisonico, che richiederebbe l'elaborazione di 16 canali simultanei, superando il limite standard di 8 canali per i singoli file audio importati [31].

All'interno del Content Browser, le sei tracce sono state organizzate e strutturate tramite l'uso di Sound Cue e Sound Class, permettendo un controllo centralizzato dei volumi attraverso un Sound Mix specifico [32] (figura 61).

*Figura 61 ▼
Impostazione di tutti gli audio
e le classi per la riproduzione
delle tracce in Unreal*



La logica del Blueprint all'interno del VRPawn (figura 62) è stata programmata per gestire la riproduzione simultanea e lo switching dinamico dei contenuti [33]. All'attivazione della simulazione, il sistema avvia automaticamente tutti i sei flussi audio, relative alle 6 casistiche indagate. Tuttavia, per garantire la coerenza spaziale, solo la traccia relativa alla posizione frontale di avvio rimane attiva, mentre le restanti vengono istantaneamente poste in stato di muto tramite il sistema di controllo logico [34] , [35].

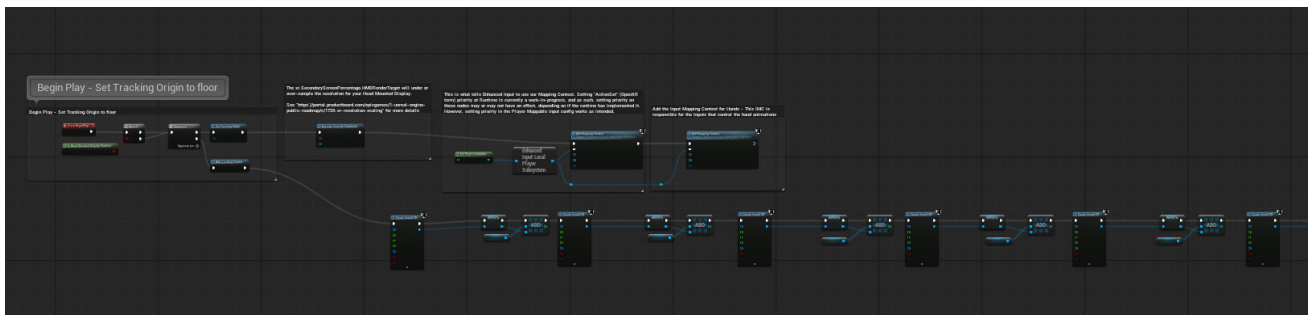


Figura 62 ▲

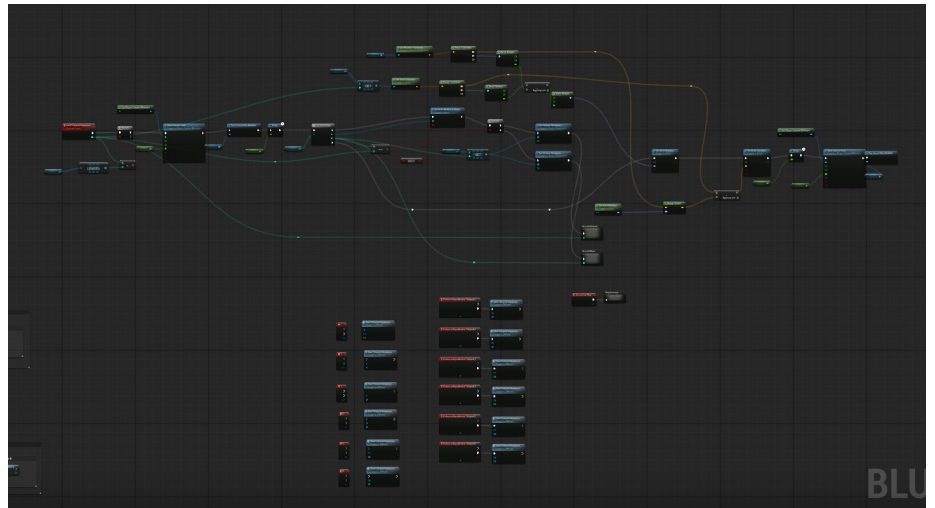
Schema dei nodi del VR Pawn personalizzato. Si evidenziano i blocchi di inizializzazione dell'hardware VR, la creazione dinamica di Audio Component persistenti e il sistema di controllo per lo switching istantaneo tra le tre postazioni di prova (Position 1, 2, 3).

Lo spostamento tra i punti di vista (Blink Teleport) è gestito da un comando di teletrasporto supportato da un effetto di fade-out (oscuramento dello schermo). Questo intermezzo visivo assolve a una doppia funzione di mitigare il disagio sensoriale causato dai cambi bruschi di prospettiva e consentire al sistema di eseguire lo switch audio.

Durante la transizione, la logica del Blueprint provvede a mutare la traccia della postazione precedente e a sbloccare esclusivamente quella relativa al nuovo punto di vista e allo specifico comando da tastiera selezionato [36].

Figura 63 ►

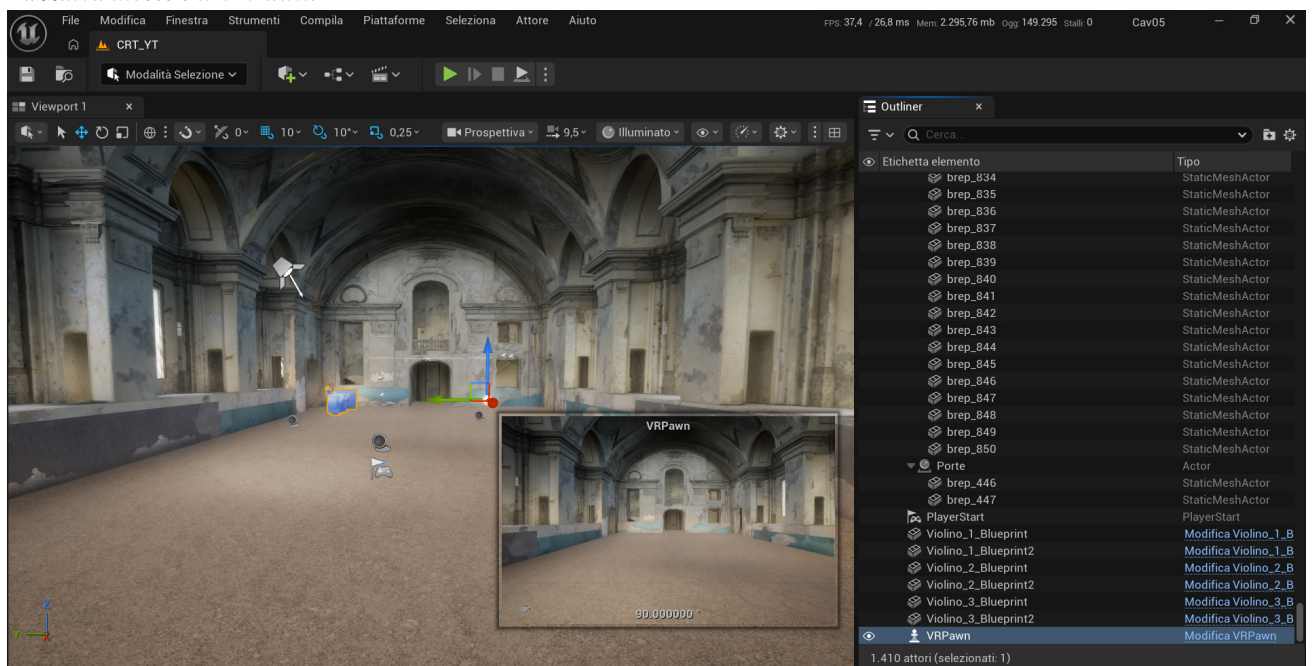
Algoritmo interattivo per la gestione delle transizioni tra postazioni di ascolto. Il Blueprint integra il controllo del feedback visivo (Blink Teleport), il ducking audio dinamico e la logica iterativa per la selezione selettiva degli stimoli auralizzati.



Il VRPawn è stato poi collegato a una matrice di sei camere virtuali (due per ogni punto di vista, per replicare i due casi studiati) (figura 64).

Figura 64 ▼

Le camere sono denominate cam 1,2, etc; la telecamera azzurra invece è il VRPawn.



L'utente può interagire con la simulazione tramite comandi da tastiera (tasti 1-6)(figura 65), che attivano istantaneamente la configurazione audio-visiva corrispondente. Questa logica garantisce una visualizzazione continua e una risposta uditiva realistica, permettendo all'osservatore di percepire immediatamente le differenze acustiche tra i due casi.

Figura 65 ►

Blueprint del teletrasporto attraverso i comandi da tastiera. Nella simulazione reale sono poi stati integrati con i comandi del controller dell'oculus.



6.5 Bidule

La simulazione è stata ulteriormente affinata per l'integrazione con l'hardware professionale dello SpaceLab del Politecnico di Torino.

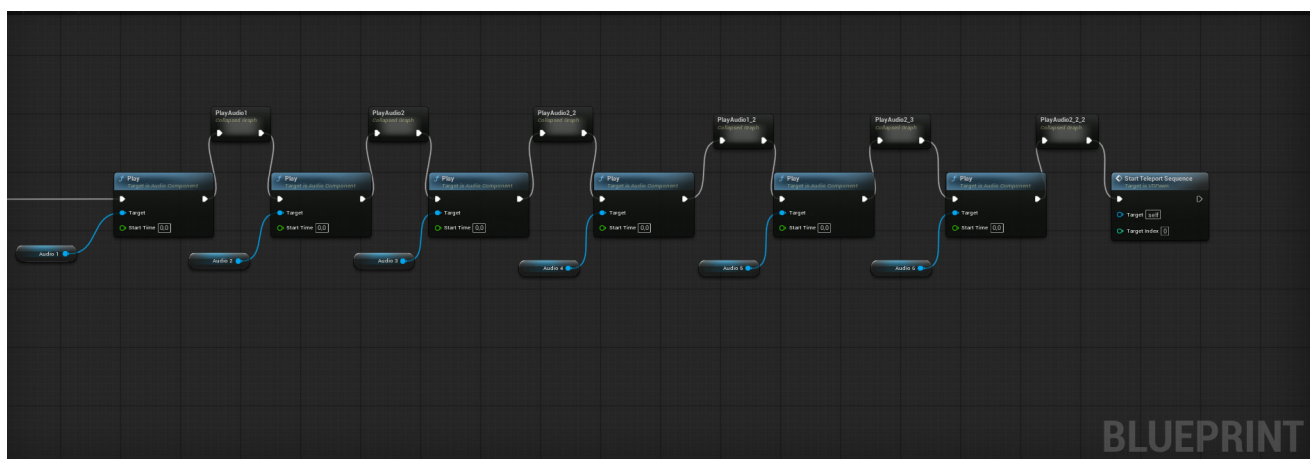
Unreal Engine 5 gestisce flussi audio fino a un massimo di 8 canali, mentre l'auralizzazione di terzo ordine utilizzata nella ricerca richiede l'elaborazione di 16 canali simultanei per una corretta ricostruzione del campo sonoro.

Per superare tale limite computazionale, la logica del segnale è stata delegata a un software esterno specializzato, Plogue Bidule. Quest'ultimo è un ambiente di sintesi e calcolo audio modulare che opera seguendo una logica a diagramma di flusso. Ogni nodo rappresenta una funzione specifica (lettori di file, matrici di guadagno, decodificatori Ambisonics) collegata attraverso cavi virtuali che trasportano il segnale multicanale verso le uscite fisiche della scheda audio [37].

Il coordinamento tra la visualizzazione in Unreal Engine e l'audio riprodotto da Bidule è stato risolto tramite l'implementazione del protocollo OSC (Open Sound Control) all'interno del Blueprint del VRPawn [38](figura 66,67).

Figura 66 ▼

Blueprint che trasporta il segnale da Unreal a Bidule per la riproduzione audio dopo l'avvio della simulazione.



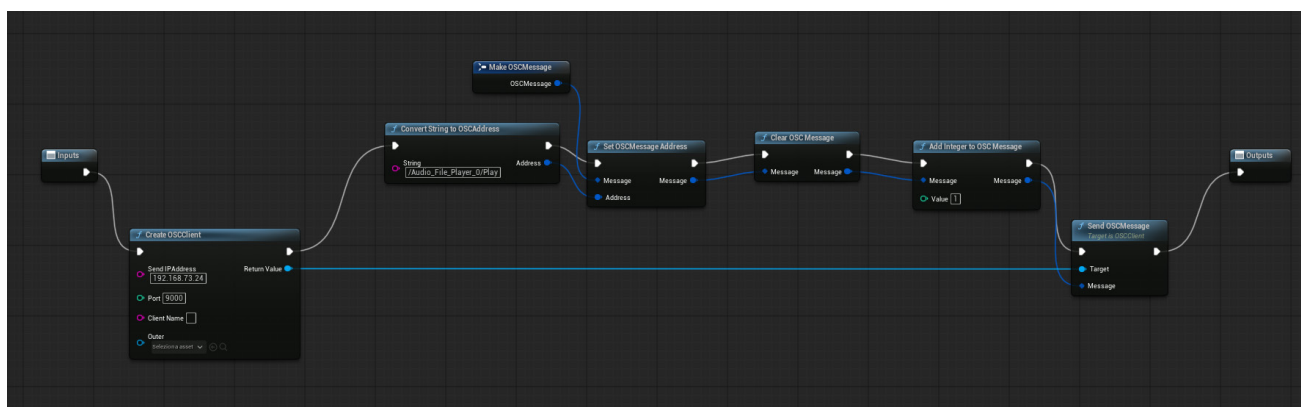


Figura 67 ▲

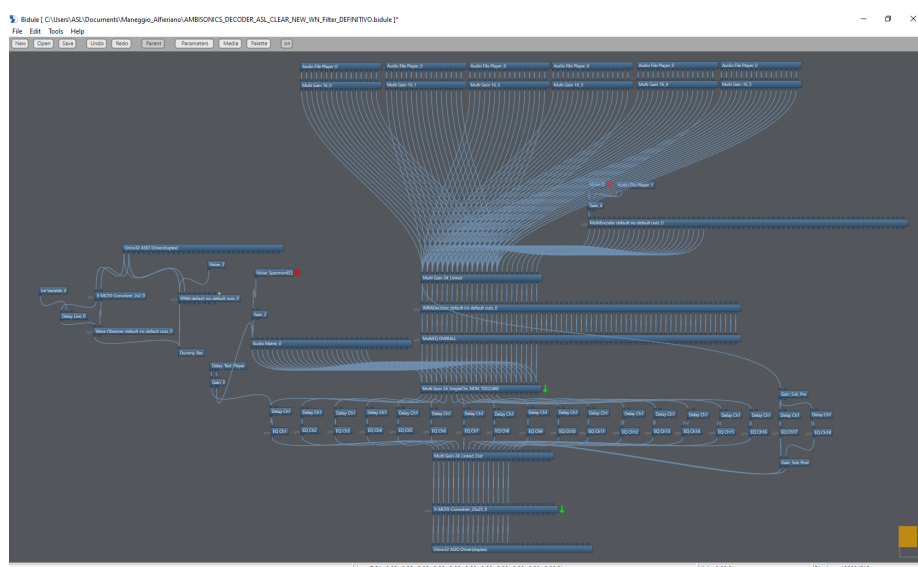
Dettaglio del nodo per trasmettere il segnale da Unreal a Bidule

Ogni volta che l'utente attiva un comando di teletrasporto tramite i tasti 1-6, il Blueprint genera un pacchetto di dati OSC. Questo messaggio viene inviato tramite rete locale all'indirizzo IP della workstation che esegue Bidule.

Il messaggio OSC contiene un indirizzo specifico (ad esempio /Audio_File_Player_0/Play) e un valore intero che indica quale traccia attivare. Bidule riceve il comando in tempo reale e istruisce i propri lettori multimediali interni per cambiare il segnale in uscita (figura 68).

Figura 68 ►

Rappresentazione grafica della logica a nodi in ambiente Plogue Bidule per la gestione e la riproduzione del segnale audio nel Laboratorio Ambisonico.



Questo workflow ha permesso di mantenere l'integrità scientifica dell'auralizzazione ad alta risoluzione, garantendo che lo spettatore all'interno dello SpaceLab percepisse un suono di terzo ordine perfettamente coerente con i movimenti e le scelte effettuate tramite il visore Oculus 2.

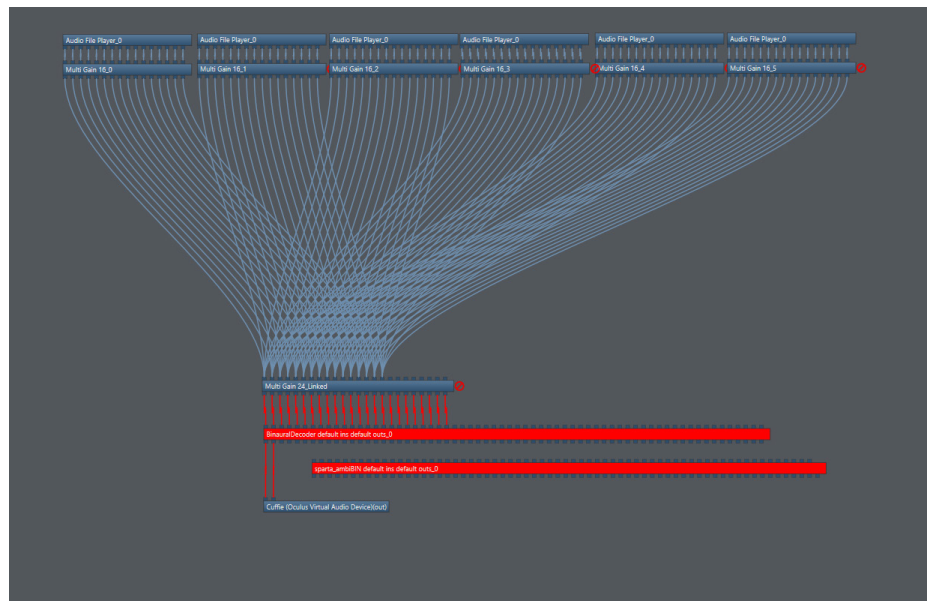
In sintesi, Bidule ha agito come il motore esterno della simulazione, permettendo al VRPawn di concentrarsi sulla gestione della logica immersiva e visiva senza i vincoli di campionamento canali imposti dal motore grafico.

Oltre al sistema di controllo per la diffusione sonora in laboratorio, il processo è stato esteso per consentire la fruizione binaurale in cuffia. Sfruttando il medesimo collegamento a 16 canali, è stato possibile implementare un sistema di head-tracking che garantisce un'esperienza immersiva paragonabile a quella del laboratorio spazializzato anche in contesti di ascolto individuale.

Grazie a questa integrazione, realizzata sempre tramite Blueprint interfacciati con Bidule, vengono trasmessi i dati relativi all'orientamento del visore: Yaw, Pitch e Roll. Questi parametri segnalano in tempo reale i movimenti della testa dell'utente al software esterno, permettendo alla decodifica binaurale di adattarsi dinamicamente. Tale approccio garantisce che il risultato sonoro in cuffia sia estremamente affidabile e coerente con la posizione spaziale degli oggetti virtuali.

Figura 69 ►

Rappresentazione della logica a nodi in ambiente Plogue Bidule per la gestione del segnale e della rotazione dei dati per il monitoraggio binaurale.



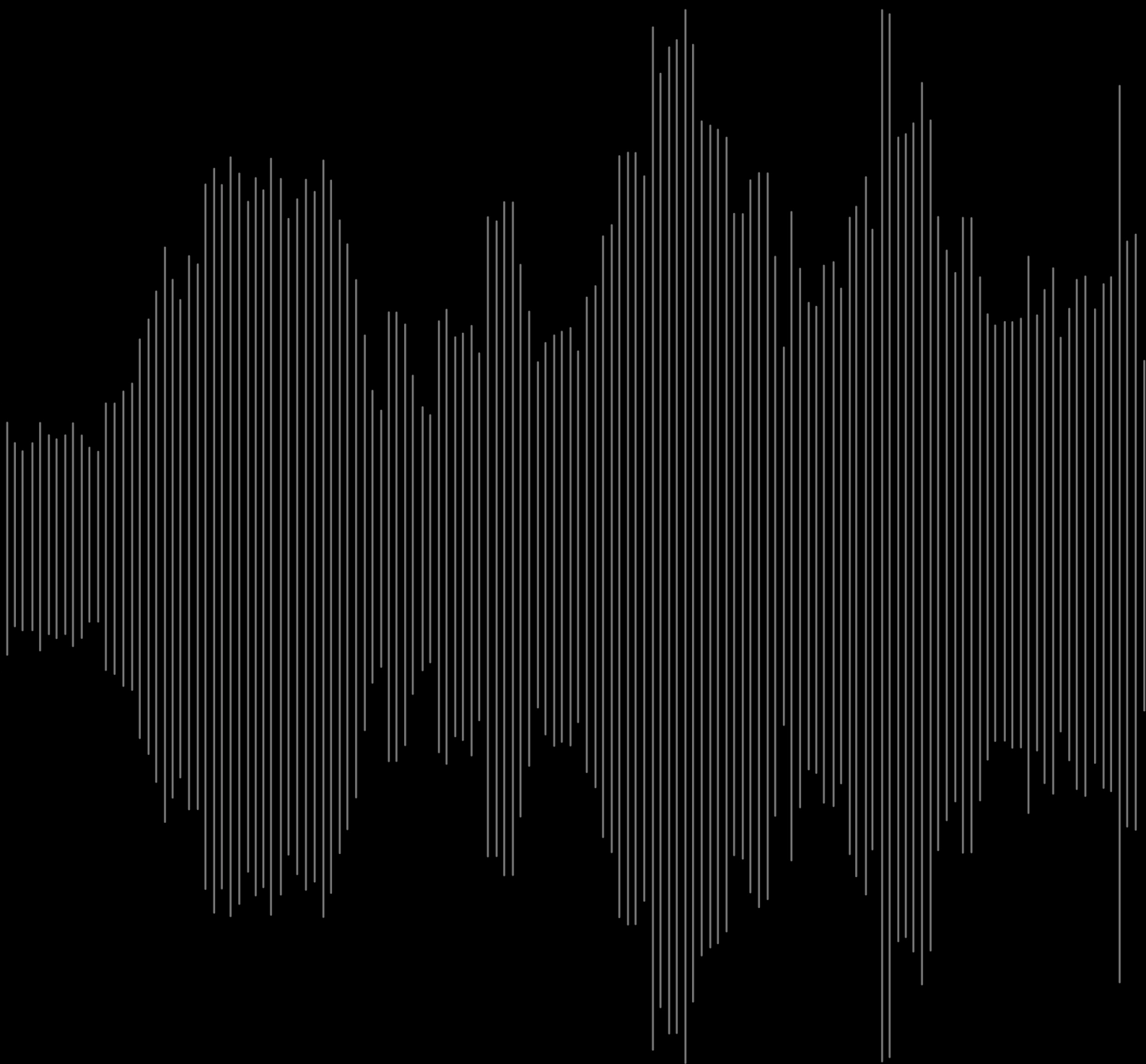
In sintesi, questo workflow ha permesso di mantenere l'integrità scientifica dell'auralizzazione ad alta risoluzione, assicurando che l'utente, sia tramite il sistema di altoparlanti dello SpaceLab, sia tramite cuffie con il visore Oculus 2, percepisca un campo sonoro di terzo ordine perfettamente coerente con i movimenti e le scelte effettuate nel mondo virtuale. Bidule ha operato come un motore di calcolo esterno, svincolando il VRPawn dai limiti di gestione canali del motore grafico e permettendogli di focalizzarsi esclusivamente sulla logica immersiva e visiva.



6.6 Configurazione Oculus

Al fine di abilitare la fruizione del modello architettonico tramite il visore Meta Quest 2, si è proceduto all'implementazione del framework OpenXR all'interno dell'ambiente di sviluppo Unreal Engine.

Partendo dal Third Person Template, sono state integrate le librerie specifiche per la realtà virtuale, garantendo l'interoperabilità tra l'ambiente hardware e il software di rendering tramite il protocollo Meta Quest Link [50]. La successiva fase di testing ha riguardato il sistema di locomozione: è stata implementata una logica di teletrasporto, verificata sia tramite input da tastiera che mediante l'utilizzo dei controller touch del visore [51]. Tale procedura di validazione è risultata determinante per confermare la stabilità del workflow e assicurare la corretta efficacia dell'esperienza immersiva durante le fasi di sviluppo.





07

Risultati

Il risultato della simulazione immersiva fornisce una risposta esauriente al quesito di ricerca, dimostrando come l'integrazione sonora nello spazio virtuale permetta di percepire chiaramente le sfumature e le variazioni acustiche al variare del punto di ascolto. L'esperienza evidenzia come il supporto visivo sia determinante poiché mentre l'ascolto delle sole tracce non permetteva di cogliere appieno le variazioni timbriche, l'interazione visiva all'interno del modello virtuale abilita una comprensione profonda della scena sonora.

Dal ricevitore 1 posto a 4 metri dal punto di visualizzazione, l'ascolto risulta nitido, uniforme e realistico. La coincidenza tra l'asse visivo e l'asse di emissione della sorgente (parallelo al microfono frontale utilizzato nella registrazione anecoica) garantisce una perfetta corrispondenza tra ciò che si osserva e ciò che si ode.

Passando al ricevitore laterale, punto 2 a 5 metri dal violinista, invece si avverte un incremento della complessità acustica; il suono appare meno diretto, ma il supporto visivo del movimento del violinista permette all'utente di associare correttamente i cambiamenti timbrici alla gestualità del musicista.

Il punto più critico è l'ultimo ricevitore, posteriore al violinista e posto a 6 metri. La distanza e l'elevato tempo di riverbero della sala rendono il segnale a tratti confuso. Sebbene la visuale sia parzialmente ostruita dal corpo del musicista, l'apertura delle braccia del performer funge da guida visiva per interpretare l'andamento della sinfonia nonostante la distorsione uditiva.

L'analisi comparativa tra le due metodologie ha rivelato differenze significative, riscontrabili principalmente nei punti di ascolto non frontali. In entrambi i casi, la traccia nel primo ricevitore appare estremamente chiara e definita, validando l'efficacia della calibrazione energetica iniziale.

Per quanto riguarda la qualità timbrica e spaziale, nel caso 1 il segnale è caratterizzato da una percezione di maggiore distanza e disturbo.

Essendo l'energia concentrata in un unico punto, la risposta impulsiva della sala tende a prevalere sul segnale diretto, rendendo l'ascolto più povero e meno definito.

Invece nel caso 2 sebbene la chiarezza non raggiunga i livelli del punto frontale, l'ascolto risulta più dolce e avvolgente. La distribuzione della potenza su quattro sorgenti vicine crea un fronte sonoro più ampio. Questo riduce la sensazione di sorgente puntiforme lontana, offrendo una spazializzazione più ricca che maschera parzialmente le criticità legate al riverbero eccessivo.

In conclusione, la ricerca dimostra che la modellazione tramite sorgenti composte (Caso 2) restituisce un'esperienza sonora più immersiva e completa, compensando la distanza fisica con una distribuzione energetica che meglio si adatta alla complessità architettonica del Maneggio.

Questo flusso di lavoro dimostra inoltre le potenzialità di una simulazione acustico-visiva integrata come strumento fondamentale per la valutazione a priori di interventi progettuali.

La ricerca apre dunque la strada all'utilizzo di laboratori esperienziali per i progettisti, permettendo di vagliare lo sviluppo futuro di spazi di qualsiasi dimensione e finalità attraverso una simulazione che sia al tempo stesso immersiva e rigorosa dal punto di vista dei dati fisici.

Inoltre è apparsa chiara la reale differenza tra le tracce solo nel momento in cui sono state integrate con il modello virtuale. Fino a quel momento non era emersa la piena consapevolezza di quanto le tracce fossero distinte e, in certi punti, confuse. Il solo ascolto, seppur supportato dai disegni in pianta di sorgenti e ricevitori, permetteva di percepire una variazione sonora, ma in maniera non così marcata. Al contrario, l'integrazione in Unreal Engine e la possibilità di osservare il musicista durante l'esecuzione hanno permesso di comprendere realmente le profonde differenze tra i tre punti di ascolto in funzione delle caratteristiche dell'ambiente.





08

Discussione

La ricerca condotta permette di analizzare criticamente la discrepanza tra il dato numerico oggettivo e la sensazione spaziale soggettiva. Sebbene un valore di T30 pari a circa 4 secondi risulti tecnicamente critico per l'esecuzione musicale, il processo di auralizzazione ha permesso agli utenti di percepire la maestosità volumetrica del Maneggio.

Un punto cruciale della riuscita della simulazione risiede nella coerenza energetica tra i due casi studio e quindi la corretta simulazione acustica. Nel punto di ascolto frontale (P1), il valore di SPL(Lin) risulta identico per entrambi i casi (70.3 dB), a dimostrazione che la strategia di scomposizione della potenza sonora (L_w) della sorgente singola (88.2 dB) in quattro sorgenti da 82.2 dB ciascuna è matematicamente corretta e preserva l'energia acustica totale nel campo diretto.

Nell'analisi comparativa tra il Caso 1 (sorgente singola) e il Caso 2 (sorgenti composte) ha evidenziato differenze percettive significative, specialmente nei ricevitori laterali (P2 e P3):

Mentre il Caso 1 restituisce una sensazione di sorgente puntiforme, a tratti percepita come "lontana" o "disturbata" dal riverbero, il Caso 2 offre un'esperienza sonora più dolce e avvolgente. La distribuzione spaziale della potenza su un fronte sonoro più ampio maschera parzialmente le criticità acustiche della sala, riducendo la percezione di un segnale secco e localizzato.

Nei punti più distanti (P3 a 6 metri), dove il tempo di riverbero (T30) prossimo ai 3 secondi tende a confondere il segnale, la configurazione multi-sorgente sembra garantire una migliore percezione sonora, mitigando la distorsione uditiva tipica degli ambienti storici monumentali.

Ma solo con l'analisi dell'esperienza immersiva è emerso chiaramente come la vista influenzi drasticamente il senso di scala.

Durante lo sviluppo del metodo è emerso che l'ascolto delle sole tracce auralizzate non permetteva di cogliere appieno le sfumature timbriche. L'integrazione nel motore grafico Unreal Engine ha invece abilitato

un'esperienza bimodale: la vista dei movimenti del violinista (il gesto dell'archetto o l'apertura delle braccia) agisce come un correttore cognitivo, permettendo al cervello di interpretare correttamente l'andamento musicale anche nel Punto 3, dove l'audio risulterebbe altrimenti eccessivamente confuso.

Inoltre la corrispondenza tra il piano visivo e l'asse microfonico frontale (parallelo al musicista) rende il Ricevitore 1 il punto di massima fedeltà, confermando l'importanza di allineare rigorosamente la geometria della registrazione anecoica con quella della visualizzazione virtuale.

Nonostante l'efficacia del modello, la distorsione uditiva rilevata a 5 e 6 metri evidenzia i limiti fisici dell'ambiente originale. La discussione suggerisce che, in contesti con riverbero elevato, la modellazione tramite sorgenti composte (Caso 2) sia preferibile per finalità di fruizione artistica e immersiva, poiché compensa la perdita di dettaglio con una maggiore ricchezza spaziale, rendendo l'esperienza meno faticosa per l'ascoltatore rispetto a una sorgente singola puramente puntiforme.





09

Conclusioni e sviluppi futuri

Il processo di simulazione e auralizzazione condotto nel presente studio permette di trarre conclusioni significative sull'efficacia della realtà virtuale applicata progettazione e al restauro di apparati architettonici. L'integrazione tra i dati acustici scientifici e l'ambiente immersivo ha dimostrato che la percezione di uno spazio non dipende esclusivamente dalla fedeltà del segnale audio, ma dalla complessa interazione tra stimoli uditivi e visivi.

Il confronto tra la sorgente singola (Caso 1) e il cluster di sorgenti composte (Caso 2) rappresenta uno dei risultati più rilevanti della tesi. Sebbene matematicamente equivalenti in termini di energia totale, le due configurazioni offrono esperienze d'ascolto diverse.

La Sorgente Natural (singola) tende a evidenziare le criticità acustiche della sala, restituendo un suono che nei punti distanti appare più secco e vulnerabile al riverbero.

La Sorgente Composta (Caso 2) genera un fronte sonoro distribuito che, all'ascolto, risulta più avvolgente. Questa configurazione compensa la distorsione uditiva causata dalle grandi dimensioni del Maneggio, offrendo un'esperienza meno affaticante per l'utente.

La discussione conferma come la vista sia un senso fondamentale per la validazione del progetto; infatti nel punto di ascolto più lontano, dove il riverbero elevato della sala renderebbe il messaggio musicale confuso, la visualizzazione dei movimenti del violinista permette di ricomporre l'esperienza sensoriale.

Questo suggerisce che, per ricostruzioni acustiche di ambienti storici complessi, l'accuratezza visiva del performer non è solo un elemento estetico, ma una necessità funzionale per la corretta decodifica del segnale sonoro.

La metodologia presentata in questa ricerca apre la strada a molteplici approfondimenti autonomi, volti a superare gli attuali limiti tecnologici e percettivi della simulazione.

Uno dei principali ambiti di sviluppo riguarda l'estensione del setup acustico.

In questa ricerca ci si è limitati a un numero discreto di punti di ascolto fissi, ma il sistema potrebbe evolvere verso una navigazione fisica continua dell'ambiente virtuale.

Questo salto qualitativo richiederebbe la creazione di una grid di Risposte all'Impulso (RIR) densa e interconnessa, ovvero un tappeto sonoro digitale capace di aggiornare i parametri acustici in tempo reale in base alla posizione (x, y, z) dell'utente.

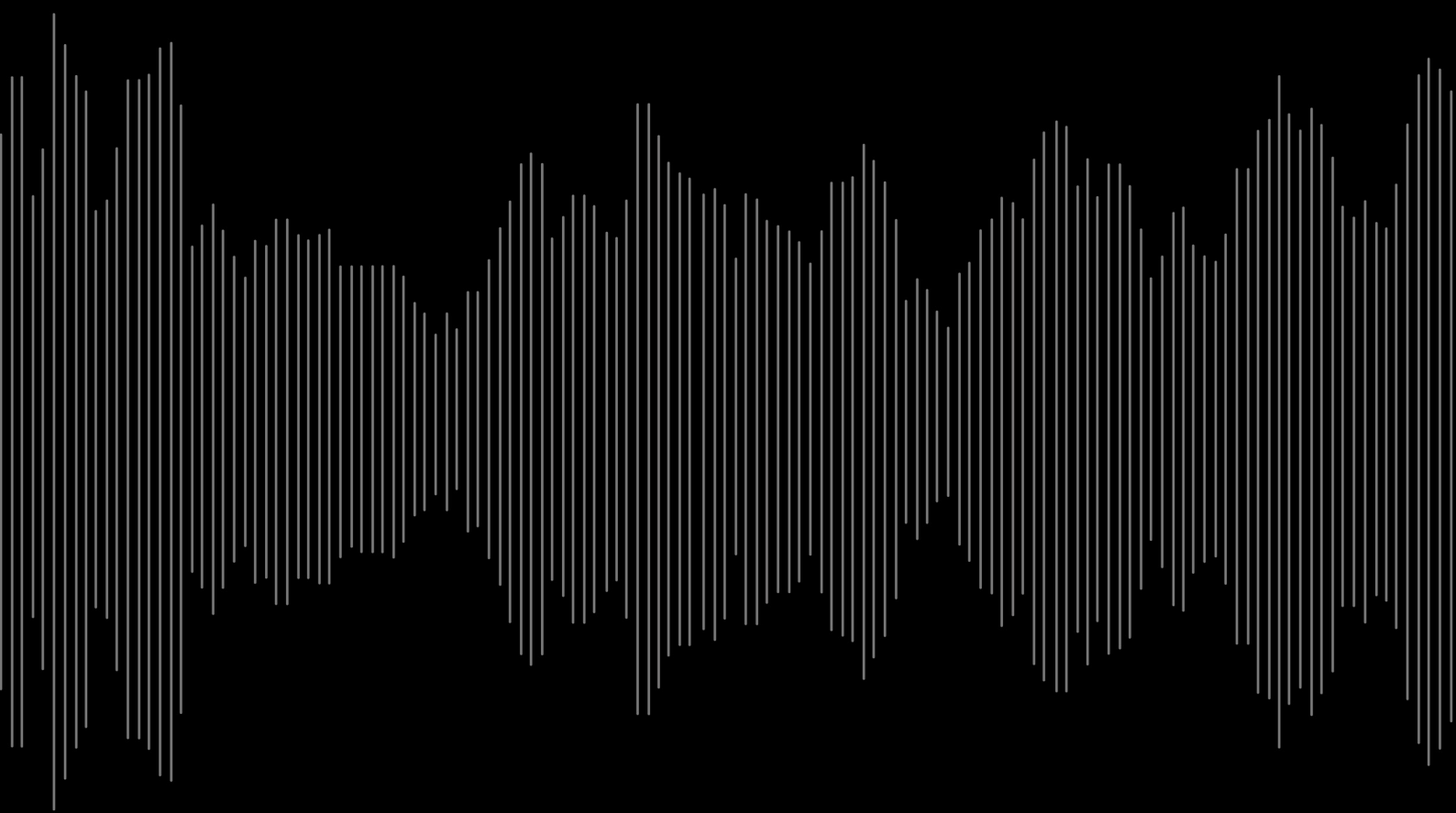
Tale approccio permetterebbe una navigazione 6DOF (Six Degrees of Freedom), dove il suono varia dinamicamente a ogni passo del fruitore, replicando con precisione millimetrica il comportamento dei fronti d'onda negli spazi reali.

Sul fronte dell'integrazione visiva, una frontiera di grande interesse è rappresentata dal superamento dei piani di proiezione tradizionali attraverso tecniche di cattura volumetrica. L'adozione del 4D Gaussian Splatting permetterebbe una ricostruzione digitale del musicista basata su una nuvola di punti densa (point cloud) dinamica.

A differenza dei video proiettati su superfici piane, questa tecnica modella il performer come un volume di particelle fotosensibili. Tale metodo consentirebbe una visualizzazione a 360°, eliminando la necessità di piani di riflessione predefiniti e garantendo la coerenza del punto di vista da qualsiasi angolazione.

L'integrazione di questa tecnologia permetterebbe di osservare il musicista con una profondità e una nitidezza superiori, rendendo l'esperienza immersiva nel Maneggio del tutto indistinguibile dalla realtà. La combinazione di una navigazione acustica fluida e di una presenza visiva volumetrica rappresenterebbe il completamento ideale per la valorizzazione del patrimonio architettonico e immateriale in chiave digitale.





Indice delle figure

Figura 1 - Immagine interna esemplificativa dei degradi superficiali delle componenti decorative.	9
Figura 2 - Immagine dell'interno del Maneggio alfieriano scattata durante il sopralluogo.	10
Figura 3 - Immagine interna del Maneggi.	10
Figura 4 - Musicista in camera anecoica durante la registrazione audio.	11
Figura 5 - Musicista nel VisionaryLab durante la registrazione video.	12
Figura 6 - Cavallerizza Reale. Fotografia di Paolo Mussat Sartor e Paolo Pellion di Persano, 2010. © MuseoTorino.	15
Figura 7 - Assonometria funzionale del complesso della Cavallerizza Reale, Presentazione della Fondazione Compagnia di San Paolo.	16
Figura 8 - Il complesso dell'Accademia e della Cavallerizza secondo il progetto di Amedeo di Castellamonte, 1674 (da Theatrum Sabaudiae, I).	17
Figura 9 _ Giuseppe Battista Piacenza, Rilievo del piano terreno del complesso della Cavallerizza, 1803 (Archivio di Stato di Torino, Palazzi reali).	17
Figura 10 -Benedetto Alfieri, Piante e sezioni di progetto della nuova Cavallerizza, 1763 (Archivio di Stato di Torino, Palazzi reali).	17
Figura 11 – Sala del Maneggio Alfieriano attrezzato come spazio teatrale.	18
Figura 12 – Immagine interna scattata durante il primo sopralluogo.	21

Figura 13 - sezione interna del Maneggio alfieriano; Tavola di progetto depositata al comune AR 03 - G - Stato di fatto - sezioni trasversali.	22
Figura 14 - interno del Maneggio Alfieriano, facciata di collegamento alle altre maniche del complesso.	23
Figura 15 - Interno del Maneggio Alfieriano, facciata di accesso.	23
Figura 16 - Andamento del tempo di riverberazione T30 in funzione della frequenza, misurato nella sala..	24
Figura 17 -Indicatori acustici energetici misurati secondo la norma ISO 3382 in diverse configurazioni sorgente-ricevitorie.	26
Figura 18 – Tavola di progetto depositata al comune, AR 03 - A - stato di fatto - planimetria piano terra e soppalchi.	27
Figura 19 - Prospettiva modello acustico realizzato in SketchUp.	27
Figura 20 - Prospettiva modello visivo realizzato in Rhinoceros 7.0.	27
Figura 21 – Planimetria Maneggio Alfieriano con punti di ascolto e sorgente.	28
Figura 22 - Immagine scattata con insta360 durante il sopralluogo.	30
Figura 23 - Microfoni, supporti per aste, calibratore e cavi utilizzati per le misure in camera anecoica.	31
Figura 24 - Microfoni utilizzati per le misure in camera anecoica.	31
Figura 25 - Setup camera anecoica.	31
Figura 26 - Setup completo VisionaryLab.	33
Figura 27 - Schema della variazione degli orientamenti in camera anecoica.	34
Figura 28 - Impostazione del set nel Visionary Lab.	35

Figura 29 - Assonometria modello di SketchUp importato su Odeon.	37
Figura 30 - Schema delle due metodologie prese in esame, al centro le due differenti sorgenti utilizzate.	40
Figura 31 - Tabella dei materiali utilizzati in Odeon.	41
Figura 32 - Schema caso 1, al centro del setup si evidenzia il pattern di direttività della sorgente scelta posta frontalmente rispetto al microfono 2.	43
Figura 33 - Sorgente Natural caso 1 in pianta.	44
Figura 34 - Lista di sorgenti e ricevitori caso 1.	45
Figura 35 - Interfaccia per la creazione dei job in Odeon, caso 1.	47
Figura 36 - Interfaccia dei comandi Convolver e Mixer, caso 1.	49
Figura 37 - Simulazione Ray Tracing (3D Investigate Rays) nel modello del Maneggio Alfieriano. Le linee fucsia indicano i cammini di riflessione calcolati da ODEON, necessari per generare la Risposta all'Impulso Binaurale (BRIR) e la successiva auralizzazione.	50
Figura 38 - Configurazione dei parametri di auralizzazione in ODEON.	51
Figura 39 - Impostazioni di esportazione in Audacity per il formato WAV multicanale.	52
Figura 40 - Mappatura personalizzata dei 16 canali in Audacity.	52
Figura 41 - Schema caso 2, al centro del setup si evidenzia il pattern di direttività delle sorgenti e la rotazione del violinista verso i punti predisposti.	53

Figura 42 - Sorgente ONE_QUARTER_OMNI_NO_BOTTOM, caso 2 in pianta.	55
Figura 43 - Odeon, visualizzazione dello strumento Point Source Editor che gestisce la direttività della sorgente sonora creata.	56
Figura 44 - Editor di una delle 4 sorgenti ONE_QUARTER_OMNI_ NO_BOTTOM	57
Figura 45 - Lista di sorgenti e ricevitori caso 2.	58
Figura 46 – Interfaccia per la creazione dei job in Odeon, caso 2.	59
Figura 47 - Interfaccia dei comandi Convolver e Mixer, caso 2.	60
Figura 48 – Odeon, Interfaccia della configurazione del mix per la convoluzione.	61
Figura 51 - Dettaglio della modellazione geometrica complessa in Rhino. La precisione del wireframe costituisce il fulcro per connettere il dato acustico rigoroso alla dinamicità dell'ambiente VR.	64
Figura 52 - Immagine di dettaglio di Rhinoceros.	66
Figura 53 - esempio di materiale scaricato dal Fab di Unreal Engine.	69
Figura 54 - immagine di riferimento per l'illuminazione interna.	70
Figura 55 - Actor dell'illuminazione presenti nella scena di Unreal.	71
Figura 56 – Immagine interna soggetta all'illuminazione.	71
Figura 57 -Schemi delle posizioni di ripresa nel VisionaryLab.	72
Figura 58 - Sezioni del Visionary Lab.	73
Figura 59 - Contenuto di ogni cartella per la realizzazione della proiezione del video.	74

Figura 60 - Esempio di Blueprint relativo al piano di riproduzione del video.	74
Figura 61 - Impostazione di tutti gli audio e le classi per la riproduzione delle tracce in Unreal.	76
Figura 62 - Schema dei nodi del VR Pawn personalizzato. Si evidenziano i blocchi di inizializzazione dell'hardware VR, la creazione dinamica di Audio Component persistenti e il sistema di controllo per lo switching istantaneo tra le tre postazioni di prova (Position 1, 2, 3).	77
Figura 63 - Algoritmo interattivo per la gestione delle transizioni tra postazioni di ascolto. Il Blueprint integra il controllo del feedback visivo (Blink Teleport), il ducking audio dinamico e la logica iterativa per la selezione selettiva degli stimoli auralizzati.	77
Figura 64 - Le camere sono denominate cam 1,2, etc; la telecamera azzurra invece è il VRPawn.	78
Figura 65 - Blueprint del teletrasporto attraverso i comandi da tastiera. Nella simulazione reale sono poi stati integrati con i comandi del controller dell'oculus.	78
Figura 66 - Blueprint che trasporta il segnale da Unreal a Bidule per la riproduzione audio dopo l'avvio della simulazione.	79
Figura 67 - Dettaglio del nodo per trasmettere il segnale da Unreal a Bidule.	80
Figura 68 - Rappresentazione grafica della logica a nodi in ambiente Plogue Bidule per la gestione e la riproduzione del segnale audio nel Laboratorio Ambisonico.	80

Figura 69 - Rappresentazione della logica a nodi in ambiente Plogue Bidule per la gestione del segnale e della rotazione dei dati per il monitoraggio binaurale.

82

Bibliografia

- [1] R. M. Schafer, *The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World*. [United States]: Distributed to the book trade in the United States by American International Distribution, 1977.
- [2] M. Kleiner, B. Dalenback, e P. Svensson, «Auralization - an Overview», *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 41, fasc. 11, pp. 861–875, nov. 1993.
- [3] «(PDF) Measuring musical instruments directivity patterns with scanning techniques», in ResearchGate, Consultato: 10 novembre 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.researchgate.net/publication/231186186_Measuring_musical_instruments_directivity_patterns_with_scanning_techniques.
- [4] *L'immagine incarnata. Immaginazione e immaginario in architettura* a €19,50. Libro di Juhani Pallasmaa Safarà Editore | Libreria Universitaria. Consultato: 4 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://www.libreriauniversitaria.it/immagine-incarnata-immaginazione-immaginario-architettura/libro/9788897561217>.
- [5] J. E. Summers, «Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, fasc. 6, pp. 4028–4029, giu. 2008, doi: 10.1121/1.2908264.
- [6] N. Bürger, H. Palleis, e W. Höhl, «Realtime Interactive Architectural Visualization using Unreal Engine 3.5», 2013, Unpublished. doi: 10.13140/RG.2.1.1744.1686.
- [7] «Gazzetta Ufficiale». Consultato: 3 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1997/12/22/97A10190/sg>.

- [8] «Gazzetta Ufficiale». Consultato: 3 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/08/06/22A04307/sg>.
- [9] «Beni culturali ambientale nel Comune di Torino Vol. 1». Consultato: 6 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://www.museotorino.it/resources/pdf/books/151/#300>.
- [10] O. link, Facebook, X, Pinterest, e A. app, «Storia della Cavallerizza Reale di Torino, Patrimonio dell'Umanità a rischio». Consultato: 6 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://rottasutorino.blogspot.com/2014/06/storia-della-cavallerizza-reale.html>.
- [11] «Cavallerizza Reale», Fondazione Compagnia di San Paolo. Consultato: 6 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://www.compagniadisanpaolo.it/it/progetti/cavallerizza-reale/>.
- [12] N. Srithammee, P. Pannattee, Y. Fukuchi, e N. Nishiuchi, «Investigating the Impact of Sound Design on User Experience in Virtual Reality», in 2025 17th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), Bangkok, Thailand: IEEE, feb. 2025, pp. 341–345. doi: 10.1109/kst65016.2025.11003277.
- [13] L. T. De Paolis e V. De Luca, «The effects of touchless interaction on usability and sense of presence in a virtual environment», *Virtual Real.*, vol. 26, fasc. 4, pp. 1551–1571, dic. 2022, doi: 10.1007/s10055-022-00647-1.
- [14] F. Otondo, J. H. Rindel, e K. Lyngby, «A New Method for the Radiation Representation of Musical Instruments in Auralizations», vol. 91, 2005.

- [15] J. Meyer, *Acoustics and the Performance of Music*. New York, NY: Springer New York, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-09517-2.
- [16] «ODEON Room Acoustics Software User Manual». Consultato: 24 novembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf>.
- [17] F. Otondo, J. H. Rindel, e K. Lyngby, «The Influence of the Directivity of Musical Instruments in a Room», vol. 90, 2004.
- [18] B. N. Postma e B. F. Katz, «Influence of visual rendering on the acoustic judgments of a theater auralization», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 141, fasc. 5_Supplement, pp. 3934–3934, mag. 2017, doi: 10.1121/1.4988901.
- [19] H. B. Firat, L. Maffei, e M. Masullo, «3D sound spatialization with game engines: the virtual acoustics performance of a game engine and a middleware for interactive audio design», *Virtual Real.*, vol. 26, fasc. 2, pp. 539–558, giu. 2022, doi: 10.1007/s10055-021-00589-0.
- [20] L. Piegl e W. Tiller, *The NURBS Book*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [21] Gediminas Kirdeikis, *Unreal Engine 5 for Architecture - Full Beginner Course*, (30 aprile 2023). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=bT8aSTkpkDY>.
- [22] «VR Template in Unreal Engine | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/vr-template-in-unreal-engine>.

- [24] «The OpenXR™ Specification». Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://registry.khronos.org/OpenXR/specs/1.0/html/xrspec.html>.
- [25] «XR Best Practices in Unreal Engine | Unreal Engine 5.0 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/xr-development>.
- [26] «Unreal Engine 5.7 Documentation | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community». Consultato: 5 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/unreal-engine-5-7-documentation>.
- [27] «Importing Datasmith Content into Unreal Engine | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 27 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/importing-datasmith-content-into-unreal-engine>.
- [28] Gediminas Kirdeikis, UE5 Tutorial: Material Basics | Unreal Engine 5, (7 marzo 2023). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=3IbYlcj9oiE>
- [29] pwnisher, Unreal Engine Materials in 6 Levels of Complexity, (11 maggio 2024). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=iZgbzwBQTPY>.

- [30] UNF Games, Unreal Engine 5 Beginner Modeling Tutorial - Learn to Model Inside Unreal!, (3 dicembre 2021). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=9InU0xbX7l0>.
- [31] Matt Aspland, How To Have The Real World Sun Position In Unreal Engine 5 (Tutorial), (11 luglio 2022). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=EVoHm0N3qYY>.
- [32] «Record and process face and body motion capture for Metahumans in Unreal Engine 5.6 | Community tutorial», Epic Games Developer. Consultato: 20 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/community/learning/tutorials/0zPa/record-and-process-face-and-body-motion-capture-for-metahumans-in-unreal-engine-5-6>.
- [33] Workbrand, How to Create a MetaHuman «Sheesh» Pose in Unreal Engine, (4 maggio 2021). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=iiXX34MZiZg>.
- [34] Unreal Katya Fedak, Mixamo To Metahuman EASIER Than Ever With Unreal Engine 5.4, (4 luglio 2024). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=SXtUd4Dyprw>.
- [35] Joey Lombardi, How to attach/parent objects to Metahumans in Unreal Engine 5.4 for Cinematics, (15 dicembre 2024). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: https://www.youtube.com/watch?v=GT_X5-A9x8g.

- [36] Y. Jiang et al., «RePerformer: Immersive Human-centric Volumetric Videos from Playback to Photoreal Reperformance», 2025, arXiv. doi: 10.48550/ARXIV.2503.12242.
- [37] WINBUSH, Key Green Screen Footage in Unreal Engine 5 - The Easy Way!, (13 febbraio 2024). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: https://www.youtube.com/watch?v=eIoM1op6o_w.
- [38] Pixel Prof, Unreal Engine Realtime Chroma Keying (In About a Minute), (14 marzo 2021). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=DgCFJPKzGEw>
- [39] «Media Framework in Unreal Engine | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/media-framework-in-unreal-engine>.
- [40] «Shading Models in Unreal Engine | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/shading-models-in-unreal-engine>.
- [41] «Play a Video File in Unreal Engine | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 20 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/play-a-video-file-in-unreal-engine>.
- [42] «Native Soundfield Ambisonics Rendering in Unreal Engine | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 20 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/native-soundfield-ambisonics-rendering-in-unreal-engine>.

- [43] «Sound Classes in Unreal Engine | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/sound-classes-in-unreal-engine>.
- [44] «Unreal Engine C++ API Reference | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/API>.
- [45] «Blueprint Arrays | Unreal Engine 4.27 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/unreal-engine-programming-and-scripting>.
- [46] «Unreal Engine 5 For Each Loop with Brake Blueprint Code | Easy Tutorial for Beginners #tutorial #ue5 | Community tutorial», Epic Games Developer. Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/community/learning/tutorials/yw4j/unreal-engine-5-for-each-loop-with-brake-blueprint-code-easy-tutorial-for-beginners-tutorial-ue5>.
- [47] «How to Enable Latent Actions in UObjects | Knowledge base», Epic Games Developer. Consultato: 23 dicembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/community/learning/knowledge-base/ZGGk/unreal-engine-how-to-enable-latent-actions-in-uobjects>.

- [48] «Bidule v0.9715 user manual». Consultato: 20 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://www.plogue.com/bidule/help/>.
- [49] «OSC Plugin Overview for Unreal Engine | Unreal Engine 5.7 Documentation | Epic Developer Community», Epic Games Developer. Consultato: 20 gennaio 2026. [Online]. Disponibile su: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/osc-plugin-overview-for-unreal-engine>.
- [50] GDXR, Installing Meta XR For Unreal Engine 5.3+, (24 novembre 2023). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=SOI07X5hGfQ>.
- [51] Dopekid, Add / Switching Multiple Camera in Unreal Engine 5| Beginners Tutorial | Cameras in Unreal Engine, (13 maggio 2023). Consultato: 1 febbraio 2026. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=EhiA2dwXDGM>.

