

Simulazione acustica di spazi antichi: problematiche e soluzioni*

Francesco Martellotta

Dipartimento di Architettura,
Costruzione e Design,
Politecnico di Bari,
Via Orabona, 4, 70125 Bari
francesco.martellotta@poliba.it

Ricevuto: 21/11/2022

Accettato: 23/12/2022

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14983

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

La ricostruzione acustica di spazi antichi, esistenti in condizioni molto diverse o non più esistenti, sta diventando un'attività sempre più diffusa in diversi campi di ricerca. La disponibilità di diversi software ha portato la simulazione acustica fuori dai laboratori specializzati e ha permesso a un pubblico molto più ampio di sfruttare le loro potenzialità. Tuttavia, come qualsiasi altro strumento di simulazione, l'affidabilità dei risultati deve essere attentamente valutata in quanto dipende da una serie di fattori relativi alla corretta conoscenza del processo di simulazione e delle caratteristiche dell'edificio da simulare.

Parole chiave: simulazione acustica, edifici storici, acustica geometrica

Acoustic simulation of ancient spaces: problems and solutions

Acoustical reconstruction of ancient spaces, existing in very different conditions or not existing anymore, is becoming an increasingly popular activity in different research fields. Availability of several softwares brought acoustic simulation out of specialized labs and made it possible for a much broader audience to take advantage of their potentials. However, like any other simulation tool, reliability of the results needs to be carefully pondered as it depends on a number of factors pertaining to proper knowledge of the simulation process and of the characteristics of the building to be simulated.

Keywords: acoustic simulation, ancient buildings, geometrical acoustics

1 | Introduzione

La simulazione acustica è diventata uno strumento ampiamente popolare per supportare la ricerca scientifica sin dalla pubblicazione del pionieristico lavoro di Krokstad et al. nel 1968 [2]. In quel documento sono state gettate le basi della simulazione acustica geometrica (AG), dimostrando che il ray tracing poteva essere utilizzato per calcolare la risposta impulsiva in luoghi chiusi. In sintesi, si spiegava il funzionamento del ray tracing acustico dicendo che: "la procedura di calcolo utilizza un modello matematico di una sala, che viene eccitata da un impulso sonoro emesso da una sorgente a punto fisso. L'energia è rappresentata da raggi equamente distribuiti sull'insieme o su una parte selezionata dell'angolo solido. La storia temporale di ogni raggio è calcolata assumendo riflessione geometrica su tutte le superfici, fino a quando il raggio colpisce l'area del pubblico dove si suppone essere totalmente assorbito. Sono calcolati sia il punto di impatto per tutti i raggi emessi sia il relativo ritardo temporale rispetto al suono diretto [2]".

Tuttavia, è stato all'inizio degli anni '90 che una serie di strumenti di modellazione sono diventati disponibili in commercio per il vasto pubblico e, da allora, numerosi articoli

scientifici hanno descritto i dettagli dei diversi algoritmi [3], mentre altri hanno confrontato la loro accuratezza [4-7], e le diverse fonti di incertezza [8]. Una panoramica approfondita dello stato dell'arte della simulazione acustica geometrica è stata riassunta da Savioja e Svensson nel 2015 [9], mentre negli ultimi anni sono apparsi sulla scena anche strumenti open source gratuiti, sia in forma di applicazioni stand-alone, sia come plug-in di software di modellazione tridimensionale.

Tuttavia, parallelamente allo sviluppo degli strumenti di simulazione basati sull'acustica geometrica, la crescente potenza computazionale, in particolare offerta dai processori multi-core e, soprattutto, dal calcolo parallelo tramite GPU, ha aperto la strada all'impiego, su intervalli di frequenza sempre più ampi, di tecniche di simulazione più hard-core come quelle basate sulla soluzione numerica dell'equazione d'onda, che, ai fini acustici, trova nell'approccio FDTD (Finite Difference Time Domain) il suo strumento ideale. Secondo questo approccio, la propagazione dell'onda sonora viene modellata discretizzando sia il dominio spaziale, sia quello temporale, risolvendo iterativamente, in maniera approssimata, le equazioni differenziali che ne sono alla base. Dai primi tentativi a bassa frequenza [10], questa tecnica può ora essere applicata all'intera gamma di frequenze [11-12], con applicazione specifica a quei casi in cui la diffrazione oppure gli effetti di focalizzazione giocano un ruolo importante [13]. Tuttavia, questi strumenti sono ancora utilizzati solo in ambito accademico. Altri metodi computazionali numerici basati su approccio FEM/BEM trovano applicazione sia in ambito di

* Il presente lavoro rappresenta la versione estesa e ampliata del contributo presentato in occasione del 2° Simposio sull'Acustica dei Teatri Antichi tenutosi a Verona dal 6 all'8 luglio 2022 [1].

ricerca sia nella pratica ma, essendo meno idonei a fornire la risposta temporale, si prestano meglio solo per analisi modali in bassa frequenza, tuttavia alcune applicazioni di queste tecniche al dominio temporale (TDFEM) incominciano ad essere indagate [14].

Man mano che gli strumenti di simulazione acustica sono diventati disponibili per un pubblico più ampio, sono emerse numerose potenziali applicazioni, dalla progettazione acustica degli spazi alle ricostruzioni di edifici non più esistenti o profondamente modificatisi nel corso del tempo (archeoacustica), ai mondi virtuali per l'industria dei giochi. Una ricerca su Google Scholar utilizzando "archeoacoustics" come parola chiave restituisce 993 documenti pubblicati, mentre prima del 2010 c'erano solo 79 articoli e prima del 2015 erano aumentati a 301. È sempre più evidente che l'idea che l'acustica sia un patrimonio culturale "intangibile" è ormai pienamente riconosciuta dalla comunità scientifica e il tema della ricostruzione archeo-acustica degli edifici sta diventando un tema mainstream per una comunità molto più ampia e interdisciplinare di ricercatori. Tuttavia, mentre ciò sta creando nuove opportunità di ricerca per la comunità degli acustici, allo stesso tempo solleva una serie di preoccupazioni sull'accuratezza e l'affidabilità di molte simulazioni quando vengono eseguite senza un'adeguata comprensione critica dei problemi acustici relativi sia agli algoritmi di simulazione sia alle tecniche di modellazione.

2 | Inconvenienti inerenti alla modellazione acustica geometrica

Le seguenti considerazioni si applicheranno alla modellazione acustica geometrica in quanto è lo strumento più diffuso e facilmente disponibile (sebbene, nella maggior parte dei casi, a un costo non trascurabile). La maggior parte dei software commerciali è stata migliorata rispetto alle prime versioni per includere strumenti di modellazione geometrica o, almeno, alcuni strumenti per importare la geometria da software di modellazione 3D di terze parti. Per gli utenti inesperti, il compito maggiormente gravoso è solitamente rappresentato dalla creazione del modello geometrico 3D che, nel peggiore dei casi, è solo un adattamento da un modello architettonico esistente e iper-dettagliato. Nel migliore dei casi, il modello è realizzato apposta, avendo chiaramente in mente le esigenze acustiche e la regola che "tutti i dettagli geometrici dovrebbero essere un ordine di grandezza maggiore della lunghezza d'onda più lunga di interesse nella simulazione, i dettagli più fini dovrebbero essere eliminati e le superfici appianate" [9]. Tuttavia, la questione di come dovrebbero essere trattati i dettagli e le corrispondenti superfici, rimane aperta, con potenziali implicazioni sulla scelta dei coefficienti di assorbimento e di scattering (vedi sotto).

Il problema del livello di dettaglio del modello è praticamente impossibile da risolvere in modo semplice, in quanto i poligoni, che devono essere grandi rispetto alle

lunghezze d'onda, per coprire la gamma di frequenze audio, richiedono una valutazione che si estende su tre ordini di grandezza (dai metri ai millimetri). È ben noto che un elevato livello di dettaglio comporterà tempi di calcolo inutilmente lunghi non compensati da alcun miglioramento nell'accuratezza dei risultati (se non, addirittura, da un peggioramento), dal momento che l'effetto prodotto degli elementi di dimensioni minori può essere meglio rappresentato modificando opportunamente i coefficienti di assorbimento e di scattering di una superficie più ampia. Infatti, una bassa risoluzione spaziale nel modello poligonale può comportare una risposta migliore sia alle basse frequenze sia nella parte delle riflessioni tardive, dove il decadimento è molto più influenzato dallo scattering superficiale piuttosto che dalle riflessioni speculari deterministiche di un modello poligonale dettagliato [8]. Un esempio di come una opportuna modificazione delle proprietà superficiali ha consentito di simulare adeguatamente l'effetto di elementi decorativi anche di grandi dimensioni è rappresentato dal caso della Basilica di San Pietro a Roma [15]. In tale simulazione (Fig. 1a), date le notevoli dimensioni dello spazio, anziché modellare nel dettaglio gli apparati scultorei e decorativi si è proceduto, basandosi sia sul confronto con altri edifici simili, sia su misure effettuate su modelli reali in scala degli elementi geometrici, ad incrementare sia i coefficienti di assorbimento, sia quelli di scattering. Le prove su modelli in scala avevano dimostrato infatti, che, rispetto alla proiezione in piano della stessa superficie, la presenza dei decori aumentava l'assorbimento dal 50% al 110%. I coefficienti di scattering sono stati quindi modificati in funzione della dimensione della decorazione rispetto alla lunghezza d'onda. L'accuratezza risultante nella previsione dei parametri è stata molto buona (Fig. 1b,c,d), con differenze puntuali generalmente al di sotto della soglia di percettibilità individuale (just noticeable difference, JND).

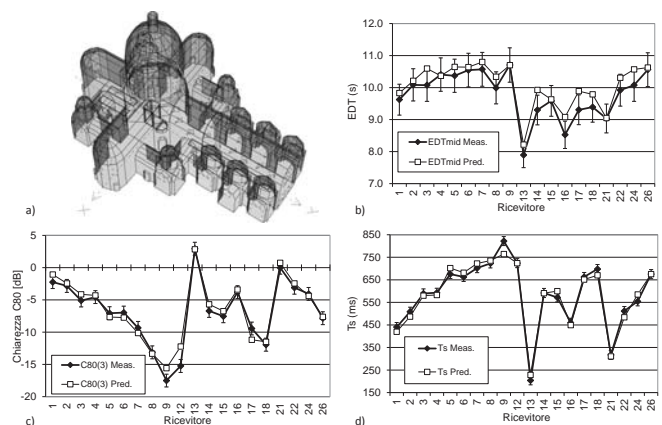


Fig. 1 – a) Modello acustico della Basilica di San Pietro in Roma; b) confronto dei valori misurati e predetti del tempo di primo decadimento EDT; c) confronto dei valori misurati e predetti di chiarezza C80; d) confronto dei valori misurati e predetti del tempo baricentrico Ts

a) Acoustic model of the Basilica of St. Peter's in Rome; b) comparison between measured and predicted EDT values; c) comparison between measured and predicted C80 values; d) Comparison between measured and predicted Ts values

A questo proposito, è interessante notare come, a differenza di quanto accade per i metodi AG, le tecniche FDTD potrebbero sembrare più immuni rispetto a queste problematiche legate al livello di dettaglio, dal momento che sarà l'onda stessa, interagendo con i dettagli geometrici della superficie, a determinare il modo in cui il suono sarà riflesso in funzione della frequenza. Tuttavia, anche in questo caso, la "voxelizzazione", ovvero la conversione di un volume 3D nel corrispondente modello reticolare, non è esente da problematiche, anche qui correlate al rapporto fra lunghezze d'onda e dimensione del reticolo e al rischio di avere superfici scaltate che possono indurre effetti diffrattivi non prevedibili, in particolare alle frequenze più alte [16], senza contare la necessità di conoscere in modo ancora più accurato le proprietà superficiali, come si vedrà di seguito. Inoltre, data la necessità di ridurre il passo della griglia di discretizzazione man mano che si eleva la più alta frequenza di interesse (legati insieme dal cosiddetto numero di Courant), con conseguente significativo incremento del carico computazionale, ne consegue che si rende spesso necessario trovare un compromesso fra la dimensione dell'ambiente da modellare e la frequenza massima di analisi e, conseguentemente, della dimensione degli elementi di dettaglio che sono modellabili.

Un altro problema che può talora influenzare in modo significativo l'accuratezza delle previsioni di un modello previsionale AG è legato a un corretto trattamento dei fenomeni di diffrazione che provocano la comparsa di onde di diffrazione che si propagano dai bordi del poligono. L'approccio che meglio si adatta alle simulazioni per l'acustica architettonica si basa sull'uso di sorgenti secondarie collocate in corrispondenza dei bordi, il quale consente sia lo studio di bordi finiti, sia di effetti di diffrazione di ordine superiore [17]. Tale approccio è stato implementato in alcuni strumenti di modellazione e permette di ottenere simulazioni più accurate e realistiche in presenza di ostacoli e array di riflettori [18].

Un'ultima questione strettamente correlata ad entrambe le precedenti è la discretizzazione di grandi superfici curve che sono approssimate da poligoni. Le superfici concave producono caratteristiche molto speciali come i punti focali che potrebbero non essere simulati correttamente se la superficie curva è discretizzata impiegando un numero di facce limitato, analogamente per le superfici convesse un numero insufficiente di piani può portare ad avere delle zone d'ombra dove il suono non è riflesso correttamente. In questi casi, possono verificarsi errori di simulazione anche se, apparentemente, il numero di raggi impiegati e le proprietà delle superfici sono impostati correttamente [8]. La corretta inclusione degli effetti di diffrazione ha anche dimostrato di poter produrre una risposta spaziale più uniforme, più simile a quella che si ottiene quando vengono utilizzati metodi basati sulle onde. Tuttavia, anche una attenta calibrazione del modello, confrontando le simulazioni con risultati misurati in sito, può aiutare a comprendere il giusto grado di dettaglio da adottare quando nelle simulazioni sono presenti superfici curve. A tale riguardo, nella simulazione acustica della chiesa della Santa

Famiglia a Grosseto [19], il confronto con le misurazioni è stato essenziale per individuare il grado di discretizzazione più idoneo (Figura 2).

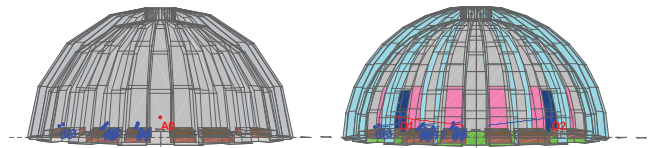


Fig. 2 – Confronto fra due modelli acustici della Chiesa della Santa Famiglia in Grosseto, realizzati adoperando una diversa risoluzione nella definizione delle superfici curve
Comparison between two acoustic models of the Church of the Holy Family in Grosseto, made using a different discretization approach in the definition of curved surfaces

Oltre ai problemi precedenti, che sono intrinsecamente associati ai metodi GA, è importante citare altri aspetti che dovrebbero essere meno rischiosi, in linea di principio, ma che potrebbero ugualmente dare origine a gravi imprecisioni se non adeguatamente impostati. La maggior parte degli strumenti condivide impostazioni simili come il numero di raggi o la durata della risposta all'impulso da simulare, oltre a impostazioni più specifiche (dalla scelta degli algoritmi, alla transizione dal metodo delle sorgenti immagine al ray tracing, ad altre opzioni non banali). Tutte queste impostazioni, a partire dal numero di raggi da emettere, richiedono che l'utente sia pienamente consapevole degli algoritmi che lavorano dietro le quinte e delle loro esigenze e limitazioni che altrimenti potrebbero influenzare fortemente i risultati e devono essere adattati al caso specifico in analisi per tenere conto della presenza di aperture, superfici curve, ecc. Gli spazi aperti o quelli che prevedono la presenza di grandi aperture, in particolare, richiedono l'utilizzo di molti più raggi per compensare la mancanza di riflessioni.

3 | Inconvenienti legati alla conoscenza delle proprietà superficiali dei materiali

In una simulazione acustica di un ambiente confinato, una simulazione accurata delle interazioni fra onda e superficie è essenziale per ottenere risultati affidabili, in particolare quando l'ambiente non soddisfa i requisiti ideali per il campo sonoro diffuso. Un'onda sonora che colpisce una superficie viene in parte assorbita e in parte riflessa. La riflessione può essere speculare o diffusa. Pertanto, in uno spazio riverberante, per ogni superficie è necessario conoscere i coefficienti di assorbimento e di scattering in funzione della frequenza.

Con riferimento al primo insieme di coefficienti, che apparentemente sono quelli che si possono trovare più facilmente in letteratura, schede tecniche e data set, occorre considerare una prima questione importante: i coefficienti di assorbimento usati nelle simulazioni AG esprimono il rapporto tra energia assorbita ed energia incidente in funzione della frequenza in condizioni di campo sonoro diffuso. Pertanto,

tali coefficienti non coincidono né con i coefficienti di assorbimento di Sabine in campo diffuso, misurati in applicazione della norma ISO 354 [20], né con i coefficienti di assorbimento di incidenza normale risultanti dall'applicazione della ISO 10534-2 [21]. Tuttavia, i primi sono generalmente utilizzati senza troppe preoccupazioni (a parte i casi in cui α_{sab} è maggiore di uno), e in diverse pubblicazioni, capita di trovare riferimenti anche i secondi, senza utilizzare formule di conversione appropriate per tener conto del passaggio da incidenza normale a incidenza diffusa. Chiaramente, nessuno degli approcci è teoricamente corretto ma le grandi incertezze che incidono sulle misurazioni dei coefficienti, unite alla pratica comune (possibile in presenza di misure dei parametri acustici architettonici dello spazio), di “calibrare” il modello con piccole progressive modifiche dei coefficienti di assorbimento, contribuiscono a limitare (o a rendere meno evidenti) gli errori che ne possono conseguire. Alcuni software consentirebbero anche di tener conto della dipendenza dei coefficienti di assorbimento dall'angolo di incidenza, ma l'uso di tale potenzialità richiede anche un approccio molto più sensibile e teoricamente consapevole delle proprietà superficiali, oltre ad una conoscenza molto più approfondita delle proprietà delle superfici. Infine, i coefficienti di assorbimento acustico sono solitamente disponibili per tipologie generiche di finiture o per materiali commerciali opportunamente certificati, mentre quando si modellano spazi esistenti (o non più esistenti), le informazioni sono molto più ridotte e i dati possono essere derivati solo da misurazioni dirette o da confronti con materiali generici similari. Inoltre, sarebbe importante conoscere anche la composizione stratigrafica di molte strutture, dal momento che il comportamento acustico non dipende solo dalle proprietà dello strato di finitura. La presenza di sottofondi, intercapedini e materiali diversi può modificare in misura rilevante il comportamento acustico e ciò può contribuire a rendere il compito di attribuire correttamente le proprietà acustiche, ancora più arduo, specie per utenti inesperti. Fortunatamente, la diffusione dei metodi di calcolo basati sulla matrice di trasferimento, rende oggi disponibili molti strumenti che consentono di calcolare i coefficienti di assorbimento di strutture anche complesse, anche tenendo conto delle loro effettive dimensioni, a condizione, però, che siano disponibili dettagli sulle proprietà dei materiali [22].

Con riferimento ai coefficienti di scattering, a parte alcune differenze esistenti tra gli strumenti di modellazione in termini di modalità di immissione dei dati, essi rappresentano la frazione di energia riflessa che non viene riflessa specularmente. Il modo in cui vengono gestite tali riflessioni diffuse dipende dall'algoritmo alla base del calcolo e può comportare un aumento significativo del carico computazionale, ma una corretta comprensione del modo in cui tali riflessioni vengono trattate da ciascun software è essenziale per adattarsi alle esigenze specifiche dello spazio modellato. Infatti, i metodi GA possono trattare le riflessioni diffuse come distribuite casualmente dal punto di impatto (cioè una quantità proporzionale di raggi riflessi viene inviata in direzioni casuali), trattarle in modo deterministico (cioè diffonderle effettivamente

in tutte le direzioni, ma questo aumenta significativamente il numero di raggi da gestire e, quindi, l'onere computazionale), oppure utilizzare tecniche per velocizzare il calcolo come l'approccio “pioggia diffusa”, dove viene verificata la visibilità di tutte le riflessioni diffuse rispetto ai ricevitori e ogni percorso visibile considerando l'angolo solido coperto dal ricevitore viene memorizzato [9]. Il modo in cui viene gestito lo scattering ha ovvie influenze in termini di accuratezza dei risultati [23], sia per la prima parte di una risposta all'impulso, sia sulla maggiore o minore diffusione del campo sonoro in spazi critici dove compaiono geometrie oblunghe oppure materiali fonoassorbenti concentrati solo su alcune superfici, pertanto, malgrado la maggiore difficoltà di trovare dati “pronti”, l'inserimento dei coefficienti di scattering va sempre effettuato con molta cura [24]. Inoltre, è stato dimostrato che lo scattering superficiale può avere effetti percepibili soggettivamente [25,26], quindi quando le simulazioni devono essere impiegate per l'auralizzazione dei segnali, è necessaria particolare cura nella selezione dei valori.

Di conseguenza, l'assegnazione di opportuni coefficienti di scattering alle superfici può diventare una parte rilevante della preparazione del modello acustico e anche una parte non banale. Infatti, oltre alle variazioni dipendenti dall'algoritmo, i coefficienti di scattering soffrono di una sostanziale mancanza di dati rispetto ai coefficienti di assorbimento. Nonostante l'esistenza di uno standard internazionale (ISO 17497-1[27]), il numero di dati misurati è limitato a “diffusori sonori” commerciali e relativamente pochi trattamenti di diffusione archetipici basati su geometrie semplici [28-29]. Negli altri casi è possibile utilizzare formule semplificate che tengano conto della rugosità della superficie, oppure modellare numericamente l'interazione fra l'onda e la forma della superficie [30]. In tutti i casi, appare una sostanziale dipendenza dall'esperienza e dalla sensibilità dell'utente, poiché i coefficienti di scattering possono influenzare il comportamento in campo diffuso di uno spazio, che, in particolare nelle geometrie meno diffondenti, può essere fortemente dipendente dalle proprietà superficiali.

Infine, come già anticipato, nella modellazione AG, è sempre necessario adattare i coefficienti di assorbimento e scattering al livello di dettaglio adottato, per cui i coefficienti di assorbimento e di scattering possono essere adeguatamente corretti per compensare ricche decorazioni e altre caratteristiche superficiali, purché questo processo derivi da ragionamenti e misure e non sia solo funzionale a conseguire una corrispondenza puramente numerica fra valori attesi e valori predetti, senza tenere nel debito conto la realtà fisica di quanto si sta modellando. Anche perché, un tale approccio, se anche funzionasse con riferimento al parametro prescelto per la verifica, cadrebbe sicuramente in difetto nell'analisi puntuale degli andamenti, motivo per cui è essenziale che questa venga condotta.

Anche su questo fronte, è interessante ragionare sulle potenzialità della modellazione FDTD a confronto con le tecniche AG. Nella prima, la capacità intrinseca di modellare le interazioni ondulatorie con le diverse forme delle superfici mi-

nimizza tutte le problematiche relative all'attribuzione dei coefficienti di scattering, mentre, per contro, in luogo dei coefficienti di assorbimento si rende necessario fornire l'impedenza complessa superficiale la quale può essere ottenuta mediante misure nel tubo ad onde stazionarie, oppure previo calcolo a partire dall'applicazione di modelli teorici o semi-empirici [31] che però possono richiedere la conoscenza di altri parametri come la resistenza al flusso. Come già visto nel caso della questione del livello di dettaglio, la modellazione FDTD apre la strada verso l'utilizzo di modelli geometrici potenzialmente più dettagliati di quelli richiesti dalla AG, compatibilmente con i range di frequenze a cui si è interessati, ma richiede certamente una maggiore padronanza dei fenomeni acustici al fine di caratterizzare opportunamente le superfici [32].

4 | Aspetti pratici della simulazione acustica

Date tutte le limitazioni e le incertezze di cui sopra, sembrerebbe difficile credere che la modellazione AG sia diventata così popolare. Infatti, dalla consulenza acustica, dove ha rappresentato un significativo passo avanti in termini di facilità ed efficienza dei costi rispetto ad altre tecniche di previsione, la modellazione AG è stata utilizzata anche nel campo della ricerca in acustica architettonica, solitamente a complemento delle misurazioni in sito. Infine, negli ultimi anni, tali strumenti sono stati spesso utilizzati negli studi umanistici (musicologia, archeologia, storia dell'arte, ecc.), soprattutto in conseguenza del riconoscimento del "suono" come patrimonio culturale immateriale e delle implicazioni che l'acustica può avere avuto su altri campi, con conseguente interesse per le ricostruzioni arqueo-acustiche di edifici non più esistenti o fortemente modificati nel corso del tempo.

Mentre quest'ultimo caso sarà discusso nell'ultima sezione, con tutti i suoi potenziali rischi, vale la pena sottolineare le buone pratiche necessarie per ottenere una simulazione acustica accurata. L'approccio più comune, almeno laddove ciò sia possibile (escludendo cioè il mondo della consulenza professionale dove non è possibile il confronto), è quello di partire prima da un modello "calibrato", dove la simulazione può essere confrontata con misure acustiche reali. Nel tempo, sono stati proposti diversi approcci per le fasi di calibrazione, con confronti più o meno accurati a seconda sia della quantità di dati disponibili che dello scopo del confronto.

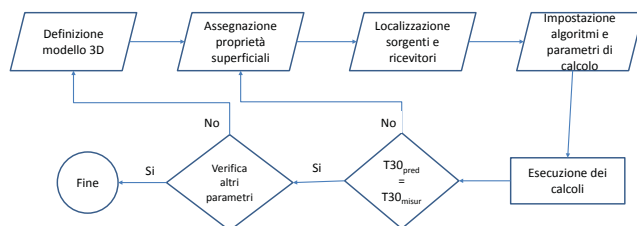


Fig. 3 – Diagramma di flusso del tipico processo di calibrazione di un modello acustico
Flow chart representing a typical calibration process for an acoustic model

Un approccio usuale [33], tipicamente utilizzato in ampi spazi con una geometria sufficientemente diffondente (Fig. 3), presuppone che i coefficienti di scattering siano attribuiti in base alla rugosità delle superfici, quindi i coefficienti di assorbimento, dopo una prima assegnazione basata su dati di letteratura, possono essere modificati iterativamente (principalmente a partire da quelli con più incertezze), fino a quando il tempo di riverberazione mediato spazialmente non corrisponde alle misurazioni. A questo punto, viene eseguita un'analisi più raffinata del modello per avere un accordo punto per punto su parametri spazialmente dipendenti come chiarezza, tempo centrale, ecc. Gli errori di previsione vengono poi confrontati con i valori soglia di JND, in modo da ottenere i valori più piccoli possibili.

Nel caso in cui si vogliono utilizzare le simulazioni acustiche per la generazione di scenari sonori tridimensionali, l'affinamento della corrispondenza fra simulazioni e misure, può essere spinto anche al punto di verificare non soltanto la corrispondenza fra i valori dei parametri, ma anche la sovrapposibilità delle risposte all'impulso e delle direzioni di provenienza delle riflessioni. Ad esempio, nella simulazione acustica della chiesa Dives Misericordiae a Roma [34] è stato impiegato proprio tale approccio, evidenziando che i pattern delle riflessioni misurati e simulati sono simili (Figura 4), con le riflessioni principali che provengono dalla stessa direzione e arrivano nello stesso tempo, con l'unica differenza rilevante rappresentata da riflessioni molto più diffuse nelle risposte misurate. I ricevitori che si trovano più lontano dalla sorgente, come il ricevitore 07, hanno schemi di riflessione più ricchi, il che potrebbe suggerire un rischio maggiore di imprecisione. Tuttavia, la maggior parte delle riflessioni più forti (rif. 2, 4 e 5) appaiono simulati correttamente, mentre alcuni altri appaiono a volte ritardati e/o provenienti da altre direzioni o semplicemente non compaiono.

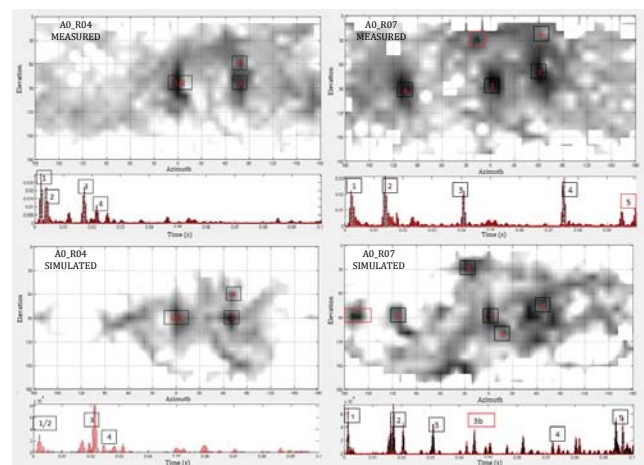


Figura 4. Mappe direzionali e risposte impulsive misurate e simulate con riferimento alla chiesa Dives Misericordiae in Roma
Directional maps and early impulse responses measured and simulated in the church Dives in Misericordiae in Rome

Postma e Katz [35] hanno successivamente proposto un approccio che implica uno studio preliminare della sensibilità del modello geometrico alle variazioni dei coefficienti di scattering, ottenuta impostando tutti i coefficienti di scattering

prima a 0%, poi a 99 %, senza modificare i coefficienti di assorbimento, in modo da comprendere l'influenza di questo parametro sul modello. Quindi, la regolazione delle proprietà della superficie segue un processo sostanzialmente simile a quello descritto nel caso precedente, in modo da ridurre al minimo la deviazione standard delle differenze fra coppie di parametri simulati e misurati per quanto riguarda riverberazione e chiarezza. Allo scopo di eliminare ulteriori elementi di incertezza gli stessi autori raccomandano l'impiego del medesimo software per il calcolo dei parametri acustici. Altri autori, hanno recentemente proposto anche l'impiego di tecniche di ottimizzazione per rendere il risultato meno dipendente dalle scelte dell'utente [36].

Una volta che tali processi di calibrazione sono stati eseguiti con successo, diventa molto più semplice utilizzare il modello AG per studiare altre posizioni di sorgenti o ricevitori, per studiare l'effetto dell'occupazione o dei cambiamenti nelle finiture superficiali o nell'articolazione volumetrica (ad esempio per studiare fasi costruttive precedenti). Al contrario, senza un riferimento solido, i risultati possono discostarsi notevolmente dalla realtà.

5 | Problematiche inerenti alla modellazione di edifici non esistenti

Come detto in precedenza, gran parte dei recenti studi in campo archeoacustico si basano su simulazioni AG di spazi in qualche modo ricostruiti, facendo ipotesi sulla geometria e, ancora più importante per tutte le possibili implicazioni acustiche, sulle finiture superficiali. I risultati acustici saranno influenzati da quelle ipotesi che, almeno, devono essere espresse in modo molto chiaro per garantire la ripetibilità. E, in ogni caso, rappresenteranno solo uno dei tanti possibili (e altrettanto probabili) scenari. Acusticamente parlando, si potrebbero effettuare misurazioni delle proprietà superficiali su frammenti eventualmente ancora esistenti o su edifici di epoca simile, in modo da corroborare le scelte con dati più affidabili.

Con riferimento alla geometria dello spazio, la questione ha implicazioni certamente molto più ampie in altri campi e, qualunque sia la forma che verrà finalmente adottata, dovrà risultare da ricerche storiche, artistiche e archivistiche e dall'aver ottenuto una sorta di consenso nella comunità scientifica di riferimento. Tuttavia, in termini di effetti acustici, anche supponendo che la geometria sia correttamente convertita per gli utilizzi acustici con il livello di dettaglio appropriato, c'è ancora molto da definire prima di poter ottenere una simulazione affidabile.

Per avere risultati affidabili si potrebbe partire da un edificio esistente dove si potrebbero effettuare misurazioni (ove già non fossero disponibili in letteratura), che abbia caratteristiche comparabili a quello da simulare sia in termini geometrici, sia di epoca storica e materiali impiegati. In questo modo si potrebbe effettuare una calibrazione preliminare ed ogni successiva variazione nella forma o nelle proprietà dei materiali potrebbe restituire risultati più convincenti. Ove fossero

disponibili informazioni sulle finiture superficiali, compresi strati sottostanti, si potrebbe ipotizzare di ricostruirne un campione per poter effettuare dei test, ad esempio in tubo ad onde stazionarie, ottenendo una base di partenza scientificamente più solida. In tal senso, è possibile anche impiegare tecniche di misurazione del coefficiente di assorbimento in situ, non distruttive (basate sulla ISO 13472-1[37]) e potrebbero essere utilizzate per testare superfici esistenti aventi caratteristiche confrontabili con le superfici da modellare. Il metodo non è immune da incertezze ma potrebbe certamente contribuire ad avere una più solida base da cui partire. Le misurazioni in situ possono anche essere ottenute utilizzando un approccio indiretto, come nelle camere riverberanti, nel caso in cui il campione di materiale possa essere spostato facilmente [38].

Infine, nel caso in cui nessuno degli approcci precedenti possa essere utilizzato, potrebbe essere utile includere nelle simulazioni una sorta di analisi di sensibilità che mostri la gamma di possibili variazioni a seguito di ragionevoli variazioni delle proprietà dei materiali. Un approccio del genere potrebbe onestamente dichiarare i limiti di ogni studio, consentendo anche al lettore (e agli stessi ricercatori) di trarre conclusioni che coprono almeno una più ampia gamma di possibilità e non solo una sola scelta, potenzialmente arbitraria. Ovviamente ciò va fatto presupponendo che tutte le altre criticità discusse prima siano state affrontate nel miglior modo possibile e che le modalità con cui la simulazione è stata condotta siano state dichiarate espressamente, magari condividendo i dati di partenza, per assicurare la ripetibilità dei risultati.

6 | Conclusioni

In questo lavoro sono state presentate le principali limitazioni della simulazione acustica geometrica, che vanno da quelle intrinsecamente dovute agli algoritmi di simulazione, a quelle più legate ad una corretta conoscenza delle proprietà dei materiali e delle superfici. I coefficienti di assorbimento e di scattering devono essere assegnati con criterio, possibilmente tenendo conto anche delle semplificazioni geometriche. Con riferimento agli edifici non più esistenti, trovare edifici esistenti o trattamenti superficiali che potrebbero essere utilizzati come riferimento per calibrare i modelli è essenziale per ottenere risultati più affidabili, altrimenti dovrebbero essere indicati intervalli di incertezza adeguati per tenere conto della mancanza di informazioni.

Conclusions

In this work the main limitations of geometric acoustic simulation have been presented, ranging from those intrinsically due to the simulation algorithms, to those more related to a correct knowledge of the properties of materials and surfaces. The absorption and scattering coefficients must be assigned carefully, possibly also taking into account the underlying geometric simplifications.

With reference to no longer existing buildings, it is essential to find existing buildings or surface treatments that could be used as a reference to calibrate the models and obtain more reliable results, otherwise uncertainty ranges should be indicated to account for the lack of more precise information.

Bibliografia

- [1] F. Martellotta, Caveats and pitfalls in acoustic simulation of non-existing buildings, Proc. 2nd International Symposium on The Acoustics of Ancient Theatres (SAT) – 6-8 July 2022, Verona.
- [2] A. Krokstad, S. Strøm, and S. Sørsdal, Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique, *J. Sound Vib.* 8(1), 118–125. 1968. doi.org/10.1016/0022-460X(68)90198-3.
- [3] U.P. Svensson and U. Kristiansen, Computational modelling and simulation of acoustic spaces, in Proc. of the AES 22nd Conf. on Virtual, Synthetic Entertainment Audio, Espoo, Finland (2002), pp. 11-30.
- [4] M. Vorlander, International round robin on room acoustical computer simulations, in Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway (1995), pp. 689-692.
- [5] I. Bork, A comparison of room simulation software – The 2nd round robin on room acoustical computer simulation, *Acta Acust. Acust.* 86(6), 943–956 (2000).
- [6] I. Bork, Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation– Part II: Calculations, *Acta Acust. Acust.* 91(4), 753–763, 2005.
- [7] F. Brinkmann, L. Aspöck, D. Ackermann, S. Lepa, M. Vorländer, S. Weinzierl, S. A round robin on room acoustical simulation and auralization, *J. Acoust. Soc. Am.*, 145(4), 2746-2760, 2019. doi.org/10.1121/1.5096178.
- [8] M. Vorlander, Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties, *J. Acoust. Soc. Am.* 133(3), 1203–1213, 2013. doi.org/10.1121/1.4788978.
- [9] L. Savioja, P. Svensson, Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(2), 708-730, 2015. doi.org/10.1121/1.4926438.
- [10] D. Botteldooren, Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems, *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, (6), 3302-3308, 1995. doi.org/10.1121/1.413817.
- [11] K. Kowalczyk and M. van Walstijn, Room acoustics simulation using 3-D compact explicit FDTD schemes, *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.* 19(1), 34-46, 2011. DOI: 10.1109/TASL.2010.2045179.
- [12] B. Hamilton, C.J. Webb, N. Fletcher and S. Bilbao, Finite difference room acoustics simulation with general impedance boundaries and viscothermal losses in air: Parallel implementation on multiple GPUs, In Proc. ISRA, 52, 2016.
- [13] G. Fratoni, B. Hamilton and D. D’Orazio, Rediscovering the Acoustics of a XII-Century Rotunda through FDTD Simulation, 2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA), 2021, pp.1-8. DOI: 10.1109/I3DA48870.2021.9610967.
- [14] T. Okuzono, T. Otsuru, R. Tomiku, N. Okamoto, Fundamental accuracy of time domain finite element method for sound field analysis of rooms, *Appl Acoust.* 71 (10), 940-946, 2010. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108212.
- [15] F. Martellotta, Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter’s Basilica in Rome, *J. Acoust. Soc. Am.* 126 1175:1186, 2009. DOI: 10.1121/1.3192346.
- [16] S. Prepelitá, M. Geronazzo, F. Avanzini, and L. Savioja, Influence of voxelization on finite difference time domain simulations of head-related transfer functions, *J. Acoust. Soc. Am.* 139(5), 2489–2504, 2016. doi.org/10.1121/1.4947546.
- [17] U.P. Svensson, R.I. Fred, and J. Vanderkooy, An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses, *J. Acoust. Soc. Am.* 106, 2331–2344, 1999. doi.org/10.1121/1.428071.
- [18] T. Lokki, V. Pulkki, P. T. Calamia, Measurement and Modeling of Diffraction From an Edge of a Thin Panel, *Appl. Acoust.* 69, 824–832, 2008, doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.05.005.
- [19] F. Martellotta, M. D’Alba, U. Ayr, Acoustic problems in a large hemispherical concrete church, Proc. EuroNoise 2018, Crete 27-31 May 2018.
- [20] ISO 354:2003. Acoustics: Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room. ISO, Geneva, 2003.
- [21] ISO 10534-2:1998, Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method, ISO, Geneva, 1998.
- [22] D. Rhazi, N. Atalla, A simple method to account for size effects in the transfer matrix method. *JASA Express Letters.*, 127(2), EL30 – EL36, 2010, doi.org/10.1121/1.3280237.
- [23] X. Zhu, J. Kang, H. Ma, The impact of surface scattering on reverberation time in differently shaped spaces. *Applied Sciences*, 10(14), 4880, 2020, doi.org/10.3390/app10144880.
- [24] H. Autio, N.G. Vardaxis, D.B. Hagberg, The Influence of Different Scattering Algorithms on Room Acoustic Simulations in Rectangular Rooms. *Buildings* 11, 414, 2021. doi.org/10.3390/buildings11090414.
- [25] L. Shtrepi, A. Astolfi, S. Pelzer, R. Vitale, M. Rychtáriková, Objective and perceptual assessment of the scattered sound field in a simulated concert hall. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(3), 1485-1497, 2015, doi.org/10.1121/1.4929743.
- [26] C. Visentin, M. Pellegatti, N. Prodi, Effects of multiple early diffuse reflections on spatial percepts, *J. Acoust. Soc. Am.*, 150 (4), pp. 2999 – 3010, 2021, DOI: 10.1121/10.0006744.
- [27] ISO 17497-1:2004, Acoustics -- Sound-scattering properties of surfaces -- Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, ISO, Geneva, 2004.
- [28] T.J. Cox, P. D’Antonio, Acoustic Absorbers and Diffusers, 3rd ed.; Taylor & Francis Group, USA, 2017.
- [29] M. Vorlander, Auralization. Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality, 1st ed. (Springer, Berlin, 2020).
- [30] J. Redondo, R. Picó, M.R. Avis, T.J. Cox, Prediction of the Random-Incidence Scattering Coefficient Using a FDTD Scheme, *Acta Acustica united with Acustica*, 95(6), 1040-1047, 2009, doi.org/10.3813/AAA.918236.
- [31] M. Cingolani, G. Fratoni, L. Barbaresi, D. D’Orazio, B. Hamilton, M. Garai, A Trial Acoustic Improvement in a Lecture Hall with MPP Sound Absorbers and FDTD Acoustic Simulations. *Appl. Sci.* 2021, 11, 2445, doi.org/10.3390/app11062445.
- [32] G. Fratoni, B. Hamilton, D. D’Orazio, Feasibility of a finite-difference time-domain model in large-scale acoustic simulations. *J. Acoust. Soc. Am.*, 152(1), 330-341, 2022, doi.org/10.1121/10.0012218.

- [33] L. Álvarez-Morales, F. Martellotta, A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches. *Appl. Acoust.* **91**, 47-58, 2015, doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.12.004.
- [34] L. Alvarez-Morales, F. Martellotta, Using 3D sound field information as an instrument to improve the accuracy of virtual acoustic models, Proc. 45º Congreso Español de Acústica, 8º Congreso Ibérico de Acústica, European Symposium On Smart Cities And Environmental Acoustics.
- [35] B.N.J. Postma and B.F.G. Katz, Perceptive and objective evaluation of calibrated room acoustic simulation auralizations, *J. Acoust. Soc. Am.* **140**, 4326-4337, 2016, doi.org/10.1121/1.4971422.
- [36] A. Pilch, Optimization-based method for the calibration of geometrical acoustic models. *Appl. Acoust.*, **170**, 107495, 2020, doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107495.
- [37] ISO 13472-1:2022, Acoustics – Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ – Part 1: Extended surface method, ISO, Geneva, 2022.
- [38] F. Martellotta and L. Pon, On-site acoustical characterization of Baroque tapestries: The Barberini collection at St. John the Divine Cathedral, *J. Acoust. Soc. Am.* **144**, 1615-1626, 2018, doi.org/10.1121/1.5055561.