

ANALISI ACUSTICA DELLA CATTEDRALE DI CARINOLA



Fig. 1 - Carinola (CE), cattedrale, fronte, portico tripartito realizzato con spolia di strutture romane.

Fig. 2 - Carinola (CE), cattedrale, interno, navata centrale, arco trionfale e sistema absidale.



di Gino Iannace, Francesco Miraglia

Scopo del presente contributo è lo studio delle caratteristiche acustiche della cattedrale di Carinola, al fine di renderla fruibile sia per il culto sia per conferenze e spettacoli musicali.

Le misurazioni per analizzare i parametri acustici sono state eseguite in situ con una sorgente sonora sferica omnidirezionale sull'altare e microfoni posizionati nell'area in cui siede il pubblico. Inoltre, utilizzando un modello geometrico tridimensionale, elaborato con un software dedicato di acustica architettonica, è stato simulato il campo sonoro all'interno della chiesa, per renderla maggiormente fruibile. Questa procedura ha permesso di valutare le caratteristiche acustiche dell'ambiente e di prevedere eventuali interventi di correzione acustica passiva.

Di origine altomedievale, Carinola è situata nel territorio della Campania denominato in età classica *ager Falernus*, oggi in provincia di Caserta. Si è originata dalla coltivazione di un banco tufaceo emergente, circondato da due piccoli torrenti, Pozzano e Malerba, alla base di un'estesa fascia collinare confinata dai monti Pecoraro, Tre Croci, Massico, Petrino e Cicoli. Carinola è ben nota per le diffuse testimonianze della cultura architettonica catalana, presenti sotto forma di edilizia civile, religiosa e militare, nonché di finestre, portali e decorazioni. La dominazione aragonese, inizialmente favorita dai governanti autoctoni, ridefinì, con la realizzazione di nuovi edifici e la ristrutturazione di quelli preesistenti, la forma urbana ed i caratteri del tessuto edilizio del sito, conferendogli tratti distintivi ancora persistenti. Al volgere della suddetta dominazione, a causa dell'isolamento geografico, l'espansione di Carinola subì una fase di arresto: eccezion fatta per piccoli interventi riguardanti la riconfigurazione di alcune arterie stradali, essa conserva sostanzialmente la caratterizzazione quattrocentesca.

Quella che sino al 1848 è stata la cattedrale della diocesi di Carinola (Figg. 1-2), deve il primigenio impianto a san Bernardo, vescovo di Foro Claudio (attuale frazione di Ventaroli), che trasferì la cattedra nel vicino insediamento che, in epoca altomedievale, sarebbe divenuto *Carinulum*. La chiesa, sulla quale è disponibile ampia letteratura, fu realizzata attigua ad un antico sacello cristiano, al quale si giungeva percorrendo uno spazio coperto posto a sud delle tre navate che componevano l'edificio sacro. All'iniziale intervento seguirono ulteriori intraprese costruttive per l'ampliamento della chiesa, nel XII secolo, per far fronte all'aumento dei fedeli.

Nel XIV secolo, durante la dominazione angioina, l'edificio sacro fu oggetto di interventi finalizzati all'ampliamento del presbiterio e alla realizzazione di un sistema absidale pentagonale, molto simile a quello della chiesa napoletana di S. Eligio Maggiore. Nei secoli successivi, la chiesa fu interessata da ulteriori interventi: la realizzazione di alcune cappelle affiancate alla navata sinistra, del pronao cinquecentesco e di un secondo campanile, sulla piazza antistante, in sostituzione dell'originario, di cui permane la base, dietro lo spazio absidale.

Successivi interventi, quali la realizzazione di stucchi sulle pareti interne e l'edificazione della cappella del Santissimo, nonché il restauro della cappella di S. Bernardo (nella quale si possono ammirare ampi lacerti di un pavimento in tessellato marmoreo policromo del periodo paleocristiano con inserti di gusto cosmatesco) sono ascrivibili al XVIII secolo.

DESCRITTORI ACUSTICI

Sotto il profilo acustico, le chiese sono luoghi complessi, per la presenza di altari, nicchie, colonne e volte, nonché di superfici riflettenti, come intonaci, stucchi e marmi. Il parametro acustico più utilizzato per analizzarle è il tempo di riverberazione. Quando il suono è emesso da una sorgente sonora in un ambiente chiuso, è riflesso dalle superfici di confine, in modo che il suono diretto che giunge al "ricevitore" sia seguito dalle mutue riflessioni sulle pareti; le riflessioni dipendono dalla posizione relativa della sorgente e del ricevitore.

Ad esempio, una riverberazione corta corrisponde ad un ambiente sordo, in cui le superfici assorbono la maggior parte dell'energia sonora incidente, come avviene in campo libero. Una riverberazione più lunga corrisponde ad un ambiente le cui superfici riflettono il suono su di esse incidente.

Nelle chiese si svolgono generalmente due tipi di attività: l'enunciazione della parola (che richiede tempi di riverberazione brevi) ed il canto, accompagnato dalla musica (che richiede tempi di riverberazione lunghi). I descrittori per lo studio delle caratteristiche acustiche degli ambienti sono riportati nelle norme UNI EN ISO 3382 "Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti".

Il descrittore maggiormente in uso è il tempo di riverberazione (RT), ossia il tempo necessario affinché, dopo l'interruzione dell'emissione sonora di una sorgente, il livello di pressione sonora nell'ambiente diminuisca almeno di 60 decibel (dB). Il valore di questo parametro varia in funzione del volume della sala e dell'assorbimento acustico totale delle superfici. Variando l'assorbimento dei materiali al variare della frequenza, anche il descrittore RT va calcolato alle varie frequenze.

Spesso in un ambiente non è possibile ottenere un decadimento sonoro di 60 dB, a causa della presenza di rumore antropico o per difficoltà oggettive: in queste condizioni, il decadimento del livello sonoro per la valutazione del tempo di riverberazione avviene su una diminuzione di 30 dB ed il relativo parametro è definito T_{30} .

Altri parametri per la valutazione delle caratteristiche acustiche sono: EDT, Definizione (D_{50}), Chiarezza (C_{80}), STI e SPL.

EDT (*Early Decay Time*): tempo impiegato perché il livello sonoro decresca da 0 a -10 dB; tiene conto del suono diretto e si avvicina alla percezione soggettiva del tempo di decadimento. Viene denominato "riverbero iniziale" o "tempo di primo decadimento" e si considera che rifletta più chiaramente il modo in cui percepiamo il riverbero in una stanza.

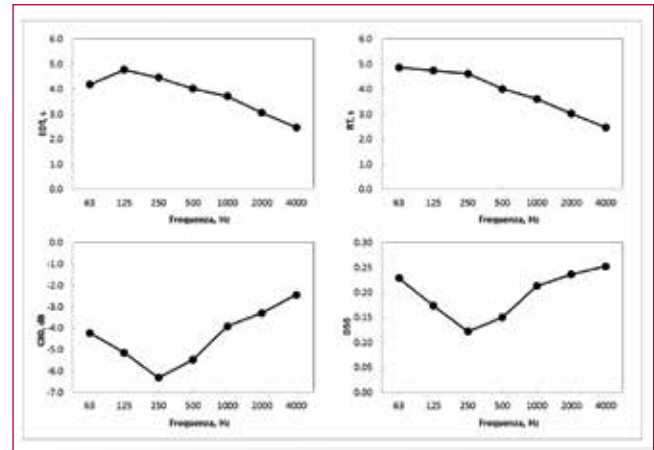


Fig. 3 - Carinola (CE), cattedrale, valori medi dei parametri acustici misurati: EDT, RT, C_{80} e D_{50} .

Il tempo di primo decadimento si dimostra un parametro particolarmente sensibile alla localizzazione del microfono, in relazione alla sua distanza dalla sorgente; infatti, l'indice diminuisce con l'allontanarsi del microfono dalla sorgente e diventa un parametro significativo per confrontare diversi punti di una stessa sala.

D_{50} : comprensione del parlato. In un ambiente in cui sono presenti un riverbero ed un rumore eccessivo, riuscire a comprendere le parole può risultare particolarmente difficile. La definizione rappresenta la capacità di distinguere suoni che si susseguono nel tempo o che giungono simultaneamente da diverse sorgenti sonore.

C_{80} : misura della chiarezza, pari a dieci volte il rapporto logaritmico tra l'energia sonora che giunge all'ascoltatore nei primi 80 ms e quella totale successiva; è il rapporto tra energia diretta unita all'energia delle prime riflessioni e all'energia delle successive. L'indice della chiarezza è ben correlato alla trasparenza della percezione in termini di successione dei suoni e della loro contemporaneità. La chiarezza è funzione del tempo di riverberazione e quindi dipende dalla vivezza; è anche funzione della distanza dell'ascoltatore rispetto alla sorgente sonora e quindi dipende dall'intensità soggettiva del suono diretto. La sensazione di chiarezza di un tono musicale è intesa come percezione del

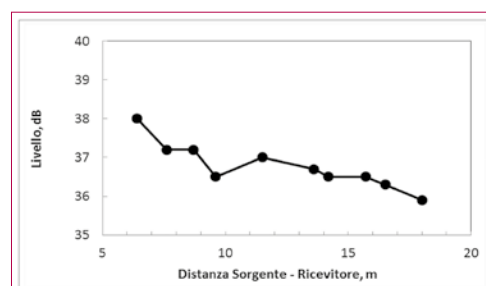


Fig. 4 - Carinola (CE), cattedrale, variazione del livello della pressione sonora con la distanza lungo la navata centrale.

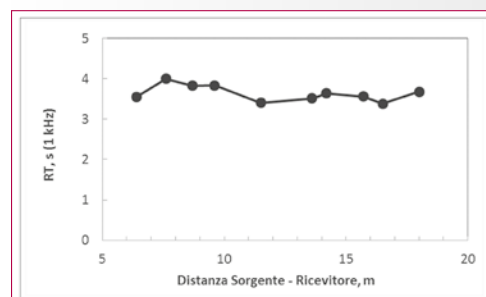


Fig. 5 - Carinola (CE), cattedrale, variazione del tempo di riverberazione, alla frequenza di 1.0 kHz, con la distanza lungo la navata centrale.

segnale, tenendo conto che l'orecchio stabilisce una relazione tra la prima parte del segnale e la successiva.

STI (Speech Transmission Index): è un valido strumento per la definizione oggettiva dell'intelligibilità del parlato in ambienti per i quali tale tipo di fruizione è di interesse. L'indice STI ha lo scopo di quantificare in modo oggettivo l'intelligibilità del parlato in una specifica posizione di un ambiente, quando viene prodotto attraverso un segnale normalizzato in un'altra specifica posizione dell'ambiente stesso. Il metodo STI risulta particolarmente utile per valutare gli effetti di modifiche introdotte (presenza di persone, modifiche geometriche, presenza di materiali per la correzione acustica). Inoltre, dimostra utilità anche nella previsione della qualità dell'intelligibilità del parlato quando si confrontano ambienti diversi o un canale di comunicazione. **SPL (Sound Pressure Level):** è il livello della pressione sonora, ossia la variazione di pressione rispetto alla condizione di quiete causata da una perturbazione che si propaga (sotto forma di onda sonora). È espresso in dB.

Nell'ambito dell'acustica architettonica, per offrire buone prestazioni una sala deve rispettare i valori dei parametri definiti in Tab. 1, in funzione della destinazione d'uso.

Pertanto, una sala destinata alle conferenze deve avere un tempo di riverberazione breve (non superiore ad un secondo) per consentire una buona comprensione del parlato.

Una sala destinata all'ascolto musicale, invece, deve avere un tempo di riverberazione più lungo per generare riflessioni mutue che ne migliorano la percezione. Una sala, in funzione della destinazione d'uso, deve presentare un tempo di riverberazione ottimale.

MISURE ACUSTICHE

La cattedrale di Carinola è composta da una navata centrale ampia e tre laterali più piccole, una disposta sul lato sinistro, le altre due su quello opposto; è coperta con volte a crociera e lateralmente presenta delle nicchie.

La sorgente sonora sferica omnidirezionale (S), posta in corrispondenza dello spazio presbiterale della fabbrica religiosa, nel punto in cui il sacerdote celebra la messa, è stata alimentata elettricamente con segnali pseudocasuali MLS (sequenze a massima lunghezza) e collegata ad un computer che genera l'impulso.

Il microfono ricevente è stato collocato, in successione, in 22 punti (R1, R2, ..., R22), posizionati pressoché ad altezza corrispondente alla testa di una persona seduta, nella navata centrale, in quelle laterali e nelle cappelle.

Descrittori	EDT, s	T ₃₀ , s	C ₈₀ , dB	D ₅₀
Valori ottimali per l'ascolto della musica	1,8 < EDT < 2,6	1,6 < T ₃₀ < 2,2	-2 < C ₈₀ < 2	< 0,5
Valori ottimali per l'ascolto del parlato	1,0	0,8 < T ₃₀ < 1,2		> 0,5

Tab. 1. Valori ottimali dei parametri acustici per le diverse condizioni di ascolto.

La deconvoluzione del segnale di alimentazione della sorgente rispetto ai segnali rilevati dai microfoni ha consentito di ottenere le risposte all'impulso, le quali, una volta filtrate in bande, hanno restituito descrittori acustici monoaurali in frequenza in bande ottave. Le misure sono state eseguite a sala vuota.

La Fig. 3 riporta i valori medi dei parametri acustici misurati, da cui si evince, alla frequenza di 1.0 kHz, che EDT e RT superano i 3,0 s; C₈₀ è inferiore a -2 dB e D₅₀ non supera il valore 0,25. Dal confronto dei valori medi misurati con quelli della Tab. 1 risulta che la chiesa, nella configurazione attuale, non presenta condizioni ottimali - comunque migliorabili a seguito di interventi specialistici - per l'ascolto della musica o del parlato.

Inoltre, è stato possibile misurare la variazione del livello della pressione con la distanza sorgente-ricevitore lungo la navata centrale; la Fig. 4 mostra l'andamento del livello della pressione sonora con la distanza, uniforme a causa del contributo al campo sonoro dovuto alle riflessioni del suono sulle superfici di confine; i punti ricevitori nella navata sono situati nel campo sonoro riverberante.

La Fig. 5 mostra l'andamento del tempo di riverberazione RT (in secondi) con la distanza lungo la navata centrale, uniforme a causa dei contributi delle riflessioni del suono dalle pareti. L'uniformità di questo parametro denota che la chiesa si considera un campo sonoro perfettamente diffuso (le caratteristiche acustiche non variano con la distanza).

MODELLO TRIDIMENSIONALE

Scopo di un rilievo acustico è la misura dei parametri più significativi di un ambiente: le misure acustiche ne forniscono dati medi e/o puntuali.

Ulteriore obiettivo del presente studio è la valutazione spaziale delle caratteristiche acustiche della chiesa, necessaria a fornire mappe delle distribuzioni medie dei parametri considerati. Non potendo ottenere misure puntuali *in situ* per economia di tempo, queste vengono realizzate attra-

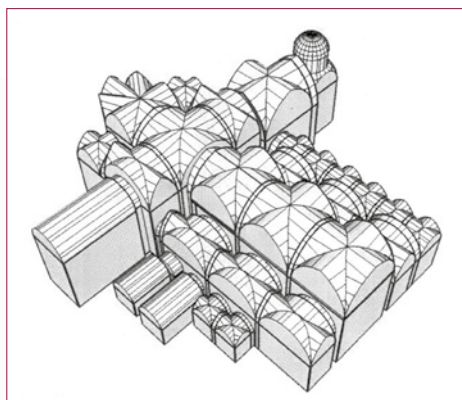


Fig. 6 - Carinola (CE), cattedrale, modello tridimensionale.

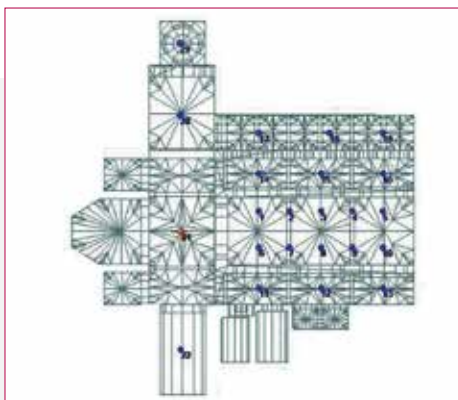


Fig. 7 - Carinola (CE), cattedrale, pianta, modello realizzato in ambiente Odeon™. In rosso la sorgente, in blu i 22 ricevitori.

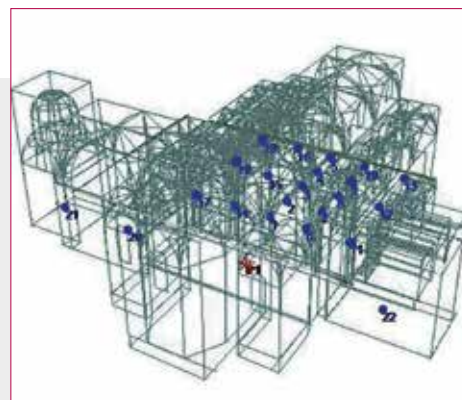


Fig. 8 - Carinola (CE), cattedrale, vista assonometrica, modello realizzato in ambiente Odeon™. In rosso la sorgente, in blu i 22 ricevitori.

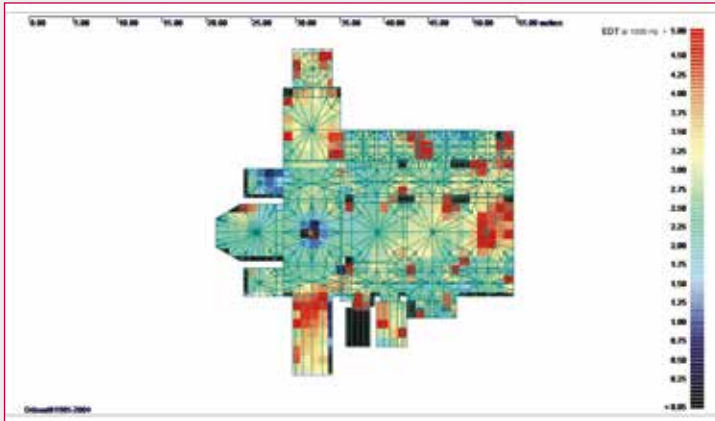


Fig. 9 - Carinola (CE), cattedrale, mappa generata in ambiente Odeon™ indicante l'andamento globale del descrittore EDT (Tempo di primo decadimento).

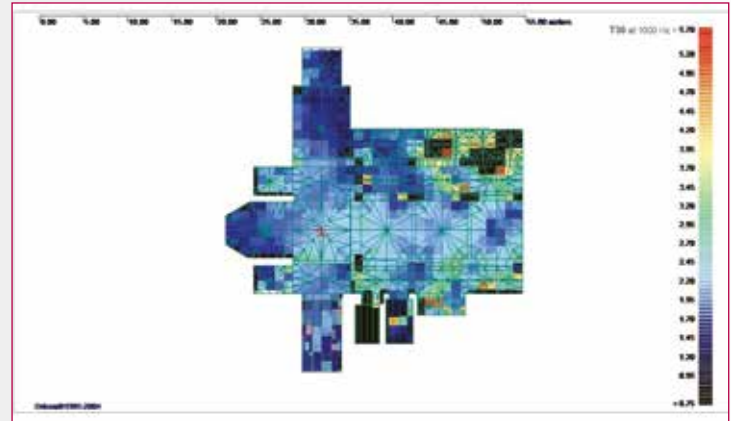


Fig. 10 - Carinola (CE), cattedrale, mappa generata in ambiente Odeon™ indicante l'andamento globale del descrittore T30 (Tempo di riverbero).

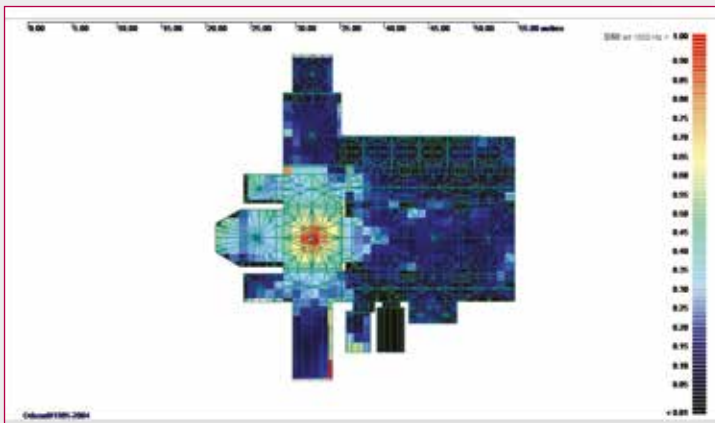


Fig. 11 - Carinola (CE), cattedrale, mappa generata in ambiente Odeon™ indicante l'andamento globale del descrittore D50 (Definizione del parlato).

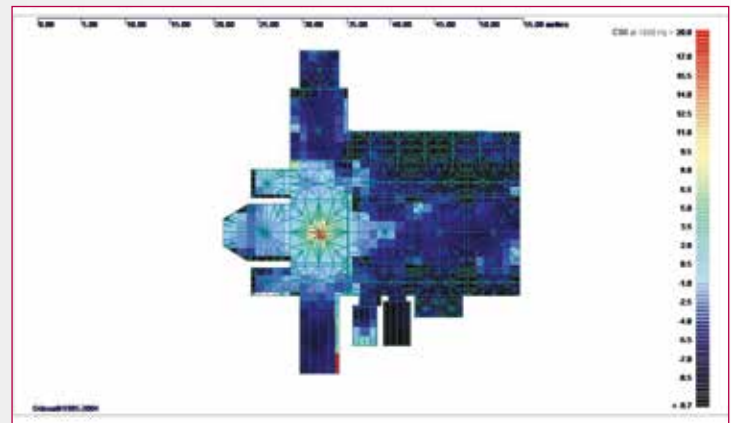


Fig. 12 - Carinola (CE), cattedrale, mappa generata in ambiente Odeon™ indicante l'andamento globale del descrittore C80 (Chiarezza).

verso l'impiego di un software di simulazione per l'acustica architettonica. Per il presente studio è stato utilizzato l'applicativo Odeon™, sviluppato nel 1984 nel Dipartimento di Tecnologia Acustica della Technical University of Denmark con la consulenza di compagnie esterne. Le attività di ricerca e sviluppo oggi continuano attraverso la società commerciale Odeon A/S. Questo software consente di prevedere e programmare l'acustica di un ambiente interno partendo da un modello tridimensionale realizzato con applicativi Cad, attraverso l'analisi di una serie di parametri acustici.

L'elaborazione è resa possibile dalla preliminare implementazione di un modello tridimensionale virtuale della chiesa, realizzato con un accurato rilievo metrico. La creazione di un modello tridimensionale dello spazio fruibile della cattedrale è scaturita dalla mediazione di due opposte esigenze: la massima semplicità della geometria, utile a diminuire i tempi di calcolo; la riproduzione fedele dell'ambiente analizzato.

Ha interesse constatare, a tal proposito, che l'approccio ottimale nasce dalla conoscenza accurata della geometria da descrivere e degli algoritmi di calcolo, che consente di comprendere se e quali particolari forme possono essere trascurate.

Mentre è evidente che un'eccessiva grossolanità del modello potrebbe nuocere all'accuratezza dell'analisi, è meno noto che la riproduzione di particolari troppo piccoli può allungare i tempi di calcolo, inficiando la correttezza della simulazione, che opera in approssimazione geometrica.

La realizzazione del modello tridimensionale si basa su superfici che simulano quelle di ogni elemento della chiesa (Fig. 6). In considerazione della complessità e dell'esten-

sione dell'edificio sacro, soprattutto per quanto riguarda il sistema voltato, il numero di facce tridimensionali utilizzate per il modello è stato particolarmente elevato, creando difficoltà di importazione nel programma di simulazione acustica; per tale motivo, si è proceduto ad una sua semplificazione (Figg. 7-8).

Il software utilizzato simula il campo sonoro in un ambiente mediante la teoria dell'acustica geometrica. Il suddetto campo sonoro è simulato da infinite rette che partono dal punto sorgente propagandosi in tutte le direzioni dell'ambiente. Quando una retta interseca una parete, è riflessa da questa, in analogia a quanto accade ad un raggio di luce riflesso da una superficie, in accordo con la legge di Snell. Il raggio riflesso dalla parete ha una direzione opposta rispetto al raggio incidente ed avrà un contenuto di energia ridotto del valore del coefficiente di assorbimento acustico della parete medesima.

Dopo aver importato il modello in Odeon™, si è proceduto all'inserimento, all'interno del programma, di una sorgente sonora omnidirezionale, posizionata al centro dell'altare maggiore, alla quale è stato assegnato un livello di potenza sonora pari a 80 dB. In seguito, sono stati inseriti i 22 ricevitori in vari punti della chiesa (Fig. 14).

Una volta collocati sorgente e ricevitori, si è proceduto al settaggio, con l'ausilio della libreria dell'applicativo, dei materiali con caratteristiche simili a quelli costituenti la fabbrica sacra, quali marmo e intonaco. I coefficienti di assorbimento del marmo variano da 0,03 (a 125 Hz) a 0,08 (a 4000 Hz); quelli dell'intonaco, invece, da 0,11 (a 125 Hz) a 0,16 (a 4000 Hz).

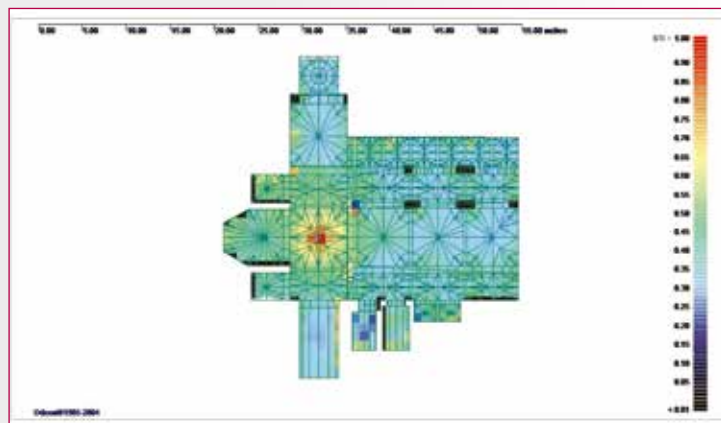


Fig. 13 - Carinola (CE), cattedrale, mappa generata in ambiente Odeon™ indicante l'andamento globale del descrittore STI (Indice di trasmissione del parlato).

Posizionata la sorgente ed assegnati i materiali, si è provveduto a settare i parametri generali di calcolo, scegliendo il metodo di *scattering* di Lambert. L'introduzione del coefficiente di *scattering* è necessaria per tenere in conto la diffusione del suono sulle superfici periodiche, come ad esempio gli scranni lignei. Sono stati utilizzati, allo scopo, 500.000 raggi per il calcolo dei diversi descrittori acustici; per la risposta all'impulso, invece, si è considerato un tempo di 4000 ms.

La diffusione del suono può essere intesa come un meccanismo di riflessione sonora omnidirezionale rispetto a quanto accade ad una riflessione in unica direzione. La diffusione del suono, in definitiva, migliora il comportamento del campo sonoro, rendendolo più uniforme.

RISULTATI

Il modello virtuale viene calibrato facendo coincidere il T_{30} misurato con quello calcolato. Una volta calibrato il modello è stata avviata la simulazione acustica, che ha fornito i dati relativi ai diversi descrittori, creando mappature che ne riportano l'andamento per tutta la chiesa. Le Figg. 9-13 descrivono le mappe con l'andamento globale di ogni singolo descrittore, alla frequenza di 1000 Hz.



Fig. 14 - Carinola (CE), cattedrale, interno, rilievi acustici, cassa omnidirezionale (sorgente) collocata nello spazio absidale.

CONCLUSIONI

L'esecuzione di musica "profana" all'interno di edifici sacri non è un evento raro. Spesso, però, l'acustica non ottimale dei grandi ambienti impoverisce l'esecuzione musicale, restituendo all'ascoltatore una qualità sonora confusa, dunque poco coinvolgente.

La cattedrale di Carinola, sulla base dei risultati ottenuti dalle misure strumentali e dalle elaborazioni numeriche, in particolare dalla mappatura del descrittore acustico C_{80} , che restituisce valori compresi tra -2,5 e 2,0 dB, può essere considerata luogo sufficientemente adatto all'ascolto della musica. Nello specifico, l'indice di chiarezza è il descrittore del campo acustico riferibile alla bontà dell'esecuzione musicale di un ambiente. I valori ottimali sono compresi tra -2 e +2 dB; tuttavia, per la musica d'organo possono essere accettati anche valori del descrittore C_{80} pari a -9 dB.

La comprensione del parlato, invece, risulta modesta, come si evince dalla mappatura del descrittore D_{50} , che ne misura l'intelligibilità. Le mappe alla frequenza di 1000 Hz del suddetto descrittore restituiscono valori, riferiti alla chiesa nel suo complesso, rientranti nel range 15-30%.

Pertanto, pur nel rispetto del carattere di palinsesto architettonico della struttura, si ritiene opportuna l'integrazione di pannellatura o, ove possibile, di intonaco fonoassorbente, da collocarsi sulle superfici del contorno, così da aumentare la comprensione del parlato, affinché il tempo di riverbero sia ridotto. Ulteriore soluzione potrebbe individuarsi nell'utilizzo di arredi opportunamente studiati e collocati, con funzione di assorbitori acustici.

BIBLIOGRAFIA

- Iannace G., Miraglia F. (2014), *L'acustica della cattedrale di Carinola. Analisi e prospettive di fruizione*, Terra Laboris. Itinerari di ricerca, 16, Armando Caramanica Editore, Marina di Minturno.
Ianniello C. (2008), *Il suono negli ambienti chiusi*, in Spagnolo R. (a cura di), *Manuale di acustica applicata*, CittàStudi, Torino, pp. 652-683.
Cundari C., Carnevali L. (2003), *Carinola e il suo territorio. Rassegna dei beni architettonici*, Edizioni Kappa, Roma.
Ianniello C., *Parametri oggettivi per la caratterizzazione dell'acustica per il pubblico nei teatri d'opera* (Atti del Convegno "L'acustica dei teatri storici: un bene culturale", Ferrara 4 Novembre 1998), a cura di N. Prodi, Ferrara.
Barron M. (1993), *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, E & FN Spon, London.
D'Onofrio M., Pace V. (1981), *Italia romanica. La Campania*, Jaca Book, Milano, pp. 96-108.

ABSTRACT

The goal of this paper is to analyze the acoustic characteristics of the cathedral of Carinola in order to make it available for both cult and conference and musical performances. Measurements to analyze the acoustic parameters were performed "in situ" with an omnidirectional spherical sound source on the altar and microphones placed in the area where the audience sits. In this way, using a three-dimensional geometric model, designed with architectural acoustics software, the sound field within the church was simulated to evaluate improvements to make it more usable. This procedure has allowed us to assess the acoustic characteristics of the church and to provide for passive acoustic correction.

PAROLE CHIAVE

RESTAURO; AUSTICA AMBIENTALE; ANALISI AUSTICA; MODELLO TRIDIMENSIONALE;

AUTORE

GINO IANNACE
GINO.IANNACE@UNICAMPANIA.IT
PROFESSORE ASSOCIATO DI FISICA TECNICA AMBIENTALE
FRANCESCO MIRAGLIA
FRANCESCO.MIRAGLIA@GMAIL.COM
ISPETTORE ONORARIO MiBACT E CULTORE DELLA MATERIA IN RESTAURO

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA E DISEGNO INDUSTRIALE -
UNIVERSITÀ DELLA CAMPANIA "L. VANVITELLI"

Be sure. **testo**



Controllo del clima in musei e archivi

Il data logger WiFi testo 160 consente di monitorare, in continuo e con la massima discrezione, le condizioni climatiche delle opere esposte o archiviate. Sempre e ovunque.

- Sensori per temperatura, umidità, lux, UV, concentrazione di CO₂ e pressione atmosferica
- Forma compatta, cover personalizzabile
- Funzioni di allarme individuali (e-mail & SMS)



Valori di
misura
sempre sotto
controllo.