

## UTILIZZO DELL'ANALISI DISCRIMINANTE PER LA VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA ACUSTICA DEI LUOGHI DI CULTO IN FUNZIONE DELLO STILE ARCHITETTONICO

Fabio Serpilli (1), Samantha Di Loreto (2), Valter Lori (3)

- 1) Università Politecnica delle Marche, Ancona, [f.serpilli@univpm.it](mailto:f.serpilli@univpm.it)
- 2) Università Politecnica delle Marche, Ancona, [s.diloreto@pm.univpm.it](mailto:s.diloreto@pm.univpm.it)
- 3) Università Politecnica delle Marche, Ancona, [v.lori@univpm.it](mailto:v.lori@univpm.it)

### SOMMARIO

Lo studio delle caratteristiche acustiche dei luoghi di culto è spesso al centro di approfondimenti sotto molteplici e differenti punti di vista. In certi casi tali approfondimenti sono stati mirati al successivo progetto di conversione ad altre destinazioni d'uso (sale per la musica in primis) o di ottimizzazione acustica finalizzata al miglioramento dell'ascolto. In altri casi la caratterizzazione acustica ha permesso di individuare dirette correlazioni con il contesto architettonico del periodo di costruzione e delle successive modifiche introdotte per scopi spesso correlati ad esigenze di mantenimento. L'ottimizzazione acustica di un ambiente confinato passa attraverso l'analisi dell'equilibrio che si dovrebbe instaurare tra la risposta acustica oggettiva della sala e la sua geometria architettonica. L'obiettivo del lavoro è stato quello di valutare tali parametri sfruttando prima l'analisi discriminata così da poter correlare i parametri geometrici e i parametri acustici misurati, al fine di investigare come il rapporto tra questi ultimi influenzi lo stile architettonico della chiesa presa in esame.

### 1. Introduzione

Sin dall'antichità il culto, inteso come totalità della pratica religiosa esteriore, è appartenuto all'uomo e i luoghi sacri si sono identificati in siti in cui le manifestazioni di tali venerazioni hanno e potranno avere luogo. Le proprietà acustiche dei luoghi di culto sono state studiate da numerosi ricercatori nel corso degli anni. In particolare, la progettazione acustica di una chiesa deve tenere conto di numerosi aspetti come la definizione dei requisiti acustici che lo spazio deve avere, la valutazione dell'aspetto percettivo del suono e infine la richiesta di intelligibilità della parola mirata a garantire un'attiva partecipazione dei fedeli alla liturgia. Pertanto, per una corretta fruizione di questi spazi, devono essere fornite condizioni di compromesso. Dal punto di vista acustico ciò si traduce in un tempo di riverberazione sufficientemente ridotto, tale da garantire adeguata intelligibilità della parola, ma al contempo sufficientemente lungo al fine di permettere un buon ascolto della musica, oltre che ad attribuire al messaggio una certa solennità, tipica degli eventi liturgici. La maggior parte delle indagini sulle proprietà acustiche dei luoghi liturgici si basa sulla determinazione dei singoli parametri acustici definiti nella norma ISO 3382 [1].

Il presente studio prende in considerazione 83 chiese appartenenti a differenti nazioni Europee ed a diverse epoche storiche. Ogni periodo storico, a partire dal medioevo sino all'epoca moderna, è stato caratterizzato da vari stili architettonici, ognuno con le sue peculiarità acustiche, come diretta conseguenza delle scelte architettoniche [2],[4].

Gli edifici analizzati sono stati in via preliminare suddivisi in base allo stile: Romano-Gotico, Neoclassico, Moderno, Barocco, Gotico, Bizantino, Mudéjar-Gothic, Rinascimentale e Paleocristiano. Per ciascuno stile sono stati quindi individuati i principali aspetti costruttivi oltre che le caratteristiche acustiche misurate. Tutte le informazioni utilizzate sono state raccolte direttamente dal gruppo di studio tramite rilievi in situ o ricavate dalla letteratura scientifica dell'ultimo decennio, particolarmente attiva nel settore.

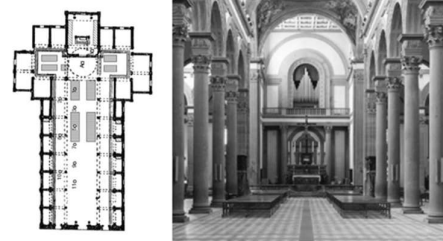


Figura 1 – Pianta e vista interna della basilica di S. Lorenzo, Firenze stile Rinascimentale (1059-1740) [2].

### 2. Descrizione dei luoghi di culto esaminati e degli indici sfruttati per l'analisi

La valutazione delle qualità acustiche degli ambienti chiusi si è basata, per molto tempo, sulla sola valutazione del tempo di riverberazione. Tale parametro si è ben presto dimostrato insufficiente a caratterizzare le proprietà acustiche di una sala, poiché, trattandosi di un parametro globale, non si presta a valutazioni locali nei vari punti d'ascolto e non tiene conto delle caratteristiche percettive degli ascoltatori. Le misure sperimentali permettono in genere la determinazione di numerosi parametri acustici tra i quali: Early Decay Time (EDT), Early to late Sound Index o Objective Clarity (C), Early Energy fraction o indice di definizione (D), Centre Time ( $T_s$ ) [5]. Al fine dello sviluppo della metodologia proposta in questo lavoro, dopo un'analisi preliminare dei dati disponibili negli articoli scientifici è stato creato un dataset complessivo di 83 chiese appartenenti a 10 stili architettonici differenti. Per l'indagine sono stati presi in considerazione i parametri acustici  $T_{30}$ ,  $T_{20}$ ,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$  e le caratteristiche geometriche principali, come volume, superficie, lunghezza, altezza e numero di navate. Essendo il dataset di dimensioni significative, per eseguire le routine di calcolo è stata eseguita un'operazione di normalizzazione. La normalizzazione dei dati in ingresso è avvenuta attraverso il calcolo della risposta media del campione, e mediante l'analisi della dispersione dei risultati attraverso il

calcolo della deviazione standard. Il risultato dei valori mediati è riportato per le caratteristiche geometriche (tab.1) e per i parametri acustici (tab.2) in funzione dello stile architettonico.

Tabella 1 – Parametri geometrici – Valori medi

STILE	Volume	Superficie	Lunghezza	Larghezza	Altezza	Navate
Romanico - Gotico	0,89	0,25	0,36	0,29	1,49	0,25
Neoclassico	0,48	0,63	0,62	1,01	1,09	0,65
Moderno	0,35	0,47	0,27	0,15	0,36	0,78
Barocco	0,09	0,17	0,04	0,13	0,46	0,38
Gotico	0,17	0,39	0,51	0,33	0,33	0,05
Bizantino	0,46	0,63	0,74	0,48	0,32	0,35
Romanico	0,23	0,07	0,05	0,20	0,06	0,25
Mudejar-Gothic	0,43	0,24	0,70	0,67	0,76	0,40

Tabella 2 – Parametri acustici - valori medi

STILE	T60	C80	D50	T20	T30
Romanico - Gotico	0,57	0,35	0,363	0,48	0,51
Neoclassico	0,97	0,55	0,39	1,17	1,14
Moderno	0,06	0,03	0,38	0,09	0,12
Barocco	0,14	0,18	0,37	0,09	0,22
Gotico	0,41	0,91	0,35	0,47	0,34
Bizantino	1,05	0,71	0,32	0,42	0,40
Romanico	0,25	0,11	0,41	0,14	0,17
Mudejar-Gothic	0,78	0,97	2,27	0,95	0,92
Rinascimentale	1,03	0,63	0,39	0,92	0,96

### 3. Definizione dei parametri in ingresso e costruzione dell'algoritmo predittivo

La Linear Discriminant Analysis (LDA) è un metodo di apprendimento automatico in grado di trovare una combinazione lineare di caratteristiche che caratterizzano o separano due o più classi di eventi. Questo metodo proietta un set di dati su uno spazio di dimensione inferiore, rendendo le classi separabili al fine di evitare un eccesso di adattamento e avere un'accuratezza del modello il più realistica possibile. Il modello costruito per questo caso studio utilizza il teorema di Bayes per stimare le probabilità [3]. Il teorema di Bayes può essere usato per stimare la probabilità della classe di output ( $y$ ) dato l'input ( $x$ ) usando la probabilità di ogni classe e la probabilità dei dati appartenenti a ciascuna classe, come mostrato in figura 2.

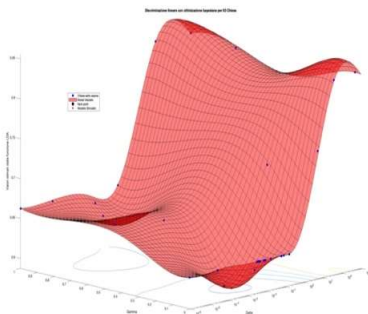


Figura 2 – Modello LDA con ottimizzazione Bayesiana per 83 chiese di diversi stili architettonici

Ottenuto il vettore numerico delle probabilità pesate su ogni classe, che nel caso in esame rappresenta lo stile architettonico,

sarà possibile determinare la matrice predittiva di cui ogni riga rappresenta la media della distribuzione normale multivariata della classe corrispondente.

### 4. Correlazioni statistiche e validazione del modello

Questa analisi ha permesso di identificare quali sono i parametri, sia singoli che combinati tra loro, che influenzano maggiormente lo stile della chiesa [4]. Le correlazioni tra le metriche descrittive delle caratteristiche delle chiese e gli stili architettonici sono state infine realizzate sfruttando un modello di regressione multivariata. In figura 3, a titolo di esempio, si riporta il modello di Fitting che mette in relazione lo stile Gotico con i parametri acustici misurati. Per questa metrica i coefficienti di regressione parziale hanno assunto i seguenti valori:  $b_0=6.37$ ,  $b_1=0.63$ ,  $b_2=-0.78$ ,  $b_3=-0.97$ .

Si è proceduto seguendo la stessa metodologia operativa per tutti gli stili sopra descritti.

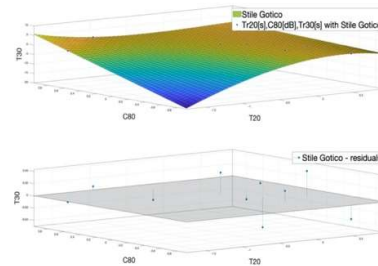


Figura 3 – Fitting polinomiale tra stile architettonico e misure dei parametri acustici

Dall'analisi effettuata sfruttando sia i modelli di Machine Learning che la correlazione statistica è possibile notare come lo stile influenzi il valore del parametro acustico. In particolare, si è evidenziata una forte dipendenza per lo stile Gotico, Neoclassico, Bizantino, Romanico, Mudejar-Gothic e Paleocristiano nei quali si ottengono valori di R-square che testimoniano la buona vestibilità del modello (tab.3).

Tabella 3 – Analisi della bontà del modello

STILE	SSE	R-SQUARE
Neoclassico	0.07	0.78
Gotico	0.06	0.74
Bizantino	0.01	0.88
Romanico	0.07	0.95
Mudejar-Gothic	0.02	0.99
Paleocristiano	0.03	0.96

Questo lavoro sintetizza i primi risultati di un lavoro più ampio, attualmente in corso, che ha lo scopo di definire metodologie speditive di analisi acustica di spazi confinati, a partire da dati noti di tipo comune, quali in questo caso stile architettonico e geometria.

### 5. Bibliografia

- [1] UNI ISO 3382-2 (2008) Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari.
- [2] E.Cirillo e F.Martellotta, Sound propagation and energy relations in churches, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.118(2005).
- [3] Pelikan M. Hierarchical Bayesian Optimization Algorithm., vol 170. Springer, Berlin, Heidelberg (2006).
- [4] Kosała, Krzysztof and Engel, Zbigniew Witold, Assessing the acoustic properties of Roman Catholic churches: a new approach, Applied Acoustics (2013).
- [5] L.Beranek - Music, Acoustics and Architecture - J.W. & S, (1962).