

# PROGETTARE CON I COEFFICIENTI DI SCATTERING E DI DIFFUSIONE

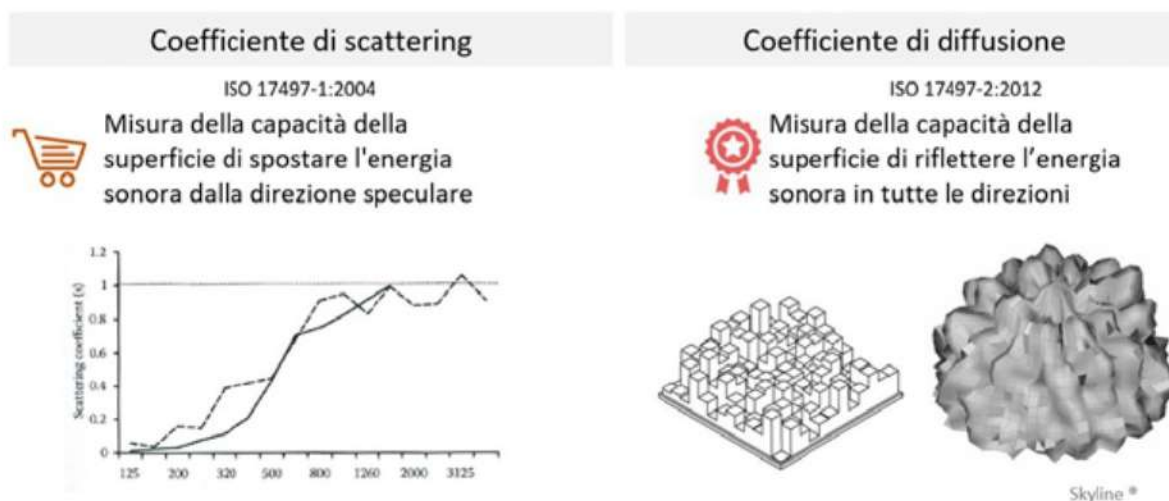
di  
\* Louena Shtrepi

## 1\_ Che cosa sono i coefficienti di scattering e di diffusione?

Il grado di diffusione acustica dalle superfici è molto importante in tutti gli aspetti dell'acustica architettonica, ad esempio in sale da concerto, studi di registrazione, capannoni industriali e camere riverberanti. Il grado di diffusione come quello di assorbimento in un ambiente chiuso sono fattori importanti che determinano la qualità acustica dello spazio (1, 2).

La necessità di determinare come il suono riflesso da una superficie sia spazialmente disperso ha portato negli ultimi anni all'implementazione dei coefficienti di diffusione e di scattering. Il fenomeno

fisico a cui si fa riferimento è quello della dispersione dell'onda sonora dovuta a elementi irregolari presenti sulla superficie o dagli oggetti su cui incide. Mentre il coefficiente di scattering è una misura che descrive la quantità di energia sonora diffusa, il coefficiente di diffusione descrive l'uniformità direzionale della diffusione, ossia la qualità della superficie fonodiffondente (Figura 1). Di conseguenza, sono necessari entrambi i coefficienti per diverse applicazioni. Il coefficiente di scattering viene utilizzato per migliorare l'accuratezza dei modelli previsionali basati sull'acustica geometrica, mentre il coefficiente di diffusione è un dato che dovrebbe facilitare la valutazione della qualità delle proprietà fonodiffondenti dei diffusori acustici proposti da diversi produttori di pannelli (3).



**fig. 1** - Coefficienti di scattering e di diffusione secondo la norma ISO 17497 (5, 6). Una curva tipica dell'andamento del coefficiente di scattering in frequenza e la polare di distribuzione 3D delle riflessioni per un diffusore Skyline® (3).

È importante sottolineare che non tutte le superfici irregolari si possono considerare dei diffusori acustici. Un diffusore acustico disperde l'energia sonora sia nel dominio del tempo che spazialmente. La Figura 2 mostra l'esempio di un diffusore di Schroeder, considerato come il diffusore per eccellenza, e la distribuzione nel tempo e nello spazio delle riflessioni generate dall'interazione del suono con il suo profilo. Al contrario, un semicilindro o una semisfera riescono a generare una distribuzione spaziale polare perfettamente uniforme, mentre sono poco efficaci sulla distribuzione nel dominio del tempo. I diffusori acustici sono superfici e volumi che massimizzano entrambe le grandezze descritte dai coefficienti di scattering e di diffusione. Per massimizzare questi due coefficienti, la dimensione degli elementi irregolari è il primo aspetto progettuale che influenza il grado di dispersione. Un semplice modello analitico (Figura 3) (3, 4),  $f=c/2a$  o  $f=c/2h$ , mostra una rela-

zione inversamente proporzionale tra la frequenza ( $f$ ) e le dimensioni delle irregolarità ( $a$ =larghezza o lunghezza, e  $h$ =altezza) degli elementi diffondenti, e fornisce la frequenza alla quale la diffusione diventa effettiva; per frequenze più basse (lunghezze d'onda più grandi), solo la modalità speculare è riflessa dal profilo delle irregolarità. Per l'ottimizzazione del coefficiente di diffusione è necessario progettare un diffusore che abbia la capacità di disperdere l'energia sonora uniformemente in tutte le direzioni, piuttosto che semplicemente allontanare l'energia dalle direzioni di propagazione delle riflessioni speculari (4). A questo scopo, le superfici curve possono facilmente generare una maggiore uniformità della distribuzione polare dell'energia diffusa. Come mostrato in Cox e D'Antonio (3), è probabile che elementi geometrici organizzati in griglie e modulati, ad esempio, come diffusori di Schroeder generino una buona distribuzione spaziale e temporale.

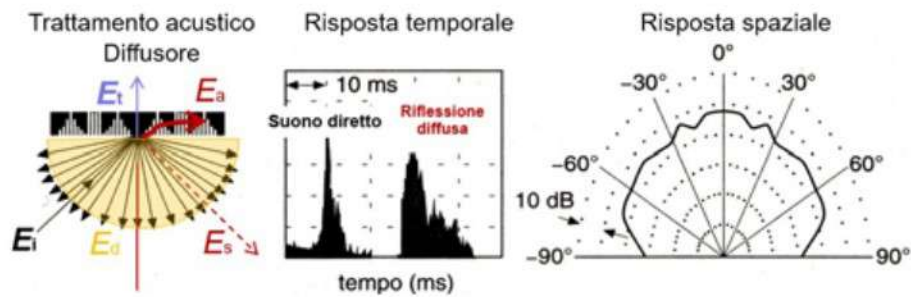


fig. 2 - Interazione dell'energia sonora con un diffusore di Schroeder: la distribuzione nel tempo e nello spazio delle riflessioni generate dall'interazione del suono con il suo profilo (3).

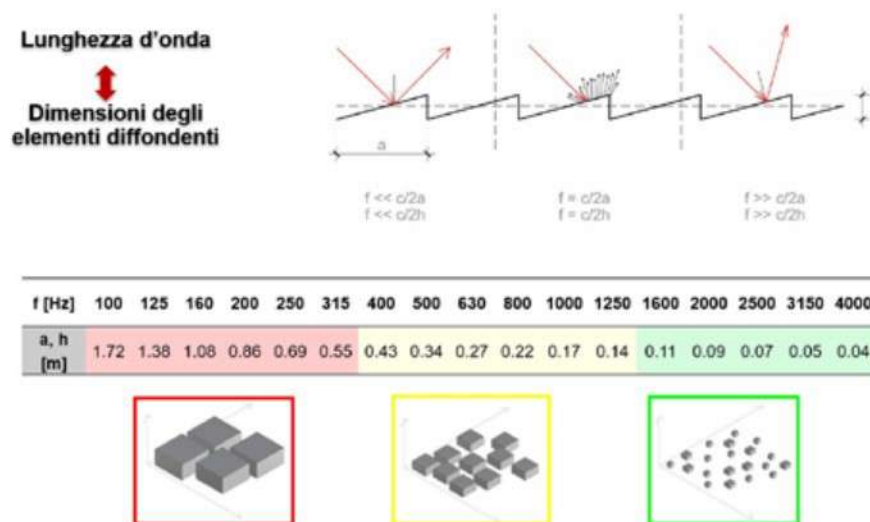
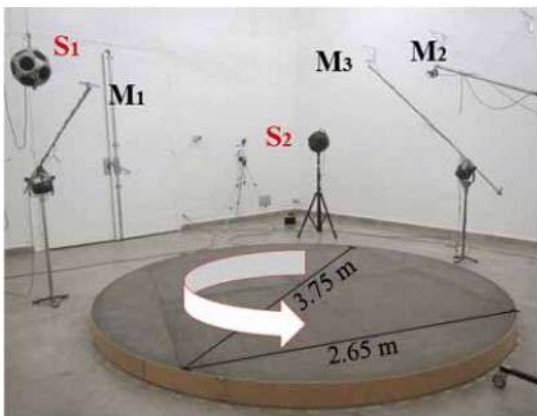


fig. 3 - Relazione lineare tra la frequenza ( $f$ ), la frequenza alla quale la diffusione diventa effettiva ( $f=c/2a$  oppure  $f=c/2h$ ), e le dimensioni delle irregolarità ( $a$ =larghezza o lunghezza, e  $h$ =altezza) degli elementi diffondenti (4).

## 2\_ Come si possono misurare le proprietà delle superfici fonodiffondenti?

La caratterizzazione acustica delle superfici fonodiffondenti si basa su due norme: la ISO 17497-1:2004 (5) definisce la misura del coefficiente di scattering a incidenza casuale in campo diffuso come il rapporto tra l'energia sonora riflessa non specularmente e l'energia totale riflessa; la ISO 17497-2:2012 (6) definisce la misura del coefficiente di diffusione direzionale in campo libero come misura del grado di uniformità della distribuzione spaziale delle riflessioni (Figura 1). Entrambi questi coefficienti sono numeri singoli adimensionali dipendenti dalla frequenza, e tutti i dati ottenuti da queste misurazioni facilitano il confronto quantitativo tra diversi trattamenti superficiali (3, 4). Va sottolineato che i due coefficienti variano nel range tra 0 e 1, dove un valore 0 significa una superficie perfettamente riflettente che genera una riflessione speculare, e un valore di 1 significa che l'energia sonora viene riflessa completamente in modo diffuso e viene distribuita in modo uniforme nel semispazio delimitato dalla superficie fonodiffondente.

nato il campione fonodiffondente. Il principio del metodo di misurazione consiste nell'estrarre l'energia speculare dalle riflessioni ottenute da diversi orientamenti del campione che viene fatto ruotare a piccoli passi sulla piattaforma. La normativa prevede quattro condizioni in cui viene valutata la variazione del tempo di riverberazione (T) all'interno della camera riverberante: T1 – ottenuto con la piattaforma vuota e senza rotazione; T2 – ottenuto con il campione fonodiffondente posizionato sulla superficie della piattaforma e senza rotazione; T3 – ottenuto con la piattaforma vuota e con rotazione; T4 – ottenuto con il campione fonodiffondente posizionato sulla superficie della piattaforma e con rotazione. Solitamente la rotazione viene fatta a passi di 5° richiedendo 72 misurazioni consecutive per la valutazione di T3 e T4. Per queste due condizioni viene effettuata una media sincronizzata delle risposte all'impulso. In questo modo, le componenti speculari si sommano in fase, mentre il suono diffuso interferisce in modo distruttivo. Così, la valutazione della differenza tra T4 e T3 permette di calcolare il coefficiente di assorbimento speculare ( $a_{spec}$ ), mentre la differenza tra T2 e T1 permette di ottenere



**fig. 4** - Sistema di misurazione del coefficiente di scattering in camera riverberante in scala reale all'Istituto Nazionale della Ricerca Metrologica (INRiM) e in scala ridotta (1:5) al Politecnico di Torino (7).

Il sistema di misurazione del coefficiente di scattering (Figura 4), prevede l'utilizzo di una camera riverberante in scala reale o ridotta attrezzata con una piattaforma rotante dove viene posizio-

il noto coefficiente di assorbimento acustico  $a_s$  (ISO 354). Questi dati possono essere utilizzati per quantificare la porzione di energia riflessa in modo non speculare secondo l'equazione (1):

$$s = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} \quad (1)$$

Come indicato precedentemente, il coefficiente di diffusione quantifica il modo in cui l'energia riflessa da una superficie viene distribuita spazialmente. La distribuzione spaziale viene rappresentata dalle risposte polari dei livelli di pressione sonora riflessi. Il sistema di misurazione prevede l'utilizzo di una camera anecoica e di un sistema di goniometri portanti la sorgente sonora, e microfoni disposti in posizioni in posizioni radiali davanti alla superficie fonodiffondente (Figura 5). Il coefficiente di diffusione ( $d_\theta$ ) viene calcolato valutando l'uniformità della distribuzione dei livelli di pressione sonora ( $L_i$ ) riflessi su  $n$  microfoni utilizzando l'equazione (2):

$$d_\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}\right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{L_i}{10}}\right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{L_i}{10}}\right)^2} \quad (2)$$

Anche per queste misurazioni, l'angolo di risoluzione per ogni punto microfonicamente posizionato sul semiarco di misura è di  $5^\circ$ , mentre le posizioni della sorgente sono fissate su tre angoli di elevazione ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ , e  $60^\circ$ ) e cinque di azimut ( $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ , e  $300^\circ$ ), risultando in un totale di 13 combinazioni richieste dalla normativa.

La standardizzazione dei metodi di misurazione di questi due coefficienti ha facilitato la costruzione di database affidabili (3) ma che necessitano ulteriori ampliamenti. Questi dati non sono solo necessari per confrontare diversi diffusori, ma sono anche adottabili come dati di input per simulazioni acustiche nella fase concettuale, preliminare, o di verifica del progetto (3, 4, 8). Tuttavia, queste misurazioni sono generalmente costose e richiedono tempo; pertanto, il loro uso è per lo più limitato a progetti di ricerca e design ad alto budget.

### 3\_ Come si possono utilizzare i due coefficienti nei calcoli previsionali?



**fig. 5** - Sistema di misurazione del coefficiente di diffusione in camera anecoica (ISO 17497-2:2012).

Andrebbe sottolineato da subito che i coefficienti di scattering sono quelli utilizzati nei calcoli previsionali e nei metodi di simulazione predittiva più avanzati. Come indicato precedentemente, il coefficiente di diffusione è definito in modo da fornire uno strumento di confronto sulla qualità delle prestazioni dei diffusori acustici. Pertanto, è poco utilizzabile in procedure che necessitano principalmente la valutazione quantitativa dell'energia riflessa in modo diffuso.

Uno dei pochi metodi che utilizzano il coefficiente di scattering per calcoli previsionali è la norma europea UNI EN 12354-6 (9), che offre tre modi alternativi per calcolare il tempo di riverberazione. Ovviamente, questo porta un progettista a chiedersi quale dei tre metodi sia

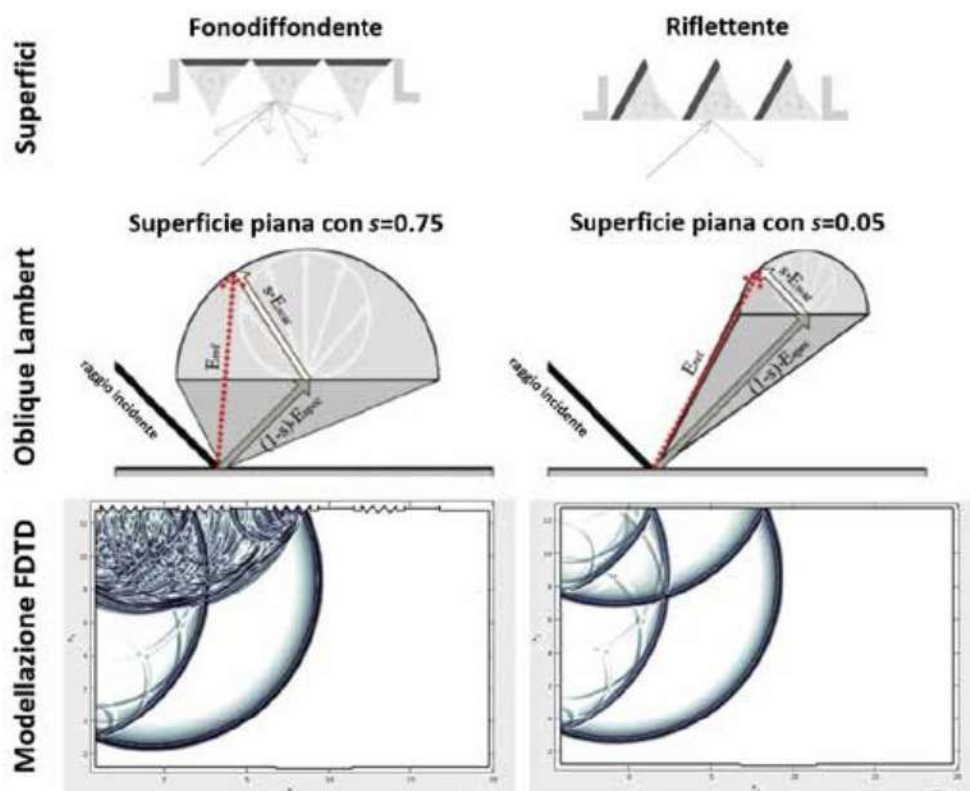
quello più attendibile, considerando anche l'onerosità dell'implementazione dei calcoli e della difficoltà ad avere a disposizione tutti i dati richiesti in ingresso. Alcuni studi mostrano in che misura sia significativa la differenza tra i risultati ottenuti con le formule indicate nei calcoli previsionali della norma rispetto alla semplice applicazione della nota formula di Sabine. Ad esempio, Nilsson e Arvidsson (10) hanno valutato questi effetti in ambienti rettangolari applicabili a diverse destinazioni d'uso come uffici, aule scolastiche e ambienti ospedalieri. Quello che è importante sottolineare è che la complessità dei calcoli e il tempo necessario per poter predisporre nel modo corretto i dati di ingresso non sono giustificati dalla differenza minima ottenuta tra questi calcoli e altri metodi più precisi (es. simulazioni più avanzate con software dedicati). Come anticipato, la norma UNI EN 12354-6 richiede i coefficienti di scattering delle superfici degli ambienti che in una fase progettuale generalmente non sono disponibili. Inoltre, come indicato nella precedente sezione, anche i database di dati misurati presenti in letteratura sono limitati per via della complessità delle procedure di misurazione. Questo significa che l'uso della norma UNI EN 12354-6 fa molto affidamento sull'esperienza e sulla personale valutazione dei progettisti acustici.

Altre proposte sull'utilizzo dei coefficienti di scattering in formule previsionali sono state presentate da Hanyu (11). L'autore ha proposto i concetti di area di scattering equivalente e il coefficiente di scattering medio per esprimere la diffusività di un campo sonoro e la valutazione del decadimento dell'energia sonora in uno spazio chiuso. Questi due concetti si basano sulla stessa metodologia di calcolo dell'area di assorbimento equivalente e del coefficiente di assorbimento medio. Anche in questo caso la principale difficoltà è dovuta alla limitata disponibilità di database di coefficienti di scattering misurati.

I modelli previsionali più avanzati considerano cruciale l'utilizzo dei coefficienti di scattering per la determinazione dell'accuratezza delle simulazioni. I primi modelli basati sull'acustica geometrica non includevano gli effetti di scat-

tering generati dai bordi, dalla rugosità e dalle irregolarità delle superfici. Negli ultimi decenni, tuttavia, vi sono stati considerevoli esperimenti e confronti (Round Robin test) per dimostrare che considerare il coefficiente di scattering in questi modelli migliora l'accuratezza della previsione. Ad esempio, è stato dimostrato che, senza la componente diffusa, questi modelli tendono a prevedere dei valori eccessivi del tempo di riverberazione. Nel primo Round Robin sui software di simulazione (8), solo i tre modelli che includevano nell'algoritmo di calcolo anche i coefficienti di scattering hanno mostrato dei risultati compatibili con dati misurati. Anche le piccole differenze individuate ricadono nei limiti delle differenze minime percepibili (Just Noticeable Difference). Bisogna sottolineare che i diversi software, principalmente basati sull'acustica geometrica, implementano il concetto di scattering in modi diversi, che però si discostano leggermente da quanto rappresentato dal coefficiente di scattering misurato secondo la norma ISO 17497-1. Questo rende ulteriormente difficile l'utilizzo corretto dei database di coefficienti di scattering disponibili al momento (12). Nei modelli basati sull'acustica geometrica, le superfici fonodiffondenti vengono modellate come superfici piane alle quali viene assegnato un coefficiente di scattering (Figura 6). Questo permette di ridurre i tempi di modellazione e di simulazione, ma è una semplificazione che può portare a delle differenze significative sulla percezione sonora (13). Per poter superare queste criticità, sono stati sviluppati altri metodi di simulazione basati su tecniche più complesse e avanzate, come il metodo FDTD (Finite-difference time-domain) (14). Questo metodo permette di risolvere l'equazione dell'onda richiedendo una modellazione più dettagliata anche delle superfici fonodiffondenti (Figura 6). L'unico suo limite, è quello del carico computazionale e della necessità di adeguate macchine di calcolo per ridurre i tempi delle simulazioni.

#### **4\_ I coefficienti di scattering e di diffusione incidono nel calcolo dei parametri acustici oggettivi per ambienti semplici come aule scolastiche e sale riunioni?**



**fig. 6** - Confronto tra il metodo Oblique Lambert utilizzato in Odeon (13) e simulazione con il metodo FDTD (14) delle superfici fonodiffondenti e riflettenti in una sala shoebox (IRCAM, Parigi).

I diffusori hanno continuamente messo alla prova le capacità progettuali degli acustici e la creatività dei designer, in quanto queste superfici determinano fortemente l'esito estetico e visivo dello spazio. In diversi studi è stata dimostrata l'importanza delle superfici fonodiffondenti per la qualità acustica degli ambienti destinati alle performance musicali, confermando gli effetti positivi nel miglioramento della spazialità e della uniformità di distribuzione dei parametri acustici oggettivi. Inoltre, le superfici fonodiffondenti vengono utilizzate per la correzione di effetti indesiderati come gli echi (1). Oltre agli effetti positivi, queste superfici possono generare anche effetti indesiderati come riduzione della riverberazione e attenuazione del livello sonoro (3). Sono utilizzati anche in altri ambienti, come aule scolastiche o spazi all'aperto, per aumentare l'intelligibilità del parlato (2), se posizionate opportunamente (es. sulla parete di

fondo), e ridurre i livelli di rumore sonoro (15). Nonostante la raccolta di questi risultati, non è ancora chiara l'influenza delle superfici fonodiffondenti sulla risposta all'impulso degli ambienti e sui valori dei parametri acustici oggettivi, di conseguenza, rimane aperta la ricerca sulla correlazione tra il fenomeno fisico e gli effetti che la presenza di queste superfici ha sulla percezione sonora (13, 16). È stato dimostrato che gli ascoltatori possono percepire in modo significativo differenze minime di 0.4 unità del coefficiente di scattering e che la percezione delle differenze sia legata alla distanza dalle superfici fonodiffondenti (17). Negli spazi chiusi, gli esseri umani sono molto sensibili alla percezione del suono in tutti i suoi aspetti temporali, spettrali e spaziali, il che rende molto complesso ottenere risultati simulati realistici. Questi tre aspetti sono fortemente influenzati dalla presenza di superfici diffondenti. È pertanto necessaria una

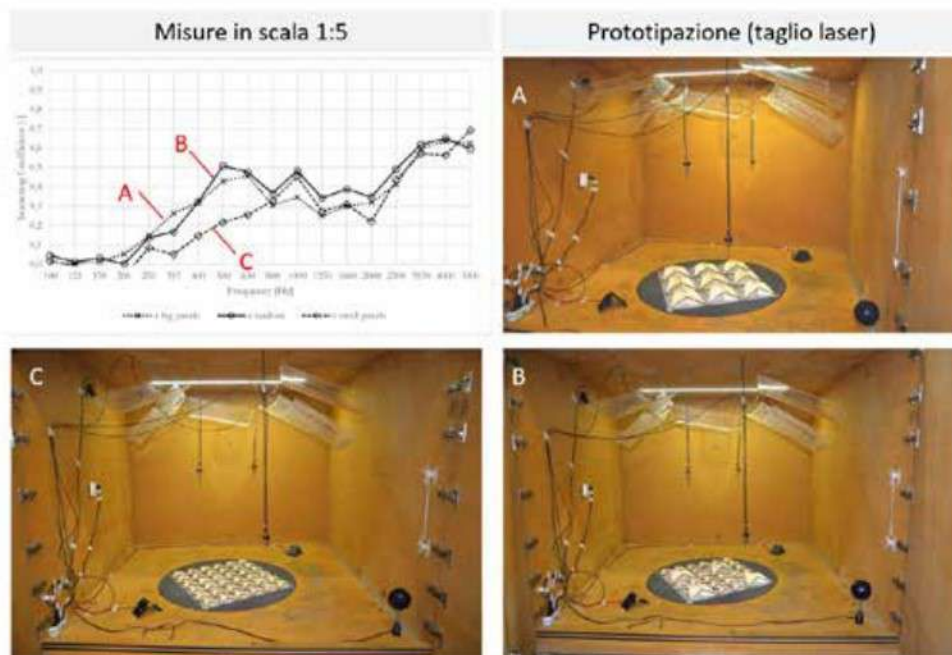
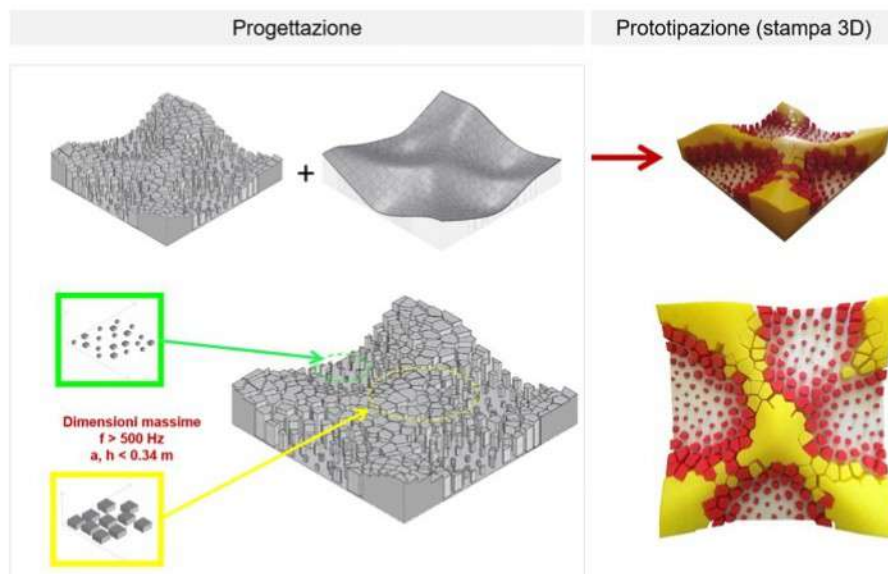
maggior comprensione del loro uso. Oltre alle misure in scala reale, altre tecniche, come i metodi numerici e le misure con modelli in scala ridotta, sono utilizzate per simulare le riflessioni complesse dovute alle superfici fonodiffondenti (13, 16, 17, 18).

## 5\_ Quali sviluppi futuri?

In questo articolo sono stati analizzati diversi

aspetti relativi all'utilizzo delle superfici fonodiffondenti. Come si può notare, nonostante la ricerca estesa fatta fino ad ora abbia portato alla standardizzazione di due metodi di misurazione delle proprietà fonodiffondenti, vi è poca consapevolezza sull'utilizzo dei due coefficienti proposti da parte dei professionisti. Questo gap è ampiamente discusso ed è principalmente dovuto alla mancanza di database accurati di dati misurati e di una relazione diretta con semplici

*fig. 7 - Progettazione e prototipazione con stampa 3D di una superficie fonodiffondente "Voronoi" ottimizzata per massimizzare il coefficiente di scattering e di diffusione (20).*



*fig. 8 - Caratterizzazione di tre diverse superfici fonodiffondenti "Origami" in camera riverberante in scala al Politecnico di Torino (21).*

formule tra le proprietà fonodiffondenti e l'approccio progettuale, basato principalmente sulla valutazione dei parametri acustici oggettivi e, nello specifico, del tempo di riverberazione. Nonostante gli effetti sulla percezione siano significativi, in mancanza di parametri oggettivi che mostrino una chiara correlazione con la presenza dei diffusori acustici, diventa difficile considerarli già nelle fasi preliminari del progetto. Queste criticità possono essere attenuate dalla validazione di strumenti adeguati basati su un sistema di progettazione computazionale completo che possa ospitare diversi strumenti digitali: generazione delle geometrie, analisi delle prestazioni e simulazioni acustiche con la possibilità di ascoltare in tempo reale gli effetti che possono avere le scelte progettuali. Questi strumenti potrebbero essere migliorati con maggiore attenzione verso un approccio più user-friendly basato su una corretta interfaccia utente e un rapido feedback visivo sulle prestazioni (es. uniformità della distribuzione polare delle riflessioni). Il processo di progettazione dei diffusori dimostra che la sensibilizzazione degli architetti e dei designer sulla correlazione tra l'output performativo e le scelte progettuali più geometriche, potrebbe portare a una progettazione più consapevole ed efficiente degli am-

bienti. Questo approccio è soggetto a continua evoluzione e richiede una personalizzazione dei software esistenti attraverso la programmazione informatica (19). Pertanto, potrebbe essere necessaria una nuova figura professionale che abbracci le conoscenze progettuali e acustiche al fine di generare soluzioni valide sia dal punto di vista estetico, sia da quello acustico, con maggiore facilità. In linea con questo, le Figure 7 e 8 mostrano alcuni esempi di superfici progettate in modo parametrico. Inoltre, sperimentazioni visionarie (Figura 9) suggeriscono l'utilizzo di robot per valutare le prestazioni acustiche parallelamente al processo di costruzione, ovvero implementare un processo di messa a punto architettonico e acustico (22). **E**



*fig. 9 - Fabbricazione additiva di superfici fonodiffondenti in-situ e messa a punto dell'area d'ascolto (22).*



## Note Bibliografiche

- 1 Beranek L.L. Concert and opera halls: how they sound. Acoustical Society of America, Woodbury, New York, 1996.
- 2 Choi Y.J. (2013) Effects of periodic type diffusers on classroom acoustics, *Appl. Acoust.* 74: 694-707.
- 3 Cox T. J., D'Antonio P. Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application. Taylor and Francis, New York, USA, 2017.
- 4 Cox T. J. et al. (2006) A Tutorial on Scattering and Diffusion Coefficients for Room Acoustic Surfaces, *Acta Acust united Ac.* 92,1-15.
- 5 ISO 17497: Acoustics -- Sound-scattering properties of surfaces -- Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, 2004.
- 6 ISO 17497-2:2012: Acoustics -- Sound-scattering properties of surfaces -- Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field, 2012.
- 7 Shtrepi, L. et al. (2016). Accuracy of the random-incidence scattering coefficient measurement. *Appl Acoust*, 106, 23-35.
- 8 Vorländer M., (1996) International Round Robin on room acoustical computer simulations. *Poc. ICA 95*, Trondheim, Norway.
- 9 UNI EN 12354-6: Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Parte 6: Assorbimento acustico in ambienti chiusi.
- 10 Nilsson, E., Arvidsson, E. (2021). An Energy Model for the Calculation of Room Acoustic Parameters in Rectangular Rooms with Absorbent Ceilings. *Appl. Sci.* 11, 6607.
- 11 Hanyu, T. (2007). Relationship between scattering coefficients of walls and diffuseness in a room," in *Proceedings of International Symposium on Room Acoustics: ISRA2007*, 2007, P09.
- 12 Lam, Y. W. (1996). The dependence of diffusion parameters in a room acoustics prediction model on auditorium sizes and shapes *J. Acoust. Soc. Am.* 100 (4), 2193-2203.
- 13 Shtrepi, L., Astolfi, A., Puglisi, G.E., Masoero, M.C. (2017) Effects of the Distance from a Diffusive Surface on the Objective and Perceptual Evaluation of the Sound Field in a Small Simulated Variable-Acoustics Hall. *Appl. Sci.*; 7: 224.
- 14 Shtrepi, L., Hamilton, B., Astolfi, A., Masoero, M. (2019). Preliminary results of scattering surface modeling and perceptual aspects in wave-based acoustic simulations. In *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics: Integrating 4th EAA Euroregio 2019*, 5990-5993.
- 15 Ryu, J., and Jeon, J. (2008). "Subjective and objective evaluations of a scattered sound field in a scale model opera house," *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 1538-1549.
- 16 Prodi, N., Pellegati, M., Visentin, C. (2022). Effects of type of early reflection, clarity of speech, reverberation and diffuse noise on the spatial perception of a speech source and its intelligibility. *J. Acoust. Soc. Am.* 151, 122-140.
- 17 L. Shtrepi, A. Astolfi, S. Pelzer, R. Vitale, M. Rychtarikova (2015). Objective and perceptual assessment of the scattered sound field in a simulated concert hall. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138 (3), 1485-1497
18. Jeon, J.Y., Jo, H.I., Seo, R., Kwak, K.H. (2020). Objective and subjective assessment of sound diffuseness in musical venues via computer simulations and a scale model. *Building and Environment*, 173, 106740.
- 19 Wortmann T. and Tuncer B. (2017). Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction, *Design Studies* 2017; 52: 173-197.
- 20 L. Shtrepi, J. Menichelli, A. Astolfi, T. Mendez, M. Masoero (2017). Improving scattering surface design with rapid feedback by integrating parametric models and acoustic simulation, *The Journal of the Acoustical Society of America* 142, 2499
- 21 Turco, M.L., Zich, U., Astolfi, A., Shtrepi, L., Poala, M.B. (2017). From digital design to physical model - Origami techniques applied to dynamic paneling shapes for acoustic performance control. *Proceedings of the 35th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe)*.
- 22 Bonwetsch T., Baertschi R., Oesterle S. (2008). Adding Performance Criteria to Digital Fabrication Room-Acoustical Information of Diffuse Respondent Panels, *Proc. 28th ACADIA*, in *Silicon + Skin*, Biological Processes and Computation, Minneapolis, Minnesota 364-369.

\* Dr. Louena Shtrepi è ricercatrice al Politecnico di Torino presso il Dipartimento di Energia "Galileo Ferraris" dal 2018. I suoi interessi di ricerca e insegnamento sono principalmente nell'acustica applicata. In particolare, dal 2012 ha iniziato a lavorare sulle proprietà dei materiali acustici, sulle simulazioni acustiche e sull'incertezza di misura. Inoltre, il suo obiettivo di ricerca è quello di incrementare la consapevolezza sulla gestione delle problematiche e delle soluzioni acustiche sin dalle prime fasi del processo di progettazione coinvolgendo attivamente gli architetti e i designer.