

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DELLA NUOVA CAMERA ANECOICA DELL'UNIVERSITÀ DI FERRARA

Nicola Prodi, Francesco Pompoli, Roberto Pompoli, Patrizio Fausti, Paolo Bonfiglio, Andrea Farnetani, Umberto Fabbri

Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara

1. Introduzione

Presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara è stata di recente terminata una grande camera anecoica e semianecoica di volume compreso tra 620 m³ e 800 m³.

Nel presente articolo verranno descritte le principali caratteristiche della camera, le procedure ed i risultati del collaudo acustico eseguito per la verifica della anecoicità secondo la norma ISO 3745, con il calcolo della relativa frequenza di taglio. Saranno inoltre illustrati i risultati relativi alle prove di isolamento acustico delle porte e di rumorosità degli impianti ed alcune misure complementari per studiare il campo acustico interno alla camera.

2. Descrizione della camera anecoica

La camera anecoica (Fig. 1) è costituita esternamente da un guscio in cemento armato di spessore di 32 cm, con dimensioni di 16 x 15 x 12 m. Una delle quattro pareti verticali è stata realizzata leggermente inclinata per attenuare i modi propri alle basse frequenze.

Una struttura di acciaio consente di sostenere delle pareti interne realizzate con sandwich in lamiera (forata sul lato interno), il cui interno è composto da uno strato di materiale in fibra di roccia (densità 90 kg/m³, spessore di 10 cm) e da un pannello di cartongesso da 12 mm (sul lato esterno). L'intercapedine tra guscio esterno e pannelli sandwich ha una dimensione variabile tra 0.98 e 1.06 m.

Sul lato interno della camera una ulteriore struttura reticolare di acciaio consente di sostenere cunei fonoassorbenti, con dimensione complessiva di 1.71 m.

I cunei, illustrati in Fig. 2, sono realizzati in fibra di poliestere di densità pari a 40 kg/m³ e presentano una base cubica di lato 0.35 m ed un successivo prisma a base quadrata che determina un sistema ad impedenza graduale.

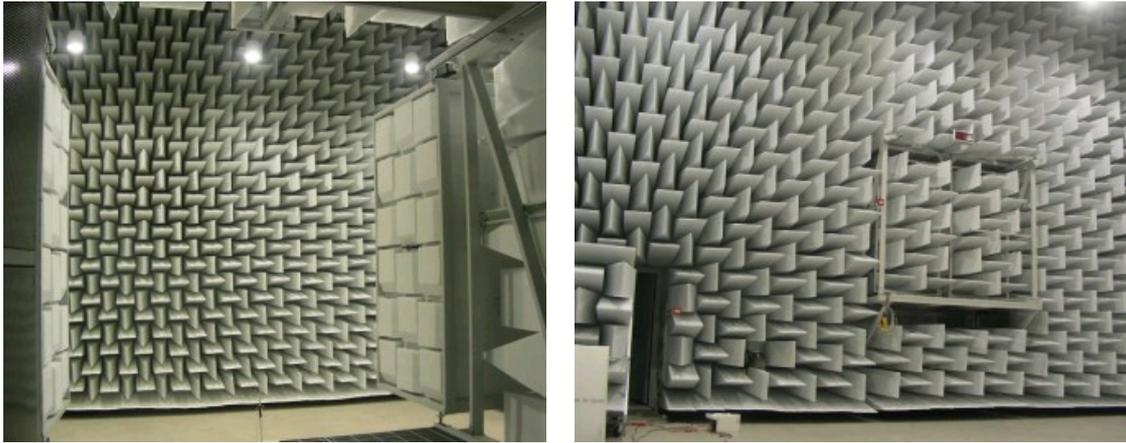


Figura 1: La camera in configurazione semianecoica.

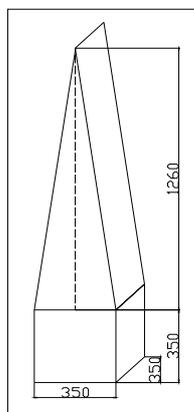


Figura 2: Trattamento fonoassorbente ad impedenza graduale.

I cunei a pavimento, nella configurazione anecoica, sono montati su carrelli con ruote in modo da essere rimossi nella configurazione semianecoica: per poter realizzare un piano calpestabile i carrelli presentano sopra ai cunei un grigliato metallico a trama larga.

Le dimensioni in pianta della camera al netto dei cunei sono 10.1 x 9.5 m, con una altezza di 8.3 m in configurazione semianecoica e 6.5 m in configurazione anecoica.

La camera presenta tre accessi: due in configurazione semianecoica (una porta di servizio di 1.2 x 2.1 m ed un portone di accesso 5.4 x 4.1 m per veicoli di grandi dimensioni) ed una in configurazione anecoica (2.8 x 2.1 m). Tutte gli accessi sono realizzati con doppie porte: una interna ad alto fonoisolamento, con guarnizioni su tutto il perimetro, ed una esterna con caratteristiche di resistenza al fuoco (REI). La distanza tra le due porte è di circa 1 m. Ciascuna porta presenta all'interno un pacchetto di cunei mobili su ruote che la rivestono quando chiusa.

La camera è climatizzata da una UTA con portata d'aria massima di 12.000 m³/h, con batterie di raffreddamento, riscaldamento, umidificazione e post-riscaldamento. L'impianto è dimensionato in modo da avere bassa rumorosità all'interno della camera, con silenziatori ad alta prestazione sui condotti di mandata e ripresa, basse velocità del flusso d'aria nelle condotte, grandi fessure a soffitto per l'immissione in camera dell'aria e ripresa con plenum a pavimento, con fessure di ripresa nascoste sotto i cunei sul perimetro vicino al pavimento.

Nella camera sono inoltre presenti i seguenti impianti di servizio:

- evacuatore di fumi per motori a combustione interna;
- utenza e scarico idrico per prove su elettrodomestici;
- argano per il sollevamento di sorgenti;
- quadri di segnale per l'acquisizione dalla camera di controllo (canali LEMO, XLR e BNC);
- quadro elettrico mono e trifase;
- interfono e videocamera per comunicazione dalla camera di controllo.

La camera è dotata di un sistema di misura di 12 canali SINUS con 10 microfoni ICP ½ pollice Gras, sonda intensimetrica B&K, con software di misura ed elaborazione dati SAMURAI®, con applicativi per misure di potenza sonora secondo la norma ISO 3745 (oltre a ISO 3744 e ISO 3746), misure di direttività delle sorgenti secondo la norma ISO 3745 (anche tridimensionale, in configurazione anecoica), misure di potenza sonora con tecnica intensimetrica secondo le norme ISO 9614-1 e ISO 9614-2 e misure di mappatura intensimetrica di superfici secondo ISO 9614-1.

3. Collaudo acustico

Il collaudo acustico ha riguardato essenzialmente la verifica dei requisiti richiesti dal capitolato d'appalto, ed in particolare:

- l'anechoicità della camera, secondo l'annesso A della norma ISO 3745 [1], da verificarsi nel range compreso tra 50 Hz e 10 kHz (terzi d'ottava);
- isolamento acustico delle porte di accesso, da verificarsi in terzi di ottava rispetto ad una curva minima indicata dal committente;
- rumore dell'impianto UTA in camera, da verificarsi in due condizioni di funzionamento secondo la norma UNI 8199 [2] per quanto riguarda i livelli globali in dB(A) e le curve NR [3] per quanto riguarda lo spettro sonoro in frequenza.

Al momento tutte le verifiche sono state eseguite in configurazione semianecoica.

3.1 Anechoicità

Questa verifica è stata effettuata impiegando due sorgenti rispettivamente per le frequenze gravi e medio-acute. Le sorgenti soddisfano gli stringenti requisiti di omni-direzionalità della norma [1] e la posizione di emissione è stata collocata nei pressi del centro della camera. Le misure sono state effettuate su cinque diverse direttrici con origine nel centro acustico della sorgente sonora. Come richiesto dalla norma [1] quattro delle cinque diagonali (Diag. 1 – Diag. 4) sono state direzionate verso gli spigoli più lontani. La quinta diagonale (Diag. P) è stata direzionata verso la porta d'ingresso utilizzata per la configurazione anecoica. Le diagonali prescelte sono mostrate in pianta e in sezione nella Fig. 3. Lungo ognuna delle direttrici il microfono è stato mosso tramite una carrucola per mantenere controllate la posizione e la direzione di spostamento come mostrato in Fig. 4. E' stato misurato il livello sonoro equivalente nelle bande di terzo d'ottava comprese tra 40 Hz e 12.5 kHz con sollecitazione di rumore bianco in banda larga. I rilievi fonometrici sono stati eseguiti ogni 10 cm partendo da una distanza di circa 50 cm dal centro acustico e fino a circa 8 m (circa 6 m per Diag. P). Per ciascuna direttrice sono state quindi eseguite 77 (56 per Diag. P) misurazioni della durata di 20 s analizzando i risultati in bande di terzi di ottava. In totale le misure eseguite sono state 728.

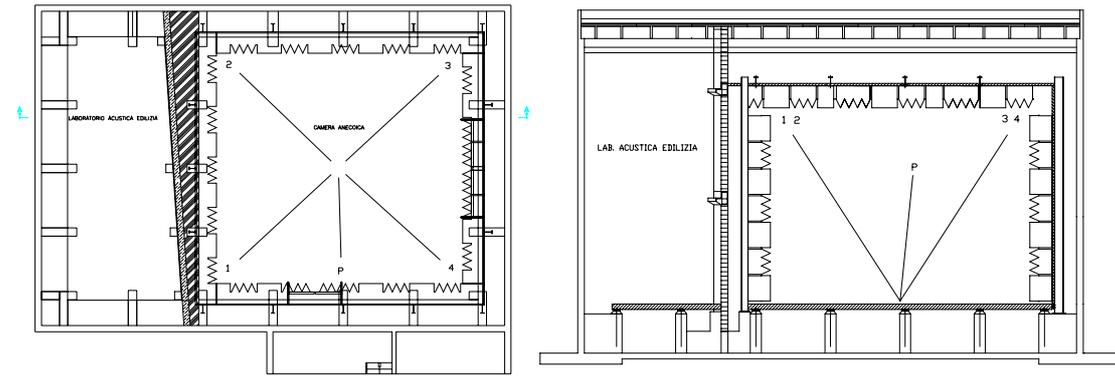


Figura 3 : Pianta e sezione della camera con tracciamento delle diagonali.

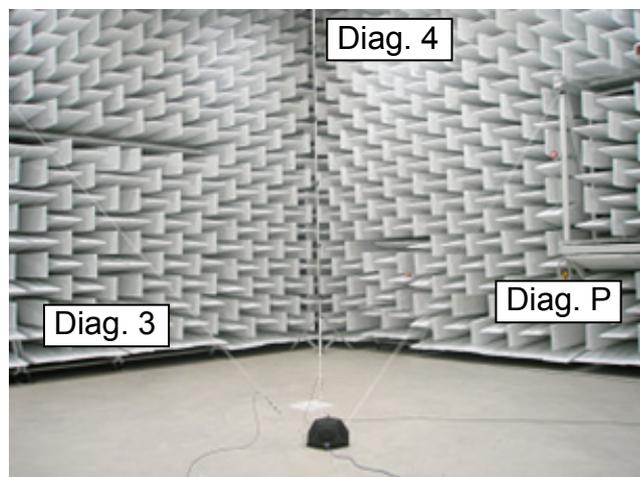


Figura 4: La sorgente per le frequenze gravi e le diagonali 3, 4 e P. Da notare il sistema di movimentazione dei microfoni.

La verifica della rispondenza alle condizioni di campo libero è stata effettuata riportando gli scostamenti fra i valori misurati ad ogni frequenza ed i rispettivi livelli teorici. Questi ultimi sono calcolati in base alla ben nota relazione di campo libero una volta fissato un riferimento comune a 1.5 m di distanza dalla sorgente. La procedura adottata è pienamente conforme alla ISO 3745, è suggerita in letteratura [4], ed evita di ricorrere a dubbie correzioni per il centro acustico. Nella Fig. 5 a), b) e c) sono mostrati come esempio gli scarti nelle bande di terzo d'ottava di 50Hz, 1kHz e 10kHz. Nei grafici sono anche marcate le rispettive tolleranze ammesse dalla normativa di riferimento per una camera semianecoica. Le misurazioni hanno dimostrato che le condizioni di campo libero sono rispettate dalla banda di terzo d'ottava centrata a 50 Hz fino alla banda di terzo d'ottava centrata a 10 kHz per tutti i punti di misura e questo soddisfa pienamente le richieste della norma [1] circa l'insieme delle bande necessarie alla misura di potenza acustica. Considerando anche le bande contigue (40 Hz e 12.5 kHz) si verifica che anch'esse possano essere utilizzate nelle misure a patto di stabilire i punti di misura ad una distanza inferiore ai 5 m dal centro acustico della sorgente sonora. A questa distanza infatti si hanno lungo la Diag. P alcuni scarti oltre le specifiche. Questi sono dovuti alle riflessioni sul telaio metallico che sorregge i cunei fonoassorbenti collocati di fronte alla porta utilizzata in configurazione anecoica.

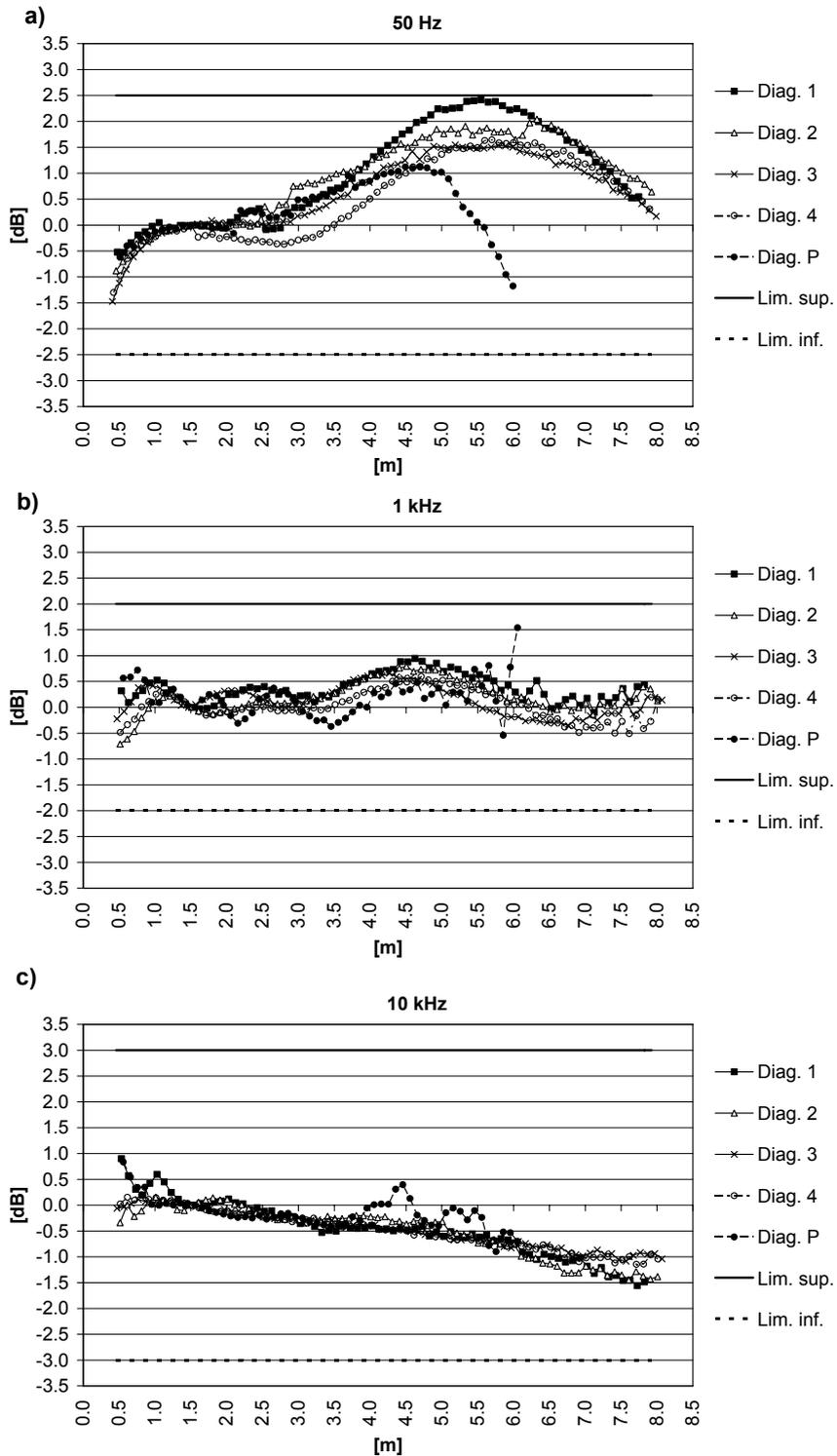


Figura 5: Scarti tra valori misurati e andamenti teorici: sono incluse le tolleranze ammesse dall'allegato A della norma [1].

3.2 Isolamento acustico delle porte di accesso

Le misure di isolamento acustico delle porte di accesso sono state eseguite in condizioni preventivamente definite in capitolato:

- posizionamento dei microfoni ad una altezza di 1.5 m, a 2 m di distanza dalle porte sul lato esterno ed interno (compresi i cunei);
- sorgente sonora direzionale per misure di facciata (in un caso, essendo la distanza della sorgente troppo contenuta, la sorgente è stata diretta verso un angolo per generare un campo diffuso);
- per le porte di dimensione maggiore, sono state eseguite diverse misure sulla lunghezza in pianta, mediando energeticamente i risultati sperimentali.

Le prove sono state eseguite anche in corso d'opera per verificare il raggiungimento dei requisiti richiesti ed individuare i maggiori ponti acustici, localizzate sulle battute centrali tra le due porte, sulle battute laterali e sulla guarnizione di tenuta con il pavimento. Sono stati inoltre resi fonoisolanti i passaggi di accesso tra le due porte, confinanti con l'intercapedine della camera anecoica, in modo da non vanificare l'isolamento acustico della porta interna. In Fig. 6 vengono riportate le curve sperimentali di isolamento acustico per i tre accessi, confrontati con i requisiti richiesti in capitolato (linea continua nera); come si può notare, per tutti gli accessi le prestazioni acustiche sono superiori al richiesto.

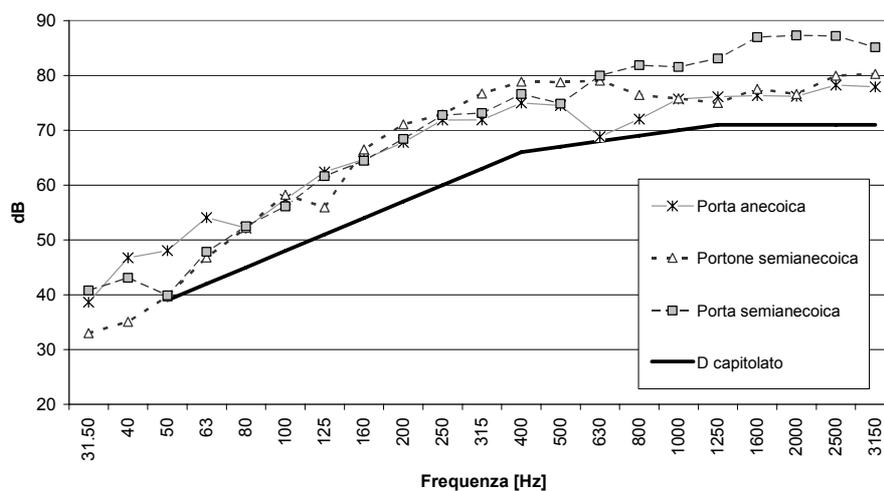


Figura 6: Isolamento acustico degli accessi della camera.

In termini di indice di valutazione D_w (non normalizzato in quanto all'interno della camera il tempo di riverberazione è praticamente trascurabile), i risultati variano tra 76 e 81 dB. Di notevole interesse risulta l'aumento di isolamento acustico durante le fasi di costruzione e registrazione di porte e relative guarnizioni: in Fig. 7 è illustrata l'evoluzione dell'isolamento acustico a partire dalla singola porta fonoisolante non accuratamente registrata, le cui prestazioni sono risultate inferiori anche di 15 dB rispetto ai valori richiesti da capitolato, in particolare:

- l'inserimento della porta REI, priva di guarnizioni, ha determinato un sensibile innalzamento dell'isolamento acustico ad eccezione di una zona compresa tra 1 kHz e 2 kHz, nella quale la presenza di fessure (principalmente a pavimento)

determina una caduta di prestazioni. Parte di questo miglioramento è comunque da ascrivere alla registrazione del portone fonoisolante ed al miglioramento delle sue guarnizioni;

- l'inserimento di guarnizioni sul perimetro della porta REI innalza ulteriormente l'isolamento acustico ma mantiene tra 1.25 kHz e 1.6 kHz una zona leggermente inferiore alle specifiche di capitolato;
- l'inserimento di una battuta rimovibile a pavimento, con guarnizione, ha consentito l'eliminazione dei problemi di isolamento a tutte le frequenze ed un ampio rispetto dei requisiti richiesti.

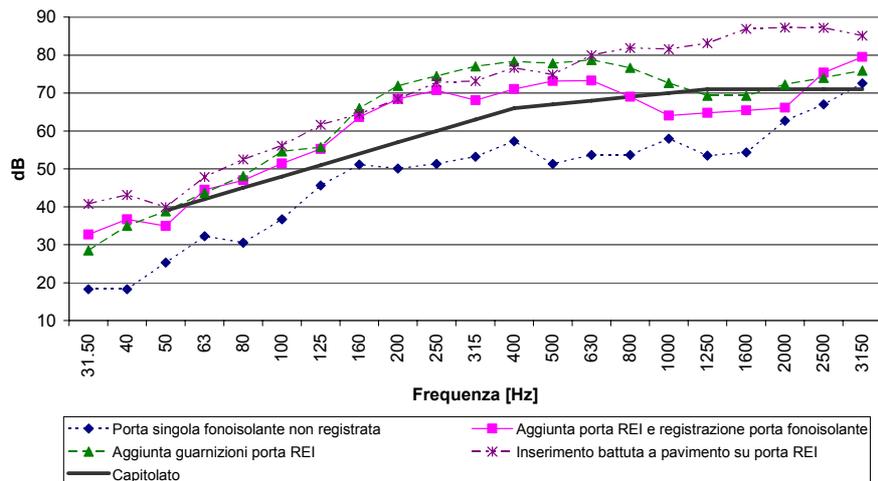


Figura 7: Isolamento della porta d'accesso semianecoica durante la realizzazione.

3.3 Rumore impiantistico e rumore di fondo

Sono state eseguite all'interno della camera misure di rumore di fondo ad impianto UTA acceso e spento, in condizioni invernali, per verificare la rumorosità dell'impianto stesso. Le misure sono state eseguite all'interno della camera in 5 posizioni di misura (al centro della camera e a 2 m dai 4 vertici della stessa), ad una altezza di 1.5 m. Le prove sono state eseguite nelle seguenti condizioni di funzionamento dell'impianto UTA:

1. impianto a velocità massima (portata pari a circa 12.000 m³/h)
2. impianto a velocità controllata da inverter (portata pari a circa 8.000 m³/h)
3. impianto spento.

In Fig. 8 sono riportati gli spettri sonori medi (media energetica dei 5 punti di misura) relativi alla rumorosità dell'impianto a velocità massima, controllata da inverter. Per quanto riguarda la verifica degli spettri sonori, sono stati confrontati gli spettri misurati (non corretti dal rumore di fondo) con le curve di riferimento NR definite dalla norma ISO 1996-1 [3]. Per frequenze superiori a 500 Hz i livelli misurati sono dovuti al rumore di fondo elettrico, proprio della catena di misura mentre per frequenze inferiori a 500 Hz si evidenzia una emissione sonora maggiore della UTA, crescente con la portata d'aria. Dalla Fig. 8 si può notare come la curva relativa al funzionamento dell'impianto a velocità massima rimane inferiore alla curva NR10 fino a 500 Hz, dove i valori misurati corrispondono al rumore elettrico della catena di misura (valore richiesto a capitolato: NR25).

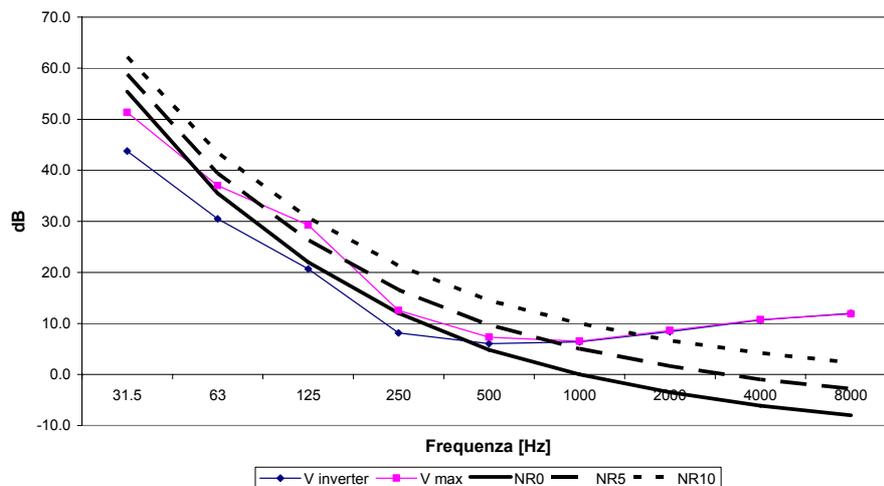


Figura 8: Spettri sonori relativi al rumore degli impianti e confronto con le curve NR.

Per quanto riguarda il funzionamento con controllo *inverter*, la curva sperimentale risulta inferiore alla NR0 fino a 500 Hz (valore richiesto a capitolato: NR20). I livelli sonori medi in dB(A) riscontrati sono riportati in Tab. 1. Per il calcolo del livello d'impianto, secondo la norma UNI 8199 [2], occorre considerare il livello sonoro massimo misurato, correggerlo con il rumore di fondo ed eventualmente con penalizzazioni che considerino eventuali impulsività (non presenti) o componenti tonali (non presenti). Poiché tra il rumore di fondo ed i livelli sonori misurati ad impianto acceso si è verificata una differenza inferiore a 6 dB(A), la norma prevede il calcolo del livello di impianto tramite la formula: $L_i = L_{\text{impianto acceso}} - 1.6 \text{ dB(A)}$.

Il livello sonoro così determinato è sicuramente sovrastimato per l'elevato livello del rumore di fondo (dovuto alla catena di misura). I livelli sonori massimi in ciascuna condizione sono riportati in Tab. 1. Dal confronto con i livelli sonori di capitolato si può notare come i livelli sonori dell'impianto siano ampiamente inferiori alle specifiche richieste.

Tabella 1: valori in dB(A) relativi al rumore all'interno della camera anecoica, ai valori del livello di impianto e a quelli previsti dal capitolato

	<i>Velocità max</i>	<i>Velocità inverter</i>	<i>Fondo</i>
Leq [dB(A)]	19.4	17.3	16.6
L_i UNI 8199 [dB(A)]	18.5	15.4	-
L_{rif} capitolato [dB(A)]	30	25	-

3.4 Prove complementari

All'interno della camera sono attualmente in corso studi più approfonditi sul campo acustico presente, soprattutto a bassa frequenza. Tra le prime prove eseguite, si riportano nel presente lavoro le misure di assorbimento acustico ad incidenza normale eseguite sulle superfici della camera con tecnica impulsiva, e la misura di risposta all'impulso nell'ambiente. Le misure di assorbimento sono state eseguite con la tecnica

descritta dalla norma [5], su una superficie piana di $7 \times 7 \text{ m}^2$, posizionando il microfono di misura ad una altezza di 3.5 m dal pavimento riflettente ed a 25 cm dalla estremità dei cunei, come illustrato in Fig. 9 a). In questo modo è possibile misurare rispetto al piano determinato dai cunei l'impedenza superficiale e l'assorbimento acustico ad incidenza normale. In Fig. 9 b) viene riportata la curva del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in FFT nel range di frequenze 10-10000 Hz.

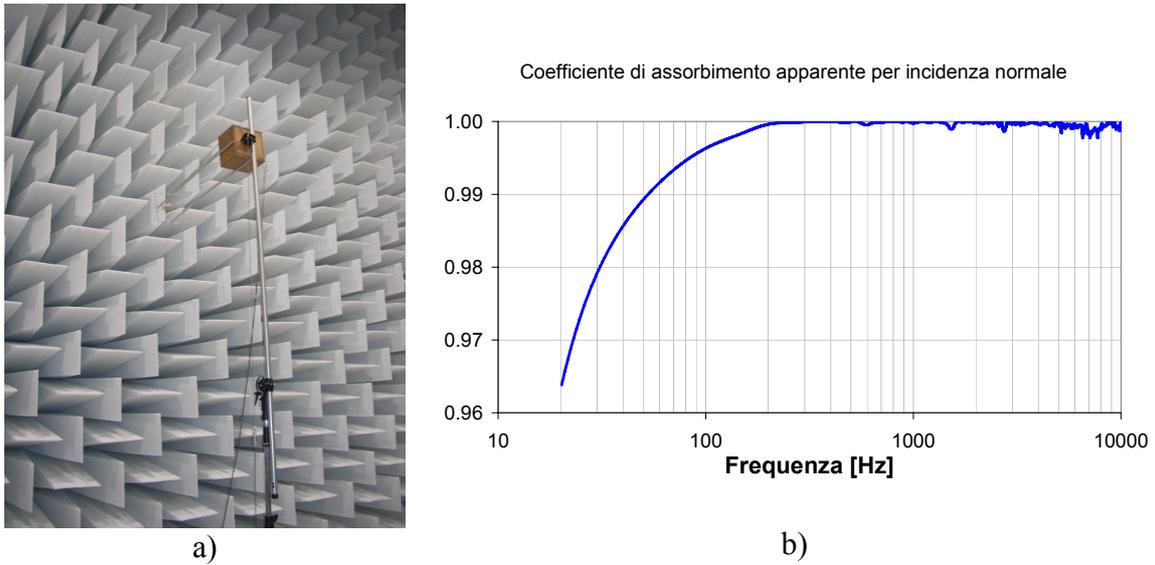


Figura 9: Coefficiente di assorbimento acustico del rivestimento interno. A) setup di misura; b) valori misurati in banda fine.

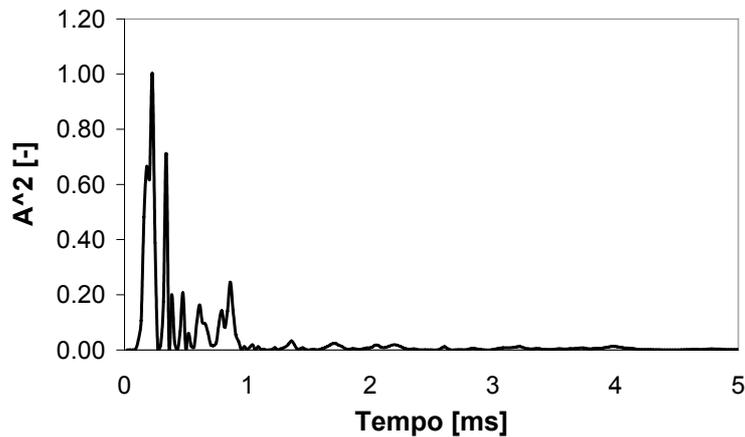


Figura 10: Tempo di riverberazione e risposta all'impulso all'interno della camera

Si noti che il coefficiente di assorbimento assume valori superiori a 0.96 per tutto il range di frequenze esaminato. In particolare per frequenze superiori a 200 Hz il valore di α è praticamente uguale a 1. Le misure di risposta all'impulso sono state eseguite con un semi-dodecaedro (Fig. 4) per verificare la presenza di riflessioni eventualmente proveniente dalle pareti. In Fig. 10 viene riportato un esempio di risposta all'impulso all'interno della camera, dalla quale si può notare come la ripartizione dell'energia nel-

la risposta temporale sia concentrata nel primo millisecondo. Non è stato riscontrato alcun fenomeno di riflessione proveniente dalle pareti, almeno alle frequenze uguali o superiori a 40 Hz dove l'emissione sonora della cassa è significativa. Si noti che nel primo millisecondo si distinguono i diversi segnali impulsivi provenienti dai diversi altoparlanti del semi-dodecaedro.

4. Conclusioni

La camera anecoica realizzata presso il Dipartimento di Ingegneria rappresenta la più grande struttura pubblica di questo tipo in Italia, e presenta prestazioni notevoli sia in termini di anecoicità (con una frequenza di taglio di 50 Hz su tutta la pianta), che in termini di basso rumore di fondo (inferiore a 20 dB(A) anche con impianto di areazione alla massima velocità). La camera verrà utilizzata, oltre che per motivi di ricerca, per la certificazione della potenza sonora di macchine di qualsiasi tipo, secondo la norma ISO 3745 o norme derivate, misure di potenza sonora con tecnica intensimetrica (ISO 9614-1/2), mappature acustiche intensimetriche per l'individuazione delle sorgenti sonore ed in generale per studi sull'insonorizzazione di macchine.

Nei prossimi mesi verrà ripetuta la procedura di verifica dell'anecoicità in configurazione anecoica e approfondito lo studio del campo acustico all'interno della camera, con tecniche sperimentali e di simulazione FEM finalizzate a sviluppare strumenti di progettazione affidabili per future camere anecoiche.

Bibliografia

- [1] ISO 3745 – 2003, *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms.*
- [2] UNI 8199 - 1998, *Acustica - Collaudo acustico degli impianti di climatizzazione e ventilazione - Linee guida contrattuali e modalità di misurazione.*
- [3] ISO 1996 – 2003 - *Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise Part 1: Basic quantities and assessment procedures.*
- [4] K.A. Cunefare, Van B. Biesel, J. Tran, R. Rye, A. Graf, *Anechoic chamber qualification: traverse method, inverse square law analysis method, and nature of test signal*, J. Acoust. Soc. Am., 113 (2), February 2003, pp. 881 – 892.
- [5] ISO 13472-1 - 2002, *Acoustics — Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ - Part 1: Extended surface method.*

Ringraziamenti

Si ringrazia il personale dell'Ufficio Tecnico dell'Università di Ferrara per la direzione dei lavori e i tecnici della Ditta Tecnoacustica srl per l'esecuzione delle opere. Il completamento della Camera anecoica è stato possibile grazie alla attribuzione di fondi "Obiettivo 2" nell'ambito del programma PRRIIT misura 3.4 – azione A – della Regione Emilia Romagna. Si ringrazia inoltre Claudio Bergamini di Lookline per il prestito della sorgente semidodecaedrica HDL301.

