



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



CTN01\_00176\_163601



## TRIM

### Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina

#### Rumore on-board: analisi preliminare delle problematiche di generazione e trasmissione del rumore in campo nautico

Sotto-Progetto	Rumore	
Obiettivo Realizzativo	Identificazione e quantificazione di sorgenti e vie di trasmissione di rumore on-board	
Descrizione attività	Analisi di soluzioni attuali in campo nautico e industriale	
Tipo di documento	Rapporto Tecnico	
Codice del documento	SP.7-OR.2-D.2	
Data di emissione	06/09/2021	
Redazione	Francesco Fidecaro, Simon Kanka	 UNIVERSITÀ DI PISA



FINCANTIERI



AZIMUT BENETTI  
GROUP







## Indice

<b>Sommario</b>	<b>2</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2 Accenni sulle imbarcazioni</b>	<b>4</b>
2.1 La classificazione delle imbarcazioni . . . . .	4
2.2 Le parti strutturali di una imbarcazione . . . . .	4
2.3 I materiali . . . . .	6
<b>3 L'acustica e l'acustica edilizia</b>	<b>8</b>
3.1 Cenni di acustica . . . . .	8
3.2 Cenni di acustica edilizia . . . . .	10
<b>4 Lo studio del rumore e delle vibrazioni all'interno delle navi</b>	<b>12</b>
<b>5 Le mitigazioni acustiche all'interno delle navi</b>	<b>17</b>
<b>6 Conclusioni</b>	<b>21</b>
Riferimenti bibliografici	<b>22</b>



## Sommario

Dopo avere tracciato a grandi linee le caratteristiche della costruzione navale si procede a stabilire, nell'ambito dell'acustica, quale sia il settore maggiormente affine, identificandolo con l'acustica edilizia per quanto riguarda la trasmissione del rumore. Successivamente vengono discusse alcune delle norme presenti, sia in campo edile che in campo nautico, e come queste ultime possano evolversi a seguito di studi specifici. Infine i tipi principali di intervento sono presentati, assieme ad alcuni studi svolti, sottolineando il vantaggio dell'integrazione in sede di progettazione delle problematiche acustiche rispetto a interventi correttivi a posteriori.

## 1 Introduzione

Negli ultimi anni si è sempre di più assistito ad una maggiore attenzione alla tematica dell'inquinamento acustico in ambito navale, sia da un punto di vista del rumore prodotto dalle navi in ambito portuale, sia dal punto di vista del rumore all'interno delle stesse imbarcazioni.

Il recente programma INTERREG MARITTIMO Italia-Francia 2014-2020, con gli specifici progetti DECIBEL, RUMBLE, MON ACUMEN, fra le altre cose, ha studiato l'impatto che il rumore navale ha sulla popolazione che vive in prossimità delle aree portuali e l'emissione acustica che le varie imbarcazioni hanno nelle differenti condizioni di operatività [1, 2, 3, 4, 5, 6].

All'interno delle navi, invece, altri studi si sono incentrati sulla salute dei marinai e sulla prevenzione degli effetti del rumore sulla salute portati da una esposizione prolungata a elevati livelli di rumore [7, 8, 9, 10]. Oltre agli aspetti legati alle attività professionali, anche le navi da trasporto passeggeri hanno ricevuto attenzioni all'esposizione al rumore dei passeggeri nelle cabine [11, 12, 13, 14]. Nei recenti anni sono anche aumentate le richieste di armatori e ospiti che, oltre alla tradizionale domanda di ambienti funzionali ed esclusivi, desiderano una migliore qualità della vita a bordo, che sempre più spesso coincide con ambienti più silenziosi e confortevoli.

L'attenzione crescente dell'industria navale nei confronti del comfort acustico ha spinto verso la ricerca di soluzioni di mitigazione acustica che passano dalle modifiche strutturali o di gestione dei locali, all'utilizzo di specifici materiali atti alla riduzione del rumore negli ambienti interessati.

A differenza dei normali studi di mitigazione di impatto acustico ogni scelta fatta deve tuttavia sposarsi a pieno con gli altri requisiti di funzionalità, massa, sicurezza, costi di costruzione e spese di esercizio a cui una nave deve rispondere.

Partendo da cenni sulle differenti imbarcazioni e le loro strutture e materiali impiegati, il presente documento riporta i principi base dell'acustica edilizia, che possono essere applicati poi nel campo della riduzione del rumore all'interno di imbarcazioni. Oltre a riportare le principali sorgenti di rumore e vibrazioni in gioco, saranno descritti alcuni materiali che possono mitigare il rumore e saranno infine riportati dei casi di abbattimento del rumore di imbarcazione presenti in letteratura.

## 2 Accenni sulle imbarcazioni

### 2.1 La classificazione delle imbarcazioni

Un qualsiasi mezzo di trasporto in grado di spostarsi in modo autonomo galleggiando sull'acqua è definito nave. All'interno di questa definizione rientrano quindi una molteplicità di imbarcazioni diverse non soltanto nella morfologia, ma anche negli usi. Classificare le imbarcazioni è quindi fondamentale per una corretta descrizione e progettazione. Le principali distinzioni si possono effettuare sulla base del sistema propulsivo utilizzato, a vela o a propulsione meccanica, oppure in base alla lunghezza dello scafo. Un'altra classificazione si basa sulla morfologia dello scafo, quali monoscafo, catamarani, trimarani o multiscafi. Le barche a motore si distinguono a loro volta in due macro categorie, le navi e gli yacht. Sono definite navi quelle imbarcazioni di grosso tonnellaggio con finalità commerciali. Al suo interno esistono ulteriori suddivisioni come navi passeggeri o navi da carico. Le prime possono essere suddivise ulteriormente in traghetti, navi da crociera, navi di linea e transatlantici. Le seconde, invece, hanno definizioni precise come ad esempio tanker (petroliera o navi per liquidi), bulk-carrier (navi mercantili con carichi sfusi) e car-carrier (navi per il trasporto di automobili). Gli yacht a motore possono essere divisi in diverse tipologie in base ai criteri d'uso, sistemi propulsivi o di rendimento: motor-yacht sono i panfili pontati interamente abitabili le cui caratteristiche permettono una permanenza prolungata a bordo, di cui una sottocategoria è rappresentata dai super-yacht, mezzi di elevate dimensioni e quindi elevato costo di armamento.

Secondo il criterio della destinazione d'uso, esistono i "fisherman", ovvero i motor-yacht progettati appositamente in base alle esigenze dettate dalla pesca sportiva d'altura, gli "offshore", motoscafi veloci e poco abitabili, i "fast-commuter", grossi motoscafi offshore con interni raffinati e prestazioni elevate, "runabout", motoscafi aperti per brevi uscite, "cruiser", motoscafi cabinati o semicabinati per brevi crociere ed i gommoni. Le piccole imbarcazioni a motore a loro volta distinte in fuoribordo ed entro-bordo a seconda della posizione del motore.

Le barche a vela, a loro volta, sono principalmente classificate in base all'andamento velico (sloop, cutter, yawl, ketch, golette, ecc). Tuttavia, per lo scopo del presente lavoro, le problematiche poste dalle barche a vela rientrano in quelle delle categorie precedenti, eccetto che nelle condizioni di navigazione esclusivamente a vela, che comporta l'assenza della principale sorgente sonora (motori di propulsione).

### 2.2 Le parti strutturali di una imbarcazione

Un'imbarcazione è principalmente composta dallo scafo e dalla sovrastruttura. Lo scafo, parte principale e più importante della nave, è costituito da un corpo solido e stagno che racchiude i volumi necessari per la sistemazione di persone o merci, a seconda della tipologia di nave. In esso trovano posto anche i macchinari per la propulsione e per il governo della nave.

Le sovrastrutture sono le parti costruite al di sopra dello scafo, di solito destinate a

contenere gli alloggi per l'equipaggio o i passeggeri. Inoltre trovano posto i locali per la condotta della navigazione e gli spazi necessari per la manovra. Questi due elementi sono costituiti da un insieme di mezzi resistenti che prendono il nome di ossature e da un involucro che le ricopre esternamente, il fasciame. Le prime danno alla nave forma e robustezza; il secondo assicura l'impermeabilità rendendo possibile la galleggiabilità della nave oltre a contribuire ad accrescere la solidità.

Lo scafo è la parte resistente della nave, mentre le ossature vengono proporzionate, distribuite e orientate in modo da formare un sistema strutturale capace di sopportare le sollecitazioni derivanti dalle forze agenti dall'esterno e all'interno della nave. Lo scafo è composto da due parti perfettamente simmetriche rispetto al piano verticale che ne attraversa la sua lunghezza da poppa a prua. Parte dritta è definita quella che si trova sulla destra guardando da poppa a prua, e parte sinistra quella che si trova alla sua sinistra. Le sezioni ortogonali al piano diametrale si definiscono sezioni trasversali o ordinate. Tra queste assume particolare importanza la sezione maestra, ovvero il piano passante per il punto di massima larghezza dello scafo, perché suddivide lo scafo in due parti: quella prodiera e quella poppiera. La parte immersa dello scafo prende il nome di opera viva o carena, mentre quella che resta fuori dall'acqua. La superficie ideale che separa queste due parti si chiama piano di galleggiamento.

Le sovrastrutture sono quindi quelle le parti sopra la linea di galleggiamento e possono essere complete o incomplete, ovvero possono essere estese per tutta la lunghezza dello scafo o soltanto per una parte.

Le ossature sono composte da verghe profilate che alle volte vengono associate a delle lamiere per accrescere la resistenza. Costituiscono un complesso studiato per assicurare ad ogni punto della costruzione quella solidità che si considera indispensabile per l'integrità della nave. La presenza delle ossature è fondamentale anche per sostenere il fasciame delle sovrastrutture non resistenti e per assicurare buoni collegamenti con le altre parti.

Nelle moderne navi è stato adottato un sistema di costruzione con il quale la robustezza dello scafo è affidata a strutture prevalentemente longitudinali nelle zone maggiormente esposte agli sforzi flettenti, e a strutture trasversali nelle zone di sforzi di tipo trasversale. In questo modo vengono realizzati scafi con fondo e ponti a struttura longitudinale mentre i fianchi, la prua e la poppa realizzati con struttura trasversale.

Infine è bene introdurre il fasciame, ovvero, l'involucro stagno che ricopre le ossature della nave ed è costituito da file di lamiere chiamate corsi collegati tramite saldatura elettrica. Le lamiere dei fasciami saldati sono disposte con le teste e i lembi affiancati e uniti da cordoni di saldatura, in modo da far scomparire le sovrapposizioni. Il fasciame può essere: fasciame esterno, se è il rivestimento della superficie esterna delle ossature di fondo e dei fianchi; fasciame dei ponti, che rappresenta il rivestimento della superficie superiore delle ossature e dei ponti; fasciame delle paratie, il rivestimento delle ossature delle paratie stagne e delle paratie terminali delle sovrastrutture incomplete.

Il fasciame dei ponti è costituito da corsi longitudinali di lamiere che ricoprono la superficie superiore delle ossature in modo tale da formare un involucro stagno. A

volte, il fasciame metallico, viene rivestito con un controfasciame in legno o con un altro materiale isolante e antisdrucchiolevole al fine di migliorare le condizioni di comfort abitativo degli ambienti sottostanti e rinforzare il ponte riducendo allo stesso tempo lo spessore di fasciame metallico.

L'installazione del controfasciame presenta però notevoli difficoltà nella garanzia dell'impermeabilità dei collegamenti. Per evitare questi inconvenienti, il fasciame da ponte di molte navi viene rivestito con appositi materiali, chiamati intonaci da ponte, che sono isolanti e antisdrucchio, anticorrosivi, incombustibili e più leggeri del legno.

### 2.3 I materiali

Il primo e più antico materiale utilizzato è il legno (quercia, Douglas, pino, cipresso, mogano e teak) che, oltre al fascino retrò, presenta pregi e difetti. Nella costruzione di scafi e coperte ha soprattutto il difetto di lasciare passare l'acqua nelle giunture tra le tavole. Infatti, quando il legno assorbe l'umidità si dilata mentre quando la perde si contrae. Questo continuo movimento allenta la chiodatura, crea fessure e crea danni o inestetismi.

Tra i pregi, invece, nell'interior design il legno gioca un ruolo chiave così come nel rivestimento dei ponti e la pavimentazione interna. Tuttavia, se all'interno dell'imbarcazione gli arredi durano perché sono ben protetti, all'esterno il ponte subisce gli agenti atmosferici rovinandosi e consumandosi. Per ovviare questi problemi, oggi le imbarcazioni non vengono più costruite interamente in legno massello, bensì viene utilizzato il compensato marino, un tipo di legno multistrato rigido e leggero, molto resistente all'umidità, ideale da utilizzare dove è necessario abbattere la trasmissione delle vibrazioni. La struttura è caratterizzata da una stratificazione elevata di piallacci nobili, in grado di rendere il tutto più stabile e uniforme, per quanto riguarda la resistenza sia del piano che nelle principali direzioni della fibratura che lo compone. Tutte queste caratteristiche prestazionali ne fanno un materiale molto utilizzato sia per quanto riguarda gli esterni, che per l'arredamento, specificatamente nel settore nautico.

Un altro materiale largamente usato è la vetroresina, un tipo di plastica rinforzata con vetro ed impregnata con resine termoindurenti. La vetroresina è un buon materiale per la costruzione navale perché ha il pregio di essere resistente agli agenti atmosferici anche se ingiallisce. Nonostante abbia vantaggi a livello economico e di durata nel tempo, ha dei difetti quali la mancanza di rigidità e la poca resistenza all'urto.

La vetroresina non richiede manutenzioni particolari perché non marcisce, non arrugginisce, non si ammacca e non deve essere dipinta ogni anno, risultando così ideale per l'utilizzatore perché costa poco e dura a lungo. Tuttavia, la vetroresina, seppur stagna, non è del tutto impermeabile e può accadere che l'acqua superi la barriera del gelcoat (parte impermeabile) e per osmosi intride la vetroresina in modo lento, ma dannoso.

L'acciaio è uno tra i materiali più utilizzati nella costruzione navale delle grandi imbarcazioni, perché dà origine a strutture molto rigide e robuste, anche se molto pesanti, è un materiale che si può lavorare facilmente anche all'aperto e, per quanto sia difficile da modellare, vi sono una serie di macchine in grado di ridurre la fatica. L'acciaio

è molto robusto, elastico, isotropico e giuntato per saldatura. Ciò che rovina questo materiale è la ruggine. Le costruzioni in acciaio col tempo si assottigliano quindi è necessario lasciare dei margini di spessore per la corrosione. Le costruzioni in acciaio hanno molti vantaggi rispetto a quelle in legno, minori rischi di incendi e allagamenti. Maggiore facilità e rapidità di manutenzione e periodo di servizio relativamente lungo (anche più di 40-50 anni). Maggiore leggerezza, l'acciaio ha un peso specifico maggiore del legno, ma l'acciaio è molto più resistente e sono necessari profili più sottili. Maggiore capacità di volume libero disponibile. A fronte di questi vantaggi, ci sono dei piccoli difetti, deviazione delle bussole magnetiche, corrosione, minore resistenza agli urti e maggiore possibilità di lacerazione dello scafo.

La lega di alluminio è un metallo molto leggero e che non si arrugginisce e non si degrada. Tuttavia, le proprietà meccaniche dell'alluminio sono inferiori a quelle dell'acciaio, quindi il dimensionamento strutturale deve essere superiore a quello dell'acciaio. Nonostante questo, il risparmio di peso che si ottiene nei confronti del ferro è circa del 40%. Per certe tipologie di navi è quindi conveniente costruire lo scafo in acciaio e le sovrastrutture in lega leggera, con risparmio di peso e abbassamento del centro di gravità. In questo caso, la costruzione in lega leggera ha come svantaggi il costo, la corrosione elettrolitica e il rischio d'incendio.

Anche leghe di rame vengono utilizzate in nautica. Il bronzo, che non si altera nel tempo perché inattaccabile dagli agenti atmosferici e dell'acqua di mare. È amagnetico e adattissimo alla fonderia perché è molto plastico e ha un punto di fusione più basso rispetto all'acciaio. Ha buone caratteristiche meccaniche e grande resistenza alla corrosione. L'ottone, simile al bronzo ma di più bella presenza, viene utilizzato per la produzione di accessori.

Il cupronichel trova impiego negli impianti di dissalazione e condensatori marini perché ha un'ottima resistenza alla corrosione marina, all'erosione e al biofouling, ovvero alla colonizzazione dei molluschi e della vegetazione marina.

La vetroresina è un membro della categoria di quei materiali compositi sviluppati per obiettivi sportivi, quando leggerezza e grande resistenza agli sforzi sono richieste. L'utilizzo di tali materiali, con la possibilità di personalizzare le caratteristiche meccaniche, assicura una ulteriore flessibilità rispetto ai materiali tradizionali, da sfruttare specialmente in imbarcazioni di gamma alta.

I materiali elencati sono tradizionalmente utilizzati per le loro caratteristiche meccaniche e la loro lavorabilità per l'aspetto strutturale della costruzione navale. Tali caratteristiche sono difficilmente conciliabili con una ridotta trasmissione del rumore dalle sorgenti agli altri ambienti della nave. Anche la leggerezza, che può risultare in minore potenza propulsiva necessaria, non costituisce vantaggio quando si va a considerare l'isolamento acustico. La mitigazione del rumore necessiterà quindi di attenzione a livello progettuale già a livello di organizzazione generale degli spazi, per scendere nel dettaglio, richiedendo quindi una integrazione delle conoscenze di acustica nelle capacità di progettazione.

## 3 L'acustica e l'acustica edilizia

### 3.1 Cenni di acustica

L'acustica è quella parte della fisica che si occupa della generazione e propagazione del suono, ovvero quelle onde che eccitano il nervo acustico e che possono essere trasmesse per via aerea, oppure nei solidi e nei liquidi.

Una sorgente di onde sonore nell'aria è sempre dovuta al movimento vibratorio di qualche corpo a contatto con l'aria ed i fenomeni acustici, quindi, sono delle perturbazioni di carattere oscillatorio che si propagano con una data frequenza in un mezzo elastico (gas, liquido o solido). Comunemente, vengono definiti "suoni" i segnali sonori composti da un certo numero di frequenze fisse e ben definite, ossia da una somma di onde componenti sinusoidali aventi particolari caratteristiche di periodicità, mentre vengono definiti "rumori" quei fenomeni completamente casuali costituiti da un numero infinito di componenti, ciascuna con caratteristiche di ampiezza e di fase puramente aleatorie.

Secondo la teoria, necessaria per studiare generazione natura e propagazione del suono, un'onda è caratterizzata da:

- lunghezza d'onda ( $\lambda$  [m]): spazio tra due picchi successivi di un'onda;
- periodo ( $T$  [s]): intervallo di tempo necessario per un'oscillazione completa;
- frequenza ( $f$  [ $s^{-1}$ ] [Hz]): inverso del periodo, ossia numero di oscillazioni complete per unità di tempo;
- velocità di propagazione ( $c$  [m/s]): velocità di propagazione dell'onda.

Il suono si propaga ad una velocità che dipende dalla natura del mezzo elastico in cui si diffonde, dalla temperatura, dalla pressione e dall'umidità.

$\lambda = c/f$  ( $\lambda$  = lunghezza d'onda,  $c$  = velocità di propagazione,  $f$  = frequenza) è la relazione che lega questi parametri. La lunghezza d'onda assume un'importanza particolare quando ha una misura paragonabile con le dimensioni dell'ambiente in cui si diffonde il suono, in quanto determina direttamente il fenomeno delle onde stazionarie.

L'ampiezza dell'oscillazione, che determina l'intensità del suono, è proporzionale all'energia dell'onda e quindi alla potenza se considerata nell'unità di tempo. L'intensità è percepita dall'essere umano secondo un andamento logaritmico, motivo per cui viene usato il decibel (dB), che esprime il rapporto fra due grandezze omogenee secondo una scala logaritmica in base 10, come unità di misura.

Di particolare interesse è capire quando il suono interagisce con degli ostacoli. Il loro materiale e dimensioni condizionano la natura dell'interazione al pari del contenuto di frequenze del suono che si sta considerando. Quando un'onda incontra una superficie, possono succedere i fenomeni di riflessione, diffrazione, rifrazione e assorbimento riportati in Figura 1.

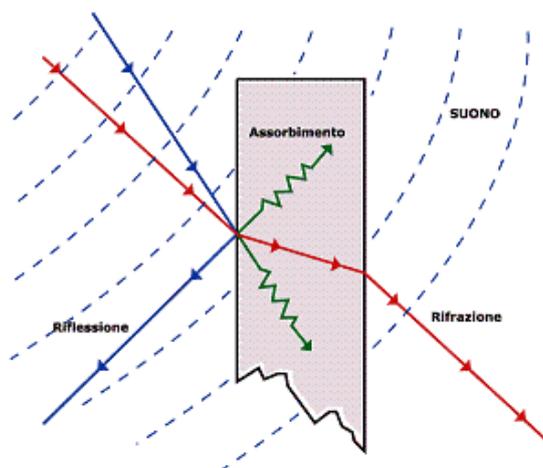


Figura 1: Riflessione, diffrazione, rifrazione e assorbimento di un'onda sonora.

Un'onda che incide su una superficie piana con un angolo di incidenza  $\alpha$  (tra la normale alla superficie e la direzione di propagazione dell'onda) viene riflessa con un angolo di riflessione pari ad  $\alpha$ . Le superfici concave tendono a concentrare il suono in un preciso punto creando distribuzioni sonore disomogenee. Viceversa le superfici convesse hanno la proprietà di diffondere il suono e dunque sono ampiamente usate per migliorare l'acustica degli ambienti.

Un suono che si propaga in una stanza raggiunge l'ascoltatore in diversi modi. Il primo segnale che arriva all'ascoltatore, che è anche il più forte, è quello diretto, seguito, con sfasamento, dei segnali che hanno subito una sola riflessione su una parete e dunque hanno ampiezza minore rispetto al segnale diretto a causa della perdita parziale di energia dovuta alla riflessione. Dopo un ulteriore ritardo arrivano tutti i segnali che hanno subito più di una riflessione, di ampiezza ancora minore rispetto alle prime riflessioni.

La rifrazione è il fenomeno secondo il quale un'onda che attraversa due mezzi di diversa densità cambia direzione, dovuto alla diversa velocità che il suono ha in mezzi diversi.

La diffrazione, invece, si verifica quando un suono aggira un ostacolo. Dipende fortemente dalla frequenza del suono, in quanto suoni con una grande lunghezza d'onda (e dunque bassa frequenza) superano con facilità ostacoli con una dimensione minore della loro lunghezza d'onda.

L'assorbimento rappresenta la parte di energia acustica convertita in energia termica da parte di una superficie quando il suono gli arriva incontro.

In generale questi quattro fenomeni sono tutti presenti nel momento in cui un'onda sonora incontra un ostacolo in un ambiente chiuso. Il campo acustico è quindi il risultato della sovrapposizione delle onde dirette e delle onde riflesse, con le prime che provengono dalla sorgente e raggiungono direttamente l'ascoltatore, e le seconde sono invece prodotte da tutte le riflessioni sulle pareti che delimitano l'ambiente.

### 3.2 Cenni di acustica edilizia

L'acustica edilizia è quella parte dell'acustica che ha lo scopo di fronteggiare il disagio acustico che affligge la maggior parte degli ambienti interni, solitamente intese come civili abitazioni. Norme progettuali garantiscono l'isolamento acustico adeguato sia in fase di progettazione di nuovi edifici, sia in fase di ristrutturazione di edifici esistenti.

Qualora i requisiti non siano soddisfatti, un adeguato isolamento acustico deve essere valutato in base a diversi tipi di sorgenti di rumore:

- Interne (ad esempio impianti e/o servizi, altri inquilini, ecc.);
- Esterne (ad esempio traffico e rumore ambientale in genere);
- Per via aerea fra ambienti: valutazione dell'isolamento fra due ambienti adiacenti e sovrapposti appartenenti a differenti unità abitative.
- Per via aerea di facciate: valutazione dell'isolamento delle facciate rispetto al rumore proveniente dall'esterno.
- Da calpestio: valutazione dell'isolamento acustico da rumori da calpestio con sorgente normata.

In Italia, l'inquinamento acustico è normato dalla Legge 26 ottobre 1995, n. 447 [15], che stabilisce i principi fondamentali di tutela dell'ambiente esterno e abitativo. Il D.P.C.M. del 5 dicembre 1997 [16] ha stabilito i requisiti acustici delle sorgenti sonore interne agli edifici ed i requisiti acustici passivi degli edifici, al fine di limitare l'esposizione dei cittadini al rumore. Le misure di verifica delle prestazioni in opera sono affidate a professionisti abilitati e iscritti negli appositi albi.

I parametri che caratterizzano i requisiti acustici passivi degli edifici in edilizia sono:

- Indice di valutazione del potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti  $R'_w$  (dB);
- Indice di valutazione del livello di rumore di calpestio di solai normalizzato  $L'_n$  (dB);
- Indice di valutazione dell'isolamento acustico standardizzato di facciata  $D_{2m,nT}$  (dB);
- Il tempo di riverberazione  $T$  (s).

Si rimanda a tale decreto per una maggiore descrizione, mentre per le tecniche di misura si deve menzionare la norma UNI 11367 del 2010 [17] che definisce una procedura per la classificazione acustica degli edifici secondo misure fonometriche. Ciascun appartamento dell'edificio esaminato viene caratterizzato in base a 5 classi acustiche, una per ogni tipologia di rumore (rumori aerei, calpestio, isolamento di facciata, rumori da impianti a funzionamento continuo e discontinuo).

Al di là dei limiti di legge, per parlare di comfort acustico, ci si concentra sulla necessità di non essere disturbati dai rumori che provengono dall'esterno o dall'interno. Tuttavia la percezione del disturbo dipende da molti aspetti, alcuni del tutto soggettivi. La sensazione di comfort dipende in modo significativo dal livello sonoro della sorgente



disturbante e dal livello presente nell'ambiente disturbato a sorgente spenta. Una sorgente di rumore non viene percepita se nell'ambiente ricevente c'è un livello di pressione sonora piuttosto elevato oppure, al contrario, una sorgente poco disturbante può essere chiaramente udita in un ambiente con un basso livello di rumore. I limiti del D.P.C.M. precedentemente citato non dipendono dai livelli sonori, ma solamente dalle prestazioni di isolamento ai rumori aerei ( $R'_w$ ), che riguarda il solo sistema costruttivo, dall'isolamento di facciata ( $D_{2m,nT}$ ), che non considera il livello di rumore esterno, dal livello di calpestio ( $L'_{nw}$ ), che si misura azionando una sorgente standardizzata e dai limiti sugli impianti ( $L_{ASmax}$  e  $L_{Aeq}$ ) che non considerano il livello di rumore esistente nell'ambiente ricevente. Pertanto, in alcune situazioni i valori limite potranno essere considerati adeguati, in altre risulteranno necessariamente insufficienti.

## 4 Lo studio del rumore e delle vibrazioni all'interno delle navi

Quanto riportato nel capitolo precedente vale anche all'interno delle navi, e può fungere da base per studiare il comfort abitativo ed eventualmente mitigare l'esposizione al rumore. Infatti, il comfort acustico sta diventando un obiettivo sempre più importante nella progettazione delle imbarcazioni di grandi e medie dimensioni, ma le problematiche riguardanti l'isolamento acustico del settore navale hanno da sempre presentato gradi di complessità, per impegno progettuale, ben diversi da quelli riscontrabili nell'edilizia tradizionale.

Nelle imbarcazioni, le sorgenti di rumore più importanti che maggiormente influenzano e limitano il comfort acustico in navigazione sono i due principali dispositivi dell'impianto di propulsione: motori (compresi gli impianti di scarico gas) e riduttori. In dettaglio, si possono trovare:

- organi dell'impianto di propulsione (motori principali, riduttori, eliche, impianti di scarico motori);
- impianti ausiliari (gruppi elettrogeni, impianti di scarico a essi associati);
- impianti idraulici (pompe, attuatori idraulici, bow thruster, verricelli, gru);
- impianti vari, acqua/aria (motori elettrici, compressori, pompe, valvole);
- ventilatori (sala macchine, fan coil interni cabine, unità trattamento aria);
- impianti elettrici (quadri, inverter e dispositivi elettrici sotto tensione).

Il rumore generato dalle sorgenti viene diffuso nei vari ambienti attraverso i due principali meccanismi di trasmissione: per via aerea o per via strutturale. Nella prima, le onde viaggiano all'interno dell'ambiente e quando raggiungono una parete vengono in parte riflesse all'interno dello stesso e in parte trasmesse agli ambienti adiacenti. L'energia acustica trasmessa dà luogo a quella che viene chiamata trasmissione del rumore per via aerea. Nella seconda, la struttura sottostante un macchinario trasmette vibrazioni (energia meccanica) che, una volta trasmessa alla struttura, si propaga all'interno di essa e, a causa del basso livello di smorzamento tipico dei materiali utilizzati per la costruzione della struttura (acciaio, alluminio vetroresina), si diffonde anche in aree molto distanti dalla sorgente. Una volta che l'energia raggiunge un pannello o una superficie piana induce in essa vibrazioni che a loro volta generano pulsazioni di pressione nell'aria circostante producendo rumore nell'ambiente. Un'immagine riassuntiva è riportata in Figura 2.

La International Maritime Organization (IMO) ha emanato normative riguardanti la salute dell'equipaggio di specifici tipi di imbarcazione, che possono essere estese a diverse tipologie di queste con particolari attenzioni. Le sorgenti considerate sono prevalentemente quelle derivanti da meccanismi interni dell'imbarcazione, precedentemente elencati, ed esclude i possibili rumori derivanti dai segnali acustici di allarmi o per le comunicazioni pubbliche. Nella IMO MSC.337(91) [18] vengono specificate le condizioni per le misure da effettuare sia quando la nave si trova in movimento che in porto. Le prescrizioni riguardano solamente i rumori interni delle navi, a parte per

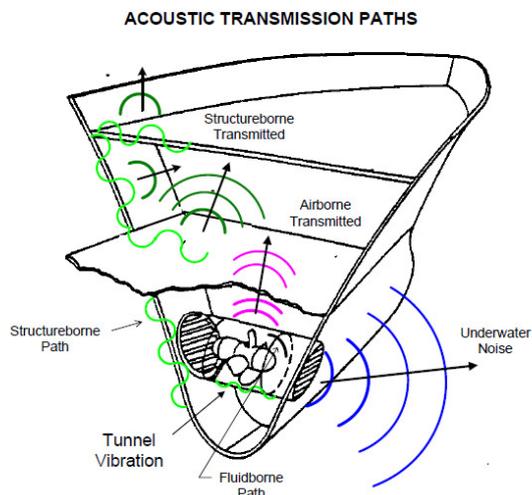


Figura 2: Generazione e propagazione del suono all'interno di un'imbarcazione.

navi mercantili di grandi dimensioni per le quali, nel caso delle misure nel porto, deve essere incluso come rumore esterno anche il disturbo generato dallo scarico e carico se questo porta a far superare il livello misurato il livello limite fissato per le zone a uso abitativo e quelle a uso lavorativo, escluso le zona del motore. L'esposizione al rumore dell'equipaggio è suddivisa in differenti zone operative, oltre che essere indicati i metodi di prevenzione. La normativa impone che le misure siano eseguite sia in ponderazione A che C e se necessario in bande di ottave in un range da 31.5 Hz a 8 kHz mediante l'uso di un fonometro integratore con media spaziale, su un periodo fino ai 15 s o quando il livello si stabilizza. Altre normative di rilevanza sono la ISO 2923:1996 [19] e la ISO 717-1:2020 [20]. Nella misurazione dell'esposizione al rumore dell'equipaggio deve essere anche considerata la generica ISO 9612:2009, che rimane valida anche in ambito navale [21]. In Figura 3 sono riportati i requisiti secondo la direttiva europea 2003/10/EC [22].

$P_{Cpeak}$ Values	Not allowed. Reduce noise exposure immediately. Identify reasons for overexposure. Avoid recurrence.	$L_{EX,sh}$ Values
140 dB(C)	Impose restricted access to workplace. Appropriate signing of workplace. Documentation of health surveillance necessary. Audiometric testing is the right of employee. Hearing protection mandatory to use.	87 dB(A)
137 dB(C)	Technical and/or organisational measures required. Documenting health surveillance (if opted). Audiometric testing may be provided to employee, if opted. Hearing protection may be made available.	85 dB(A)
132 dB(C)	Information and training of employee. Risk assessment	80 dB(A)

Figura 3: Livelli di esposizione al rumore e azioni corrispondenti da intraprendere [22].

Lo studio dei parametri acustici caratterizzanti la qualità di ambienti interni a imbarcazioni, quindi, oltre a tenere conto dei tipici parametri acustici associati a rumore diretto nelle imbarcazioni stesse, deve tenere conto anche delle vibrazioni generate dai macchinari e che si trasmettono al corpo umano. Questo vale sia per lo studio del comfort all'interno di yacht o navi passeggeri, che in qualsiasi tipo di imbarcazione con presenza di lavoratori. Infatti, l'equipaggio non deve mai essere sottoposto a livelli di rumore maggiori di 85 dB(A) se non protetto da appositi dispositivi. La ISO 9612:2009 [21] descrive i metodi per la valutazione dell'esposizione al rumore delle diverse categorie di lavoratori e fissa come limite per i picchi di rumore un livello di 135 dB(C) in assenza di cuffie protettive per l'udito. Inoltre, vengono specificate le misure di protezione da adottare per l'esposizione di livelli di pressione sonora superiore a 85 dB(A). La risoluzione della IMO A.468(XII) [23] già aveva fissato nel 1981 i limiti di rumore da rispettare internamente a vari ambienti delle navi, come riportato in Tabella 1.

Tabella 1: Limiti di rumore per spazi interni alle imbarcazioni secondo la risoluzione IMO A.468(XII).

Space type	Spaces	Limits [dB(A)]
Work spaces	Machinery spaces (continuously named)	90
	Machinery spaces (not continuously named)	110
	Machinery control rooms	75
	Workshops	85
	Non-specified work spaces	90
Navigation spaces	Navigating bridge and chartrooms	65
	Listening post, including navigating bridge wings and windows	70
	Radio rooms (with radio equipment operating but not producing audio signals)	60
	Radar rooms	65
Accommodation spaces	Cabins and hospital	60
	Mess rooms	65
	Recreation rooms	65
	Open recreation areas	75
	Offices	65
Service spaces	Galleys without food processing	75
	Serveries and pantries	75
	Spaces not specified	90

Successivamente, il progetto SILENV [24] ha fornito i propri livelli, Tabella 2, aggiornando quanto precedentemente riportato.

Tabella 2: Limiti di rumore per spazi interni alle imbarcazioni secondo il progetto SILENV [24].

Group #	Group name	Location example	[dB(A)]
1	Cabins	Passenger cabin Crew cabins Hospital	50
2	Offices		53
3	Public space A	Libraries Calm public spaces	55
4	Public space B	Restaurant, lounge Mess room Shops	60
5	Public space C	Disco Ballroom Corridor Staircase	65
6	Outdoor areas	Open recreational areas Bridge wings/open deck working areas	70
7	Wheelhouse	Wheelhouse Radio room	60
8	Workspace A	Engine control room Galleys	65
9	Workspace B	Pantries Stores Laundries Workshops Garage	75
10	Workspace C	Continuously manned machinery spaces	90
11	Workspace D	Not continuously manned machinery spaces	105

Allo stesso modo, le vibrazioni, oltre a poter essere una fonte di disturbo per esposizioni a basso livello, possono generare danni a livello di salute, come discusso dalla International Labour Organization nella “Convention No. 188” [25] e nella “Recommendation No. 199” [26], oltre che in [27]. Lo studio delle vibrazioni deve essere effettuato tenendo in considerazione la tipologia di nave, al fine di poter individuare al meglio le fonti di disturbo e le precauzioni da prendere [28].

Secondo le classi di notazioni introdotte negli ultimi decenni [29] per la valutazione del comfort ambientale a bordo a seconda della tipologia di nave con limiti diversi, sono distinte in classe A (navi da crociera), classe B (traghetti), classe C (navi mercantili), classe Y (imbarcazioni da diporto).

La determinazione delle vibrazioni per la qualità di ambienti interni a imbarcazione passa dalla loro misurazione tramite accelerometri piezoelettrici triassiali a shear. Con tale strumento è possibile acquisire informazioni alla base dello studio della qualità dell'ambiente o per poter valutare l'esposizione delle persone a vibrazioni trasmesse all'intero corpo umano.

La normativa UNI 9614:2017 [30], emanata per gli edifici, definisce i metodi di misurazione per le vibrazioni derivanti da sorgenti esterne e interne, oltre che il metodo di valutazione del disturbo generato da queste alle persone e agli edifici. Per lo studio dei parametri caratterizzanti la qualità degli ambienti interni alle imbarcazioni risulta di maggior interesse la parte concernente il disturbo alle persone negli ambienti interni. Le sorgenti interne sono predominanti per le imbarcazioni in viaggio, mentre per quelle in porto sono da considerare sia quelle interne che quelle esterne.

Per qualsiasi tipo di vibrazione la misura viene eseguita attraverso il metodo del running rms. Tale metodo consiste nel calcolare il valore efficace dell'accelerazione ponderata con costante di tempo slow e prendere il valore massimo nell'intervallo considerato. Un evento è definito come l'elemento minimo della misura del fenomeno vibratorio preso in considerazione che viene caratterizzato dalla massima accelerazione ponderata. Tali eventi sono suddivisi in eventi di natura discontinua, continua e stazionaria.

Le misurazioni devono essere effettuate lungo i tre assi in maniera simultanea. La direzione degli assi di misurazione possono essere presi in riferimento all'edificio oppure all'individuo. Ciò non influisce sui valori da considerare per la valutazione del disturbo, ma conviene tenerne conto per poter considerare meglio la natura di tali eventi.

Il valore di base per la valutazione è la massima accelerazione statica, che corrisponde alla stima del percentile della distribuzione cumulata di probabilità della massima accelerazione ponderata. Per ogni singolo asse cartesiano viene misurata il valore efficace dell'accelerazione in un intervallo di 1 s. Il valore di riferimento è il modulo dell'accelerazione, che quindi è indipendente dalla scelta della base di coordinate per la misura. Risulta però importante il punto della misura, che deve essere effettuata nella zona di massima ma non nei punti di singolarità.

Ulteriori normative di riferimento sulle vibrazioni sono la ISO 20283-5:2016 [31], la ISO 2631-2:2003 [32], la ISO 8041:2005 [33], la ISO 5348:2021 [34] e la ISO 20283-2:2008 [35].

## 5 Le mitigazioni acustiche all'interno delle navi

I cantieri navali hanno ormai compreso che, oltre a effettuare gli interventi standard realizzati mirati principalmente alla riduzione del rumore trasmesso per via aerea, devono rivedere l'impostazione del progetto e introdurre fin dalle prime fasi di impostazione criteri, specifiche tecniche e componenti finalizzati alla riduzione e al contenimento del rumore trasmesso per via strutturale.

Infatti, la migliore delle mitigazioni di entrambe le componenti deve passare da accorgimenti da applicare in fase progettuale e di montaggio.

Considerando quanto riportato nei precedenti capitoli, all'interno di un'imbarcazione vi sono locali più vicini alle sorgenti di rumore e locali più distanti, ma anche locali in cui è necessario mantenere un livello di rumore più basso al fine di garantire un comfort adeguato.

La trasmissione del rumore per via aerea influenza principalmente gli ambienti confinanti con i locali tecnici in cui sono presenti alti livelli di rumore e diventa sempre meno importante allontanandosi dalla sorgente. La trasmissione per via strutturale, invece influenza il comfort acustico di tutto lo yacht, anche alle distanze maggiori. In Figura 4 si riporta, a titolo di esempio, i livelli acustici all'interno dei vari ambienti di uno yacht, intesi come obiettivi da ottenere per un adeguato comfort.



Figura 4: Obiettivi di livello di comfort acustico per vari ambienti di uno yacht [36].

Gli interventi per l'abbattimento del rumore trasmesso per via aerea risultano più "semplici" rispetto alla propagazione strutturale e possono anche essere pensati a costruzione ultimata, o a ristrutturazione in corso. Il controllo della trasmissione del rumore per via aerea si ottiene prevedendo adeguati trattamenti acustici degli ambienti di bordo e in fase di montaggio procedure e controlli mirati all'eliminazione puntuale di eventuali "buchi acustici" e imperfezioni delle lavorazioni acustiche realizzate. Durante l'utilizzo di appositi materiali di mitigazione, tuttavia, devono essere rispettati gli spessori minimi richiesti, i pesi e la composizione degli interventi necessari. I trattamenti normalmente presenti sulle imbarcazioni sono principalmente di tipo fonoassorbente o fonoisolante.

### ***Interventi fonoassorbenti per abbattimento del rumore trasmesso per via aerea***

Sono generalmente applicati in tutti gli ambienti con lo scopo di ridurre il livello di rumore interno e migliorare la qualità di quello percepito. I materiali utilizzati sono permeabili all'aria e generalmente fibrosi (lane roccia/vetro, fibre in poliestere ecc.) o poliuretani espansi a cellule aperte. Il parametro tecnico che li caratterizza è l'indice di assorbimento acustico, già precedentemente introdotto. Negli ambienti caratterizzati da alti livelli di rumore, quali la sala macchine o i locali tecnici, sono tipicamente installati materiali con spessore elevato (da 10 cm a 15 cm minimo) e con densità da  $80 \text{ kg/m}^3$  a  $130 \text{ kg/m}^3$ . Nelle cabine e nei rimanenti spazi pubblici sono preferiti trattamenti più dimensionati in base alla posizione dell'ambiente interessato e dalle prestazioni minime richieste.

Spesso i materiali fonoassorbenti sono anche isolanti termici, poiché composti di fibre tessili di poliestere termolegate senza l'impiego di resine o collanti. Hanno inoltre i vantaggi di essere prodotti igienici, traspiranti, atossici ed esenti da resine fenoliche, oltre che essere dotati di ottima resistenza meccanica e reazione al fuoco, con bassa emissione fumi. Possono essere prodotti in vari spessori, essere termoformati, accoppiati con masse plastiche o smorzatori di vibrazioni e resi autoadesivi. Nel recente periodo, inoltre, si trovano prodotti con materiali di riciclo [37] o classici pannelli di lana minerale accoppiati con rivestimento in velo di vetro o fibra di vetro [38].

### ***Interventi fonoisolanti per abbattimento del rumore trasmesso per via aerea***

Questi trattamenti sono realizzati all'interno degli ambienti dove sono presenti elevati livelli di rumore: sala macchine, trunk di ventilazione, locali tecnici ecc. Sono applicati su tutte le superfici che separano l'ambiente "rumoroso" dagli altri riservati agli ospiti. I materiali utilizzati non sono permeabili all'aria, sono caratterizzati da una elevata massa superficiale (da  $5 \text{ kg/m}^2$  a  $10 \text{ kg/m}^2$ ) e hanno lo scopo di minimizzare la quantità di energia acustica trasmessa agli ambienti adiacenti. Affinché blocchino la trasmissione del rumore, dunque, devono essere caratterizzati da una massa superficiale elevata. Solitamente vengono utilizzati in abbinamento ai materiali fonoassorbenti in modo tale da realizzare sandwich che alternano strati isolanti e strati assorbenti.

Di particolare interesse risulta l'utilizzo del legno che, come accennato nei capitoli precedenti, è un materiale molto apprezzato per le finiture interne. Il suo utilizzo per isolare le cabine sollecitate dal rumore è suggerito in quelle situazioni in cui è necessario contenere la massa complessiva della realizzazione. Trova il suo campo di applicazione principale nell'isolamento degli ambienti circostanti alle cabine motore, ma è anche utilizzabile per pavimentazioni, paglioli, cabine, casse insonorizzate, compartimentazioni portanti, divisionali. Il migliore rendimento si ottiene in configurazione di pannello sandwich composto da facce esterne di Compensato marino Okoumè e anima standard in guaina da 3 mm di sughergomma ad alta densità [39].

### ***Interventi per l'abbattimento del rumore trasmesso per via strutturale***

Questo tipo di trasmissione del rumore non è influenzata solo dalle caratteristiche dinamiche delle sorgenti e dall'ampiezza delle eccitazioni che esse producono, ma è

controllata anche dalle caratteristiche tecniche degli elementi resilienti di accoppiamento con le strutture e dalle caratteristiche meccaniche e dinamiche delle strutture di fissaggio. La struttura è coinvolta nel suo insieme, ma si possono distinguere tre diversi aspetti.

- *Strutture di fondazione a cui sono collegate le sorgenti* quali, ad esempio, le fondazioni dei motori. Le caratteristiche meccaniche e dinamiche sono di fondamentale importanza perché controllano la quantità di energia vibratoria che entrerà nella struttura. Infatti, minimizzando quella in ingresso, il rumore sarà ridotto in tutti gli ambienti di bordo. L'isolamento vibratorio di una sorgente non si raggiunge solamente interponendo tra la sorgente e la fondazione un supporto resiliente di collegamento, ma si ottiene bilanciando/ottimizzando le caratteristiche elastiche del supporto resiliente e quelle meccaniche della fondazione. Maggiore è il rapporto tra l'impedenza dinamica della fondazione e quella del supporto resiliente e maggiore è l'isolamento vibratorio, con conseguente energia vibratoria trasmessa dalla sorgente alla struttura.
- *Strutture intermedie* quali, ad esempio, regioni dello scafo/strutture scafo, paratie o altre strutture collegate alle fondazioni o quelle in cui entra l'energia. Sono il mezzo attraverso cui l'energia vibratoria si propaga all'interno dello yacht. Opportuni accorgimenti mirati a interrompere o limitare il trasporto di energia devono essere introdotti nei piani di costruzione e specifici trattamenti smorzanti delle lamiere, paratie e strutture coinvolte nel meccanismo di trasmissione devono essere previsti in fase di progettazione ed eseguiti dopo la costruzione dello scafo ma prima della fase finale di montaggio.
- *Strutture finali* quali, ad esempio, paratie, zone dello scafo, ponti che costituiscono le pareti o il pavimento delle cabine o degli spazi pubblici in cui si vuole ridurre il rumore. Queste parti si comportano come altoparlanti e trasformano l'energia meccanica associata alle loro vibrazioni in rumore che viene emesso e percepito nell'ambiente circostante. Anche in questo caso criteri progettuali per il dimensionamento di strutture o puntelli e trattamenti smorzanti delle superfici piane devono essere inseriti per tempo nel progetto e devono essere eseguiti nelle zone previste, durante e dopo la costruzione dello scafo.

Rimanendo fedeli al suggerimento che il miglior intervento si ottiene progettando correttamente gli ambienti e le separazioni fra di esse, la migliore mitigazione ad opera realizzata si ottiene con una mitigazione combinata sulla sorgente e sulla via di propagazione. Infatti, un adeguato trattamento smorzante alle strutture/fondazioni dello scafo in prossimità delle sorgenti aiuta ad aumentare il coefficiente di smorzamento delle strutture stesse, mentre a un efficace isolamento vibratorio delle sorgenti riduce la potenza stessa della sorgente.

Una soluzione combinata proposta in [40] per il soffitto di una sala macchine prevede strati combinati di feltro in fibra ceramica (densità  $96 \text{ kg/m}^3$ , spessore 50 mm) steso su tutta la superficie, una doppia lamina incrociata in piombo (spessore 0.5 mm), un pannello lana di roccia (densità  $100 \text{ kg/m}^3$ , spessore 60 mm) posto in senso ortogonale rispetto al primo, una doppia lamina incrociata in piombo (spessore 0.5 mm) a copertura del secondo strato di isolamento, un pannello di lana di roccia (densità  $100 \text{ kg/m}^3$ ,

spessore 60 mm) steso su tutta la superficie, elettrosaldatura di profili a funzione di supporto rivestimento, un rivestimento con lamiera sandwich in alluminio/polietilene (spessore 3 mm) e arpionatura elettrosaldata. La stessa referenza propone anche soluzioni di mitigazioni sulle sorgenti, quali il motore, i gruppi elettrogeni o gli impianti di bordo. Per il motore, come soluzione free standing, vengono proposti dei supporti morbidi per il motore, un giunto torsionale in grado di compensare disallineamenti importanti, dei supporti riduttore in grado di reggere la spinta dell'elica con buona elasticità in direzione trasversale e un giunto linea d'asse. I supporti riduttore e il giunto linea d'asse sono soprattutto per isolare le alte frequenze del rumore, mentre i supporti motore e il giunto principale sono per le vibrazioni.

Particolare menzione merita lo studio di Piana e Marchesini [41]. Partendo dalle tre gruppi principali in cui le Comfort Class [42] dividono le imbarcazioni a seconda della qualità da raggiungere, gli autori studiano un livello di perdita di inserzione della parete in modo da migliorare la qualità acustica della cabina. Nelle Comfort class, la classe 1 rappresenta il livello di comfort più elevato e la classe 3 rappresenta una situazione accettabile. Il livello di rumore massimo consentito per le condizioni di transito nelle cabine passeggeri varia da 55 dB(A) a 44 dB(A) ma, considerando che gli yacht sono prodotti di lusso, sarebbe preferibile che fossero soddisfatti i requisiti per le cabine di alto livello, destinate anche alla crociera notturna. Il livello massimo consentito scende quindi a 35 dB(A). Pertanto l'indice di isolamento acustico apparente della paratia dovrebbe essere di almeno 33 dB. Nella maggior parte dei casi, invece, è adatto un valore superiore a 45 dB. Mediante misurazioni gli autori hanno mostrato come i problemi principali sulla nave fossero causati dal cattivo isolamento tra la sala macchine e la cabina. Il valore è stato raggiunto sostituendo l'anima in PVC espanso con lana minerale, inoltre i pannelli sono stati incollati ogni 640 mm per mezzo di due borchie in acciaio a "Z" fissate al compensato di Okumè tramite viti. Al posto della schiuma di PVC, tra i pannelli è stata posizionata una lana minerale a bassa densità.

Infine, a confermare il fatto che una corretta progettazione sia la migliore via per mitigare il rumore all'interno delle navi, si riportano due studi di Borelli, et al. Nel primo [43], gli autori mostrano come una errata progettazione delle cabine dei passeggeri all'interno dei traghetti porti ad una concentrazione dei modi di risonanza della stanza proprio nel punto di essa in cui i passeggeri pongono la testa sui letti. Posizione che, invece, dovrebbe essere quella più silenziosa per consentire un corretto riposo. In [12], Borelli, et al. hanno evidenziato i punti deboli del sistema di ventilazione in una nave oceanografica, rivelatosi mal progettato dal punto di vista acustico. Averlo simulato in anticipo ha consentito di rimediare adottando adeguate contromisure prima dell'inizio del processo di costruzione navale ed evitando così costosi miglioramenti post-operativi e/o azioni di recupero. Le principali soluzioni adottate sono state quelle di cambiare la sezione delle tubature, cambiare la forma degli snodi ed utilizzare degli attuatori dove necessario.



## 6 Conclusioni

Il presente documento riassume la fase di ricerca che è stata condotta nel settore dell'acustica all'interno delle imbarcazioni. Tale ambito risulta ancora molto nuovo e innovativo, sebbene sia soggetto a continue attenzioni da parte di armatori e passeggeri verso un comfort acustico migliore.

L'esperienza teorica acquisita farà da base alle prossime fasi, in cui misure a bordo saranno effettuate con fonometri ed accelerometri. Sarà inoltre utilizzata una acoustic camera, uno strumento composto da un array di 112 microfoni ed una videocamera che, basandosi su algoritmi di *beamforming*, consente la visualizzazione del rumore emesso o trasmesso.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Licitra G., Bolognese M., Palazzuoli D., Fredianelli L. e Fidecaro F. Port noise impact and citizens' complaints evaluation in RUMBLE and MON ACUMEN INTERREG projects. In *Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV 26)*, volume 7, pages 4686–4693, Montréal, QC, Canada, 7-11 July, 2019.
- [2] Nastasi M., Fredianelli L., Bernardini M., Teti L., Fidecaro F. e Licitra G. Parameters affecting noise emitted by ships moving in port areas. *Sustainability*, 12(20):8742, 2020.
- [3] Fredianelli L., Bolognese M., Fidecaro F. e Licitra G. Classification of noise sources for port area noise mapping. *Environments*, 8(2):12, 2021.
- [4] Fredianelli L., Nastasi M., Bernardini M., Fidecaro F. e Licitra G. Pass-by characterization of noise emitted by different categories of seagoing ships in ports. *Sustainability*, 12(5):1740, 2020.
- [5] Bolognese M., Fidecaro F., Palazzuoli D. e Licitra G. Port noise and complaints in the north tyrrhenian sea and framework for remediation. *Environments*, 7(2):17, 2020.
- [6] Borelli D., Gaggero T., Pallavidino E., Schenone C., Kamdem E. L. W. e Njotang C. A. Y. Development of a harbour noise monitoring solution within the interreg maritime RUMBLE project. In *Proceedings of the Forum Acusticum 2020*, volume 2, pages 1261–1262, Lyon, France, 7-11 December, 2020.
- [7] Vukić L., Mihanović V., Fredianelli L. e Plazibat V. Seafarers' perception and attitudes towards noise emission on board ships. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2):6671, 2021.
- [8] Rapisarda V., Valentino M., Bolognini S. e Fenga C. Il rischio rumore a bordo dei pescherecci: alcune considerazioni sulla prevenzione e protezione degli esposti. *Giornale Italiano di Medicina del Lavoro ed Ergonomia*, 26(3):191–196, 2004.
- [9] Moon S.-B., Jung U.-S., Ha H.-D., Jun S.-H. e Kim J.-H. A study on health status and occupational stress of seafarer. In *Proceedings of the Korean Institute of Navigation and Port Research Conference*, volume 6, pages 39–46, 2006.
- [10] Turan O., Helvacioğlu I. H., Insel M., Khalid H. e Kurt R. E. Crew noise exposure on board ships and comparative study of applicable standards. *Ships and Offshore Structures*, 6(4):323–338, 2011.
- [11] Borelli D., Gaggero T., Rizzuto E. e Schenone C. Onboard ship noise: acoustic comfort in cabins. *Applied Acoustics*, 177:107912, 2021.
- [12] Borelli D., Schenone C. e Di Paolo M. Application of a simplified “source-path-receiver” model for HVAC noise to the preliminary design of a ship: a case study. In *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV 21)*, volume 2, pages 1257–1264, Beijing, China, 13-17 July, 2014.

- [13] Vladimir N., Lončar I., Ančić I. e Senjanović I. Prediction of noise performance of Ro-Ro passenger ship by the hybrid statistical energy analysis. *Pomorski zbornik*, Special edition(2):29–45, 2018.
- [14] Shin Y. Study on reduction of excessive noise and vibration of aft part of high speed Ro-Ro passenger ship. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33 (2):196–202, 2019.
- [15] Legge 26 ottobre 1995, n. 447. Legge quadro sull'inquinamento acustico. *Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie generale* n. 254, 30/10/1995.
- [16] Decreto, del Presidente del Consiglio dei Ministri 5 dicembre 1997. Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie generale* n. 297, 22/12/1997.
- [17] Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). La classificazione acustica delle unità immobiliari, 2010. UNI 11367:2010, UNI, Milano.
- [18] International Maritime Organization (IMO). IMO resolution MSC.337(91) – Adoption of the code on noise levels on board ships, 2012. London, UK.
- [19] International Organization for Standardization (ISO). ISO 2923:1996, Acoustics – Measurements of noise on board vessels, 1996. Geneva, Switzerland.
- [20] International Organization for Standardization (ISO). ISO 717-1:2020, Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, 2020. Geneva, Switzerland.
- [21] International Organization for Standardization (ISO). ISO 9612:2009, Acoustics – Determination of occupational noise exposure – Engineering method, 2009. Geneva, Switzerland.
- [22] European Union. Directive 2003/10/EC of the European Parliament and of the Council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise). *Official Journal of the European Union*, 42, 38-44, 2003.
- [23] International Maritime Organization (IMO). IMO resolution A.468(XII) – Code on noise levels on board ships, 1981. London, UK.
- [24] Gaggero T., André M., Baudin E., Palomo P., Dambra R., Delente M., Haimov E., Hallander J., Houbeni M., Ianniello S., Caballero S., Pirovsky Ch., Rantanen A., Rizzuto E. e Turan O. Holistic noise and vibration abatement within the EU 7FP. The SILENV project: Ship Innovative soLutions to rEduce Noise and Vibrations. In *Proceedings of Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*, Paris, France, 14-17 April, 2014.

- [25] International Labour Organization (ILO). The Work in Fishing Convention, 2007 (no. 188): Getting on board. *Issues paper for discussion at the Global Dialogue Forum for the promotion of the Work in Fishing Convention, 2007 (No. 188)*. Geneva, 15-17 May 2013, 2013. ILO, Sectoral Activities Department. Geneva, Switzerland.
- [26] International Labour Organization (ILO). Work in Fishing Recommendation, 2007 (no. 199), 2007. Geneva, Switzerland.
- [27] Goethe W.H.G., Watson E.N. e Jones D.T., editors. *Handbook of Nautical Medicine*. Springer, Berlin, Germany, 1984.
- [28] American Bureau of Shipping (ABS). Guide for crew habitability on ships, 2016. Spring, TX, USA.
- [29] Tonelli A. e Linari M. Analisi acustica nel locale della plancia di un rimorchiatore attraverso l'utilizzo di tecniche agli elementi finiti. *Analisi e Calcolo*, 33:33-35, 2008.
- [30] Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo, 2017. UNI 9614:2017, UNI, Milano.
- [31] International Organization for Standardization (ISO). ISO 20283-5:2016, Mechanical vibration – Measurement of vibration on ships – Part 5: Guidelines for measurement, evaluation and reporting of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships, 2016. Geneva, Switzerland.
- [32] International Organization for Standardization (ISO). ISO 2631-2:2003, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), 2003. Geneva, Switzerland.
- [33] International Organization for Standardization (ISO). ISO 8041:2005, Human response to vibration – Measuring instrumentation, 2005. Geneva, Switzerland.
- [34] International Organization for Standardization (ISO). ISO 5348:2021, Mechanical vibration and shock – Mechanical mounting of accelerometers, 2021. Geneva, Switzerland.
- [35] International Organization for Standardization (ISO). ISO 20283-2:2008, Mechanical vibration – Measurement of vibration on ships – Part 2: Measurement of structural vibration, 2008. Geneva, Switzerland.
- [36] <https://www.ems-engineering.it/index.asp>.
- [37] <http://www.insonorizzanti.it/it/settori-applicazione/settore-navale>.
- [38] <https://www.knaufinsulation-ts.com/it/our-solutions/sea-tek>.
- [39] <https://nordcompensati.com/>.
- [40] <https://www.vulkan.com/it-it/holding/aziende-vulkan/italy>.



- [41] Piana E. A. e Marchesini A. How to lower the noise level in the owner's cabin of a yacht through the improvement of bulkhead and floor. In *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV 21)*, volume 5, pages 3692–3699, Beijing, China, 13-17 July 2014.
- [42] Det Norske Veritas. Rules for classification of ships – Part 5 Chapter 5: Comfort Class, 2011. DNV, Høvik, Norway.
- [43] Borelli D., Gaggero T., Rizzuto E. e Schenone C. Acoustical behaviour of a passenger cabin of a ro-pax vessel. In *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration (ICSV 24)*, volume 9, pages 6606–6613, London, United Kingdom, 23-27 July, 2017.