



*“La Scienza del Suono”*

**armonia:** derives from the Greek word ἁρμονία, that signifies the consistent, orderly arrangement of the parts of a whole. Social harmony is the agreement between an individual's freedom with that of other men. In music, harmony is the combination of tones that create a pleasant acoustic impression; in life, it means to feel good in accord with the well-being of others.

**armonia:** dal greco ἁρμονία, è l'ordine, la disposizione finalisticamente organizzata delle parti di un tutto. L'armonia sociale è l'accordo tra la libertà del singolo e quella degli altri uomini. Nella musica è l'insieme dei suoni che creano un'impressione acustica piacevole. Nella vita, lo stare bene in accordo con il bene degli altri.

“It is not always necessary for the truth to take shape; it is sufficient that it is around in spiritual form, bringing about harmony as it floats on the breeze as a spiritual presence like the solemn-friendly sound of bells”.

**Johann Wolfgang von Goethe,**  
*Maxims and reflections*

“Non è sempre necessario che il vero prenda corpo; è già sufficiente che aleggi nei dintorni come spirito e produca una sorta di accordo come quando il suono delle campane si distende amico nell’atmosfera apportatore di pace”.

**Johann Wolfgang von Goethe,**  
*Massime e riflessioni*



Everything is sound and therefore sound is everywhere?

If we close our eyes and prick up our ears we can concentrate on the sounds which surround us, plunge into the sound atmosphere and try to select them, sorting them out. Life itself, our memories are always associated with a soundtrack like in a movie. If you stop to think of it, all cities – be they large or very large ones – have a peculiar sound ensemble: New York's sounds are different from the one of London and Berlin, Rome or Istanbul or Mumbai.

After a while we live in a place we can recognize the places in the distance from sounds as well as from smells and lights.

Everything around us is pulsating with life; we know the sound of a butterfly's wings or the heart's beating, we can hear the difference between a stream's water running and the sea's waves.

We communicate and live emotions via waves that are in the air which are captured, consciously or not, since our birth; we learn how to distinguish them one from the other, to file them in our memory, pursuing some of them while avoiding others.

Our personal sound alphabet seems to have a universal code that goes through language and cultural differences – a sign of our common origin, an archetype. That's why we recognize the sound as something belonging to our DNA. The percussion of drums, a woman's lullaby, a child's voice singing, the wind through the trees. The harmony that goes through our life bringing us back to a common matrix, a universal beauty, powerful and light and bright at the same time.

Human beings perceive the world through their senses, a perfect and complex system which is the direct expression of body and soul.

The auditory apparatus is certainly the most sophisticated of all the senses. It is the means by which we hear; it is a passive organ of reception – ears receive and hear sounds. In this sense they represent the utmost vulnerability: they cannot be closed as eyes can. It is not enough for words to reach the ears, they must also be intelligible and in order for this to occur we need to receive sounds correctly. In fact, if the sound intensity in an enclosed environment is particularly high, its perception might not be correct.

Tutto è suono e dunque il suono è ovunque?

Se chiudiamo gli occhi e aguzziamo le orecchie possiamo sintonizzarci sui suoni che ci circondano, immergerci nell'atmosfera sonora e provare a selezionarli, distinguendoli l'uno dall'altro. La vita stessa, i nostri ricordi sono sempre accompagnati, come in un film, da una colonna sonora. Città, metropoli o megalopoli, se ci pensate, hanno un loro corpus sonoro particolare: New York ha sonorità diverse da Londra e da Berlino, Roma da Istanbul o da Mumbai. A lungo andare, vivendoci per un po', potremmo riconoscere a distanza i luoghi, oltre che dagli odori e dalla luce, anche dai suoni.

Tutto intorno a noi pulsa di una vita manifesta, così sappiamo che rumore fanno le ali di una farfalla o il battito di un cuore, distinguiamo il rumore dell'acqua di un torrente da quello delle onde del mare.

Comunichiamo e viviamo emozioni attraverso onde che viaggiano nell'aria e che catturiamo, consapevoli o inconsapevoli, sin dalla nostra nascita, imparando a catalogarle, distinguerle, ricercandone alcune e rifuggendone altre.

L'alfabeto sonoro di ognuno sembra avere un codice universale che attraversa le diversità linguistiche e culturali, traccia di un'origine comune, archetipica, per questo riconosciamo un suono come un qualcosa di appartenente al nostro DNA: la percussione di tamburi, una nenia femminile, il canto di una voce di bimbo, il vento fra i rami degli alberi; un'armonia che attraversa le nostre vite riconducendoci ad un'unica matrice, una bellezza universale, potente e nello stesso tempo leggera e splendente.

Noi esseri viventi percepiamo il mondo attraverso i sensi, sistema complesso e perfetto diretta espressione del corpo e dell'anima.

Fra tutti gli organi, uno dei più sofisticati è l'apparato uditivo, strumento predisposto all'ascolto, con una struttura passiva di ricezione: le orecchie, infatti, si limitano a ricevere. In questo senso rappresentano la vulnerabilità assoluta: non si possono chiudere le proprie orecchie come si chiudono gli occhi. Non è sufficiente, inoltre, che le parole accedano alle orecchie, bisogna anche che siano comprensibili e perché questo avvenga è necessario che i suoni ci possano arrivare correttamente. Infatti, se l'intensità del suono è particolarmente alta in un ambiente chiuso, la sua percezione non sarà corretta.

L'acustica architettonica studia quella che si può definire la dimensione acustica

Architectural acoustics studies what can be defined as the acoustical dimension of man-made environments and aims to improve the quality of sound perception.

Today it is indeed necessary to design and build environments destined for civil use – as well as for leisure – considering architectural acoustics as the fundamental and indispensable component of all contemporary and responsible projects.

The concept of people's well-being can differ according to culture, religion and geographical location, but body and soul aspire universally to beauty and good, and complete harmony.

The Fantoni Research Centre has been working for ten years in order to provide concrete answers to professionals who opt for responsible design, always taking into consideration man's right to live and work in good conditions. This constant attention led to an important and painstaking result: the design and construction of Acoustic Lab, a reverberation chamber at Patt's site in Attimis, near Udine.

Acoustic Lab was created out of the need to test the group's products, but it is now at the disposal of institutions, companies and other organisations linked to the sector intending to qualify their products from the acoustical point of view. This is yet another indication of the desire to follow the path to innovation and share results with others.

Today the Research Centre produces the most suitable materials for sound-absorption and climatic comfort also compatible with different social and environmental settings. They are innovative, durable and perfectly in tune with the contemporary design, contributing to people's well-being by improving in quality. They work with discreet elegance, controlling reverberation with a multiplicity of solutions. This is in order to restore a correct and healthy acoustical dimension to satisfy the increasing attention of designers for environmental psychology as a means of knowledge and investigation to improve real quality in environments and therefore increase the pleasure of life and work for people.

People's well-being is an important goal, as we are important as human beings. We are part of a single, sustainable system. Starting from this we can operate that great magic of turning noise into sound, with the engagement of many people, to spread harmony for the pleasure of improving our lives.

dell'ambiente antropizzato, con la finalità di migliorare la qualità della percezione sonora. È quindi necessario progettare e costruire gli ambienti ad uso civile ma anche i luoghi del tempo libero pensando all'acustica ambientale come ad un tassello fondamentale e imprescindibile di ogni progetto contemporaneo.

Il benessere delle persone, infatti, può variare per cultura, religione e latitudine ma l'anima e il corpo tendono universalmente al bello e al buono: all'armonia del tutto.

Il Centro Ricerche del gruppo Fantoni lavora da dieci anni per dare risposte concrete ai professionisti che scelgono la progettazione responsabile, pensando sempre al diritto di ognuno di vivere e lavorare bene. Un'attenzione costante che ha raggiunto un importante e impegnativo momento con la progettazione e quindi costruzione di una Camera Riverberante – Acoustic Lab – presso la Patt di Attimis.

Acoustic Lab è uno strumento nato dall'esigenza di testare i prodotti del gruppo Fantoni, ma è anche a disposizione di enti e aziende del settore che intenderanno qualificare anche i loro materiali dal punto di vista acustico: una testimonianza della volontà di percorrere la strada dell'innovazione e il desiderio di condivisione dei propri risultati.

Dal Centro Ricerche escono i materiali più adatti al fonoassorbimento e al comfort climatico, compatibili con le diverse situazioni ambientali e sociali: innovativi, in sintonia con la progettazione contemporanea e tesi al miglioramento della qualità di vita delle persone. Essi lavorano "silenziosamente" negli interni dominando il riverbero in una molteplicità di soluzioni per restituire una dimensione acustica corretta e sana quale risposta concreta alla crescente attenzione dei progettisti alla psicologia ambientale: uno strumento d'indagine e conoscenza per migliorare la qualità reale degli spazi e aumentare il piacere di vivere e di lavorare.

Un obiettivo, quello del benessere delle persone, tanto importante quanto importanti siamo noi: noi come parte di un unico, solidale sistema. A partire da qui può compiersi quella grande e sapiente magia, costruita con l'impegno di tanti, del trasformare il rumore in suono, donando armonia, per il piacere di migliorare la nostra vita.



**suono:** *“Definitur sonus percussio aeris indissoluta usque ad auditum”.*

“Sound can be defined as a percussio of the air that is not interrupted until it reaches the ear”.

(Boethius, 475-525 A.C.,  
*De institutione musica*)

**suono:** *“Definitur sonus percussio aeris indissoluta usque ad auditum”.*

“Si può definire suono una percussione dell’aria che non si interrompe fintanto che non colpisce l’orecchio”.

(Boezio, 475-525 d.C.,  
*De institutione musica*)



introduction to the concepts of architectural acoustics

# introduzione ai concetti dell'acustica architettonica

Professor Antonino Di Bella  
Department of Technical Physics  
University of Padua

"Man is in an uneasy ocean of air continually agitated by the disturbances called sound waves. Much of our acoustical experience is involuntary, but the production of sounds that please as well as serve has been proper concern of man ever since he learned to smile".

**Frederick Vinton Hunt,**  
*Origins in Acoustics (1978)*

"L'uomo è in un agitato oceano di aria continuamente mosso da disturbi chiamati onde sonore. La gran parte delle nostre esperienze acustiche è involontaria, ma la produzione di suoni gradevoli e utili è sempre stata un bisogno primario dell'uomo da quando ha imparato a sorridere".

**Frederick Vinton Hunt,**  
*Origini dell'acustica (1978)*

Describing the principles regarding the generation and propagation of sound is as complex as the hearing and interpretation of sound is simple and natural and instinctive.

Hearing sound is a common experience. The usefulness and pleasure of this experience depends on the conditions of the hearer which may be objective or subjective. Objective conditions depend essentially on the physical or environmental parameters of the place where the sound is produced (outside or inside), the distance between the sound source and the hearer, the sound power developed by the source and, consequently, the level of sound pressure heard, and the tonality and variation in time of the sound produced. Subjective conditions can be extremely diverse and generally depend on physiological, mental or cultural factors such as state of health, predisposition for listening or attention, and state of mind.

Sounds allow us to 'interpret' the world we live in. Our auditory apparatus enables us to evaluate the distance from a sound source by means of the intensity of hearing, in the same way as the direction of sound origin or the spatiality of an environment. It is enough to close our eyes and rely on our hearing to attempt to imagine the environment we are in through the sounds we hear: we can estimate distances or guess the volume of a room from the way in which we collect, analyse and compare the sounds we hear with those from our experience and memory.

As regards the importance of cultural mediation on the interpretation of the sound phenomenon, it is useful to quote the thoughts of the contemporary composer and musician Frank Zappa. *"When someone composes a piece of music, what he or she writes down is more or less the equivalent of a recipe, in the sense that the recipe is not the food itself but merely the instructions to prepare the food (...). If I write something on a scrap of paper, I cannot actually hear it out loud. I may be able to have visions of what the symbols on the page represent and imagine how a certain piece of music may be performed, but nevertheless it is still a feeling which cannot be transferred: it cannot be shared or conveyed. Until the recipe is transformed into agitated air molecules, the thing is not, in current terms, a musical experience. When it is performed, music is a type of sculpture. The air in the performance space is sculpted into something: this 'molecular-sculpture-in-time' is then perceived by the ears of the listeners or by a microphone. The ear decodes sound. Things creating sound*

La descrizione dei principi connessi alla generazione ed alla propagazione del suono è tanto complessa quanto semplice e naturale (istintiva) è la percezione e l'interpretazione degli stessi. L'ascolto di un suono è un'esperienza comune. Questa esperienza può risultare più o meno utile o piacevole in relazione alle condizioni in cui si trova l'ascoltatore. Tali condizioni possono essere di tipo oggettivo o soggettivo. Le condizioni oggettive dipendono essenzialmente da parametri fisici o ambientali legati al luogo in cui viene prodotto il suono (all'aperto o al chiuso), alla distanza che intercorre fra la sorgente sonora e l'ascoltatore, alla potenza sonora sviluppata dalla sorgente e, di conseguenza, al livello di pressione sonora percepito, alla tonalità e alla variazione nel tempo del suono prodotto. Le condizioni soggettive possono essere molto diverse e dipendono, in genere, da fattori fisiologici, psichici o culturali, come lo stato di salute, la propensione all'ascolto o l'attenzione, lo stato d'animo.

I suoni ci permettono di "interpretare" il mondo in cui ci troviamo. Il nostro apparato uditivo ci consente di valutare la distanza da una sorgente sonora attraverso l'intensità della percezione, così come la direzione di provenienza di un suono o la spazialità di un ambiente. Basta chiudere gli occhi ed affidarsi all'udito per provare ad immaginare l'ambiente in cui ci troviamo attraverso i suoni che percepiamo: possiamo stimare le distanze o intuire il volume di una stanza dal modo in cui raccogliamo, analizziamo e confrontiamo i suoni percepiti con quelli della nostra esperienza e della nostra memoria.

A proposito dell'importanza della mediazione culturale sull'interpretazione del fenomeno sonoro, è utile citare il pensiero del compositore e musicista contemporaneo Frank Zappa. *"Quando qualcuno scrive un brano musicale, quello che mette per iscritto è più o meno l'equivalente di una ricetta, nel senso che la ricetta non è il cibo ma solo le istruzioni per la preparazione del cibo (...). Se scrivo qualcosa su un pezzo di carta, non posso realmente ascoltarlo. Potrò avere delle visioni di quello che i simboli sulla pagina stanno a significare e immaginarmi come può venire eseguito un certo brano musicale, ma pur sempre si tratta di una sensazione non trasferibile: non può essere condivisa o trasmessa. Sino al momento in cui la ricetta non viene trasformata in molecole d'aria agitate, la cosa non è, in termini correnti, un'esperienza musicale. La musica, quando viene eseguita, è un tipo di scultura. L'aria nello spazio della rappresentazione è scolpita dentro qualcosa: questa "scultura molecolare nel tempo" viene quindi osservata dalle orecchie degli ascoltatori o da*



*are things which can create disturbances. These disturbances modify (sculpt) raw matter (the static air of the room and its state of inertia before the musicians begin to play)".* Not only the written word or musical notes, but also the sounds of nature and noises produced by human activity must all be contextualized in order to be used and interpreted correctly, and the context also passes through the mediation of the listening environment.

It can be unpleasant and tiresome to hear a word or music outside the context in which our cultural education places a specific communicative event, if that word or music is not expressly sought out and desired. The images of a violinist performing a 'capriccio' by Paganini in the machine room of a ship, or a religious ceremony held on a moving bus are paradoxes which make us smile, but we must not forget that technological progress is leading us to an increasing individualization of the listening experience, with the constant availability of a significant amount of information: we listen indiscriminately to music in the car, in the office, at home, and while playing sport or communicate using mobile phones untroubled by the context we are in. In the same way, we accept the performance of a certain type of music or a play at the theatre in places which were not originally designed for that purpose, but that are simply available or have the necessary audience capacity. 'Unsuitable places', lacking specific acoustic qualities even though they possess great prestige or are rich in history, are becoming more widespread. This problem is not a new one, which is exactly why it is necessary to pay a great deal of attention to issues of architectural acoustics. Places where people listen to the spoken word or music have indeed undergone great transformations over the centuries, dictated for the most part by demands of a social, cultural, economic, political or religious nature more than those of acoustic quality.

In antiquity the analogy between sound propagation and the movement of waves rippling the surface of water was well-known, as were the abilities of some building materials to reflect and absorb sound.

However, it was not until the beginning of the previous century that architectural acoustics was born as a discipline based on well-established principles of physics. Before that time (and consequently before the definition of the fundamental concepts of sound reverberation and the acoustic absorption of materials or the formulation of relationships that link the perception of the level of sound pressure to the procedures of propagation and distribution

*un microfono. Il suono è un dato decodificato dall'orecchio. Le cose che creano suono sono cose in grado di creare delle perturbazioni. Tali perturbazioni modificano (scolpiscono) il materiale grezzo (l'aria statica della stanza, il suo modo di essere inerte prima che i musicisti inizino a suonare)".* Non solo la parola scritta o le note musicali, ma anche i suoni della natura ed i rumori prodotti dalle attività umane richiedono una contestualizzazione per essere correttamente interpretati e fruiti, che passa anche attraverso la mediazione dell'ambiente d'ascolto. Se non espressamente voluto e ricercato, l'ascolto della parola e della musica al di fuori del contesto in cui la nostra formazione culturale pone uno specifico evento di comunicazione può risultare sgradevole o fastidioso. Le immagini di un violinista che esegue un "capriccio" di Paganini nella sala macchine di una nave o di una funzione religiosa tenuta su un autobus in corsa sono dei paradossi e ci fanno sorridere, ma non dobbiamo dimenticare che il progresso tecnologico ci porta verso una sempre maggiore individualizzazione dell'esperienza d'ascolto, con la costante disponibilità di un gran numero di informazioni: ascoltiamo musica indifferentemente in auto, in ufficio, a casa, mentre facciamo sport oppure comunichiamo attraverso i telefoni cellulari, incuranti del contesto in cui ci troviamo. Allo stesso modo accettiamo l'esecuzione di un certo genere musicale o lo svolgimento di uno spettacolo teatrale in luoghi che non sono stati concepiti in origine per quella funzione, ma che, semplicemente, sono disponibili o hanno la necessaria capienza di pubblico. Si diffondono così sempre più i "luoghi impropri", privi di qualità acustiche specifiche ancorché ricchi di immagine o di storia. Questo problema non è nuovo e proprio per questo bisogna prestare molta attenzione ai problemi dell'acustica architettonica. I luoghi per l'ascolto della parola e della musica, infatti, hanno subito nel corso dei secoli grandi trasformazioni, dettate prevalentemente da esigenze di carattere sociale, culturale, economico, politico o religioso più che di qualità acustica. Nell'antichità era nota l'analogia fra la propagazione del suono ed il moto delle onde che increspano la superficie dell'acqua, così come erano conosciute le capacità di alcuni materiali da costruzione di riflettere o assorbire il suono. Occorre tuttavia attendere l'inizio del secolo scorso, con la nascita dell'acustica architettonica come disciplina basata su consolidati principi fisici.

Prima di allora e della definizione dei fondamentali concetti di riverberazione del suono e di assorbimento acustico dei materiali, o dell'elaborazione delle relazioni che legano la

of sound waves), the acoustic design of architectural environments was based on intuition, the application of empirical methods and models or the imitation of past experience.

The acoustic qualities of environments were frequently sacrificed for aesthetic or functional needs, or even just simply neglected. Great examples of religious and civil architecture span the centuries, but not all of them necessarily possess optimum acoustics.

The acoustic quality of a hall may be defined as its suitability for a certain type of sound performance, in particular for listening to the spoken word or to pieces of music.

The acoustic quality of an environment depends principally on its shape, the type of sound-proofing or reflective materials present and their position in relation to the sound source and on the audience, the sound reverberation and the total level of background noise or in any case outside noise or noise that is non-functional to the performance.

The acoustic design of environments therefore requires a great deal of attention and the appropriate tools.

Can a car be assembled with a pen-knife? Perhaps it can, but it would be impossible to know if or how well it would be able to work. In the same way, however, it is possible to construct a hall for listening to music or the spoken word. Perhaps the acoustics will even be acceptable, but if they are it will only be by chance. Only with an accurate integrated design, that takes into account the multiple aspects of the problem and makes appropriate use of the scientific and technical tools available, will it be possible to get close to achieving the expected result.

In general, in order to design the acoustics of an environment correctly it is necessary to establish its dimensions, function and mode of use. Equally important is the knowledge of the building structure characteristics defining the environment, both from the point of view of sound insulation from outside noise, and regarding the sound-proofing properties of interior surfaces and furnishings. The positioning itself of sound-proofing materials and acoustically reflective surfaces inside an environment has a considerable influence on the overall acoustic quality.

As regards the dimensions of the acoustic environment, a room may be considered acoustically 'small' if its volume is less than 5,000 m<sup>3</sup> and if, in the presence of a distributed sound field, it is possible to determine the parameters of the environment in terms of the

percezione del livello di pressione sonora alle modalità di propagazione e diffusione delle onde sonore, la progettazione acustica degli spazi architettonici si basava su intuizioni, applicazione di metodi e modelli empirici o imitazione di esperienze pregresse. Molto spesso la qualità acustica degli ambienti veniva sacrificata per esigenze estetiche o funzionali, oppure semplicemente trascurata. A noi sono giunti, attraverso i secoli, grandi esempi di architettura religiosa e civile, non tutti necessariamente dotati di un'ottima acustica. La qualità acustica di una sala può essere dunque definita come la sua adeguatezza per un certo tipo di rappresentazione sonora, in particolare per l'ascolto del parlato o di brani musicali.

La qualità acustica di un ambiente dipende principalmente: dalla sua geometria, dal tipo di materiali fonoassorbenti o riflettenti presenti e dalla loro disposizione rispetto alla sorgente sonora ed agli ascoltatori, dalla riverberazione del suono e dal livello totale del rumore di fondo o comunque estraneo o non funzionale alla rappresentazione. La progettazione acustica degli ambienti richiede, quindi, molta attenzione e strumenti adeguati. Si può assemblare un'automobile con un coltellino multiuso? Forse sì, ma non sappiamo come o quanto potrà funzionare. Allo stesso modo è possibile realizzare comunque una sala per l'ascolto della musica o della parola. Forse l'acustica sarà anche accettabile, ma sarà solo frutto del caso. Solo con un'accurata progettazione integrata, che tenga conto dei molteplici aspetti del problema e che utilizzi correttamente gli strumenti scientifici e tecnici a disposizione, sarà possibile avvicinarsi al risultato atteso.

In generale, per una corretta progettazione acustica di un ambiente è necessario stabilirne le dimensioni, la funzione e le modalità di utilizzo. Altrettanto importante è la conoscenza delle caratteristiche delle strutture edilizie che delimitano l'ambiente, sia dal punto di vista dell'isolamento acustico nei confronti dei rumori provenienti dall'esterno, sia per quanto riguarda le proprietà di fonoassorbimento delle superfici interne e degli arredi. La stessa disposizione dei materiali fonoassorbenti e delle superfici acusticamente riflettenti all'interno degli ambienti ha una notevole influenza sulla qualità acustica complessiva. Per quanto riguarda le dimensioni dell'ambiente, una sala può essere considerata acusticamente "piccola" se il suo volume è inferiore a circa 5.000 m<sup>3</sup> e, in presenza di un campo sonoro diffuso, è possibile caratterizzare l'ambiente attraverso le relazioni che legano la riverberazione al rapporto tra il volume dell'ambiente e l'assorbimento acustico totale delle superfici che lo

relations between the reverberation and the ratio between the volume of the environment and the total acoustic absorption of surfaces that define it and the objects which characterize it. For larger dimensions it is still possible to determine the parameters of the environment in a similar manner, but it is necessary to pay considerable attention to particular phenomena characteristic of environments of large volume, such as the acoustic absorption of air or the delay in hearing direct sound, in comparison to the initial reflections. Parameters defining the acoustic quality of an environment depend on its functions and the destination for use of that area. These differ on the basis of the average distance between the sound source and the audience: environments destined for conferences, theatres, concert halls, churches, cinemas, libraries, classrooms, foyers, indoor stadiums or swimming pools may have average and large distances; while offices, shops, restaurants, ticket offices and hospital areas may have small distances. In relation to the distance between the source and the receiver and the type of information intended to be transmitted, it is possible to optimise the characteristics of absorption, reflection or distribution of sound in the environment to facilitate the intelligibility of the spoken word or the clarity of musical perception.

The main parameter for checking the acoustic quality of an environment is reverberation, defined as the totality of reflected sound still present in a confined space after the sound source has ceased emitting. The decline in the pressure level of the reverberated sound may be quantitatively described by the 'reverberation time', which is inversely proportional to the environment's total acoustic absorption. There are several relations allowing for the optimal reverberation time of an environment to be determined in relation to its volume, destined use and, as a consequence, the average distance between source and receiver. It is evident that in a multipurpose area a compromise must be reached between different acoustic requirements and other functional parameters, in any case giving priority to the predominant function that will influence the final result. Knowledge of the actual acoustic absorption specifications of the materials in the effective conditions of use is therefore fundamentally important for the acoustic and architectural design of an environment suitable for listening to music or the spoken word. Without this information, there will be a lack of the basic elements needed for the correct evaluation of the main acoustic parameters and, consequently, of the effectiveness of the measures directed towards the checking of overall acoustic quality.

delimitano e degli oggetti che lo caratterizzano. Per dimensioni superiori è ancora possibile caratterizzare l'ambiente in maniera analoga, ma occorre prestare notevole attenzione a particolari fenomeni caratteristici degli ambienti di grande volume, quali l'assorbimento acustico dell'aria o il ritardo nella percezione del suono diretto, rispetto alle prime riflessioni. I parametri che definiscono la qualità acustica di un ambiente dipendono dalle sue funzioni e dalla destinazione d'uso. Questi differiscono in base alla distanza media che intercorre tra la sorgente e gli ascoltatori: si possono avere distanze medie e grandi nelle sale per conferenze, nei teatri, nelle sale da concerto, nelle chiese, nei cinema, nelle biblioteche, nelle aule scolastiche, nelle sale d'attesa, negli atri, nei palasport o nelle piscine; si hanno invece distanze piccole negli uffici, nei negozi, nei ristoranti, nelle biglietterie o negli ambienti ospedalieri. In relazione alla distanza sorgente-ricettore e al tipo di informazione che si intende trasmettere, è possibile ottimizzare le caratteristiche di assorbimento, riflessione o diffusione del suono nell'ambiente per favorire l'intelligibilità del parlato o la chiarezza della percezione musicale.

Il principale parametro per il controllo della qualità acustica di un ambiente è la riverberazione, intesa come la totalità del suono riflesso che è ancora presente in uno spazio confinato dopo che la sorgente sonora ha cessato di emettere. Il decadimento del livello di pressione del suono riverberato può essere quantitativamente descritto attraverso il "tempo di riverberazione", che è inversamente proporzionale all'assorbimento acustico totale dell'ambiente. Esistono diverse relazioni che consentono di determinare il tempo di riverberazione ottimale per un ambiente in funzione del suo volume, della sua destinazione d'uso e, di conseguenza, della distanza media fra sorgente e ricettore. È evidente che in un ambiente multifunzionale deve necessariamente essere raggiunto un compromesso fra i differenti requisiti acustici e gli altri parametri funzionali, dando comunque la priorità alla funzione predominante, che condiziona il risultato finale. Risulta quindi di fondamentale importanza, per la progettazione acustica ed architettonica di un ambiente per l'ascolto della musica o della parola, la conoscenza delle reali caratteristiche di assorbimento acustico dei materiali nelle effettive condizioni di impiego. Senza queste informazioni vengono a mancare gli elementi di base per la corretta valutazione dei principali parametri acustici e, di conseguenza, dell'efficacia degli interventi finalizzati al controllo della qualità acustica complessiva.

**sound perception:** we are able to communicate with the world around us through sounds. The quality of this exchange depends both on the environment where the sound propagation occurs and the particular characteristics of our auditory system.

**percezione uditiva:** attraverso i suoni riusciamo a comunicare con il mondo circostante. La qualità di questo scambio dipende sia dall'ambiente dove avviene la propagazione sonora sia dalle particolari caratteristiche del nostro sistema uditivo.



sounds, environments and sound perception

# suoni, ambienti e percezione uditiva

Professor Diego Gonzalez  
Music and Architectural Acoustics Laboratory  
Fondazione Scuola di San Giorgio (Venice)  
National Research Council (CNR)

“We must choose a place in which the voice can diminish softly and does not return by reflection so as to bring an indistinct meaning to the ear”.

Vitruvius (2<sup>nd</sup> century B.C.)

“Dobbiamo scegliere un posto nel quale la voce possa attenuarsi soavemente e non ritorni per riflessione in maniera tale da portare un significato indistinto all’orecchio”.

Vitruvio (sec. II a.C.)

If you ever go inside an anechoic room such as those normally used for research and measurements in the field of acoustics, you will experience a strong sense of discomfort. The complete absence of external noises alongside the diminishing of sounds produced inside, due to the complete lack of reflection from walls, ceiling and floor, creates a sense of oppression and discomfort; sound perception is altered and it is a struggle to even recognize and accept your own voice. In such extreme acoustic conditions, indeed, sound arrives to the inner ear not by normal air conduction, via the tympanic membrane, but above all by bone transmission, through the mandible and the cranial bones. The listening experience in the anechoic room highlights two important characteristics of the acoustic environment in relation to man: the first is our innate ability to identify the acoustic environment with great accuracy thanks solely to our sense of hearing; the second concerns the importance of the acoustic characteristics of this environment for determining a situation of comfort, or conversely, or discomfort inside it. An anechoic room clearly represents an extreme case that may only be found in artificially created situations. The other extreme of the acoustic spectrum, as far as the presence of noise is concerned, is represented by environments with high acoustic pollution. A typical example is large company canteens where it is almost impossible to have an easy conversation during the busiest times. Reflections and reverberation time (the time sound remains in the environment after being emitted), the complete opposite of anechoic rooms, can be illustrated by large environments in stone or brickwork, such as churches and cathedrals, where sounds persist for a long time, mixing with each other and seriously compromising the intelligibility of speech.

Some of the above characteristics of the propagation of sound in environments were already known in ancient times, as was the concern for improving the human habitat from this point of view. In the 1<sup>st</sup> century B.C. Lucretius said: *“But if the intervening space is greater than it should be, words... will be confused... heard in an undistinguishable way in their meaning”*, clearly anticipating the concept of speech intelligibility in acoustic spaces. Moreover, some documented cases highlight the importance of this research from the historical point of view. As a paradigmatic example, in the illustration of Athanasius Kircher's book *Musurgia Universalis*, dating from 1650 (Fig.1) we can

Se si fa l'esperienza di entrare in una sala anecoica come quelle normalmente utilizzate per ricerche e misurazioni nel campo dell'acustica, non si può fare a meno di sentire un forte disagio. L'assenza completa di rumori esterni insieme all'attenuazione dei suoni prodotti all'interno – dovuta alla completa mancanza di riflessioni dalle pareti, dal soffitto e dal pavimento – crea una sensazione di oppressione, di disagio; la percezione uditiva viene alterata e si fa fatica a riconoscere ed accettare anche la propria voce. In tali estreme condizioni acustiche, infatti, il suono arriva all'udito interno non per normale conduzione aerea, attraverso la membrana del timpano, ma soprattutto per trasmissione ossea, attraverso la mandibola e le ossa del cranio.

L'esperienza dell'ascolto nella camera anecoica mette in evidenza due importanti caratteristiche dell'ambiente acustico in relazione all'uomo: la prima, è la nostra capacità innata d'identificare con grande precisione l'ambiente acustico grazie unicamente al nostro senso dell'udito; la seconda, riguarda l'importanza delle caratteristiche acustiche di questo ambiente nel determinare una situazione di comfort o al contrario di disagio al suo interno. È chiaro che una sala anecoica rappresenta un caso estremo riscontrabile solo in situazioni create artificialmente. L'altro estremo dello spettro acustico, per quanto riguarda la presenza di rumori, è dato dagli ambienti con un alto inquinamento acustico. Un esempio tipico è rappresentato dalle grandi mense aziendali, dove, nelle ore di punta, risulta quasi impossibile mantenere una conversazione agevole.

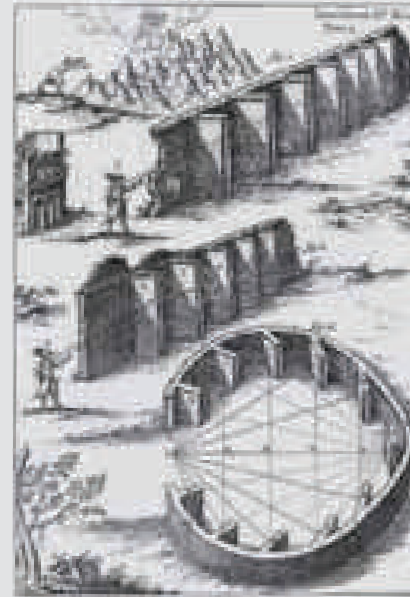
Per quanto riguarda, invece, le riflessioni ed il tempo di riverberazione (il tempo di permanenza di un suono nell'ambiente dopo essere stato emesso) – che è l'estremo opposto delle camere anecoiche – può essere ben rappresentato dai grandi ambienti in pietra o muratura, come, ad esempio, le chiese o le cattedrali, dove i suoni si mantengono a lungo, confondendosi tra di loro e compromettendo in modo considerevole l'intelligibilità del parlato.

Alcune di queste caratteristiche della propagazione del suono negli ambienti erano già note nei tempi antichi, così come la preoccupazione di migliorare l'habitat umano da questo punto di vista. Lucrezio, nel primo secolo a.C., infatti, diceva: *“Ma se lo spazio che intercorre è più lungo del dovuto, le parole... saranno confuse... percepite in modo non distinguibile nel loro significato”*, anticipando, in modo chiarissimo, il concetto

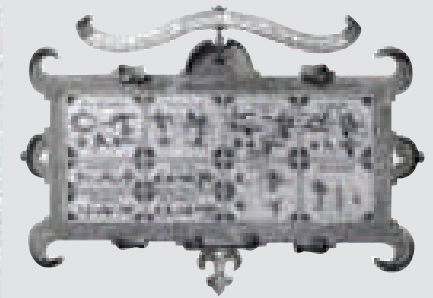
appreciate the reflection of sound through multiple obstacles (responsible for so-called pitch or tone repetition), and the convergence obtained thanks to the curvature of walls defining the acoustic space, analysed in a geometric approximation (approximate anticipation of so-called 'ray tracing').

Comprehending the ensemble of characteristics determining the acoustic quality of an environment still represents an extremely serious problem today which involves whole disciplines of scientific and technological knowledge. The production and propagation of sound in environments, the phenomena of interference, reflection and absorption, the physiology of the auditory apparatus and psycho-acoustics, are just a few select examples of the areas involved. The complexity of the problem, today requiring a multidisciplinary approach, was also recognized in past times. In the illustration of Kircher's book (Fig. 2) we may appreciate one of the first attempts at a systemic approach, directed towards understanding the anatomy of the auditory apparatus. The middle ear ossicles belonging to several animals are drawn here with great precision; for some idea of the difficulties of anatomical research, it is sufficient to say that the smallest of the three auditory ossicles (the stapes) is also the smallest bone in the human body and weighs only 2.5 milligrams on average: the thousandth part of what a normal antibiotic capsule would weigh. Its small dimensions are necessary to diminish the system's inertia which must vibrate extremely fast, up to approximately 20,000 times per second, for the highest frequencies that we are able to hear. On the other hand, the ossicles perform an important function by allowing the maximum transfer of energy between the vibrations of the tympanic membrane and those on the physiological fluids inside the cochlea.

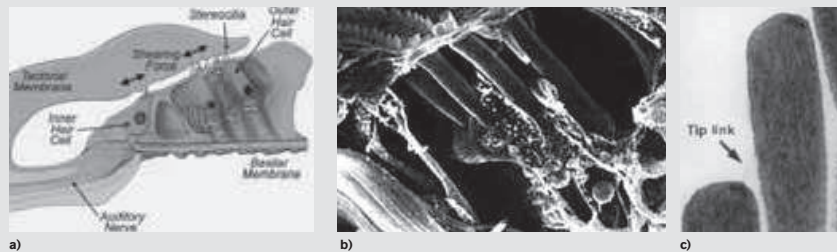
But despite these important anticipations, it is only thanks to recent progress in the comprehension of the diffusion of the acoustic field, the physiological mechanisms that determine the hearing of the same, the aspects linked to new materials and architectural techniques for acoustic design, that it has been possible to realise the importance of acoustic comfort as a determining factor of the quality of life inside living, study and work environments, and as a consequence to ensure that possible measures of design and intervention are directed to its optimization. The quality of an



**fig. 1** Athanasius Kircher, *Musurgia Universalis*, schemi di percorsi del suono. Athanasius Kircher, *Musurgia Universalis*, diagram of sound paths.



**fig. 2** Athanasius Kircher, *Musurgia Universalis*, rappresentazioni anatomiche degli ossicini dell'udito medio di diversi animali. Athanasius Kircher, *Musurgia Universalis*, anatomical representations of the middle ear ossicles in several animals.



**fig. 3 a)** Schema dell'organo del Corti all'interno della coclea; le cellule ciliate interne ed esterne (in proporzione numerica di 1:3) sono le responsabili della trasduzione dell'energia meccanica di vibrazione dei fluidi cocleari in impulsi nervosi, funzionando ambedue come microfoni biologici; in più, e grazie anche alle loro connessioni efferenti, le cellule ciliate esterne possono funzionare come altoparlanti, cioè, come piccoli motori che riescono a modificare localmente il comportamento dell'organo del Corti; in questo modo si possono amplificare suoni molto deboli che diventano udibili anche se le vibrazioni associate sono nell'ordine delle dimensioni atomiche; i suoni molto forti possono invece essere attenuati dando al nostro sistema uditivo un range dinamico di oltre 120 dB. Le cellule ciliate esterne sono anche responsabili della grandissima sensibilità frequenziale dell'udito dei mammiferi (l'abilità nel distinguere tra suoni acuti e suoni gravi che si possono disporre in una scala musicale). **b)** microfotografia dell'organo del Corti dove si possono vedere le cellule ciliate interne ed esterne e le loro ciglia sensibili alle torsioni meccaniche. **c)** microfotografia e schema delle minute molle biologiche che collegano le ciglia tra di loro; quando queste molle vengono tese, viene rilasciata una sostanza chimica che provoca la contrazione automatica del corpo cellulare. **a)** Diagram of the organ of Corti inside the cochlea; the inner and outer hair cells (in numerical proportion 1:3) are responsible for the transduction of mechanical energy due to vibration of the cochlear fluids in nerve impulses, both of them acting like biological microphones. Moreover, also due to their efferent connections, outer hair cells can function as loudspeakers, in other words like small motors which can locally modify the behaviour of the organ of Corti. In this way, very weak sounds may be amplified and thus become audible even if the related vibrations are comparable with atomical dimensions: very loud sounds may instead be decreased, giving our auditory system a dynamic range of over 120 dB. Outer hair cells are also responsible for the extremely high frequential sensitivity of the hearing of mammals (the ability to distinguish sounds from high-tones from low-tones that may be arranged in a musical scale). **b)** microphotograph of the organ of Corti where outer and inner hair cells are visible alongside their cilia which are sensitive to mechanical torsions. **c)** microphotograph and diagram of the minute biological springs which connect the cilia to each other; a chemical substance causing the automatic contraction of the cell body is released when these springs are put under tension.

dell'intelligibilità del parlato all'interno degli spazi acustici. Alcuni casi documentati evidenziano, inoltre, l'importanza di questa ricerca dal punto di vista storico.

Come esempio paradigmatico si può apprezzare nell'illustrazione del libro di Athanasius Kircher, *Musurgia Universalis*, del 1650 (fig.1) la riflessione del suono in ostacoli multipli (responsabile del cosiddetto pitch o colorazione di ripetizione), e la convergenza ottenuta grazie alla curvatura delle pareti che delimitano lo spazio acustico, analizzata in un'approssimazione geometrica (anticipazione approssimativa del cosiddetto *ray tracing*). La comprensione dell'insieme di caratteristiche che determinano la qualità acustica di un ambiente rappresenta ancora oggi un problema molto difficile che coinvolge intere discipline della conoscenza scientifico-tecnologica. La produzione e la propagazione del suono negli ambienti, i fenomeni d'interferenza, riflessione ed assorbimento, la fisiologia dell'apparato uditivo e la psicoacustica, sono solo alcuni dei campi coinvolti. Questa complessità del problema che oggi comporta la necessità di un approccio multidisciplinare è stata riconosciuta anche nei tempi passati.

Nell'illustrazione del libro di Kircher (fig. 2) possiamo apprezzare uno dei primi intenti di approccio sistematico, volto a capire l'anatomia dell'apparato uditivo; gli ossicini dell'orecchio medio di diversi animali sono disegnati con grande accuratezza; basti menzionare, per avere un'idea delle difficoltà nelle ricerche anatomiche, che il più piccolo dei tre ossicini dell'udito medio è anche il più piccolo osso del corpo umano (staffa) e pesa in media solo 2,5 milligrammi, cioè circa la millesima parte di quanto possa pesare una normale capsula di antibiotico. Le piccole dimensioni sono necessarie per diminuire l'inerzia del sistema che deve vibrare molto velocemente, fino a circa 20.000 volte al secondo, per le frequenze più alte che siamo in grado di percepire. D'altra parte, questi ossicini compiono un'importante missione consentendo il massimo trasferimento di energia tra le vibrazioni in aria della membrana timpanica e quelle nei fluidi fisiologici all'interno della coclea.

Nonostante queste importanti anticipazioni, è solo grazie ai recenti progressi nella comprensione della diffusione del campo acustico, dei meccanismi fisiologici che determinano la percezione dello stesso, degli aspetti legati ai nuovi materiali e alle tecniche architettoniche per il design acustico, che è stato possibile prendere atto dell'importan-



acoustic environment firstly depends on the sensations aroused by several types of sound source, such as music, speech or the different categories of noise, which are in turn determined by the response of the room itself and by the physiology of our auditory apparatus. Theophrastus already understood in the 1<sup>st</sup> century B.C. that the perception of sound needed to start from hearing to reach the brain, as his statements demonstrate: *“Hearing depends on the penetration of sound to the brain... the ear is physically joined to air, and given that it is in the air, the air inside is moved in accordance with the air that is outside”*. But despite this knowledge, some of the most complicated mechanisms of the auditory system have only been drawn to our attention in recent times. For example, we have discovered that some specialised neurons in the inner ear (called outer hair cells), have a double function: on the one hand they manage to produce nerve signals (of an electric nature) when they are bent by movement of the organ of Corti, inside the cochlea (they function like standard microphones converting mechanical movement to electric signals) and at the same time they can function in exactly the opposite way, bending when they receive a nerve impulse, in other words acting like small loudspeakers. These minute motors are distributed along the cochlea in three parallel lines amounting to approximately 15,000 units. By activating themselves according to the characteristics of sound in arrival, they can modify the behaviour of the cochlea locally, thereby optimizing the hearing response in order to hear sounds as well as possible which may vary enormously both in width (intensity) and in spectrum content (frequencies that they consist of). Fig. 3 shows a microphotograph of these extraordinary cells alongside a diagram which shows how they work. These cells are microscopic, they are therefore invisible to the naked eye, with cilia that have a diameter which is much smaller than the body of the cell itself. Even more surprising is the fact that the extremities of these minute cilia are attached by biological springs approximately 100 times smaller than the cilia themselves. When these springs are put under tension they release chemical substances that can produce an automatic contraction of the cell body at a speed of up to several thousand times a second (following the oscillations of sound in arrival). This mechanism is the fastest response to a stimulus that exists in our organism, and could compete with the fastest

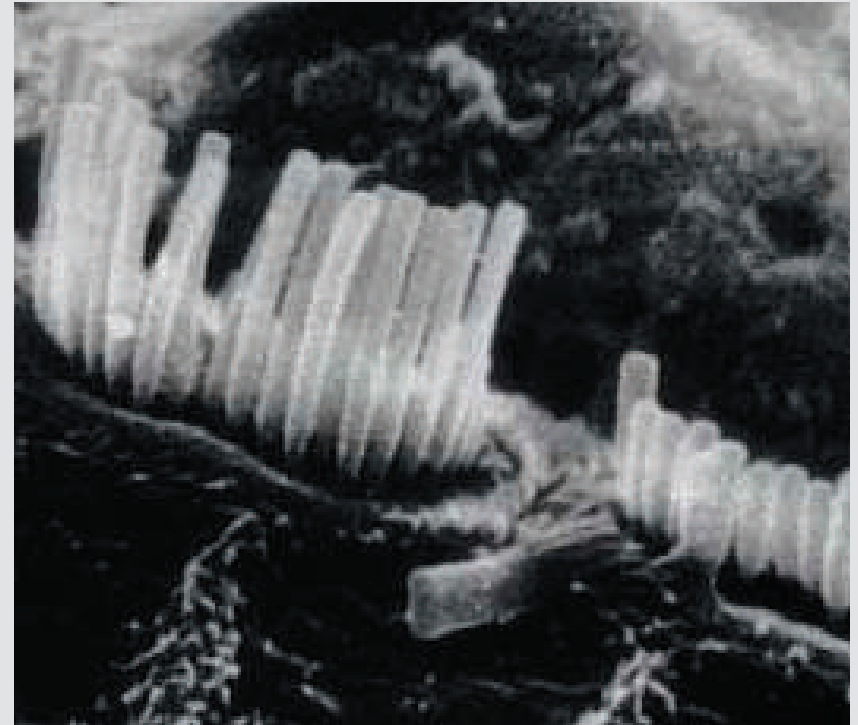
za del comfort acustico come fattore determinante della qualità di vita all'interno degli ambienti abitativi, di studio e di lavoro, e attuare di conseguenza le possibili misure di progettazione e d'intervento indirizzate alla sua ottimizzazione.

La qualità di un ambiente acustico dipende, in primo luogo, dalle sensazioni che sono eccitate dai diversi tipi di sorgenti sonore, come ad esempio, la musica, il parlato o le diverse categorie di rumori, che vengono determinate dalla risposta dell'ambiente stesso e dalla fisiologia del nostro sistema uditivo. Sebbene già Teofrasto, nel primo secolo a.C., avesse capito che la percezione del suono doveva partire dall'udito per arrivare al cervello, come dimostrano queste sue asserzioni: *“L'ascolto dipende dalla penetrazione del suono fino al cervello... l'orecchio è unito fisicamente all'aria, e dato che è nell'aria, l'aria dentro è mossa in accordo con l'aria che è fuori”*, solo recentemente sono stati messi in evidenza alcuni dei più complicati meccanismi del sistema uditivo. Ad esempio, si è scoperto che nell'udito interno alcuni neuroni specializzati, chiamati cellule ciliate esterne, hanno una doppia funzione: da una parte riescono a produrre segnali nervosi (di tipo elettrico) quando vengono piegate dal movimento dell'organo del Corti, all'interno della coclea (funzionano cioè come normali microfoni che convertono i movimenti meccanici in segnali elettrici) e, nello stesso tempo, possono funzionare esattamente al contrario, flettendosi quando ricevono un impulso nervoso, cioè agendo come piccoli altoparlanti. Questi piccolissimi motori sono distribuiti lungo la coclea in tre file parallele raggiungendo circa le 15.000 unità. Attivandosi secondo le caratteristiche del suono in arrivo, possono modificare localmente il comportamento della coclea, ottimizzando così la risposta dell'udito per far percepire nel modo migliore suoni che possono variare enormemente sia in ampiezza (intensità) che in contenuto spettrale (frequenze che li compongono). Nella figura 3 si può apprezzare una microfotografia di queste straordinarie cellule insieme ad uno schema del loro funzionamento. Cellule che sono microscopiche, non visibili quindi a occhio nudo, con ciglia che hanno un diametro parecchie volte minore del corpo della cellula stessa. Ancora più sorprendente è il fatto che gli estremi di queste minuscole ciglia siano legati da molle biologiche circa 100 volte più piccole delle ciglia stesse. Quando queste molle vengono messe in tensione rilasciano delle sostanze chimiche in grado di produrre una contrazione automatica del

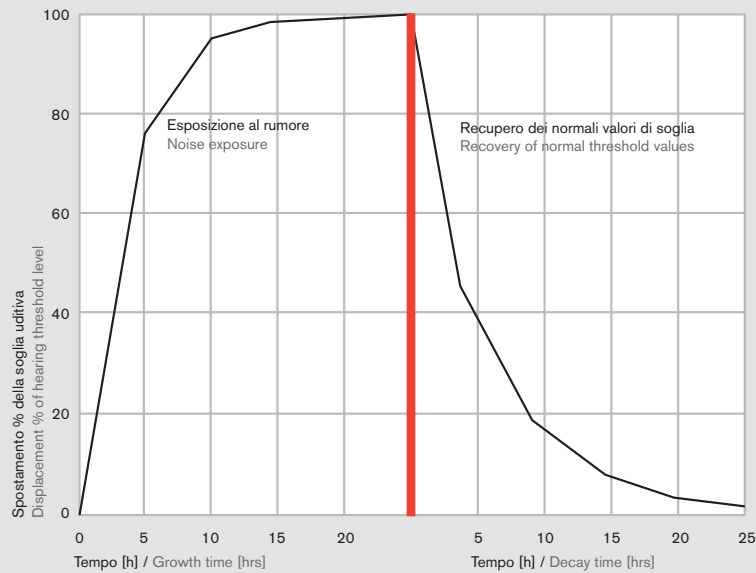
and most complex electronic circuits in terms of its capacity to process sounds. If we think that the quality of our hearing depends in good measure on the integrity of these extremely delicate cells, then we can immediately appreciate the damage an inappropriate acoustic environment may cause our ears. Furthermore, the outer hair cells, as is the case with all the neurons in the human body, do not reproduce, which is why once one has died irreversible damage is caused to our hearing capacity.

It should also be said that some mechanisms related to the functioning of this delicate system are still not known and are therefore the object of the most recent research. For example, we are just starting to understand now that the non-linearities of hearing are not a source of distortions, as was always thought in the hi-fi sector, but are instead a fundamental aspect of hearing mechanisms intimately related to their outstanding performance. The main effect of non-linearities in any kind of processing system is the generation of frequencies not found in the entrance to the system. A particularly interesting example in terms of hearing is the so-called phenomenon of the missing fundamental or residual perception. Thanks to this effect it is possible to listen to music from a small MP3 player despite the fact that low frequencies are practically inexistent. These are effectively regenerated at the level of the hearing system and it has been recently demonstrated how such a property is a phenomenon related to non-linearities which are active present in hearing like those found at the level of outer hair cells (the so-called active feedback system).

Several agents may cause damage to our delicate hearing organ, including ototoxic substances such as some types of antibiotics, or infections or traumas, and above all exposure to intense sounds for long periods of time. Fig. 4 shows the effect of prolonged exposure to intense noise on the outer acoustic hair cells which can lead to injury and also the destruction of the cells themselves or entire sections of the organ of Corti. Without necessarily causing the destruction of cells, exposure to noise may also cause sensory fatigue which leads to a transitory rise of the hearing threshold level, which means to say a reduced hearing sensitivity that leads to increased difficulty in verbal communication. Fig. 5 shows the rising contours of the hearing threshold level for the different intensities and exposure times. These phenomena present us with



**fig. 4** Microfotografia che illustra il danno prodotto alle cellule ciliate esterne dall'esposizione a rumore intenso; si possono vedere alcune ciglia piegate, altre fuse tra di loro, ed altre, mancanti, che sono state completamente distrutte. Microphotograph showing damage caused to outer hair cells exposed to intense noise; some bent cilia can be seen, others which have been fused together, others which are missing have been totally destroyed.



**fig. 5** Effetto dell'esposizione a rumore intenso nel caso reversibile. Nella parte sinistra la soglia uditiva si innalza fino ad un valore massimo di reversibilità ATS (Asymptotic Threshold Shift) raggiunto con legge asintotica. Quindi nella parte destra, dopo l'interruzione dell'esposizione al rumore, si osserva il graduale recupero. The effect of exposure to intense noise in the reversible case. The left part shows the hearing threshold level rise until it reaches a maximum value of reversibility ATS (Asymptotic Threshold Shift) with the asymptotic law. Therefore the right part shows the gradual recovery observed after interruption to exposure to noise.

corpo cellulare ad una velocità che può arrivare a diverse migliaia di volte al secondo (seguendo le oscillazioni del suono in arrivo). Questo meccanismo rappresenta la risposta più veloce che esiste nel nostro organismo ad uno stimolo, e potrebbe competere con i più complessi circuiti elettronici per la sua capacità di processare i suoni. Se si pensa che dall'integrità di queste delicatissime cellule dipende, in buona misura, la qualità del nostro senso dell'udito, si può comprendere immediatamente i danni che un ambiente acustico non idoneo può recare al nostro orecchio. Per di più, le cellule ciliate esterne, come del resto tutti i neuroni del nostro corpo, non si riproducono, pertanto una volta che ne muore una si produce un danno irreversibile alla nostra capacità di ascolto. Va anche detto che alcuni meccanismi legati al funzionamento di questo delicato sistema non sono ancora noti e pertanto sono oggetto delle più recenti ricerche. Ad esempio, si comincia a capire solo ora che le non linearità dell'udito non rappresentano una fonte di distorsioni, come è stato sempre ritenuto nel campo dell'alta fedeltà, bensì sono un aspetto fondamentale dei meccanismi uditivi intimamente legato alle loro strabilianti prestazioni. Il principale effetto delle non linearità in qualsiasi sistema di elaborazione del segnale è la generazione di frequenze che non si trovano nell'entrata del sistema. Un esempio particolarmente interessante nel caso dell'udito è rappresentato dal cosiddetto fenomeno della fondamentale mancante o percezione del residuo. Grazie a questo effetto è possibile ascoltare musica da un piccolo riproduttore MP3 nonostante la presenza di frequenze basse sia praticamente inesistente. Queste, infatti, sono rigenerate a livello del sistema uditivo ed è stato dimostrato recentemente come tale proprietà sia un fenomeno legato alle non linearità di tipo attivo presenti nell'udito come quelle che si trovano a livello delle cellule ciliate esterne (il cosiddetto sistema attivo di retroazione). Diversi agenti possono provocare danni al nostro delicato organo dell'udito, tra i quali, sostanze ototossiche come alcuni antibiotici, oppure infezioni o traumi e, soprattutto l'esposizione a suoni intensi per lunghi periodi di tempo. Nella figura 4 si può notare l'effetto sulle cellule ciliate esterne di un'esposizione prolungata a rumore intenso che può portare alla menomazione e anche alla distruzione delle cellule stesse o di intere sezioni dell'organo del Corti.

the second aspect concerning acoustic comfort, namely psycho-physical perception that is at the level of subjective sensations which are produced in the central nervous system. Some of these perceptive attributes are of particular importance for perception in environments, for example: subjective intensity or loudness, timbre (tonal effects), spaciousness and spatial localisation (binaural effects). Two other phenomena related to psycho-acoustics which are particularly important for spatial localisation and the intelligibility of speech are the precedence effect or 'de Haas' effect, and the 'cocktail party' effect. The first concerns our ability from a perceptive point of view to eliminate delayed versions of a sound that reaches our ears as reflections of the original sound, (this effect enables us to maintain our spatial localization ability even in extremely reverberant environments). On the other hand, the second effect refers to our ability to hear the interlocutor's voice even in environments where other noises and conversations overlap, for example during an animated meeting. This effect goes against the masking effect in which a 'masking' sound negatively interferes with another sound, raising the perception threshold. The influence of acoustic conditions in various types of environment, in relation to their habitability – what we might call acoustic comfort – is an issue that is growing in importance, even in the light of new discoveries about hearing in physiological and psychological terms, and also thanks to new technologies analysing the acoustic field. Conventional dwellings, as well as schools, offices and shared spaces, may be considered non-critical environments in contrast to those traditionally viewed as specialised areas like theatres and places for musical performances. If on one hand we have accepted the necessity of consultancy regarding specialized acoustics for environments we might call 'critical', it is even more evident that every type of space should today be thought of in terms of acoustics, and that design and intervention criteria are necessary in order to guarantee acoustic comfort. It is also important to underline that today the boundary between these two typologies is becoming less and less defined. A significant example are Home Theaters which aim to recreate the acoustic performance typical of cinemas but in normal living environments. Moreover, acoustic comfort is not only important for quality of life, it is also a particularly influential factor for productivity related to different activities

Senza arrivare alla distruzione delle cellule, l'esposizione al rumore può provocare anche affaticamento sensitivo che si traduce in un innalzamento transitorio della soglia uditiva, vale a dire, in una diminuita sensibilità dell'ascolto che si può tradurre in un aumento della difficoltà nel comunicare verbalmente. Nella figura 5 si possono vedere le curve d'innalzamento della soglia uditiva per diverse intensità e tempi d'esposizione. Questi fenomeni ci introducono nel secondo aspetto che riguarda il comfort acustico, quello della percezione a livello psicofisico, cioè, a livello delle sensazioni di tipo soggettivo che vengono prodotte nel sistema nervoso centrale. Alcuni di questi attributi percettivi sono di particolare importanza per la percezione negli ambienti, come ad esempio: l'intensità soggettiva o *loudness*, il timbro (effetti di coloritura), la spaziosità, la localizzazione spaziale (effetti binaurali). Altri due fenomeni legati alla psicoacustica, di particolare importanza per la localizzazione spaziale e per l'intelligibilità del parlato, sono: l'effetto di precedenza o *de Haas*, ed il *cocktail party effect*. Il primo riguarda la nostra capacità di eliminare, dal punto di vista percettivo, le versioni ritardate di un suono che arrivano nel nostro orecchio come riflessioni del suono originale (questo effetto ci consente di mantenere la nostra capacità di localizzazione spaziale all'interno di ambienti anche molto riverberanti). Il secondo, invece, si riferisce alla nostra capacità di ascoltare la voce di un interlocutore anche in ambienti dove si sovrappongono altri rumori e conversazioni come, per esempio, in una riunione animata.

Questo effetto si contrappone al mascheramento, nel quale un suono "mascherante" interferisce negativamente su di un altro, alzando la sua soglia di percezione. L'influenza delle condizioni acustiche nei vari tipi di ambienti in relazione alla loro abitabilità, quello che potremmo chiamare il comfort acustico, è un tema che sta acquisendo sempre più importanza, anche alla luce delle nuove conoscenze sul nostro udito sia a livello fisiologico che psicologico e grazie pure alle nuove tecnologie per l'analisi del campo acustico.

Abitazioni, ma anche scuole, uffici, spazi condivisi, possono essere considerati ambienti non critici in contrasto con quelli considerati tradizionalmente spazi specializzati come teatri e luoghi per le performance musicali. Se da una parte, infatti, viene accettata la necessità di avere una consulenza sull'acustica specializzata per gli spazi che possiamo



conducted in work and study environments. Nowadays, we know with some degree of certainty that inappropriate acoustic environments can have a negative influence on school learning and cause behavioural problems and even stress disorders. Acoustic quality is crucial even in the work environment. An analysis by the Center for the Built Environment (CBE) at U.C. Berkeley interviewed 4,096 people in 15 different working environments divided into sections (Fig. 6). The study highlights how acoustic comfort is the last parameter of all to be taken into account when determining the general conditions of living quality (such as thermal comfort, air quality, etc). More than 60% of those interviewed considered the inadequate acoustics of an environment to interfere negatively on their ability to appropriately accomplish work.

It is clear that there is still a great deal to do concerning the application of new findings in the field of acoustics and new building materials that may be used to improve these living conditions. Nowadays, even important design innovations of new cars concern this aspect: less interior noise, use of innovative materials, checks of ventilation noise, improved quality of musical diffusion, pleasant noise of door and other accessories. A recent striking example is the attention given to the design of the giant European airliner, Airbus®, (Fig.7) considered to be the most comfortable aircraft ever built also in terms of acoustic comfort. We have previously mentioned that some of the most relevant psycho-acoustic characteristics for the definition of acoustic comfort are in relation to the directionality and spatial properties of sound inside environments. This is why it is important for acoustic measurements in existing spaces and calculator simulations designing new spaces or optimization interventions take the spatial character of sound and its propagation into account. The first analyses of environments were conducted by measuring acoustic pressure only, and pressure microphones were indeed the first to be developed in the past (already back in the 19<sup>th</sup> century). The acoustic field, however, is actually four-dimensional: it has one component for pressure and three for the speed of air particles. This complete approach for the study of acoustic field propagation in environments, and therefore the real or virtual determination of acoustic comfort parameters, is nowadays possible also thanks to recent technological developments in the field of microsystems. State of the art probes (developed since the beginning of the

chiamare critici, risulta sempre più evidente che, oggi, ogni tipo di spazio sia da considerare uno spazio acustico e che è necessario avere dei criteri di design e di intervento per garantirne il comfort acustico. Va anche sottolineato che la linea di frontiera tra queste due tipologie risulta sempre meno definita.

Un esempio significativo viene rappresentato dagli Home Theater per i quali si punta a raggiungere le prestazioni acustiche tipiche delle sale cinematografiche ma in normali ambienti abitativi. Il comfort acustico, inoltre, non solo rappresenta un aspetto importante per la qualità della vita, ma è anche fattore di particolare influenza pure nella produttività associata alle diverse attività condotte negli ambienti di lavoro e di studio. Oggi, si sa con certezza che ambienti inadeguati dal punto di vista acustico possono influire negativamente sull'apprendimento scolastico arrivando a creare problemi di comportamento e anche patologie da stress. Anche nell'ambiente di lavoro risulta molto importante la qualità acustica.

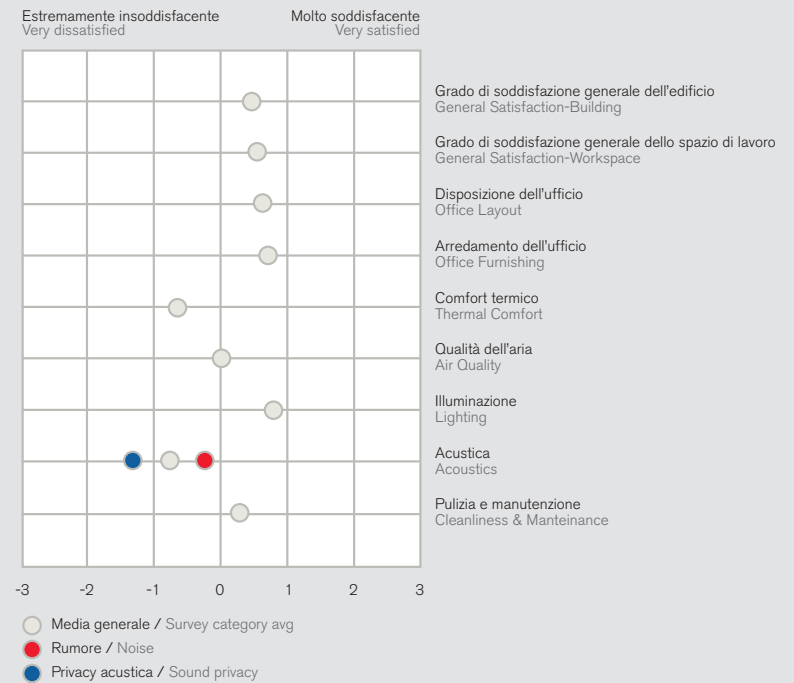
Un'analisi condotta dal Center for the Built Environment (CBE) at U.C. di Berkeley in 15 luoghi diversi di lavoro in ambiente compartato con 4.096 intervistati (fig. 6), mette in evidenza infatti come il comfort acustico occupi l'ultimo posto tra tutti i parametri che determinano le condizioni generali di qualità abitativa (come comfort termico, qualità dell'aria ecc...). Tuttavia più del 60% degli intervistati considera che un'acustica degli ambienti non adeguata interferisca negativamente sulla loro capacità di portare a termine correttamente il lavoro.

È chiaro che rimane ancora molto da fare nell'impiego di nuove conoscenze nel campo dell'acustica e dei nuovi materiali per l'edilizia che possono essere utilizzati per migliorare queste condizioni abitative. Attualmente, anche importanti innovazioni nel design di nuove automobili riguardano questo aspetto: meno rumore all'interno, uso di materiali innovativi, controllo del rumore di ventilazione, migliorata qualità della diffusione musicale, rumori gradevoli delle porte e di altri accessori. Un recente ed eclatante esempio è rappresentato dall'attenzione prestata al design del gigantesco aereo europeo, l'Airbus® (fig. 7), che viene considerato il velivolo più confortevole mai costruito, anche dal punto di vista del comfort acustico.

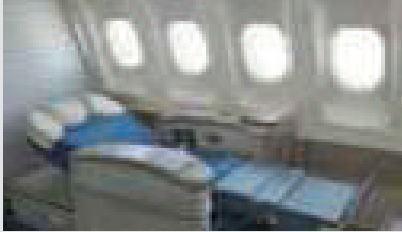
Si è precedentemente menzionato che alcune delle caratteristiche psicoacustiche più

1990s) allow for the simultaneous measurement, at any possible point in space, of the four components of the acoustic field. This is possible thanks to a technique exploiting the differential cooling properties of electronically controlled twin microwires. Fig. 8 is a photograph of the most recent state of the art probes.

The use of new technologies for the characterisation of acoustic spaces, the advance in knowledge of how our hearing system works, the development and manufacture of new acoustic materials for building, and also in the near future, the use of active control techniques for the diffusion of sound, are paving the way for a revolution in the field of living design. In this context, acoustic comfort is set to be the focus of increasing attention.



**fig. 6** Studio condotto dal Center for the Built Environment (CBE) dell'U.C. di Berkeley, sul grado di soddisfazione relativo a differenti parametri all'interno di uffici open space: la qualità dell'acustica risulta il peggiore. Oltre il 60% degli intervistati ritiene che interferisca negativamente sulla loro capacità di portare a termine il proprio lavoro. Study conducted by the Center for the Built Environment (CBE) at U.C. Berkeley, on the level of satisfaction relative to different parameters in open space offices: the acoustic quality is the worst. More than 60% of those interviewed believed it to interfere negatively with their ability to accomplish work appropriately.



**fig. 7** Interno dell'Airbus® A340, aereo europeo gigante per il trasporto dei passeggeri. Interior of Airbus® A340, the giant European passenger airliner.




**fig. 8** Titan by Microflowm®, l'ultima sonda di nuova generazione per la misurazione simultanea delle quattro componenti del campo acustico: la pressione e le tre componenti della velocità delle particelle d'aria. Titan by Microflowm®, the latest state of the art sound probe that simultaneously measures the four components of the acoustic field: pressure and the three air particle velocity components.

rilevanti per la definizione del comfort acustico sono in relazione con le proprietà di direzionalità e spazialità del suono all'interno degli ambienti. Per questo motivo è importante che le misurazioni acustiche negli spazi esistenti, le simulazioni al computer per il design di nuovi spazi o gli interventi di ottimizzazione tengano conto del carattere spaziale del suono e della sua propagazione. Le prime analisi degli ambienti furono condotte misurando solo la pressione acustica. Storicamente, infatti, sono stati sviluppati per primi i microfoni di pressione (già nell'Ottocento), ma il campo acustico è in realtà quadri-dimensionale: una componente per la pressione e tre componenti per la velocità delle particelle d'aria. Questo approccio completo per lo studio della propagazione del campo acustico negli ambienti – e pertanto della determinazione reale o virtuale dei parametri di comfort acustico – è possibile, oggi, anche grazie ai recenti sviluppi tecnologici nel campo dei microsistemi. Le sonde di ultima generazione, infatti (sviluppate a partire dagli anni '90 del secolo scorso), consentono la misurazione simultanea, in un punto qualsiasi dello spazio, delle quattro componenti del campo acustico. Questo è possibile grazie a una tecnica che sfrutta le proprietà di raffreddamento differenziale di coppie di microfilari controllate elettronicamente. Nella figura 8 possiamo osservare una fotografia con la più recente di queste sonde di ultima generazione.

L'uso di queste nuove tecnologie per la caratterizzazione degli spazi acustici, l'avanzamento nelle conoscenze sul funzionamento del nostro sistema uditivo, lo sviluppo e la fabbricazione di nuovi materiali acustici per l'edilizia e anche, in un futuro prossimo, l'impiego di tecniche di controllo attivo della diffusione del suono, stanno aprendo la strada ad una rivoluzione nel campo del design abitativo. In questo contesto il comfort acustico sarà sicuramente l'oggetto di una grande e sempre più crescente attenzione.

**riverberation:** is the prolongation of a sound in an enclosed space after the source which generated it has been completely depleted; it is caused by multiple reflections on the surfaces defining the environment itself.

**riverberazione:** è il perdurare di un suono all'interno di uno spazio confinato successivo al completo esaurimento della sorgente che lo ha generato ed è causato dalle riflessioni multiple sulle superfici che delimitano l'ambiente stesso.



the geometry of sound

# la geometria del suono

Architect Livio Consolino  
Acoustic Designer

“... when they are interrupted by obstructions, the first waves, flowing back, break up the formation of those which follow.  
In the same manner the voice executes its movements in concentric circles; but while in the case of water the circles move horizontally on a plane surface, the voice not only proceeds horizontally, but also ascends vertically by regular stages”.

Vitruvius Pollio *“De Architectura”*, Book V,  
taken from the writings of Aristoxenus  
(about 350 B.C.)

“... quando incontrano qualche ostacolo, le prime onde, refluendo all'indietro, intersecano le seguenti e ne turbano i contorni.  
In modo analogo, anche i suoni si propagano tutto all'intorno circolarmente; ma mentre nell'acqua le onde si muovono soltanto allargandosi sul piano della superficie dello specchio acqueo, i suoni non solo si diffondono orizzontalmente, ma salgono gradatamente anche in altezza”.

Vitruvio Pollio *“De Architectura”*, Libro V,  
tratto dagli scritti di Aristosseno (ca. 350 a.C.)



The evolution and development of the life of human beings are associated with sensorial phenomena; these events are displayed through the wonderful gift of the perception of the five main senses characterising the way every individual lives his/her entire life right from the moment of birth.

The auditory apparatus is considered to be one of the most complex and sophisticated organs of the human body. Wonderfully fascinating mechanisms occur inside the apparatus, where potential energy, which develops in the surrounding environment through voice, sounds, noises and any other disturbance of the air, is transformed into an acoustic signal.

Besides this, sound and noise are disturbances and displacements of particles varying in strength which propagate easily if spread by elastic media, whether gaseous, liquid or solid.

In the absence of these, in other words in a vacuum, sound has no possibility of diffusing; whereas it finds its natural origin in air, water, cement or steel and in general in the presence of propagation media.

The expansion of sound therefore occurs in very diverse media in terms of appearance, state of aggregation and physical conformation.

A sound wave generated by disturbances is essentially a mechanical movement, a form of energy in every respect, and is technically called sound pressure.

This energy materially displaces the tympanic membrane (the incus, malleus and stapes) through the cochlea, which contains the liquids where hair cells (neuromediators) are present, is transformed into a signal and transmitted to the brain through the cranial nerve VIII (the acoustic nerve).

It is clear that the human body and the mechanisms which power it are inevitably perceived to be extraordinarily beautiful due to their simplicity, functionality and purity; in the face of similar features, as experts in architectural acoustics, we should feel a moral and professional duty to protect the auditory apparatus from the dangers which it is unfortunately subjected to. We should dedicate ourselves to research in order to give all types of environments – from the most simple domestic ones to the most complex ones of mass use – high qualitative standards of acoustic comfort because

L'evoluzione e lo sviluppo della vita degli esseri umani sono associati a fenomeni di natura sensoriale e questi eventi si manifestano attraverso il dono meraviglioso della percezione dei cinque sensi principali caratterizzando il modo di vivere di ogni individuo, dal momento della sua nascita per tutto il ciclo vitale.

L'apparato uditivo è considerato uno degli organi più complessi e sofisticati del corpo umano. Al suo interno sono racchiusi dei meccanismi meravigliosamente affascinanti, dove l'energia potenziale che si sviluppa nell'ambiente circostante attraverso la voce, i suoni, i rumori e qualsiasi altra agitazione dell'aria, viene trasformata in segnale acustico. D'altronde, il suono e il rumore sono perturbazioni e spostamenti, più o meno grandi, di particelle che si propagano agevolmente se veicolate da mezzi elastici gassosi, liquidi o solidi che siano.

In assenza di questi, cioè nel vuoto, il suono non ha possibilità di diffondersi, mentre trova la sua genesi naturale nell'aria, nell'acqua, nel cemento o nell'acciaio e in generale in presenza di mezzi di propagazione.

L'espansione del suono avviene dunque in mezzi molto diversi tra loro per aspetto, stato di aggregazione e conformazione fisica.

L'onda sonora generata dalle perturbazioni è in sostanza un movimento meccanico, un'energia a tutti gli effetti, chiamata tecnicamente pressione sonora.

Questa energia sposta materialmente la membrana timpanica (incudine, martello e staffa), attraversa la coclea, che contiene i liquidi dove sono presenti le cellule ciliari (neuromediatori), viene trasformata in segnale e trasmessa al cervello attraverso l'VIII nervo cranico che è il nervo acustico.

È evidente che il corpo umano e i meccanismi che lo compongono e lo animano ci appaiono inevitabilmente come un qualcosa di straordinaria bellezza per la loro semplicità, funzionalità e purezza. Di fronte a simili fattezze, come esperti in acustica architettonica, dobbiamo sentire l'obbligo morale e professionale di preservare l'apparato uditivo dai pericoli ai quali, suo malgrado, esso andrà incontro e di applicarci nella ricerca per poter conferire a tutte le tipologie di ambienti, da quelli più semplici domestici a quelli più complessi e di utilizzo di massa, degli elevati standard qualitativi di comfort acustico. Questo perché le suggestioni uditive non derivano soltanto dalle voci o dai suoni musi-

the beauty of hearing does not derive solely from voices or musical sounds but also simply from mechanical noises. The risks that the auditory apparatus is subjected to originate from particularly intense noises, as well as specific unfavourable and prolonged hearing conditions.

Hearing damage can take various forms; the most serious and unfortunately irreversible forms affect highly delicate neural mechanisms (such as acoustic hair cells in the cochlea) which do not reproduce again once damaged.

This is precisely why one of the Fantoni Research Centre's areas of application is specifically aimed at the identification and solution of problems occurring in reverberant environments – closed environments – which are distinguished mainly from open areas by the fact that in addition to direct sound originating from one or more sources, all confined spaces are subject to reflections generated according to the architectural geometry of environments and materials that they are composed of.

When designing single environments with high acoustic signal responses, rather than expressing ourselves in our discipline only in terms of decibels (which is not the measurement unit of sound, but one of its reading scales), it is necessary to focus on what happens inside an environment as well. Here, in fact, the disturbances of sound pressure are diffused by the walls, ceiling, floor and any other element present in a room, affecting all possible frequencies from close by and thus giving origin to a series of reflections, not always easy to control, and other acoustic disturbance phenomena.

The main historical references are environments defined as 'Sabinian', in homage to Wallace Clement Sabine (1868-1919), an American physicist, pioneer of architectural acoustics and scholar of the first analytic relations concerning reverberation time (RT60), certainly considered – alongside other indicators which must not be forgotten – one of the fundamental and essential elements of study for the overall acoustic balance of all environments, to be therefore kept under appropriate control.

To give an idea of what reverberation time is – not so much from a technical viewpoint,

cali ma anche semplicemente da rumori meccanici, e i rischi ai quali è sottoposto l'udito possono derivare sia da situazioni di rumori particolarmente intensi, sia da specifiche condizioni d'ascolto sfavorevoli e protratte nel tempo.

I danni uditivi sono di diversa natura e quelli più gravi e purtroppo irreversibili interessano i delicatissimi meccanismi (come le cellule ciliate contenute nella coclea) di natura neuronica che una volta danneggiati, non si riproducono mai più.

Ed è proprio per questo che una delle aree di applicazione degli studi del Centro Ricerche Fantoni è tesa specificatamente all'individuazione e soluzione dei problemi che si manifestano negli ambienti riverberanti – ambienti chiusi – che si differenziano principalmente dalle situazioni all'aperto, per il fatto che in tutti gli spazi confinati vi è la presenza, oltre che del suono diretto, proveniente da una o più sorgenti, anche di tutte quelle riflessioni che si generano in funzione della geometria architettonica degli ambienti e dei materiali di cui sono composti.

Nel restituire alle persone ambienti dalle elevate risposte al segnale acustico, più che esprimerci nel nostro ambito solo in termini di decibel (che non è l'unità di misura del suono, bensì una sua scala di lettura), bisogna concentrare l'attenzione anche su cosa succede all'interno di un ambiente. Qui, infatti, le perturbazioni di pressione sonora si diffondono dalle pareti, dal soffitto, dal pavimento e da qualsiasi altro elemento presente in una sala, interessando da vicino tutte le frequenze possibili e dando così origine ad una serie di riflessioni, non sempre facilmente controllabili, e ad altri fenomeni acustici di disturbo.

I riferimenti storici principali sono gli ambienti denominati "sabiniani", in omaggio a Wallace Clement Sabine (1868-1919), fisico statunitense, pioniere dell'acustica architettonica e studioso delle prime relazioni analitiche riguardanti il tempo di riverberazione (RT60), considerato – insieme ad altri indicatori da non trascurare – uno degli elementi di studio fondamentali ed essenziali per l'equilibrio acustico complessivo di tutti gli ambienti, da tenere quindi opportunamente sotto controllo.

Per dare un'idea su che cos'è il tempo di riverberazione – non tanto da un punto di vista tecnico ma di pura percezione – si provi a pensare alla sensazione acustica che si può sperimentare quando ci si trova all'interno di una chiesa o di una palestra e si cerca di

but from pure perception – try imagining a sound perception experienced inside a church or a gym when we try to speak. It will certainly not be the same impression that we have in a cinema or a recording studio. Let us think, furthermore, of the irritating ‘boom’ inside an industrial building which prevents us from hearing well and even communicating properly; all this can certainly never be compared to the accuracy of hearing in a theatre, conference hall or in any case an environment with the correct characteristics of acoustic design.

Hearing has several requirements: for example, if we want to listen to a concert of Gregorian chants it is necessary to have an environment with a particularly long reverberation time (a characteristic handed down through the centuries by religious orders) of four or five seconds or more, because this type of singing cannot permit shorter times to be appreciated otherwise it would lose its peculiar characteristics.

On the contrary, in a television studio or cinema, environments must be particularly ‘dry’ with reduced reverberation times of even half a second.

Reverberation time is technically defined as ‘the necessary time for a sound present inside a confined space to diminish by 60 dB’, or in even simpler terms, it can be indicated as ‘the necessary time for a particularly high sound emission (in a closed environment) to diminish in intensity until it becomes practically imperceptible’.

Sabine’s mathematic formula concerning reverberation time that he wrote towards the end of the 19<sup>th</sup> century was drawn up in an entirely experimental manner: he confirmed his own intuitions by working inside a room – which we may consider as the precursor of the reverberation chamber – using a pipe organ as a source instead of the omnidirectional or dodecahedral source that we have nowadays, a stopwatch instead of digitised systems, and a good ear instead of advanced microphones.

The main operations performed in the pseudo reverberation chamber consisted of the positioning and removal of padded cushions and measuring the time between the interruption of the source and the complete dissolution of the acoustic signal.

All this led Sabine to mathematically fix one of the fundamental concepts of architectural acoustics, in the following relation which is still valid today:

parlare. Non sarà di certo la stessa impressione che potremo avere in una sala cinematografica o in uno studio di registrazione. Pensiamo, inoltre, al fastidioso “rimbombo” all’interno di un capannone industriale, che non ci consente di sentire bene e neanche di comunicare correttamente. Tutto ciò non può essere assolutamente paragonato alla precisione di ascolto all’interno di un teatro, di una sala conferenze o comunque in ambienti con caratteristiche di progettazione acustica corretta.

Diverse sono poi le esigenze di ascolto: se dobbiamo ascoltare un concerto di canti gregoriani avremo bisogno, ad esempio, di un ambiente con riverberazione particolarmente lunga (caratteristica tramandata nei secoli dagli ordini religiosi) con tempi di quattro, cinque secondi ed oltre perché questo tipo di canto, per essere apprezzato non può avere tempi inferiori in quanto perderebbe la propria particolarità.

Al contrario, in uno studio televisivo o in una sala cinematografica, c’è la necessità di avere ambienti particolarmente “secchi” con tempi di riverberazione ridotti addirittura a mezzo secondo.

Il tempo di riverberazione si definisce tecnicamente come “il tempo necessario affinché un suono presente all’interno di uno spazio confinato diminuisca di 60 dB”, e in termini più semplici, lo si può indicare come “il tempo necessario affinché un’emissione sonora particolarmente elevata (sempre in ambiente chiuso) vada a diminuire la propria intensità fino a diventare praticamente impercettibile”.

L’equazione matematica che Sabine scrisse sul tempo di riverberazione verso la fine dell’Ottocento, fu ricavata in maniera assolutamente sperimentale: egli confermò le proprie intuizioni lavorando all’interno di una stanza – che possiamo pensare come l’antenata della camera riverberante – utilizzando quale sorgente un organetto a manovella invece di una sorgente omnidirezionale o dodecaedrica dei giorni nostri, un cronometro al posto di sistemi digitalizzati ed un buon orecchio invece di evoluti microfoni.

Le operazioni principali che si svolgevano nella pseudo camera riverberante consistevano nel posizionare e rimuovere dei cuscini imbottiti e nel misurare il tempo che intercorreva tra l’interruzione della sorgente e il completo dissolvimento del segnale acustico.

Tutto questo portò Sabine a fissare matematicamente uno dei concetti fondamentali dell’acustica architettonica, attraverso la seguente relazione ancor oggi valida:

$$\frac{RT60 = 0.161 V}{S \cdot a}$$

$$\frac{RT60 = 0,161 V}{S \cdot a}$$

where 'RT60' indicates reverberation time measured in seconds, 'V' indicates the volume of the room in cubic metres, 'S' indicates the surface area of the room in square metres and 'a' indicates the average absorption coefficient of the surfaces making up the room (Fig. 1).

Dove con "RT60" si indica il tempo di riverberazione misurato in secondi, con "V" il volume della stanza in metri cubi, con "S" la superficie della stanza in metri quadrati e con "a" il coefficiente di assorbimento medio delle superfici che compongono la stanza (fig. 1).

It can be understood how the prolongation of a sound tail inside enclosed spaces generates hearing difficulty, not only for music (composed of extremely variable sounds in their complexity), but also for speech.

Si può intuire come il perdurare di una coda sonora all'interno di spazi chiusi generi difficoltà nell'ascolto, non solo della musica (composta da suoni molto variabili nella loro complessità), ma anche del parlato.

And this is why there is no actual optimum reverberation time of reference, instead it should definitely be within a wider range of times from particularly dry conditions, present in the open (free acoustic field) or in anechoic rooms (with no reverberation), to conditions with an excessive reverberation produced by large architectural volumes. Recent studies have combined the evaluation of reverberation time with a series of analysis on hearing and perso-

Ed è per questo che si può affermare che non esiste in realtà un tempo di riverberazione ottimale di riferimento, ma lo si dovrà ricercare sicuramente in un intervallo più ampio di tempi compresi fra una condizione particolarmente secca, presente all'aperto (campo acustico libero) o nelle stanze anecoiche (senza riverberazione), ed una con esagerata riverberazione prodotta dai grandi volumi architettonici. Studi recenti integrano la valutazione del tempo di riverberazione con una serie di

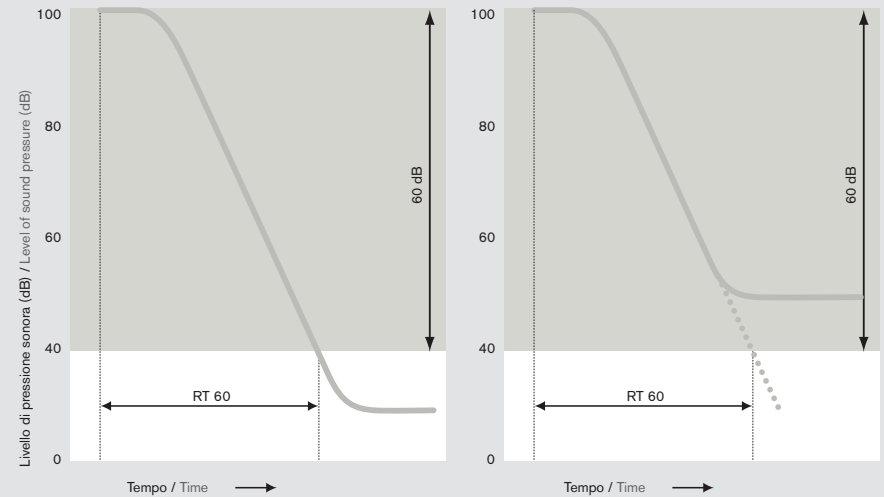


fig. 1 Rappresentazione grafica della determinazione del tempo di riverberazione in funzione del livello di pressione sonora (dB) e del tempo espresso in secondi. Diagram of reverberation time determination according to the level of sound (dB) pressure and Time in sec.

## the geometry of sound

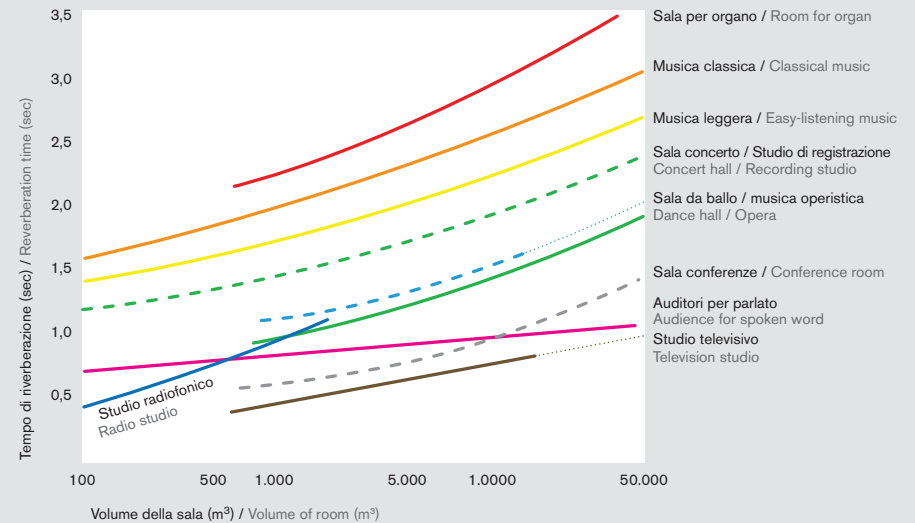
nal judgment of individual spectators. The following diagram schematically represents the determination of the indicative reverberation time, according to the function and overall volume of an environment (Fig. 2). It is necessary for sound reflection to be distributed uniformly throughout the entire volume of the room in order for the environment to possess good acoustics and a representative reverberation time.

As a result, the geometry of a room assumes an important role because it is precisely the structural form, materials of use, appropriate inclinations of the room itself and the sound absorbing panels that allow for meaningful hearing situations to be obtained, trying to avoid in all cases the areas of echo and silence due to sound shadows.

analisi sull'ascolto e sul giudizio personale dei singoli spettatori. Il diagramma di seguito inserito rappresenta schematicamente la determinazione del tempo di riverberazione indicativo, in base alla funzione e al volume complessivo di un ambiente (fig. 2).

Affinché un ambiente sia dotato di una buona acustica e di un tempo di riverberazione caratterizzante, è necessario che le riflessioni sonore siano ripartite in modo omogeneo in tutto il volume architettonico. Di conseguenza la geometria di una sala assume un ruolo importante perché è proprio dalla forma strutturale, dai materiali d'impiego, dalle opportune inclinazioni della sala stessa e dai pannelli di spinta del suono che si riescono ad ottenere situazioni di ascolto significative, cercando di evitare in ogni modo le aree di eco e di silenzio dovute ad ombre sonore.

## la geometria del suono



**fig. 2** Determinazione grafica del tempo di riverberazione in funzione del volume complessivo degli ambienti e della loro diversa destinazione d'uso. Diagram of reverberation time according to the total volume of environments for different destined use.



Reflections generated by sound waves follow the same geometric principles as those originating from light rays that hit a mirror, where the angle of incidence of the direct wave front is equal to the angle of reflection, and as a consequence the two-dimensional aspect offers a source, an image point, and a wave 'bounce' angle, determined by the form of the impact surface (Fig. 3).

The surfaces of rooms are hit indiscriminately by spherical wave fronts – and not as we thought simply by linear rays – and these fronts undergo many reflections in their path given that they are continually diffusing on all walls. If a sound wave, on the other hand, hits a surface which is not flat but concave or convex, the reflections will tend towards phenomena of concentration or diffusion (Fig. 4-5).

The effect produced by this path of sound waves leads to a loss of energy on the part of every single reflection until they are completely dissipated in heat. Reflections which follow this type of path will affect the medium-high perceptible frequencies and are called specular frequencies.

Le riflessioni generate dalle onde sonore seguono gli stessi principi geometrici di quelle originate dai raggi di luce che colpiscono uno specchio, dove l'angolo di incidenza del fronte d'onda diretto è uguale all'angolo di riflessione. Di conseguenza la geometria piana ci offrirà una sorgente, un punto immagine, e un angolo di "rimbalzo" dell'onda, determinato dalla forma della superficie di impatto (fig. 3).

Le superfici delle sale vengono investite senza distinzione da fronti d'onda sferici – non come si pensa, per semplicità, da raggi lineari – e questi fronti subiscono nel loro percorso molte riflessioni dato che si diffondono di continuo su tutte le pareti. Se un'onda sonora, viceversa, colpisce una superficie non piana, ma concava o convessa, le riflessioni tenderanno a fenomeni di concentrazione o diffusione (fig. 4-5).

L'effetto prodotto da questa progressione delle onde sonore comporta la perdita di energia da parte di ogni singola riflessione fino alla sua completa dissipazione in calore. Le riflessioni che seguono questo tipo di andamento interessano le frequenze percettibili medio-alte e sono chiamate frequenze speculari.

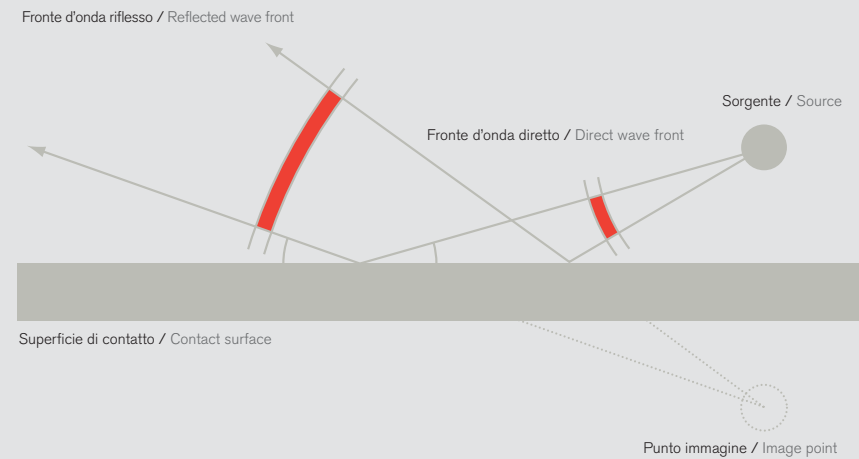


fig. 3 Rappresentazione grafica della riflessione geometrica del suono su superficie piana. Representation of sound geometrical reflection on a flat surface.

## the geometry of sound

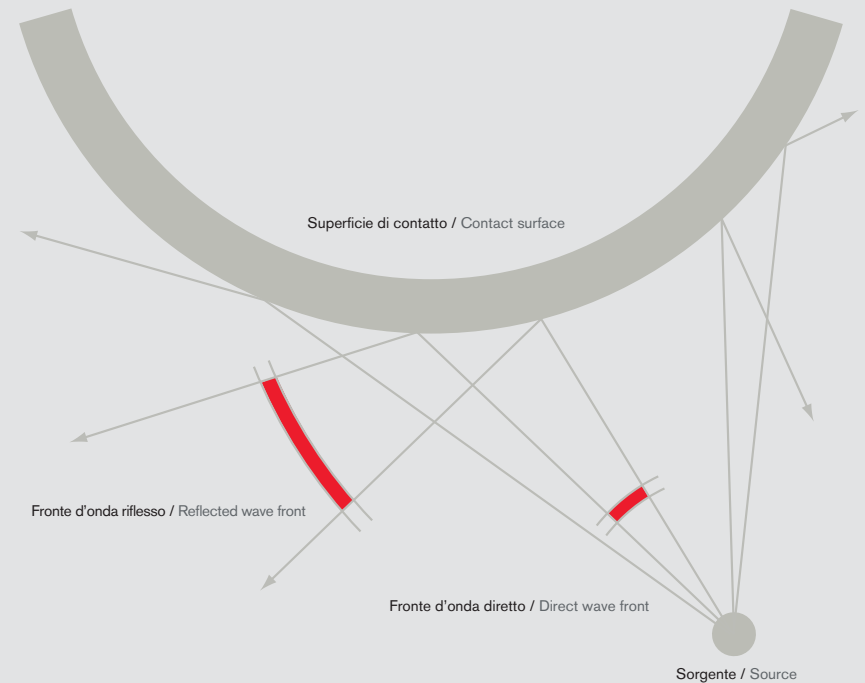
As a result, it is necessary to control the direction and behaviour of sound during the acoustic design phase and follow the basic rules of geometric reflection in order not to compromise the good result of environments.

Then endeavouring to look more closely at the behaviour of frequencies and conditions of operability that we must reserve for architectural acoustics, and to better understand the composition of our main opponents, that is sounds and noises, we must first of all understand exactly what a frequency is as well as its field of action and morphology.

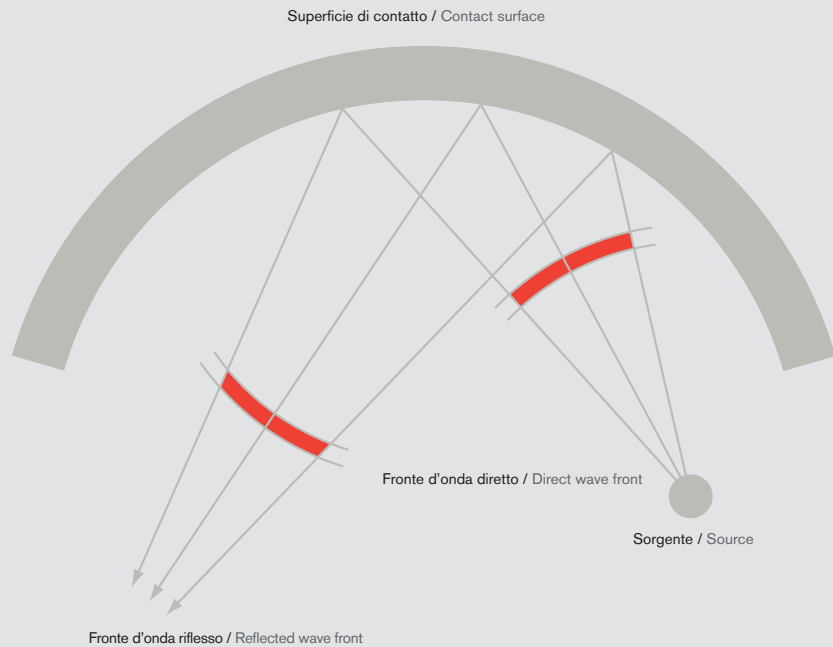
Di conseguenza bisognerà, in fase di progettazione acustica, controllare la direzione ed il comportamento del suono seguendo le regole basilari della riflessione geometrica per non compromettere la buona riuscita degli ambienti.

Cercando poi di guardare più da vicino il comportamento delle frequenze e le condizioni di operatività che dobbiamo riservare all'acustica architettonica e per meglio conoscere la composizione dei nostri antagonisti principali, cioè suoni e rumori, dobbiamo innanzitutto sapere che cos'è una frequenza, qual è il suo campo d'azione e la sua morfologia.

## la geometria del suono



**fig. 4** Rappresentazione grafica della riflessione geometrica del suono su una superficie convessa. *Superficie convessa = Diffusione del suono.* Representation of sound geometrical reflection on a convex surface. *Convex surface = sound diffusion.*



**fig. 5** Rappresentazione grafica della riflessione del suono su una superficie concava.  
*Superficie concava = Concentrazione del suono.* Representation of sound geometrical reflection on a concave surface. *Concave surface = sound concentration.*

### Bassa Frequenza

La bassa frequenza è una frequenza di natura impattiva e non è in grado di sentire le asperità della parete; tutto quello che trova nel suo cammino viene colpito con la stessa potenza.

Tanta energia colpisce la parete ed altrettanta energia rimbalza (in acustica “riflette”) seguendo una direzione di riflessione con un angolo uguale a quello di impatto.

Per chiarire il concetto, si può associare l'onda sonora ad una certa quantità d'acqua. Se, infatti, lanciamo con forza un secchio pieno d'acqua, quindi una certa massa, su di una parete, osserveremo che gran parte dell'acqua che colpisce il muro avrà la forza necessaria per riflettersi in altre direzioni perdendo poca dell'intensità d'impatto data la sua forza iniziale. Ora, è importante sapere come si sviluppa la lunghezza d'onda della bassa frequenza. Sappiamo che la lunghezza d'onda di una frequenza è data in generale dalla seguente relazione analitica:

$$\lambda = c/f$$

Dove con “c” indichiamo la velocità del suono nell'aria (340, 341, 342 m/sec ...), e con “f” la frequenza di riferimento. Ricordandoci che il range di valori percepibili dall'apparato uditivo degli esseri umani varia tra i 16 e 16.000 Hz, ed ipotizzando di prendere in considerazione una bassa frequenza di 100 Hz (equivalenti all'oscillazione di una particella per 100 volte nell'unità di tempo, ossia il secondo [sec.]) avremo:

$$\lambda = 340/100 = 3,4 \text{ m}$$

Come potete osservare, la bassa frequenza è dotata di una estesa lunghezza dell'onda, (perché in acustica 3,4 m sono una lunghezza non indifferente) e questa è la sua caratteristica principale capace di mandare in vibrazione intere pareti.

Se prendiamo in considerazione i moti rotazionali (come per esempio quelli di un motore) con frequenza di 34 Hz, la lunghezza d'onda sarà addirittura:

$$\lambda = 340/34 = 10 \text{ m}$$

### Low Frequency

Low frequency is an impactful frequency unable to feel the harshness of walls; it hits everything in its path with the same power.

A great deal of energy hits the wall and an equal amount bounces (in acoustics the term is 'reflects') following a reflection direction angle equal to that of impact.

In order to clarify the concept, a sound wave might be associated with a certain quantity of water. If, indeed, we forcefully throw a bucketful of water against the wall, we can observe that most of the water that hits the wall will have the necessary strength to reflect in other directions losing little of its impact intensity given its initial force.

It is now important to know how the low frequency wavelength is developed.

We know that a frequency wavelength is generally given by the following analytic relation:

$$\lambda = c/f$$

Where 'c' indicates the speed of sound in air (340, 341, 342 m/sec ...), and 'f' indicates the frequency of reference.

Remembering that the range of values perceived by the auditory apparatus of human beings varies from 16 to 16,000 Hz, and hypothesising the consideration of a low frequency of 100 Hz (equivalent to the oscillation of a particle 100 times in a time unit, or second [sec.]) we have:

$$\lambda = 340/100 = 3.4 \text{ m}$$

As can be observed, low frequency possesses an extended wavelength (because 3.4 m is a considerable length in acoustics) and this is the main characteristic capable of making entire walls vibrate.

If, for example, we consider rotational movements (such as those of a motor) with a frequency of 34 Hz, the wavelength will be as much as:  $\lambda = 340/34 = 10 \text{ m}$

### Media frequenza

Se ora lanciamo sulla parete lo stesso quantitativo d'acqua ma questa volta con una bottiglia, avremo un urto del tutto inferiore a quello precedente ed è intuitivamente chiaro che l'impatto delle medie frequenze su qualsiasi superficie sarà più attenuata della bassa frequenza e la direzione delle onde riflesse seguirà una direzione del tutto diversa dalle precedenti, assumendo un andamento di tipo composto (come rappresentato nello schema funzionale).

E la lunghezza d'onda, supponendo una media frequenza pari a 1.000 Hz, sarà:

$$\lambda = 340/1.000 = 0,34 \text{ m} = 34 \text{ cm}$$

Si può notare come la lunghezza d'onda a media frequenza sia sensibilmente diminuita rispetto a quella della bassa frequenza.

### Alta frequenza

Proseguendo con le esemplificazioni, dopo l'acqua lanciata con il secchio e con la bottiglia vogliamo ulteriormente esagerare cercando in qualche maniera di proiettare ancora la stessa quantità d'acqua con una siringa.

La parete, ovviamente, non avrà nessun tipo di deformazione ma noteremo che le gocce d'acqua più o meno lentamente seguiranno l'andamento delle asperità presenti sulla sua superficie, riflettendosi in direzioni del tutto diverse l'una dall'altra.

L'alta frequenza ha quindi un tipo di comportamento per cui si può considerare come un'onda "intelligente", nel senso che "sente" tutte le scabrosità di una parete, e non solo, seguendo anche gli andamenti determinati dai materiali e dalla morfologia strutturale e spaziale delle superfici.

Supponendo un'alta frequenza pari a 10.000 Hz avremo:

$$\lambda = 340/10.000 = 0,034 \text{ m} = 3,4 \text{ cm}$$

### Medium Frequency

If we now throw the same quantity of water against the wall but this time from a bottle, we will have an impact which is much less than the previous one and it is intuitively clear that the impact of medium frequency on any surface will be weaker than low frequency impact and the direction of reflected waves will follow a completely different direction from the previous ones, assuming a composite path (as represented in the functional diagram).

And, supposing a medium frequency equal to 1,000 Hz, the wavelength will be:

$$\lambda = 340/1,000 = 0.34 \text{ m} = 34 \text{ cm}$$

It can be noted that the medium frequency wavelength is considerably less than the low frequency one.

### High Frequency

Continuing the examples of water being thrown from a bucket and then a bottle, we would now like to try in some way to project the same quantity of water with a syringe.

Obviously the wall will have no strain whatsoever but we can note that the water droplets will follow the path of the asperities present on its surface more or less slowly, reflecting in completely different directions.

High frequency therefore behaves in such a way as to be considered an 'intelligent' wave, in the sense that it 'feels' all the roughness of a wall; but this is not all, it also follows the paths determined by materials and the structural and spatial morphology of surfaces.

Supposing a high frequency equal to 10,000 Hz, we will have:

$$\lambda = 340/10,000 = 0.034 \text{ m} = 3.4 \text{ cm}$$

Si è osservato dunque l'importanza di una serie di aspetti che necessariamente siamo tenuti a prendere in considerazione quando parliamo di ambienti chiusi e di campo riverberante in generale.

Approfondendo poi gli aspetti geometrici e i principi che regolano la propagazione delle onde sonore, credo si sia acquisita una certa "dimestichezza" anche con le frequenze.

Le argomentazioni trattate vogliono essere uno strumento conoscitivo iniziale per chi si avvicina per la prima volta al tema sempre più sentito del corretto funzionamento acustico degli ambienti, nel contesto di un'argomentazione comunque vastissima.

Controllare tutti questi interessanti elementi e "normalizzare" il tempo di riverberazione, significa lavorare a stretto contatto con una serie di parametri acustici che sono decisivi per "l'accordatura" finale delle sale. Vuol dire confrontarsi, inoltre, con le frequenze e con i coefficienti di assorbimento dei materiali, siano essi di uso comune o tecnologicamente avanzati, significa modellare geometricamente lo spazio architettonico, le sue regole di partizione e decidere quali saranno i tempi (RT60) che più si adatteranno alle diverse tipologie che gli ambienti dovranno assumere, asservendoli alle esigenze funzionali più differenti.

Sarà altrettanto importante riflettere sulle ricerche condotte nei tempi passati da coloro che, avuti i nostri stessi problemi, hanno cercato di risolverli senza avere a disposizione gli strumenti altamente sofisticati dei giorni nostri e di conseguenza mettere in atto una ricognizione temporale alla ricerca degli ambienti più significativi presenti nella letteratura acustica, dai quali trarre, oggi, riferimento e opportunità per sviluppi di successo.



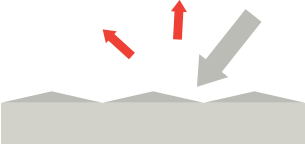
We have therefore observed the importance of a series of aspects that it is necessary to consider when we talk of enclosed environments and reverberating fields in general.



By going into more detail about the geometric aspects and principles regulating the propagation of sound waves, I believe that a certain 'familiarity' even with frequencies may be acquired.

The subjects dealt with here serve as an introductory tool for those who come for the first time to the increasingly important area concerned with the correct acoustic functioning of environments, in the context of an extremely vast subject area.

Controlling all these interesting elements and 'normalizing' the reverberation time, means to work in close contact with a series of acoustic parameters which are decisive for the final 'tuning' of the room. Furthermore, this entails examining frequencies and absorption coefficients of materials, whether they are of common use or are technologically advanced; it also entails the geometric modelling of the architectural space and its rules of subdivision as well as deciding what times (RT60) will be most suitable for the different types the environments must assume, subjecting them to the most varied functional demands.

It will be equally important to reflect on past research conducted by those who attempted to resolve the same problems as today but without highly sophisticated instruments at their disposal, and as a consequence embarking on a temporal reconnaissance on the lookout for more meaningful environments present in acoustic literature, which might today be used as a reference point and as opportunities for successful developments.

<p>Bassa frequenza Low frequency</p> <p><b>(100-315 Hz)</b></p>	 <p>(100 Hz)</p>	<p>Lunghezza d'onda / Wavelength <math>\lambda = c/f</math></p> <p><math>\lambda = 340/100</math>      <b>3,4 m</b></p>
<p>Media frequenza Medium frequency</p> <p><b>(400-1250 Hz)</b></p>	 <p>(1.000 Hz)</p>	<p>Lunghezza d'onda / Wavelength <math>\lambda = c/f</math></p> <p><math>\lambda = 340/1000</math>      <b>0,34 m</b></p>
<p>Alta frequenza High frequency</p> <p><b>(1600-5000 Hz)</b></p>	 <p>(10.000 Hz)</p>	<p>Lunghezza d'onda / Wavelength <math>\lambda = c/f</math></p> <p><math>\lambda = 340/10000</math>      <b>0,034 m</b></p>

 Onda diretta / Direct wave  
 Onda riflessa / Reflected wave

Alta frequenza = Lunghezza d'onda corta  
 Bassa frequenza = Lunghezza d'onda estesa  
 High frequency = Short wavelength  
 Low frequency = Extended wavelength

Schema riassuntivo dell'andamento delle frequenze e lunghezza d'onda.  
Summary scheme of paths of frequencies and wavelength.



**acoustic absorption:**

the dissipative phenomenon for which part of the incident sound radiation on a body is converted to heat.

**assorbimento acustico:**

fenomeno dissipativo per cui parte della radiazione sonora incidente su un corpo viene convertita in calore.

than that requested in the execution of the test itself, especially because the results that are obtained are unbreakably bound to the material employed, but also and above all to the particular configuration of assembly adopted: the same tested sound absorber applied to two different fittings will always give rise to well-distinguished acoustic absorption curves. The importance of such a refined and delicate research tool is therefore evident considering that it makes the systematic comparison of all existing materials possible in the most varied applications whilst at the same time becoming indispensable for the study and development of new ones. This is merely the first step; nevertheless it is a fundamental one. On the other hand, before being created in a laboratory, the acoustic comfort of a confined space is first conceived in the mind of the person who draws up the design, who must be careful to convert, by combining awareness and responsibility, data provided by research into materials and forms appropriate for the definition of spaces.

Materiale/Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz	4.000 Hz
Superficie d'acqua Water surface	0,008	0,008	0,013	0,015	0,02	0,025
Vetro Glass	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Cemento liscio Plain cement	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Intonaco cementizio Cement coating	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Piastrelle di ceramica Ceramic tiles	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Lastre di marmo Marble sheets	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Linoleum incollato al cemento Linoleum glued to cement	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Parquet fissato sul cemento Parquet fixed on cement	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Moquette da 6 mm 6 mm carpet	0,03	0,09	0,25	0,31	0,33	0,44
Tappeto pesante Thick rug	0,02	0,06	0,14	0,37	0,6	0,65
Sedie rivestite con tessuto Upholstered chairs	0,44	0,6	0,77	0,89	0,82	0,7
Lana minerale spessore 50 mm Mineral wool thickness 50 mm	0,15	0,7	0,6	0,6	0,85	0,9
Tendaggi (0,2kg/m <sup>2</sup> ) Curtains (0.2kg/m <sup>2</sup> )	0,05	0,06	0,39	0,63	0,7	0,73
Topakustik 13/3 Topakustik 13/3	0,16	0,51	1,00	1,00	0,77	0,67

Coefficienti di assorbimento di materiali comuni da costruzione.  
Absorption coefficients of common construction materials.

**comfort:** the Italian word 'confort' derives from the late Latin '*confortare*' signifying ease and convenience and refers to equipment or services that may determine such a state of well-being. By promoting responsible contemporary design that places human beings and their needs at the centre, we are contributing to environment comfort and perform a good deed for society.

**comfort:** in italiano confort, dal tardo latino "*confortare*", significa agio, comodità ed è riferito ad attrezzature o a servizi che possono determinare tale stato di benessere. Promuovendo una progettazione contemporanea responsabile che riporti al centro l'essere umano e le sue esigenze, si contribuisce al comfort ambientale e si compie un'azione sociale.