

UNIVERSITA' DI CATANIA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

FISICA TECNICA INDUSTRIALE

VOLUME QUARTO: ACUSTICA E ILLUMINOTECNICA

**ACUSTICA FISICA E FISIOLOGICA
TRASMISSIONE DEL SUONO
IL RUMORE ED EFFETTI SULL'UOMO
ELEMENTI DI ACUSTICA FONETICA
VALUTAZIONE DEL RISCHIO UDITIVO
REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI
RUMOROSITÀ DEGLI IMPIANTI
CENNI DI ACUSTICA AMBIENTALE
VALUTAZIONE DELLA RUMOROSITÀ AMBIENTALE
CENNI DI ACUSTICA DELLE SALE
GRANDEZZE FOTOMETRICHE
VISIONE E COMFORT VISIVO
ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE**

PROF. ING. GIULIANO CAMMARATA

**UNIVERSITA' DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E MECCANICA
SEZIONE DI ENERGETICA INDUSTRIALE ED AMBIENTALE**

AGGIORNAMENTO DEL 23/07/2006

FILE: FISICA TECNICA VOL 4 - ACUSTICA E ILLUMINOTECNICA.DOC

AUTORE: GIULIANO CAMMARATA

DATA: 23/07/2006

www.gcammarata.net
gcamma@diim.unict.it

Il presente volume può essere liberamente copiato e diffuso dagli Allievi per uso didattico e a condizione che rimangano invariati i riferimenti sopra indicati.

INTRODUZIONE AL QUARTO VOLUME DI FISICA TECNICA INDUSTRIALE

Ormai da tre anni opera una riforma universitaria che suddivide i cinque anni del corso di Laurea in Ingegneria in due tronchi: nel primo, della durata di tre anni, si dovrebbe conseguire la *Laurea di Base* e nel secondo, di altri due anni, la *Laurea Specialistica*.

Mutata mutandis le cose sembrano restare quasi allo stesso modo del vecchio corso quinquennale (ormai denominato *Vecchio Ordinamento*) con qualche differenza di approccio agli studi che, almeno nelle intenzioni degli estensori di questa riforma, avrebbero dovuto rendere più agevole, moderno ed europeo il corso di studi.

Al di là dei convincimenti personali che qui non desidero esporre, l'attuale riforma sembra essere ancora *in fieri* tant'è che già abbiamo un *nuovissimo ordinamento* che vede nuovamente ristrutturati gli insegnamenti e la loro organizzazione oraria.

La *Fisica Tecnica Industriale* per il corso di studi in *Ingegneria Mecanica* è fra le materie interessate da questo cambiamento passando dalle iniziali 60 ore alle attuali 90 ore. Altre materie del raggruppamento disciplinare ING-IND 10 (a cui appartiene la *Fisica Tecnica Industriale*), quali *Impianti Termotecnici*, *Termofluidodinamica ed Energetica*, sono state trasferite al biennio di specializzazione e pertanto, confrontando il vecchio e il nuovissimo ordinamento non sembrano esserci cambiamenti radicali.

Tuttavia le 90 ore assegnate a questo corso vanno inquadrare in un corso di studi triennale che vuole essere autonomo e completo. Ciò ha comportato una nuova ristrutturazione del programma di *Fisica Tecnica Industriale* reinserendo, oltre ai classici argomenti principali di *Termodinamica Applicata*, *Trasmissione del Calore e Moto dei Fluidi*, anche un cenno di *Acustica ed Illuminotecnica*.

Questi due materie che prima avevano ciascuna un volume dedicato ora sono accorpate in un volume più ridotto nel quale sono presenti solamente gli argomenti principali necessari per l'*Ingegnere Meccanico*.

INTRODUZIONE ALL'ACUSTICA

La *Fisica Tecnica* si è sempre occupata delle applicazioni della *Fisica all'Uomo*. In particolare l'*Acustica Tecnica* (nelle varie sue suddivisioni: *Acustica Fisica*, *Acustica Fisiologica*, *Acustica Ambientale*, *Acustica delle Sale*, ...) è disciplina fondamentale. Il comfort acustico è legato ad un organo sensoriale per certi versi meno complesso degli occhi ma per altri versi con problematiche più ampie e meno facili da risolvere di quelle illuminotecniche.

Lo scopo del corso è quello di esaminare il comfort acustico, anche in considerazione del numero elevato di norme e leggi che sono state emesse in questo settore negli ultimi dieci anni.

Per l'*Acustica* è più difficile definire condizioni di comfort per l'ascolto: sono troppe le variabili psicofisiche ed accessorie rispetto a quelle fisiche ed oggettive per potere pensare di ridurre il problema del comfort acustico ad una equazione (*come ha fatto Fanger per il comfort termico*). Oggi abbiamo ancora il problema di *valutare* (e quindi di esprimere un voto, un giudizio) il *rumore* che, come si vedrà nel prosieguo, è un suono affetto da un giudizio di disturbo o inaccettabilità dell'Uomo. Non esiste un modo sicuro, univoco ed oggettivo per valutare il rumore.

Ricorriamo a complesse procedure che cercano di combinare effetti fisici e reazioni psicofisiche ma riusciamo a farlo solo per determinate condizioni mentali, ad esempio possiamo *valutare* il rumore per gli effetti sul parlato (ossia sull'intelligibilità delle sillabe e dei fonemi) ma non siamo in grado di fare altrettanto per altre attività dell'Uomo.

L'evoluzione delle conoscenze nell'Acustica ha molto condizionato lo sviluppo di questa disciplina, probabilmente più delle altre. Ritengo opportuno fare un brevissimo cenno alla storia dell'Acustica anche per i risvolti che ha avuto, ad esempio, nella storia dell'Architettura dei Teatri.

Nell'età del rame i primi teatri all'aperti erano costruiti, vedi Figura 1, con il solo scopo di consentire la visione della scena e l'ascolto della recitazione. L'esempio del teatro di *Cnoso* ci fa vedere

come fosse essenziale la disposizione dei sedili e della stessa scena. La distanza massima fra attore e spettatore era una decina di metri.

Quando *Erastosso* enunciò la sua teoria sulla propagazione del suono (“*come le onde in uno stagno ma anche verticalmente*”) i greci riuscirono a costruire mirabili teatri all’aperto (vedi il Teatro di *Epidauro*, di *Siracusa*, di *Taormina*, ...) tutt’oggi ammirati per la loro perfetta funzionalità ed ancora utilizzati per le rappresentazioni teatrali.

Le distanze massime raggiunte fra attore e spettatore erano dell’ordine di 70 metri, quasi il doppio del limite di 42 m fissato da *Lyon* nei suoi esperimenti per la determinazione della massima distanza di diffusione del suono all’aperto.

I greci non solo avevano compreso che il suono si propaga, all’aperto, per onde sferiche (l’angolo delle gradinate è tale da far intercettare le onde dirette e la loro disposizione è a semicerchio) ma anche che la riflessione del muro di scena e della piattaforma antistante il palco rafforza l’intensità acustica e quindi consente di raddoppiare la distanza massima di trasmissione.

L’esempio dei teatri greci all’aperto è una mirabile sintesi di teoria e di applicazione progettuale: la soluzione trovata era quella che meglio risolveva il problema dell’Acustica dei teatri all’aperto. Ben diversa è stata la situazione per i teatri chiusi.

Non sappiamo se ne siano stati mai costruiti nell’antichità poiché non ne abbiamo alcun ritrovamento archeologico. Molto probabilmente la complessità del menome dell’*Acustica delle Sale chiuse* ha reso inefficaci gli sforzi progettuali per millenni, fino alla metà del settecento quando la famiglia di architetti dei *Galli Babiena* sperimentò una forma teatrale chiusa (Teatro di S. Michele a Venezia, oggi scomparso) che, parafrasando la forma delle campane, consentiva di ottenere buoni risultati. Quella è stata la prima forma dei teatri detti *all’Italiana* destinati alla rappresentazione di opere liriche.



Figura 1: Teatro del Palazzo di Cnosso, Creta: La forma è solo funzionale alla visione

Fino all’inizio de novecento i teatri erano opere *casuali*: essi erano plagiati da forme teatrali esistenti delle quali si conosceva il buon funzionamento oppure venivano innovati nella forma, costruiti, provati e demoliti se non rispondevano alle esigenze funzionali per le quali erano costruiti.

La storia dei teatri¹ europei ci insegna come questa ricerca della forma acustica perfetta sia stata lunga e costosa.

Per millenni l'Uomo, quindi, non è riuscito a controllare il fenomeno della trasmissione del suono in ambienti confinati: troppo complesso il fenomeno per potere essere compreso e definito.

Si è dovuto aspettare che W.C. Sabine enunciasse la sua teoria sulla *riverberazione acustica* all'interno delle sale e che fornisse la prima relazione scientifica sul *tempo di riverberazione* per potere iniziare a capire come vanno le cose e a costruire, coscientemente, i primi teatri. Spesso si ricorreva all'utilizzo di metafore per cercare di risolvere il problema dei teatri, come detto per il Teatro a forma di campana (vedi i Galli Babiena nel '700), perché si riconosceva a questa forma una buona musicalità. Chi non si accorge che i teatri lirici sembrano tutti gli stessi ad eccezione dei fregi artistici, degli ordini dei palchi, Sono tutti a forma di *doppio ellisse* come il primo teatro di Venezia. Ma non si vuole qui limitare l'interesse all'Acustica solo per le Sale Teatrali. Oggi il campo di interesse si è enormemente allargato alle applicazioni fisiche industriali (*analisi non distruttive*), mediche (*ecografia*), geologiche (*prospettive terrestri*), marine (*ecografia subacquea*).



Figura 2: Teatro di Epidauro: La forma è funzionale all'Acustica del Teatro

Ma di grande interesse sono anche le problematiche dell'Acustica Ambientale, cioè dell'Acustica che si occupa della propagazione del suono in ambienti esterni e alle problematiche connesse al rumore, in particolare alla valutazione del rischio uditivo ai sensi del D. Lgs 277/91, D. Lgs 626/94, D.Lgs

¹ Vedi Michael Forsyth: *Edifici per la Musica*, Edizione Zanichelli (1991)

494/96. Finalmente anche in Italia (*dopo oltre 130 anni dall'unità!*) stiamo acquisendo la cultura del benessere fisiologico (qui, in particolare, di quello acustico) e nell'ultimo decennio sono state emanate numerose leggi e decreti per regolamentare i problemi del rumore.

Dato l'interesse professionale dell'Acustica Ambientale se ne darà ampio riscontro nei prossimi capitoli. Si farà anche riferimento ai problemi della rumorosità da traffico veicolare, ai sistemi di valutazione e di protezione dal rumore. Forse fra tutti gli intorni fisici (*termico, illuminotecnico, igrometrico, acustico*) quello acustico è ancora il più complesso e ancora lontano dall'essere pienamente definito.

Nei prossimi capitoli si vedranno i fattori ambientali che definiscono gli indici di benessere acustico, se ne studieranno le procedure di definizione, le normative e la legislazione vigente.

Alcuni concetti di base verranno brevemente introdotti nella stessa trattazione per maggiore completezza espositiva.

Si consideri, ancora, che nell'ultimo decennio si è avuto un notevole impulso alla normativa per il controllo del rumore negli ambienti di lavoro.

Anche alla luce della cogenza di alcune norme e dell'importanza che esse assumono nella vita professionale dell'Ingegnere, qualunque sia il suo ruolo, ritengo opportuno presentare le problematiche della sicurezza nei luoghi di lavoro e in particolare per la valutazione del rischio uditorio.

Il quadro di riferimento è ben nutrito e qui di seguito riassunto:

L. 30/07/1990 n. 12 (*Recepimento delle Direttive europee in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi da esposizione ad agenti esterni*) D.Lgs 15/08/1991 n. 277 (*Norme in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi da esposizione*)

L. 19/02/1992 n. 142 (*Recepimento delle Direttive europee in materia di sicurezza dei lavoratori*) D.Lgs del 19/09/1994 n. 626 (*Norme di attuazione in materia di sicurezza dei lavoratori*) e successive modifiche;

D.Lgs del 14/08/1996 n. 494 (*Norme di attuazione in materia di sicurezza nei cantieri mobili*) e successive modifiche. Direttiva 2003/10/CE del 06/02/03 (*Sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici – rumore*) Si vedranno, quindi, le metodologie di calcolo oggi utilizzate per il calcolo del livello di esposizione personale giornaliero (*metodo analitici e semiempirici*) e si indicheranno alcuni esempi.

Una trattazione completa di tutte le problematiche sopra esposte richiederebbe certamente uno spazio più ampio di quello qui utilizzato.

Pertanto per l'approfondimento dei temi trattati si rinvia alla *bibliografia* riportata alla fine dei capitoli e alle pubblicazioni scientifiche indicate.

INTRODUZIONE ALL'ILLUMINOTECNICA

Una delle più innovative invenzioni scientifiche è certamente la lampada di *Edison*. Essa ha totalmente cambiato la vita di tutti noi consentendoci di vedere in ogni condizione senza dover dipendere dalla luce solare.

Certo i mezzi utilizzati fino ad inizio secolo erano stati sufficienti per l'illuminazione artificiale: in fondo dalla torcia al lume ad olio o alla candela in cera o al lume a petrolio non ci sono grandi evoluzioni tecnologiche se non nel materiale utilizzato.

Ciò che caratterizza l'illuminazione artificiale con lampade moderne è la possibilità di ricreare una ambiente confortevole che consente non solo di vedere (o appena di vedere) ma di *vivere* in piena dignità e di produrre in piena sicurezza.

L'evoluzione della tecnica dell'illuminazione non è solamente tecnologica (mezzi più evoluti, meno costosi e più efficienti, ma anche funzionale nel senso che tende a creare le migliori condizioni di benessere visivo).

Con questa definizione si intende, ancora una volta, l'*atteggiamento mentale di piena accettazione senza sensazioni sgradevoli dell'ambiente visivo*.

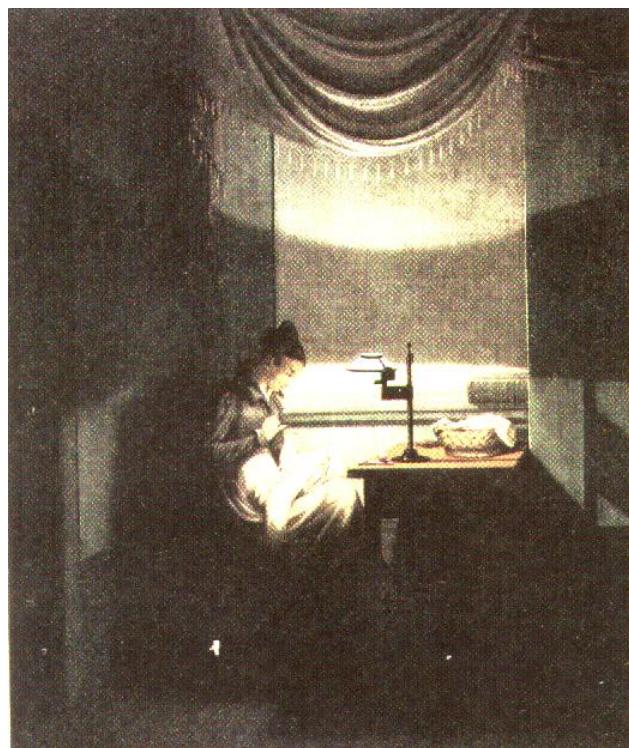


Figura 3: "Donna che cucce alla luce della lampada" (1828) di Georg Friedrich Kersting

Oggi siamo in grado di illuminare in modo diverso a seconda delle esigenze: per lavoro, per svago, per arte, .. Disponiamo di numerose sorgenti luminose che consentono di vedere fedelmente i colori degli oggetti e di illuminare gli oggetti nel modo desiderato evitando, ad esempio, effetti indesiderati e sgradevoli quali l'abbigliamento visivo. Per arrivare a questo stadio della ricerca e della tecnica si è passati in varie fasi, ancora non esaurite, che hanno avuto origine proprio con la piena disponibilità di luce mediante illuminazione artificiale.

La vita notturna è oggi possibile grazie alla possibilità di ricreare condizioni accettabili di visibilità e di poter lavorare in tutta sicurezza. Si parla già di città da utilizzare per 24 ore anziché per il solo periodo diurno.



Figura 4: Vista della Terra nelle ore notturne e delle zone più illuminate

In questo modo si avrebbe un utilizzo più razionale delle risorse urbane (strade, uffici, negozi, trasporti, ..) distribuendolo nell'arco dell'intera giornata ed evitando gli affollamenti mattutini per gli uffici, la scuola, i negozi ,...

La nozione di comfort visivo è ormai, forse inconsciamente, diffusa e quasi banale per tutti. In realtà lo studio del comfort visivo è sempre in continua evoluzione e siamo ben lontani dall'avere esaurito l'argomento. In fondo a definire le condizioni di benessere visivo è l'Uomo mediante il suo organo della vista. Tanto più avanzano le conoscenze sugli organi umani tanto più si evolvono le conoscenze sul comfort in genere e in particolare su quello visivo.

L'analisi e la valutazione del livello di illuminazione che si vuole raggiungere in uno specifico ambiente (abitazione, ufficio, industria, scuola, ospedale, etc.), per una perfetta visione, assume primaria importanza in fase progettuale essendo ad essa legata il corretto svolgimento delle attività lavorative. La maggior parte delle informazioni necessarie per lo svolgimento di una attività lavorativa sono infatti di tipo visivo per cui, le modalità di illuminazione del *compito* devono essere attentamente valutate al fine di garantire il comfort dell'operatore.

Per raggiungere tale obiettivo bisogna:

realizzare un ambiente luminoso idoneo a soddisfare le esigenze fisiopsicologiche dell'operatore assicurando sempre, ove possibile, il ricorso all'illuminazione naturale;

rendere ottimale la percezione delle informazioni visive, per assicurare buone condizioni di lavoro ed una prestazione visiva veloce e precisa.

Sulla base di queste premesse la progettazione degli interni non deve mirare esclusivamente al raggiungimento di un illuminamento uniforme del piano di lavoro e quindi dell'ambiente, ma deve garantire una corretta visibilità del compito visivo mediante un'analisi accurata e dettagliata di tutti quei parametri che ne influenzano la prestazione visiva quali: *il contrasto percepito dall'operatore, lo stato di adattamento, la presenza di fenomeni di abbagliamento e di riflessione, la procedura di svolgimento del compito visivo, etc.*

Particolare importanza riveste lo studio dello spazio fisico e delle caratteristiche funzionali ad esso connesse quali:

- corretta dimensione degli ambienti e delle superfici vetrate;
- finitura, colore e caratteristiche di riflessione delle superfici;
- dimensione e caratterizzazione di eventuali schermi;
- definizione delle classi di utenza;
- definizione delle attività svolte nell'ambiente;
- profilo di occupazione dell'ambiente.

Questo testo, affrontando il problema dell'illuminazione di interni con luce artificiale e con luce naturale descrive inoltre i principali parametri da adottare in fase di progettazione e di verifica degli ambienti.

Data la limitatezza del tempo a disposizione per la trattazione dell'*Illuminotecnica* nell'ambito del corso di *Fisica Tecnica* si presentano in questa sede solo gli aspetti ritenuti più importanti e fondamentali rinviando per gli approfondimenti ai testi e manuali specializzati indicati in *Bibliografia*.

Catania 23 luglio 2006

1. PROBLEMATICHE DELL'ACUSTICA TECNICA

Il suono è generato dalla variazione di pressione che si trasmette in un mezzo materiale (fluido o solido) che si propaga senza trasporto di materia.

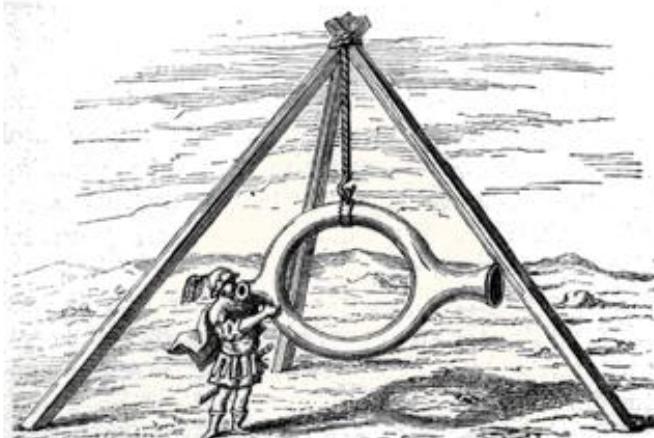
Esso è caratterizzato da alcune grandezze fondamentali quali l'*Ampiezza*, la *frequenza* o il periodo di oscillazione, la *lunghezza d'onda* e la *celerità di propagazione* nel mezzo attraversato.

Il suono è il principale mezzo di comunicazione dell'Uomo e il suo apparato uditivo si è specializzato nel tempo in modo da ottimizzare l'ascolto del linguaggio parlato. A differenza della luce il suono può essere generato dall'Uomo che, pertanto, è anche una sorgente sonora.

Anche il rumore è un suono con caratteristiche fisico - psichiche non gradite: si vedranno nel prosieguo sia la definizione di rumore che le problematiche che esso pone.

Il suono ha utilizzi di vario genere: oltre che per la comunicazione fra esseri viventi esso può essere utilizzato nell'industria, nella medicina, nelle geologia, ...

Anticamente veniva utilizzato, dai mongoli, anche per torturare ed uccidere i prigionieri ponendoli all'interno di una campana metallica.



The horn of Alexander the Great

Figura 5: Il corno di Alessandro Magno

Si dice che Alessandro Magno utilizzasse un grande corno per terrorizzare i suoi nemici.

Nel prosieguo si introdurranno i concetti fondamentali dell'*Acustica Fisica* e dell'*Acustica Fisiologica* necessari per lo studio dell'*Acustica Ambientale* nei vari aspetti (*rumore, trasmissione del suono, protezione dal rumore, rischio uditivo*), dell'*Acustica Fonetica*, dell'*Acustica delle Sale*.

Questo testo non è un riferimento completo di tutte queste problematiche né può esserlo considerando il tempo limitato a disposizione. Vuole in ogni caso essere uno stimolo per le numerose ad attualissime problematiche che l'*Acustica Tecnica* oggi pone nella vita quotidiana dei cittadini e nel campo professionale.

Qualora questi concetti non venissero presentati nell'ambito della Fisica Tecnica molto probabilmente verrebbero del tutto persi a causa degli attuali piani di studio della Facoltà di Ingegneria e di Architettura di Catania che non prevedono alcun corso sia per l'*Acustica* che per l'*Illuminotecnica*.

Il numero e l'importanza delle leggi, decreti e norme tecniche oggi presenti in Italia (*quasi tutte non più vecchi di un decennio*) rendono le conoscenze dell'*Acustica Tecnica* necessarie per qualsivoglia attività professionale (sia in campo industriale che in campo civile) si eserciti.

Ne sono testimoni i decreti legislativi per la sicurezza nei luoghi di lavoro, nei cantieri, nelle discoteche, ... debbo dire che l'*Acustica Tecnica* è disciplina poco studiata in Italia. Non tutte le Università la contemplano nei piani di studio e la Facoltà di Ingegneria di Catania, grazie a questi riferimenti (anche se limitati) nell'ambito della *Fisica Tecnica*, è fra le poche che forniscono agli Allievi anche una preparazione su questi argomenti.

2. CENNI DI ACUSTICA FISICA

Si presentano nei successivi paragrafi alcuni concetti fondamentali di Acustica Fisica e in particolare si richiameranno le leggi fisiche più importanti ed utili per il prosieguo. Si ricorda che l'Acustica Fisica fa parte dei corsi di Fisica Generale e pertanto quanto qui riportato ha solo valore di un semplice richiamo. Sfortunatamente questo argomento, pure importantissimo della Fisica, viene quasi sistematicamente trascurato nei corsi di primo anno e pertanto queste pagine vogliono solo colmare, in modo sintetico, questa lacuna formativa.

2.1. LA CELERITÀ DEL SUONO

Nel mezzo di trasmissione l'onda sonora si propaga con una certa velocità detta *celerità del suono* (detta erroneamente anche *velocità*).

Tale grandezza dipende da più fattori, uno dei quali è il materiale del corpo attraverso il quale avviene la propagazione. La velocità di propagazione del suono nell'aria (supposta come gas perfetto) si ricava dalla formula:

$$v_s = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad [1]$$

ρ = pressione

k = modulo di compressibilità adiabatica dell'aria

= massa specifica

Così pur essendo indipendente dalla frequenza e dall'umidità, la velocità del suono nell'aria è dipendente dalla temperatura: ad una temperatura di 20°C la velocità è di circa 344 m/s; ad ogni aumento di 1°C della temperatura, corrisponde un incremento nella velocità di 0,61 m/s.

Nel caso di mezzi di trasmissione liquidi, la velocità si ottiene mediante la formula:

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad [2]$$

k = modulo di compressibilità adiabatica

= densità del liquido

Nei solidi:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [3]$$

E = modulo di elasticità del solido

In generale si dimostra in *Termodinamica* che per piccole perturbazioni (quali si hanno nei suoni normali) vale la relazione:

$$c = \sqrt{\frac{\rho}{s}} \quad [4]$$

Ossia, la *celerità del suono* è legata alla radice quadrata della variazione della densità rispetto alla pressione ad entropia costante. Per un gas perfetto si può anche scrivere:

$$c = \sqrt{kRT} \quad [5]$$

con k costante di adiabacità (C_p / C_v) del mezzo di trasmissione ($k=1.4$ per l'aria), T la temperatura assoluta del mezzo (in gradi Kelvin) ed R la costante del gas ($R=R^*/M$) rapporto fra la costante universale dei gas ed il peso molecolare.

Dall'osservazione di queste formule si deduce che il suono si propaga più velocemente nei solidi che nell'aria; nel mattone ad esempio è undici volte maggiore di quella dell'aria.

Mezzo di trasmissione	c (m/s)
Aria (secca, 15° C)	341
Acqua di mare	1460
Marmo	3800
Mattoni	3650
Vetro	5000
Ferro	5000
Sughero	500
Gomma elastica	30-70

Tabella 1: Velocità del suono per alcuni mezzi di trasmissione

2.2. ONDE PIANE E SFERICHE

Il suono si diffonde seguendo le leggi dei fenomeni ondulatori, come si dirà fra breve. Si tratta di una sequenza di compressioni e rarefazioni del mezzo di trasmissione che presenta delle zone a densità differenziata; queste rarefazioni non sono ferme ma si spostano nell'aria alla velocità di circa 340 m/s.

A seconda del tipo di sorgente emittente, le onde sonore possono essere *piane*, *cilindriche* o *sferiche*: Nel primo caso i punti di massima rarefazione sono contenuti in piani perpendicolari alla direzione di propagazione; nel secondo caso si ha una sorgente lineare che oscillando nella direzione del proprio asse mediante cilindri concentrici genera onde cilindriche: un esempio è dato dal rumore proveniente dal traffico veicolare o ferroviario.

Nel terzo caso, onde sferiche, si può immaginare che la sorgente sia piccola rispetto alle distanze dal punto di ricezione e pertanto le zone di compressione formano delle sfere concentriche. E' questa un'ipotesi semplificativa che molto spesso viene applicata nei calcoli. Si tratta, si intuisce, di una approssimazione valida solo quando le dimensioni della sorgente sono piccole rispetto alla distanza.

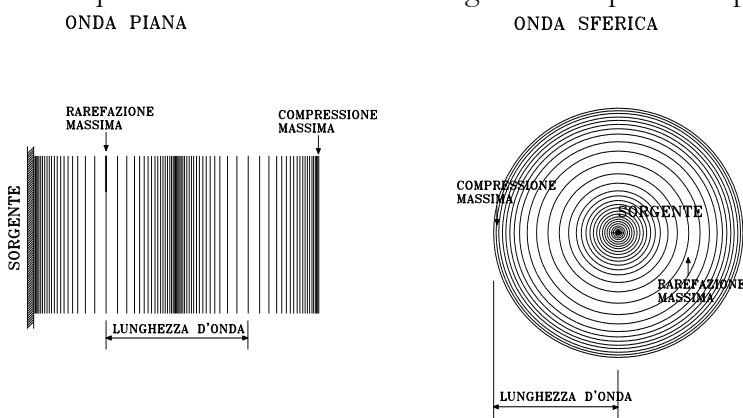


Figura 6: Esempi di onda sonora piana e sferica

Spesso i problemi di trasmissione delle onde acustiche sono più complessi di quanto ci si lasci immaginare. Nella Figura 6 si ha un esempio di fronte d'onda che inizialmente è sferico (viene rappresentata una sezione in piano) e poi, al crescere della distanza dalla sorgente, il fronte d'onda diviene piano.



Figura 7: Esempio di propagazione di onde acustiche: inizialmente sferiche e poi piane a grandi distanze

Pertanto l'ipotesi da seguire nelle applicazioni deve essere attentamente valutata caso per caso onde evitare possibili errori finali. Vedremo nel prosieguo quali implicazioni si ha l'ipotesi di fronte sferico o di fronte cilindrico nell'attenuazione dell'intensità acustica per divergenza.

2.3. GRANDEZZE FONDAMENTALI PER L'ACUSTICA

2.3.1. LUNGHEZZA D'ONDA E FREQUENZA

I fenomeni ondulatori e quindi anche il suono, vengono descritti mediante grandezze fisiche. Tra le più importanti vi sono la *lunghezza d'onda* e la *frequenza*. La lunghezza d'onda è la distanza che intercorre tra due fronti d'onda aventi la stessa fase ossia, poiché il fenomeno si ripete ciclicamente, tra due zone di massima rarefazione o compressione del mezzo di trasmissione.

La frequenza è per definizione, il numero di volte in cui il fenomeno ondulatorio completo si ripete nell'unità di tempo (secondo) e la sua unità di misura è l'Hertz (Hz). Queste grandezze sono legate tra loro dalla formula:

$$f = c \quad [6]$$

c = lunghezza d'onda

f = frequenza (Hertz)

c = celerità del suono

Se la frequenza è il numero di volte in cui il fenomeno ondulatorio si ripete nell'unità di tempo, il suo inverso sarà il tempo necessario a compiere tale ondulazione completa. Questa grandezza si dice *periodo* e si esprime analiticamente (l'unità di misura è il *secondo*):

$$T = \frac{1}{f} \quad [7]$$

Il diagramma seguente mostra in forma grafica la relazione fra la lunghezza d'onda e la frequenza nel **campo dell'udibile**, cioè fra 20 e 20000 Hz (intervallo di notevole interesse applicativo poiché rappresenta l'intervallo di udibilità dell'Uomo medio²).

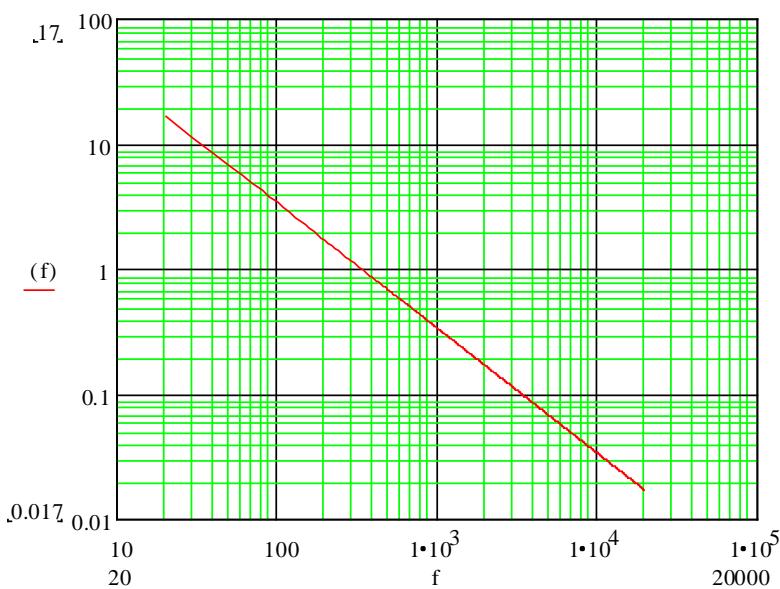


Figura 8: Legame fra lunghezza d'onda e frequenza nel campo dell'udibile

² Le applicazioni della Fisica all'Uomo si riferiscono a comportamenti, giudizi, valutazioni, di un **normotipo** individuato dalla risposta media di una platea campioni di uomini e donne, di età compresa fra i 18 e i 33 anni (per evitare problemi di adolescenza e di senilità). È stato dimostrato che il **normotipo** non è dipendente dal colore della pelle e che, pertanto, ci si può sempre riferire ad un Uomo medio universale.

Si osservi come a 20 Hz, frequenza minima udibile, la lunghezza d'onda corrispondente sia di 17 m mentre a 20.000 Hz è di 17 mm. Queste dimensioni sono importanti nel valutare le interazioni che le onde acustiche hanno con la materia.

Per valori di lunghezza d'onda tale che $\lambda/4$ sia comparabile con quelle del corpo sul quale il suono incide si ha il fenomeno della *diffrazione* per cui i bordi del corpo divengono essi stessi sorgenti sonore. Con i valori sopra calcolati si ha a 20 Hz una parete di 4 m diffrange il suono. E' quello che avviene, lo si vedrà nel prosieguo, con gli schermi acustici.

Per frequenze oltre 200 Hz si ha $\lambda/4$ di circa 0,5 m e quindi le pareti si comportano come specchi: si ha *riflessione* e non *diffrazione*. E quindi si possono considerare valide le regole dell'*Acustica Geometrica* basate sulla riflessione geometrica del suono con angoli uguali, ma ribaltati rispetto alla normale, degli angoli di incidenza. Le applicazioni di *Acustica delle Sale* (vedi il Capitolo ad essa dedicata) sono basate, di norma, sull'*Acustica Geometrica* e pertanto si deve tenere conto dei limiti di validità.

Si vedrà ancora che le onde di bassa frequenza interagiscono in modo particolare con la materia e che per la loro attenuazione (vedi note sul *Potere Fonoisolante*) si debbono utilizzare metodologie particolari che sfruttano le risonanze delle cavità o delle lastre.

2.3.2. POTENZA SONORA

La *potenza sonora*, detta anche indice di emissione di energia acustica, è l'energia sonora emessa da una sorgente nell'unità di tempo.

Bisogna tuttavia considerare che questa grandezza varia considerevolmente nell'unità di tempo. Per questo motivo si usa distinguere in potenza *massima* e *media*: la prima è il valore più alto rilevato nell'intervallo di osservazione; la seconda risulta generalmente dal calcolo dei valori medi anche se vi sono diversi metodi per calcolarla.

Questi due valori differiscono tra di loro per diversi ordini di grandezza; un suono che ha una potenza media di 1 *Watt* può presentare potenze istantanee di decine o centinaia di *Watt*; questo fatto è abbastanza rappresentativo dell'importanza di adottare tecniche di misura che siano realmente indicative della potenza sonora sopportata o della sensazione soggettiva che tale potenza comporta.

<input type="checkbox"/> Potenza	Livello di potenza sonora in dB	Sorgente
100.000.000	200	<i>Motore di missile</i>
10.000	160	<i>Motore di turboreattore</i>
1000	150	
100	140	<i>Aereo leggero da crociera</i>
10	130	
1	120	<i>Motore da 150 CV</i>
0.1	110	<i>Motore elettrico 100 CV, 2600 giri/min.</i>
0.01	100	
0.001	90	
0.0001	80	<i>Aspirapolvere</i>
0.00001	70	<i>Cornamusa</i>
0.000001	60	
0.0000001	50	
0.00000001	40	<i>Discorso bisbigliato</i>
0.000000001	30	<i>Sfogo d'aria, velocità aria 1 m/s</i>
0.0000000001	20	

Tabella 2: Livello di potenza sonora media di varie sorgenti.

Si fa osservare che la potenza acustica è una grandezza assoluta nel senso che la potenza emessa da una sorgente dipende dalla sorgente di emissione mentre il livello di pressione sonora (di cui si parlerà nel prosieguo) dipende da come si trasmette il suono e quindi dipende dalle caratteristiche acustiche e trasmissive dell'ambiente.

In pratica una stessa potenza acustica può dar luogo a diversi livelli di pressione sonora in ambienti diversi. Per analogia si può dire che una stessa lampada che emette la stessa intensità luminosa fornisce valori diversi di illuminamento in ambienti diversi a seconda delle caratteristiche riflessive delle pareti.

2.3.3. INTENSITÀ SONORA

Se la potenza è un'energia nell'unità di tempo, l'intensità è un'energia specifica, cioè per unità di superficie. Considerando un'onda sonora che si propaga dalla sorgente, essendo la potenza emanata costante, si nota che tale potenza si distribuisce su superfici sempre più ampie. L'intensità di un suono è quindi il flusso di potenza che passa nell'unità di tempo, attraverso una superficie unitaria e perpendicolare alla direzione di propagazione.

Nel caso di onde sferiche e mezzo di propagazione isotropo ed omogeneo si ha

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad [8]$$

I = intensità sonora

r = raggio della sfera

Da questa formula si deduce che l'intensità sonora per una sorgente sferica è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente.

2.4. TIPO DI ONDE ACUSTICHE

Si riassumono qui di seguito le relazioni principali per le onde acustiche. Per onde acustiche sferiche l'intensità è inversamente proporzionale al quadrato della distanza, per le onde lineari l'intensità dipende dall'inverso della distanza e per onde acustiche piane l'intensità è indipendente dalla distanza.

Le equazioni delle tre forme di onde possono qui essere scritte con il solito simbolismo:

$$p(r,t) = \frac{A}{r} f \propto t \propto r \quad [9]$$

$$p(r,t) = A f \propto t \propto r \quad [10]$$

$$p(r,t) = \frac{A}{\sqrt{r}} f \propto t \propto r \quad [11]$$

L'equazione delle onde piane nella sua forma più semplice (*suono puro*) è data da:

$$p = p_{\max} * \sin \omega t \quad [12]$$

con p_{\max} valore massimo della pressione, la pulsazione $\omega = 2\pi f$. Si osservi che non si è indicata la fase perché l'orecchio umano è poco sensibile ad essa. Dell'onda sinusoidale sopra indicata definisce la pressione efficace (o valore quadratico medio, indicato spesso come RMS acronimo di Root Mean Square) mediante la relazione:

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad [13]$$

Per un segnale sinusoidale risulta essere:

$$p_{\max} = \sqrt{0.5} A \quad [14]$$

con:

- A valore massimo dello spostamento, m
 F la frequenza, Hz
 ρ_0 densità dell'aria, kg/m^3
 c celerità del suono, m/s

Si definisce *densità sonora* l'energia nell'unità di volume, J/m^3 , che, sempre per un'onda sinusoidale, è legata dalla relazione:

$$D = 2 \cdot f^2 \cdot \rho_0 A^2 \quad [15]$$

L'*Intensità acustica*, W/m^2 , è data dalla relazione:

$$I = 2 \cdot f^2 \cdot \rho_0 C A^2 = Dc \quad [16]$$

Inoltre l'intensità è legata alla pressione efficace dalla relazione:

$$I = \frac{\bar{P}^2}{\rho_0 C} \quad [17]$$

con $\rho_0 C$ impedenza acustica dell'aria (vedi nel prosieguo).

Per onde sinusoidali risulta essere ancora per l'intensità acustica e per la densità (somma dell'energia cinetica e di quella potenziale per unità di volume):

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p u d t \\ D &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{E_c + E_p}{V} d t = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{1}{2} \rho_0 U^2 + \frac{\rho^2}{2 C^2} d t \end{aligned}$$

2.5. PROPAGAZIONE DELLE ONDE SONORE

Per lo studio della propagazione delle onde acustiche si hanno le equazioni della *Fluidodinamica* che sono riportate di seguito. Per la conservazione della massa si ha:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot u = 0 \quad [18]$$

Per la conservazione della quantità di moto si ha:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{F} = \nabla \cdot \bar{u} \quad [19]$$

Quest'ultima si può semplificare supponendo trascurabili le forze esterne e i fenomeni dissipativi viscosi. Si ha, cioè:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \text{grad} P = 0 \quad [20]$$

ove di è fatto uso della *derivata sostanziale* definita dalla relazione:

$$\frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z}$$

Semplificando i termini si ottengono le due relazioni (conservazione della quantità di moto e della massa semplificate):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot \bar{u} &= \nabla \cdot \text{grad} P \\ \frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot \rho \bar{u} &= 0 \end{aligned} \quad [21]$$

Alle equazioni di Navier Stokes [21] si aggiunge anche l'equazione di stato relativa alla trasformazione termodinamica per l'evolversi delle oscillazioni di pressione. Ipotizzando un'assenza di attrito (le variazioni di pressione in campo acustico sono piccole) la trasformazione termodinamica si può assumere *adiabatica* e pertanto si ha:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{k}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} k^2}$$

Ipotizzando variazioni piccole della pressione e della densità: $p \approx p_0$, $\rho \approx \rho_0$, allora, trascurando variazioni piccole di ordini superiore, si ha:

$$\frac{p}{p_0} \approx 1 + \frac{k^2}{2} \quad [22]$$

Ricordando la definizione di celerità del suono $c = \sqrt{k p_0 / \rho_0}$ e derivando rispetto al tempo si ottiene:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad [23]$$

Combinando la [23] con le [21] si ottiene, infine, l'equazione:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad [24]$$

detta equazione di Laplace. Analogamente sviluppando le [21] si ricavano le equazioni:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} = 0 \quad [25]$$

e ancora:

$$\frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial x^2} = 0 \quad [26]$$

Posto $\vec{U} = \text{grad}(P)$ le equazioni [21] si possono scrivere nella forma:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0 \quad [27]$$

L'integrale generale è dato da:

$$P = \int_1 \left[k \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + n \right] dt + \int_2 \left[k \frac{\partial \vec{U}}{\partial x} + n \right] dx \quad [28]$$

$$\text{con } k \text{ detto } \textit{numero d'onda} \quad k = \frac{2}{c}.$$

L'integrale generale rappresenta la sovrapposizione di due onde, una detta *diretta* ed una detta *inversa*. L'applicazione di condizioni al contorno congruenti spazio-temporali all'equazione delle onde porta a risolvere il problema della propagazione delle onde in un volume di controllo solo in condizioni geometriche particolarmente semplici (prisma, sfera, cilindro) mentre nei casi più generali (e reali) le difficoltà matematiche per determinare una soluzione esatta divengono insormontabili e si deve ricorrere a metodi di integrazione numerica approssimata.

Questo problema interessa, ad esempio, l'*Acustica delle Sale* per la cui soluzione non esistono oggi metodi esatti. Si deve far ricorso a metodi di *ray tracing* o a modelli in scala o a calcoli numerici intensivi agli elementi finiti: in ogni caso la soluzione ottenuta deve essere considerata un compromesso di buon senso e di formalismo matematico.

Per la propagazione delle *onde sferiche*, assumendo variazioni piccole di pressione, dalla [25] si può derivare una relazione nota come *l'equazione delle onde*:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} - c^2 \left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right] \quad [29]$$

che, integrata nel semispazio, fornisce la soluzione generale:

$$p(x, y, z, t) = \frac{1}{r} f(ct - r) + \frac{1}{r} g(ct + r) \quad [30]$$

con r distanza radiale dalla sorgente, f e g funzioni arbitrarie (onde dirette e inverse).

Si definisce impedenza specifica il rapporto fra la pressione acustica e la velocità in un dato punto arbitrario dell'onda e cioè si ha:

$$Z = r c k r \frac{kr}{1 + k^2 r^2} \quad i \frac{kr}{1 + k^2 r^2} \quad \text{in Rayl} \quad [31]$$

Per la trasmissione delle *onde piane*, semplificando la [29] alla sola coordinata x , si ha:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad [32]$$

che, integrata per un semispazio, fornisce un'equazione generale del tutto simile alla [30] ma nella sola x : Una soluzione particolare si ha ipotizzando le funzioni f di tipo esponenziale con argomento immaginario. L'onda che si propaga in direzione positiva diviene:

$$p(x, t) = p_{\max} e^{jk ct - kx} + p_{\max} e^{-jk ct - kx} \quad [33]$$

con p_{\max} ampiezza dell'oscillazione, $k = \omega/c$ [rad/m] il *numero d'onda*. Mediante l'applicazione dei complessi si possono risolvere molti problemi relativi ad onde sinusoidali. Assumendo valida per la rappresentazione fisica la parte reale (o anche il coefficiente dell'immaginario) si ha:

$$p = p_{\max} \sin(kc x) \quad [34]$$

con kx ritardo o *sfasamento* dell'onda. La velocità è data dalla relazione:

$$u = \frac{1}{0} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{k p_{\max}}{0} \cos(kc x) = u_0 \quad [35]$$

e quindi si ottiene:

$$u = \frac{k p_{\max}}{0} \sin(kc x) = B \quad [36]$$

con B costante da calcolare in base alle condizioni iniziali. Imponendo che per $x=0$ la u coincida con la velocità del piano sorgente si ha:

$$u = u_{\max} \sin(kc x) \quad [37]$$

Pertanto le velocità delle particelle sono in fase con la variazione di pressione acustica.

L'impedenza acustica ora diviene:

$$Z = \frac{\rho_{\max}}{u_{\max}} = \rho_0 c \quad [38]$$

Nel caso dell'aria si ha $\rho_0 c = 412$. L'intensità acustica si ricava dalla relazione:

$$I = p u \cos \theta \quad [39]$$

essendo p ed u in fase in tutto il campo delle onde piane. Da questa relazione si ottiene la [16]. Si rimanda ai testi specializzati per una trattazione più approfondita di questo argomento.

2.5.1. TONI PURI

I suoni reali sono estremamente complessi ma esistono dei modelli semplificativi che ci permettono di comprenderli meglio. Nel caso dei suoni o delle onde sonore in particolare, la forma d'onda reale di un suono qualsiasi è una curva complessa, più o meno periodica, con molte irregolarità e quindi di difficile comprensione.

Esistono tuttavia delle sorgenti che, seppur reali, sono in grado di produrre suoni molto semplici e di facile comprensione detti *toni puri*. Una di queste è il diapason, strumento che emette, se percosso, un suono che si può definire, con buona approssimazione, *puro* e quindi rappresentabile con una semplice sinusoide.

Se andiamo ad analizzare la forma dell'oscillazione nel tempo del braccio del diapason ci accorgiamo che questa è molto prossima a un'onda sinusoidale che può essere cioè rappresentata matematicamente dalla funzione seno

$$y = A \sin(2\pi f t) \quad [40]$$

A = ampiezza di vibrazione del braccio

f = frequenza in Hertz

t = tempo in secondi

Anche la corrispondente variazione di pressione che si propaga dal diapason sotto forma di onde sonore segue una legge sinusoidale

$$p = p_0 \sin(2\pi f t) \quad [41]$$

p_0 = ampiezza di pressione.

Il moto compiuto da una tale onda è detto *moto armonico semplice*. Se oltre a presentare queste caratteristiche l'onda sonora è composta da una sola frequenza allora si dirà *tono puro*. Il tono puro è l'unità base costituente tutte le onde sonore, dalle più semplici alle più complesse: ogni suono infatti è costituito da uno o più toni puri.

2.5.2. LE ARMONICHE

Quando si parla di toni puri si presuppone che la sorgente (l'oggetto che vibra) sia infinitamente rigida ed oscilli con frequenza costante, cosicché l'onda emessa risulti un moto armonico semplice. Un suono di questo tipo può essere ottenuto da un *diapason* di determinata lunghezza d'onda.

Un suono semplice (*monofrequenziale*) si può rappresentare nel piano delle frequenze-ampiezza con una riga centrata alla frequenza f ed avente un'altezza p_0 pari all'ampiezza dell'onda.

Nella realtà queste condizioni non possono sussistere in quanto non esistono oggetti-sorgente infinitamente rigidi; succede allora che la superficie sviluppa delle vibrazioni supplementari, dette appunto *armoniche*, a frequenze che sono il multiplo di quella principale detta *frequenza fondamentale*; se per esempio la nostra sorgente emette un suono puro a 60Hz, emetterà anche delle armoniche a 120, 180 ... Hz.

Queste frequenze si dicono rispettivamente *prima armonica*, *seconda armonica* e così via. Quanto detto è alla base dello sviluppo in serie di Fourier delle onde acustiche complesse.

2.5.3. SUONI COMPLESSI

Come abbiamo già accennato, i rumori³ o i suoni che percepiamo ogni giorno attraverso l'organo dell'udito, sono ben più complessi dei "modelli ideal" di onda descritti sopra. Essi costituiscono la totalità dei suoni percepiti quotidianamente poiché i suoni puri sono solo un'eccezione e direi anche un'astrazione fisica.

³ Il *rumore*, come già indicato nell'Introduzione, è un suono complesso affetto da un giudizio di indesiderabilità e disturbo da parte di chi lo subisce. Del *rumore* si parlerà più in dettaglio nel prosieguo.

Quando si è in presenza di un suono *monofrequenziale* si prova un disturbo notevole, come si dirà nel prosieguo a proposito del DPCM 1/3/91, che le norme vigenti penalizzano.

Tuttavia tali onde mantengono alcune delle caratteristiche dei suoni più semplici, sono cioè *periodiche*, ossia si ripetono uguali a se stesse in maniera ciclica. Hanno inoltre la peculiarità di essere composte da più toni puri sovrapposti. La forma d'onda non sarà più quindi una sinusoidale ma apparirà come una curva frastagliata e ripetitiva. Dalla combinazione casuale di questi suoni semplici nascono le molte varietà di suoni con i quali abbiamo familiarità: la voce umana, il timbro del violino, il rumore di un'auto.

Oscillogrammi e spettri sonori

Nei paragrafi precedenti abbiamo parlato del suono come di un effetto risultante dalle innumerevoli vibrazioni di una sorgente. Il movimento vibratorio compiuto da questa si propaga attraverso il mezzo sotto forma di perturbazioni di pressione: le onde sonore.

L'oscillogramma di un suono rappresenta graficamente la relazione tra il tempo e la pressione sonora cosicché, per un suono puro, sarà una semplice oscillazione sinusoidale; per uno strumento musicale risulterà dalla sovrapposizione degli oscillogrammi delle funzioni sinusoidali semplici del suono fondamentale e delle sue armoniche. Quando si parla di rumore al posto dell'oscillogramma viene normalmente utilizzato lo spettro sonoro, un grafico che in ascissa riporta la frequenza e in ordinata il livello sonoro. La rappresentazione dello spettro di un suono complesso è data da una serie di righe aventi ciascuna frequenza ed ampiezza ben determinate e il cui numero può essere anche infinito (*suoni impulsivi*). Nella Figura 9 si hanno due rappresentazioni relative ad un suono puro e ad un suono complesso.

Oscillogramma di un suono puro e di un suono complesso

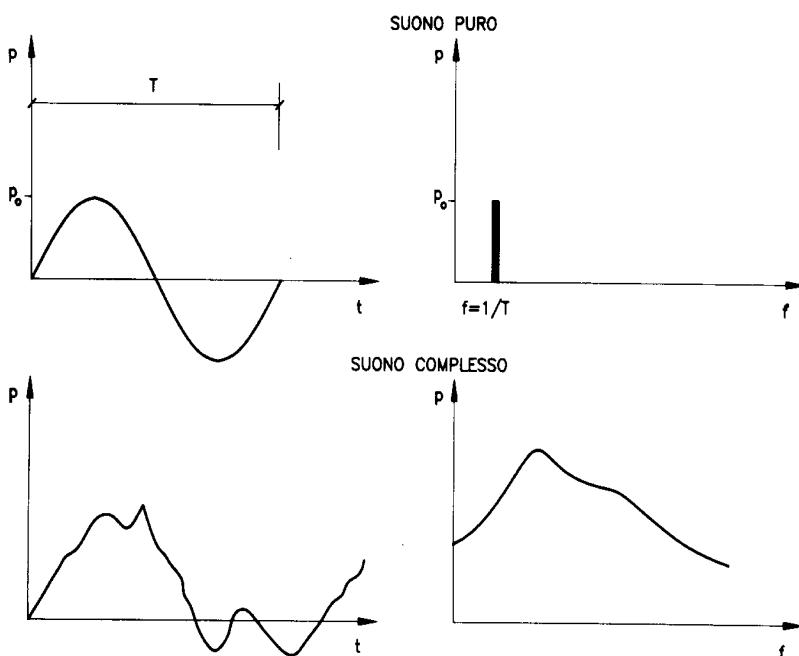


Figura 9 : Rappresentazione spettrale dei suoni.

Nella trattazione del rumore solitamente vengono utilizzati spettri sonori a bande che riuniscono le frequenze acustiche in gruppi cosicché lo spettro anziché essere graficamente formato da linee viene costruito per bande. Usualmente vengono utilizzati spettri sonori a banda d'ottava o a terzi d'ottava.

Le bande di ottava sono definite come intervalli di frequenza tali che il rapporto fra la frequenza massima e la minima sia pari a 2. Per le bande a terzi di ottava le frequenze estreme stanno in rapporto pari a $\sqrt[3]{2}$. La frequenza di centro banda è data dalla relazione:

$$f_{cb} = \sqrt{f_1 f_2}$$

Normalmente in una banda di ottava si hanno tre bande a terzi di ottava.

Le frequenze di centro banda per le bande di ottava sono normalizzate e precisamente sono:

31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000

Anche le frequenze a terzi di ottava di centro banda sono normalizzate.

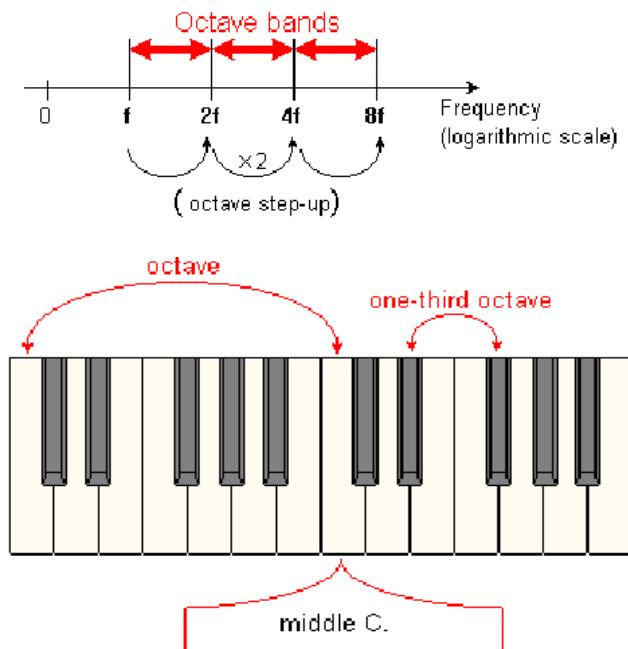


Figura 10: Rappresentazione delle bande acustiche di ottava e terzi di ottava

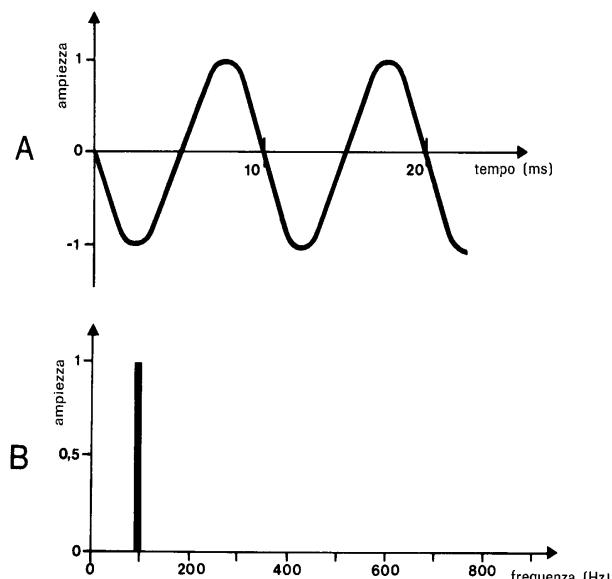


Fig. 13 - Oscillogramma (A) e spettrogramma (B) di un segnale sinusoidale.

Figura 11: Rappresentazione di un suono puro nel piano ampiezza-tempo e nel piano ampiezza-frequenza.

Un'onda sinusoidale è facilmente rappresentabile nel piano ampiezza-tempo. Se caratterizziamo quest'onda con la sua ampiezza e la sua frequenza possiamo rappresentarla nel piano ampiezza-frequenza come riportato dalla figura seguente.

In teoria dei segnali si suole anche considerare la fase: in acustica questa viene trascurata poiché l'orecchio umano non è in grado di discriminare la fase. Nella Figura 12 si ha un esempio di composizione di tre suoni puri aventi frequenze multiple della fondamentale. Nella Figura 13 si ha la composizione di tre armoniche aventi frequenze multiple, ampiezze variabili e la prima armonica è sfasata nei casi rappresentati a sinistra e a destra della figura.

L'andamento dell'oscillogramma ampiezza-tempo risulta graficamente molto diverso ma per l'udito umano (*scarsamente sensibile alle variazioni di fase*) i due suoni appaiono identici.

La composizione $p_1(t) + p_2(t) + p_3(t)$ non è di immediata lettura: probabilmente un occhio addestrato saprà individuare la presenza di tre armoniche ma non i rapporti fra loro intercorrenti. Questo tipo di rappresentazione risulta molto comodo quando si esaminano suoni complessi, cioè formati da più armoniche.

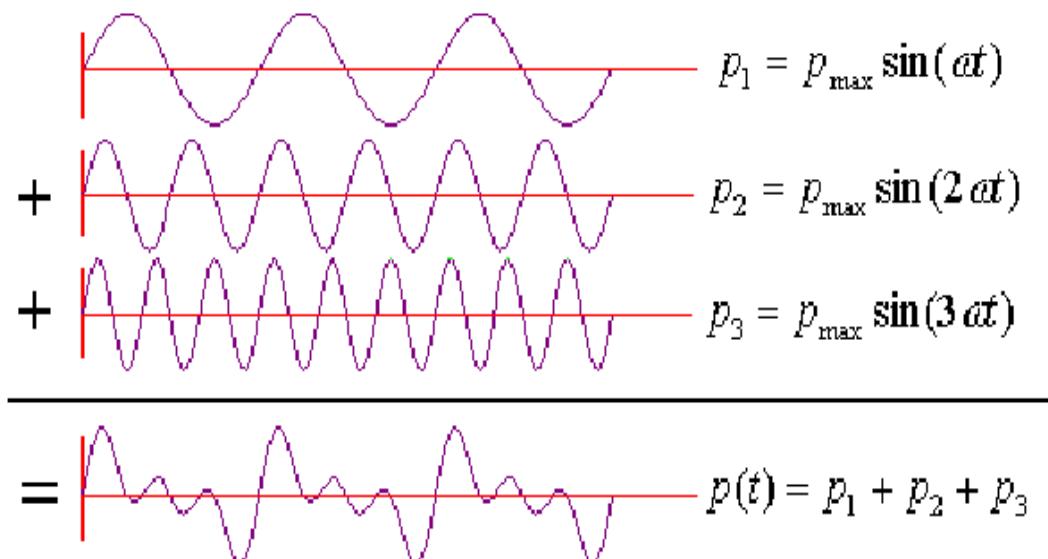


Figura 12: Rappresentazione temporale della somma di tre armoniche

A sinistra e destra della figura si hanno tre armoniche che differiscono solo per la fase della componente fondamentale.

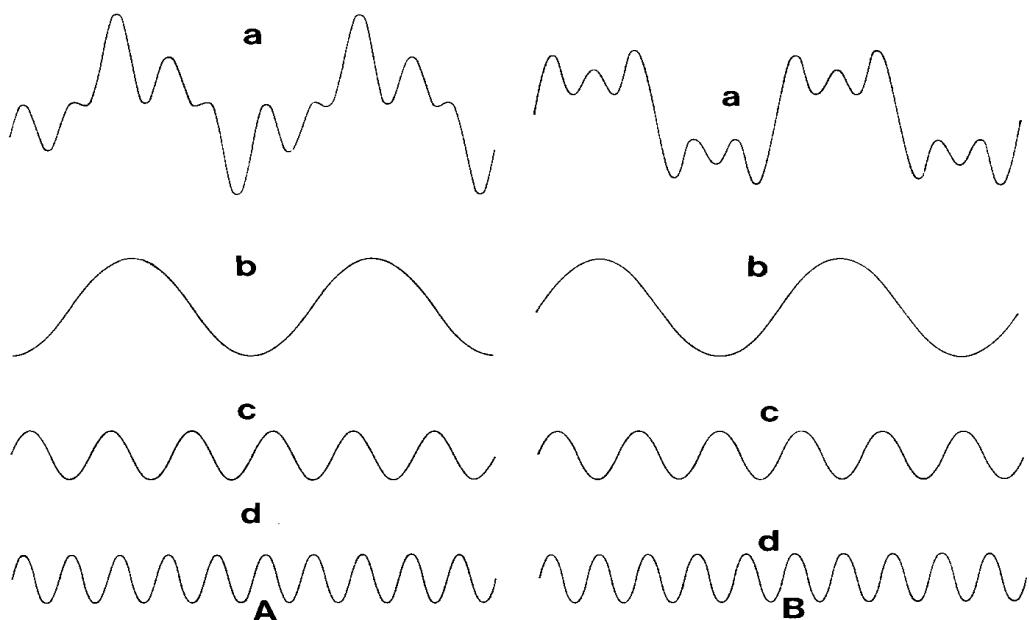


Fig. 19 - Segnali complessi periodici (a), aventi la stessa composizione spettrale (3 armoniche b, c e d) ma differenti nella forma in quanto la 1° armonica (b) in A ha fase diversa che in B.

Figura 13: Composizione di tre armoniche nel piano ampiezza-tempo

Nel piano ampiezza-frequenza si ha l'andamento di Figura 14. Come si può ben osservare le tre componenti sono perfettamente identificabili e la composizione del suono complesso appare chiara già a partire dal primo sguardo.

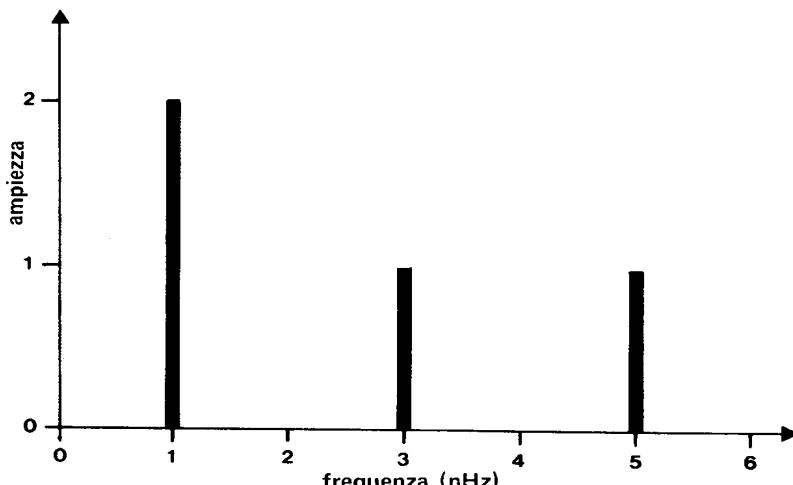


Fig. 20 - Spettro di frequenza dei due segnali (a) di fig. 19.

Figura 14: Composizione di tre armoniche nel piano ampiezza-frequenza.

Per questo motivo l'analisi frequenziale (come viene detta la rappresentazione ampiezza-frequenza) è oggi molto utilizzata per lo studio e l'analisi dei suoni complessi.

L'algoritmo matematico utilizzato è quello della scomposizione in serie di Fourier mediante le seguenti relazioni:

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(nx) + B_n \sin(nx) \quad [42]$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int f(x) \cos(nx) dx \quad [43]$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int f(x) \sin(nx) dx \quad [44]$$

Le funzioni sinusoidali (o cosinusoidali) sono dette armoniche del segnale dato.

Trasformazione dello spettro di un segnale

Nelle applicazioni acustiche si utilizzano spesso dispositivi, detti *filtri*, che hanno lo scopo di modificare lo spettro dei segnali e quindi anche la composizione armonica del segnale.

Un segnale filtrato modifica il suo spettro a seconda del tipo di filtro utilizzato, come si può osservare nella figura seguente.

Si osservi che partendo dal segnale iniziale (si tratta di un segnale *glottidico*, cioè prodotto dalla *glottide* umana) lo si trasforma mediante filtri detti, nell'ordine in cui essi compaiono i figura:

Filtro *passa - basso*: Vengono lasciate passare solo le frequenze inferiori ad una data frequenza di taglio f_1 ;

Filtro *passa - alto*: Vengono lasciate passare solo le frequenze maggiori di una data frequenza di taglio f_2 ;

Filtro *passa - banda*: Passano solo le frequenze comprese fra due frequenze di taglio f_1 ed f_2 ;

Filtro *elimina - banda*: Passano le frequenze esterne ad una data banda di frequenze f_1 ed f_2 ;

Nella stessa figura si ha, sul lato destro, la ricostruzione del segnale nel dominio del tempo partendo dalle armoniche che passano attraverso il filtro. Si può ben osservare che si ha una differenza sostanziale con il segnale originario.

Pertanto l'azione del filtro è sostanziale in quanto altera sia la composizione del segnale che l'effetto che esso produce con l'ascolto.

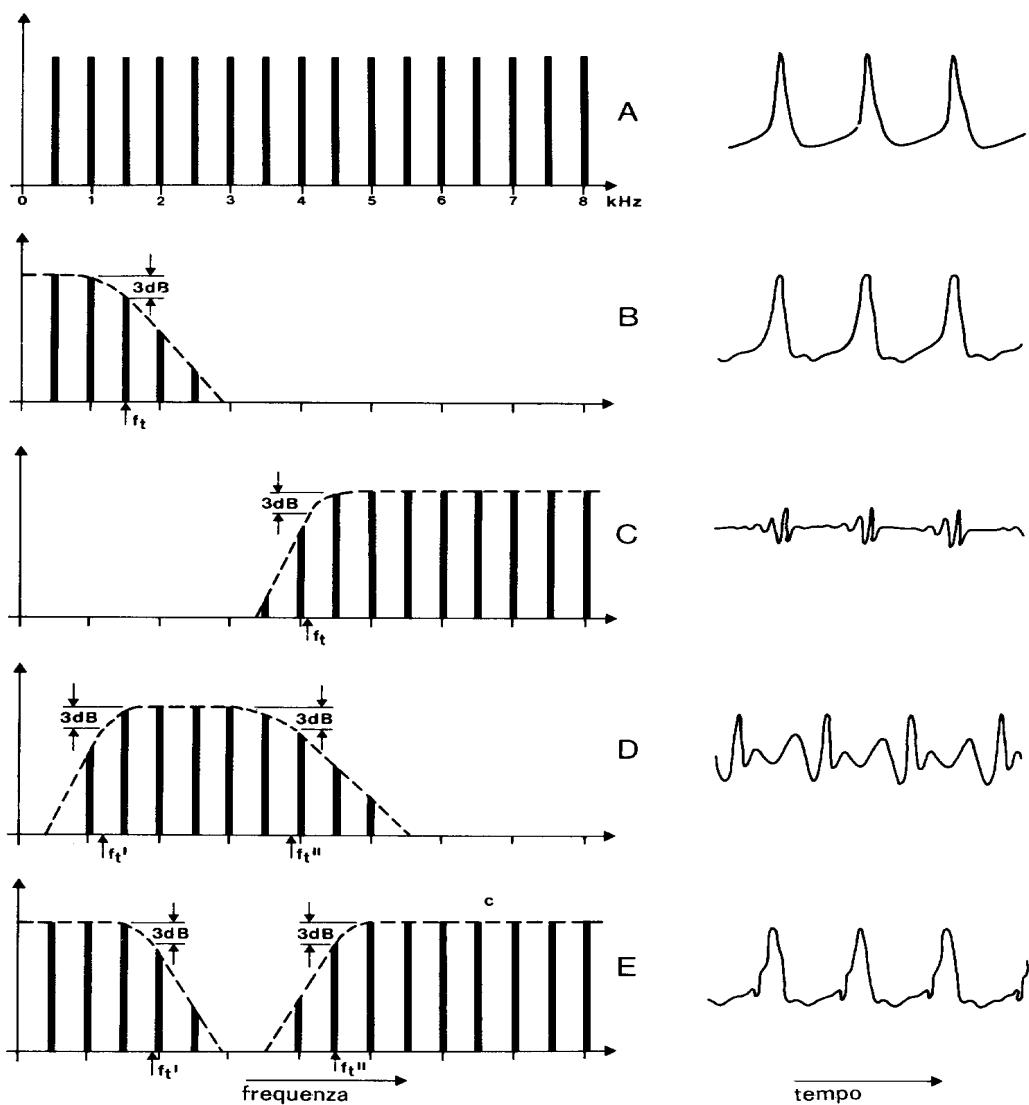


Fig. 22 - Spettrogramma ed oscillogramma di un segnale periodico di tipo impulsivo (A), e loro trasformazioni a seguito di filtraggio reale passa-basso (B), passa-alto (C), passa-banda (D) e elmina-banda (E).

Figura 15: Azione dei filtri sui segnali

In Figura 15 si ha l'esempio, nella prima riga, di un segnale glottidico⁴ rappresentato a sinistra dallo spettro e a destra dall'andamento temporale. Applicando i vari filtri indicati nelle righe successive si può vedere come si modifica sia lo spettro (si ha una riduzione di righe e quindi di armoniche) che l'oscillogramma rappresentato alla destra di ogni riga esaminata. Pertanto l'azione di un filtro è quella di modificare la costituzione spettrale dei segnali e la loro apparenza sensoriale all'Uomo.

Vedremo più avanti come anche l'orecchio umano si comporti come un filtro di particolare complessità nella banda passante fra 20 e 20.000 Hz.

2.6. SPETTRO DI UN SUONO COMPLESSO

Da quando l'informatica e l'elettronica hanno consentito di potere effettuare il calcolo della *Trasformata di Fourier* in tempi tanto brevi o addirittura in *tempo reale* (cioè tali da potere essere considerati istantanei) si è potuto tracciare una particolare rappresentazione di un suono: lo *spettrogramma* o anche *sonogramma*.

⁴ Si tratta di una specie di impulso che la *glottide* nella gola emana al momento della richiesta di fonazione da parte dell'Uomo. Questo segnale viene poi modificato (cioè filtrato) dall'esofago, dalla bocca, dalle labbra e dalla lingua per formare il linguaggio parlato.

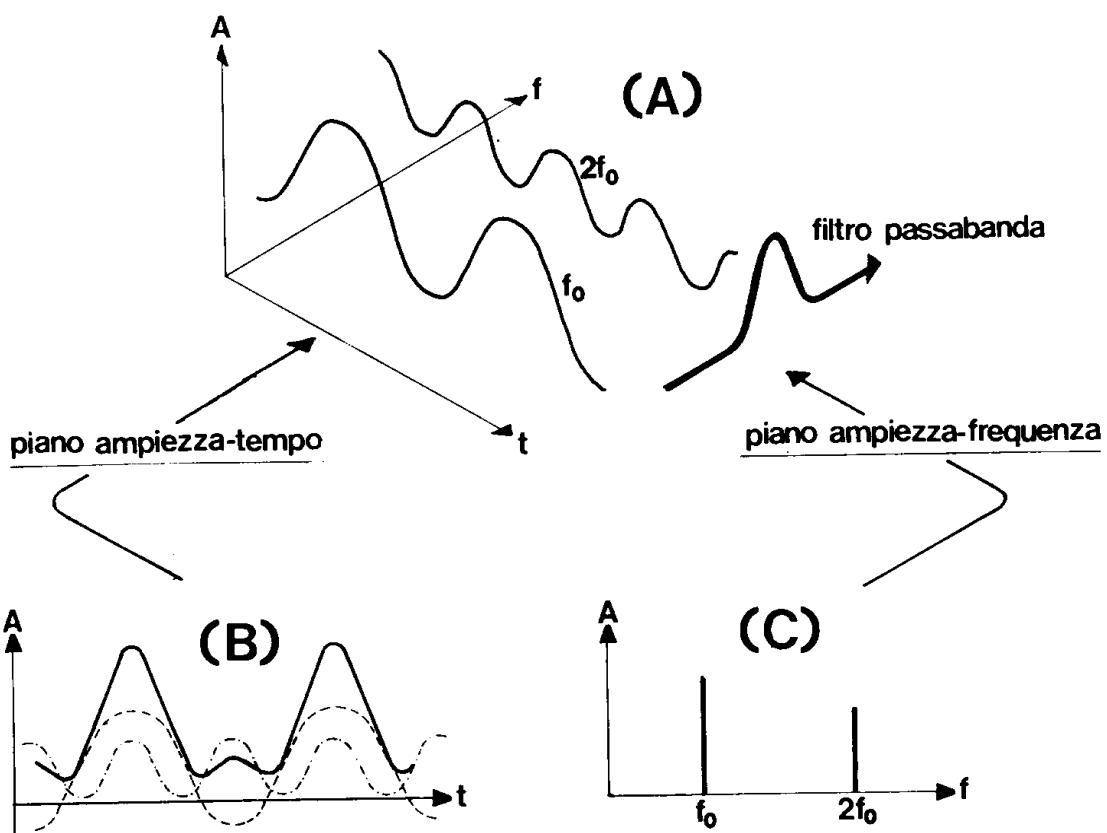


Fig. 26 - Rappresentazione schematica della tecnica di analisi di un segnale compleso periodico composto da due armoniche ad opera di un filtro passa-banda che « esplora » l'asse delle frequenze.

Figura 16: Rappresentazione di un segnale nei vari piani.

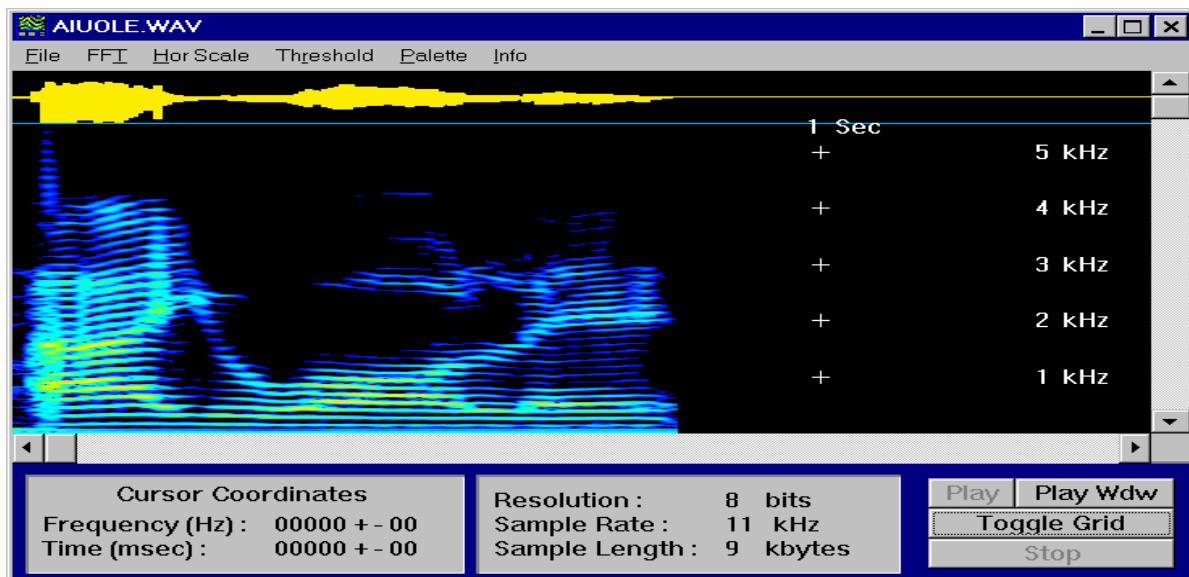


Figura 17- Spettrogramma della parola [AIUOLE].

Esso è in pratica una rappresentazione tridimensionale avente in ascisse il tempo, in ordinate la frequenza e nella terza dimensione l'altezza delle armoniche.

Non potendo rappresentare la terza dimensione su carta è invalso l'uso di indicare l'altezza delle armoniche con gradazioni di colore o di grigio: maggiore è il valore dell'altezza più nero (se si usa la scala di grigi) o di colore più vivo (se si usa la scala di colori) è il punto corrispondente.

In Figura 17 si ha la parola rappresentata in forma spettrale.

In Figura 18 è rappresentato l'andamento temporale della stessa parola *[AIUOLE]* pronunciata da un parlatore.

Le due figure si riferiscono allo stesso brano ma da due punti di vista differenti: la prima fornisce l'andamento bidimensionale del segnale acustico (diagramma ampiezza-tempo detto *oscillogramma*) mentre la seconda fornisce l'andamento tridimensionale frequenza – tempo – ampiezza, detto *spettrogramma*.

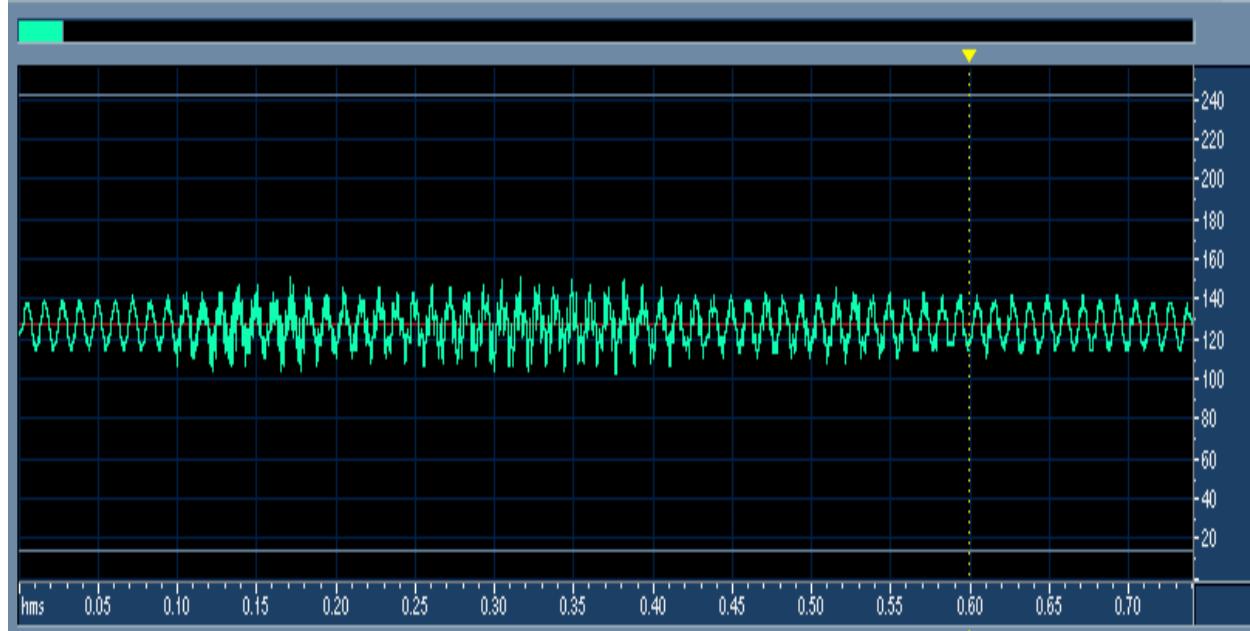


Figura 18- Oscillogramma della parola *[Aiuole]* pronunciata da un parlatore

Per un suono *complesso* lo spettro, quindi, risulta molto articolato e non può essere rappresentato dalle sole armoniche componenti (di ampiezza variabile e di frequenza crescente e multipla della frequenza minima detta fondamentale) ma occorre rappresentare il suono con riferimento all'intensità contenuta all'interno di bande di frequenze stabilite (a banda stretta di pochi Hz o a banda larga di ottava o a terzi di ottava).

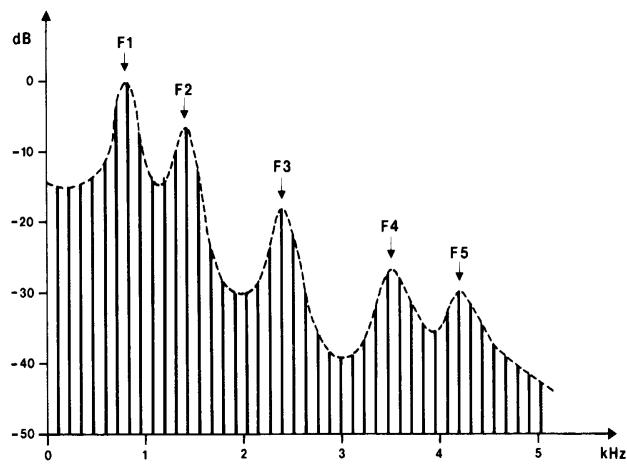


Fig. 14 . Spettro di una vocale [a] con evidenziati l'envolto spettrale (a tratteggio) e le prime cinque formanti.

Figura 19: Rappresentazione spettrale di un suono complesso: la vocale [a].

In pratica si taglia il suono dato a fette di larghezza stabilita, dette *frame*, e si effettua l'analisi spettrale di ciascuna fetta di suono avendo cura di *raccordare* le *frames* mediante particolari funzioni matematiche (*funzioni di Hamming, di Hanning, sinusoidale,*), come si dirà fra poco.

In Figura 19 é data la rappresentazione spettrale di una vocale pronunciata da un uomo la cui frequenza fondamentale é di circa 70 Hz.

In Figura 20 é riportata una rappresentazione dell'analisi spettrale di un suono complesso, dittongo [ai] con frequenza fondamentale di 125 Hz, sia a banda stretta che a banda larga.

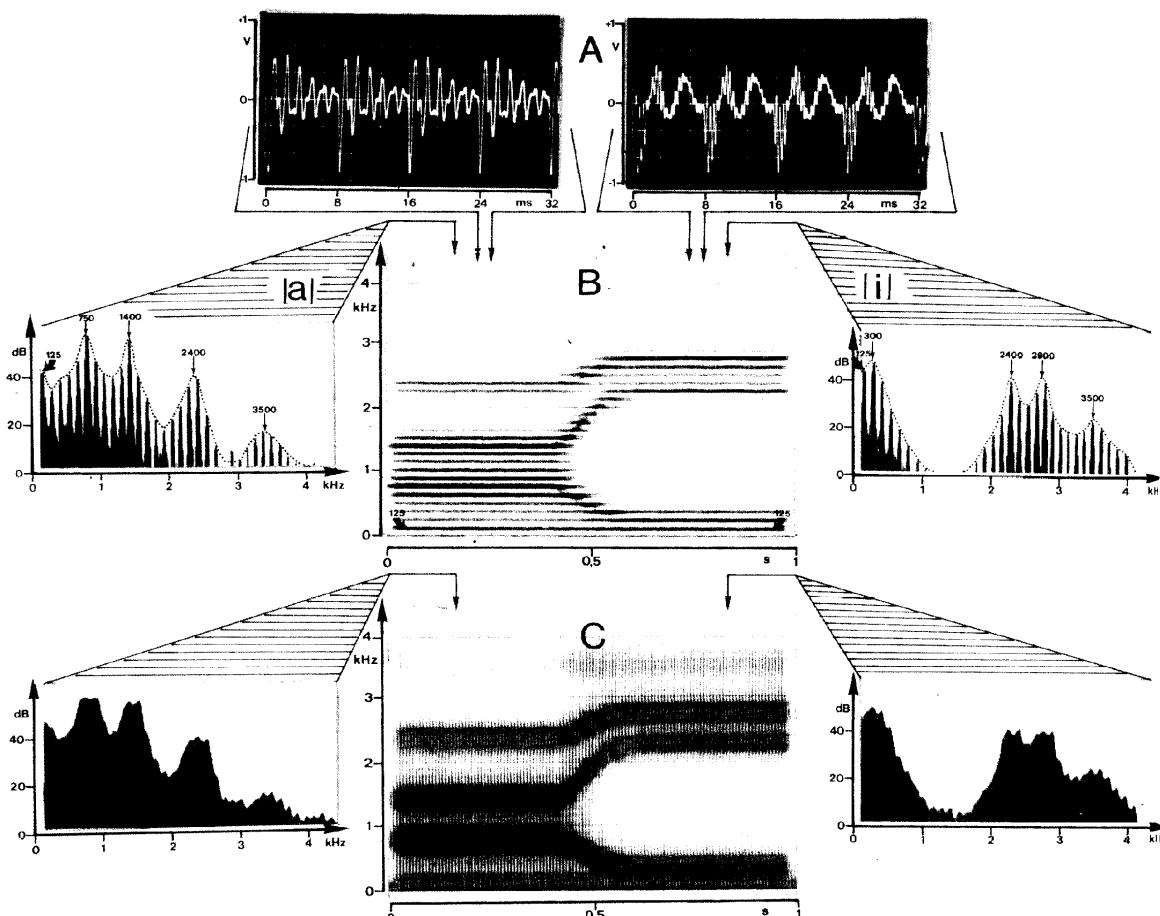


Figura 20: Rappresentazione spettrale convenzionale: sonogramma

Al centro si riporta la sovrapposizione della rappresentazione spaziale con l'ampiezza variabile in funzione del colore (*più nero per maggiore ampiezza*).

2.6.1. TRASFORMATA VELOCE DI FOURIER DI UN SEGNALE DIGITALE (FFT)

Lo strumento principale di analisi di un suono complesso è la trasformata di Fourier che oggi può esser anche implementata in modo semplificato mediante un algoritmo basato sulle trasformate di Hadamard detto *Trasformata Veloce di Fourier (FFT)*.

Introduzione alla Trasformata di Fourier

Su un segnale acustico l'*Analisi di Fourier* ci aiuta, come già detto, ad identificare le singole componenti in frequenza. L'*Analisi di Fourier* si basa sull'omonimo teorema e cioè sulla proprietà di un segnale temporale di poter essere scomposto in una somma di sinusoidi (serie). In generale si può dire che tanto più "complicato" è il segnale temporale, maggiore è il numero di componenti che lo compongono e ciascuna componente viene identificata mediante la propria ampiezza e la propria fase.

Fase ed ampiezza possono essere descritte come funzioni della frequenza; cioè la trasformata di un segnale temporale.

In altri termini potremmo pensare alla *Trasformata di Fourier* come l'equivalente in frequenza di un segnale temporale; essa contiene le medesime informazioni del segnale temporale tanto che, applicando una *Trasformata Inversa* alla *Trasformata di Fourier* si ottiene nuovamente il segnale nel tempo.

Se non si tiene conto della fase della trasformata tracciando solamente l'ampiezza in funzione della frequenza, si ottiene lo spettro della frequenza (*frequency spectrum*), chiamato anche spettro dell'energia (*energy spectrum*) che non è che una parte del *power spectrum* o spettro di potenza. Solitamente l'ampiezza viene espressa in dB mentre la frequenza in Hz. I picchi dello spettro di potenza identificano le singole componenti.

Digitalizzazione ed FFT

L'analisi di Fourier è oggi effettuata mediante computer e pertanto si richiede che il segnale venga trasferito opportunamente nella memoria Ram. Quando il calcolatore registra un segnale si serve di una speciale scheda che converte il segnale stesso, da una variazione continua, in una discreta. Durante questa procedura, chiamata *digitalizzazione*, il segnale viene "*campionato*" ad una certa velocità (tipicamente parecchie migliaia di volte al secondo) ed il *digitalizzatore* assegna ad ogni campione un valore intero a cui corrisponde una determinata tensione. Il valore di tensione ed il valore temporale costituiscono, per il calcolatore, un ben determinato codice con cui esso è in grado di ricostruire il segnale con buona approssimazione.

La sequenza di numeri generata dal convertitore A/D (*Analog to Digital*) riproduce, con buona approssimazione, il segnale continuo. Così come il matematico applica uno sviluppo in serie di Fourier alla formula matematica che approssima il segnale, così si applica un algoritmo simile, la FFT, al segnale digitalizzato, per estrarre il contenuto in frequenza. Tale algoritmo consente di calcolare le singole componenti trattando un numero di punti del segnale presi in potenza di 2 (256, 512, 1024...ecc). Questa tecnica può essere aggirata usando il metodo dello "*zero padding*" descritto più avanti.

La trasformata di Fourier accetta, in ingresso, un segnale che contiene N campioni e restituisce, in uscita, $N/2$ valori (linee o canali) di frequenza, in ampiezza e fase. Le componenti in frequenza sono equamente spaziate fra di loro tra 0 Hz e metà della frequenza di campionamento. Aumentando la frequenza di campionamento, aumenta la fedeltà con cui è possibile ricostruire un segnale a scapito della necessità di una maggiore memoria su cui memorizzare i dati.

Frames, Filtri e FFT di breve durata

Sebbene, in teoria, sia possibile calcolare una FFT su una durata illimitata, la maggior parte delle analisi viene effettuata su periodi (*frames*) abbastanza brevi: un *frame* tipico per le analisi di suoni va da 10 a 50 ms. E' molto importante capire come la lunghezza su cui è calcolata l'FFT influenza il risultato della stessa.

Un principio basilare dell'analisi di Fourier stabilisce che l'analisi nel dominio del tempo è complementare a quella nel dominio della frequenza nel senso che quanto più si conosce della prima, tanto meno è identificata la seconda (indeterminazione tempo-frequenza). In teoria per estrarre tutte le componenti di un segnale occorrerebbe valutarne la trasformata tra $-\infty$ e $+\infty$. D'altro canto, trasformando un segnale finito se ne ottengono le componenti a spese della risoluzione di misura dove per risoluzione (larghezza di banda) si intende la distanza minima calcolata per separare due componenti vicine.

Un altro modo per dare un significato fisico all'FFT è quello di pensare di mandare il vostro segnale ad un banco di N filtri passabanda ideali, tutti uguali e posti in parallelo, ciascuno dei quali con larghezza di banda predefinita e centrata in maniera da non fare sovrapporre i filtri mettendoli uno accanto all'altro. Un sistema così costruito, idealmente è ovvio, restituisce il segnale separando ogni singola componente del medesimo: se immaginiamo che ogni filtro abbia larghezza di banda 1 Hz ed i filtri siano cento a partire da 1 Hz fino a 100 Hz, il primo filtro restituirà la componente ad 1 Hz, il secondo quella a 2 Hz, il terzo quella a 3 Hz e così via presentando, come risultato del nostro ipotetico schermo, uno spettro di 100 righe.

Il primo importante risultato che otteniamo è la valutazione della quantità di segnale necessaria per ottenere un risultato corretto; abbiamo detto che i filtri sono 100 ciascuno con larghezza di banda 1 Hz. Per il teorema di indeterminazione tempo-frequenza, 1 Hz vuole sostanzialmente dire 1 ciclo al secondo. Dunque per ottenere un risultato corretto, come livello della nostra misura, occorrerà attendere almeno un secondo di segnale affinché i filtri rispondano correttamente.

In caso contrario tanto minore è il tempo di permanenza nel filtro del segnale, tanto più scorretto sarà il valore di ampiezza misurato nel filtro. Nel nostro Analizzatore di Fourier accade la medesima cosa: se vogliamo analizzare un segnale con risoluzione 1 Hz, per avere un risultato corretto, dobbiamo analizzare almeno 1 sec. di segnale. Si osservi però che **il tempo di misura non dipende dalla velocità di campionamento.** Proviamo ad immaginare di portare il nostro fondo scala di analisi ad 1 kHz invece di 100 righe avremo bisogno di 1000 righe di analisi. La velocità di campionamento sarà maggiore, ma sempre 1 secondo di segnale passerà attraverso i nostri ipotetici filtri.

In un analizzatore FFT questo significa un maggior numero di punti analizzati nel tempo, **ma sempre per la medesima quantità di tempo**, a parità di risoluzione considerata.

In genere un analizzatore FFT tratta il segnale temporale in un numero di punti che, per necessità dovute al calcolo binario, è potenza di 2:

Numero di punti	Righe generate in frequenza
64	25
128	50
256	100
512	200
1.024	400
16.384	6.400

Tabella 3: Corrispondenza fra numero di punti e righe di frequenza

Abbiamo detto che, di regola, gli analizzatori di Fourier utilizzano il segnale per punti espressi in potenza di 2 e ciascun punto è un campione generato dal convertitore A/D.

Diremo anche che il campionamento va di passo con il fondo scala in frequenza che si vuole analizzare nel senso che, generalmente, si utilizza come campionamento la così detta frequenza di Nyquist, vale a dire 2,56 volte il fondo scala di analisi. Se, ad esempio, si desidera analizzare componenti in frequenza fino a 1 kHz, il segnale verrà campionato a 2,56 kHz, per 10 kHz si userà 25,6 kHz e così di seguito. Un'altro importante punto del nostro analizzatore FFT è la finestra di pesatura del segnale. Al contrario di quanto accade per l'analisi di Fourier matematica, l'analizzatore ha a che fare con una dimensione fisica del segnale che, per sua definizione, non può essere infinita.

Ciò dà luogo ai così detti *errori di troncamento* perché il calcolo è effettuato su quello che abbiamo chiamato *frame* il quale ha una durata finita.

Il metodo correntemente usato dagli analizzatori FFT è quello di moltiplicare il segnale per una funzione matematica (*finestra*) fatta in modo da minimizzare tali errori.

Generalmente nei suoni o comunque su segnali non stazionari, si è soliti servirsi di finestre *Hanning* o *Hamming* che hanno la particolarità di ottimizzare il segnale al centro e ridursi a zero ai contorni. Siccome tali finestre hanno una formulazione matematica ben conosciuta, è possibile stimare a priori l'errore introdotto dalla "pesatura" e tenerne conto.

L'uso delle varie finestre è abbastanza codificato, a seconda del tipo di segnale che si vuole analizzare e dei risultati che si desidera ottenere e si apprende con la pratica.

In alcuni tipi di analisi si è soliti calcolare molte FFT su tempi brevi affiancandole poi l'una all'altra fino a coprire l'intero segnale (es. una frase o il ciclo di avviamento di un motore) per costruire il cosiddetto *Spettrogramma* o *Sonogramma*.

Ogni singola FFT viene calcolata con la finestra di *Hamming* e l'avanzamento temporale di ogni FFT consecutiva è chiamato *Frame Advance*.

Si può definire la lunghezza del frame su cui è calcolata l'FFT specificando il *Filter Frequency* che è un parametro che richiama il funzionamento dei vecchi Sonografi analogici.

Un filtro stretto, ad esempio 59 Hz si riferisce ad una larghezza di banda più sottile e consente di risolvere frequenze distanti tra loro 59 Hz.

Un filtro più largo, es. 184 Hz, risolve una banda in frequenza più ampia mentre, per contro, migliora la risoluzione temporale (per es. consente di evidenziare gli attacchi della voce).

Siccome la teoria dell'analisi del segnale ci insegna che moltiplicare un segnale temporale per una finestra corrisponde a convolvere lo spettro in frequenza del segnale temporale con l'FFT della finestra stessa, da ciò deriva che esiste una relazione tra la larghezza della finestra (m_s) e la larghezza della FFT associata (H_z), come evidenziato nella tavola seguente:

Larghezza Finestra (ms)	Larghezza Filtro (Hz)
33	45
25	59
10	150
8	184
5	300
3.2	450
2.5	600

Tabella 4: Corrispondenza fra la larghezza della finestra e l'ampiezza del filtro

2.6.2. DEFINIZIONI DI BASE

Questo paragrafo descrive alcuni calcoli comunemente usati e richiede una certa dimestichezza con l'analisi matematica.

La Trasformata veloce di Fourier, FFT

La FFT di N punti discreti, detta anche **DFT** (*Discrete Fourier Transform*), con punti campionati mediante digitalizzazione, è definita dalla relazione:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-j2\pi nk/N} \quad [45]$$

per k variabile da 0 ad $N-1$. Si definisce anche la FFT Inversa ad N punti di una sequenza di valori data dalla relazione:

$$A_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k e^{j2\pi nk/N} \quad [46]$$

Queste funzioni (diretta e inversa) sono oggi facilmente calcolate mediante algoritmi rapidi e compatti che possono essere registrati nella memoria EPROM delle apparecchiature acustiche o eseguiti dai moderni e veloci computer. Si osservi che il numero N di punti definiscono una durata finita del segnale campionato pari a $N t$ con uno spettro discretizzato in $N/2$ componenti complesse alla distanza di f_s/N Hertz con f_s la frequenza di campionamento.

Se il segnale da analizzare è tutto compreso nella finestra di analisi $N t$ allora la DFT non introduce errori in caso contrario si ha un effetto di **troncamento** agli estremi della finestra temporale $N t$, come schematizzato in Figura 21 dove si ha nella prima riga la DFT teorica e nella seconda riga la DFT reale con l'errore di troncamento che produce una anomalia nel segnale ricostruito nel dominio del tempo.

Zero Padding

Il numero di campioni contenuti in un frame deve sempre essere uguale ad una potenza di 2: per garantire si fissa la dimensione della trasformata a 2^N in maniera da renderla uguale o maggiore della dimensione del frame ed ogni punto al di fuori è calcolato come zero. Per ridurre l'effetto di **troncamento** si utilizzano opportune funzioni dette *finestra* che hanno lo scopo di ridurre l'ampiezza del segnale campionato alle estremità della finestra di campionamento. In pratica si moltiplica il segnale per una funzione particolare che riduce gli effetti di discontinuità agli estremi della stessa *finestra* di analisi.

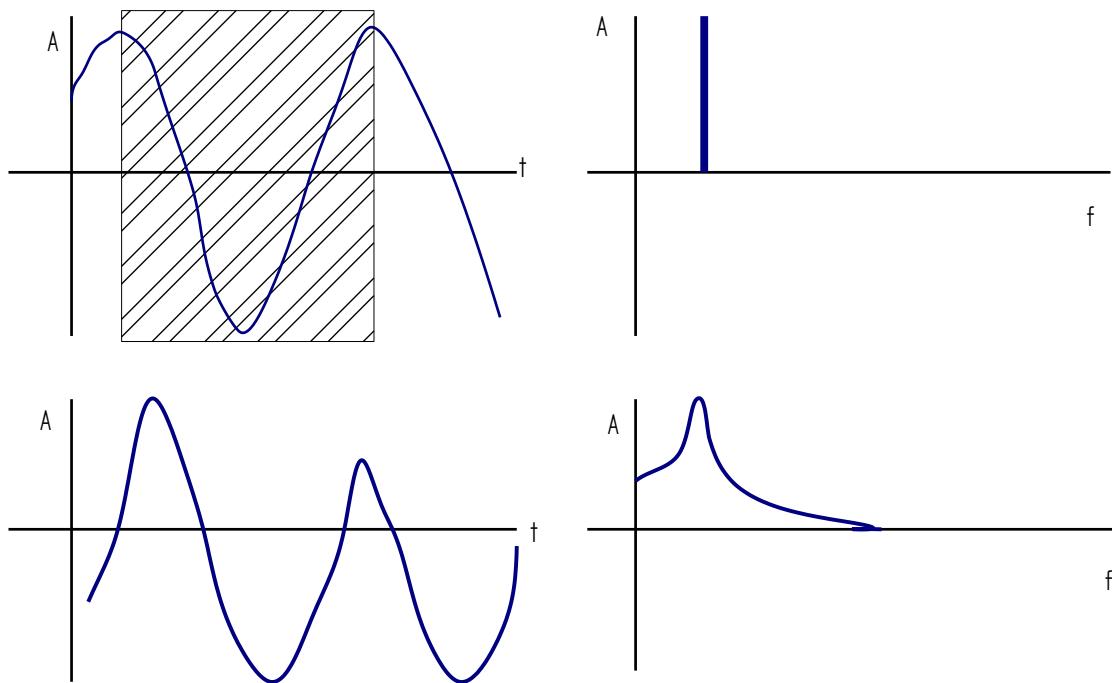


Figura 21: Errore di troncamento dei segnali

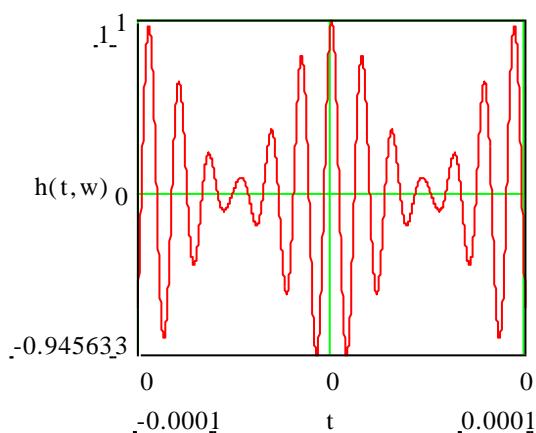
Per il teorema di convoluzione si applica la finestra effettuando la convoluzione nel dominio del tempo tra lo spettro del segnale non ponderato e la trasformata di Fourier della *funzione finestra*.

Interessante é la funzione di *Hamming*, vedi Figura 22, definita dalle seguenti relazioni:

$$s(t) = a(t) \cos(\pi t)$$

con:

$$a(t) = 0.54 - 0.46 \cos(2\pi f_0 t)$$

Figura 22: Rappresentazione della funzione di Hamming per $T_0=40$

Per $|t| \leq T_0$ e con $a(t)=0$ fuori dell'intervallo. Una rappresentazione grafica é data nella figura seguente. Nella Figura 23 si ha lo spettrogramma della parola [aiuole] e nella Figura 24 si ha la sezione effettuata in corrispondenza del cursore (riga verticale) pesata con la funzione triangolare.

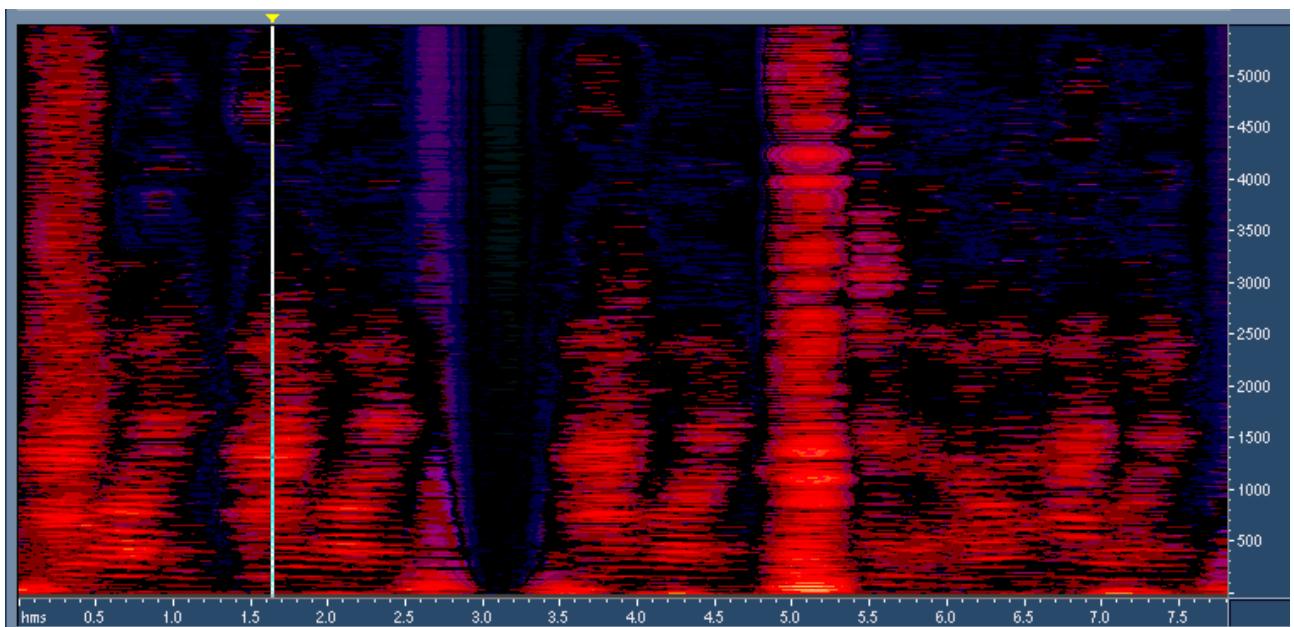


Figura 23: Spettrogramma della parola [aiuole]

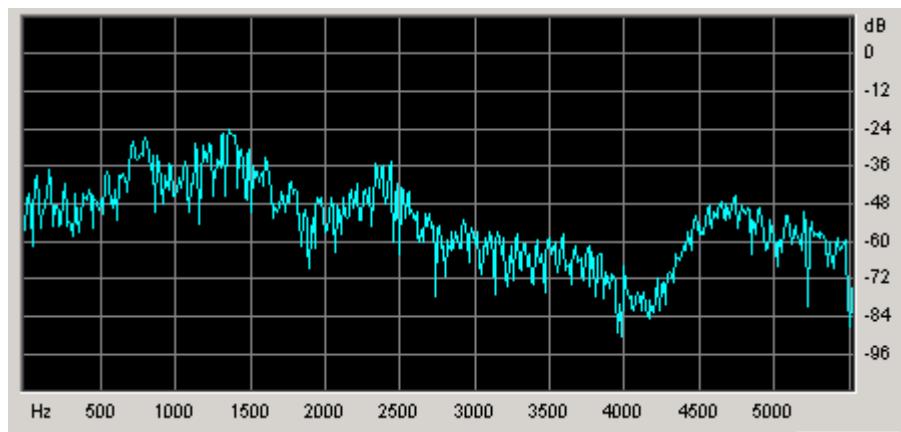


Figura 24: Sezione dello spettrogramma con finestra di pesatura triangolare

Nella Figura 25 si ha la stessa sezione pesata con una finestra di *Hamming* mentre in Figura 26 si ha una pesatura con la funzione di *Blackmann e Harris*.

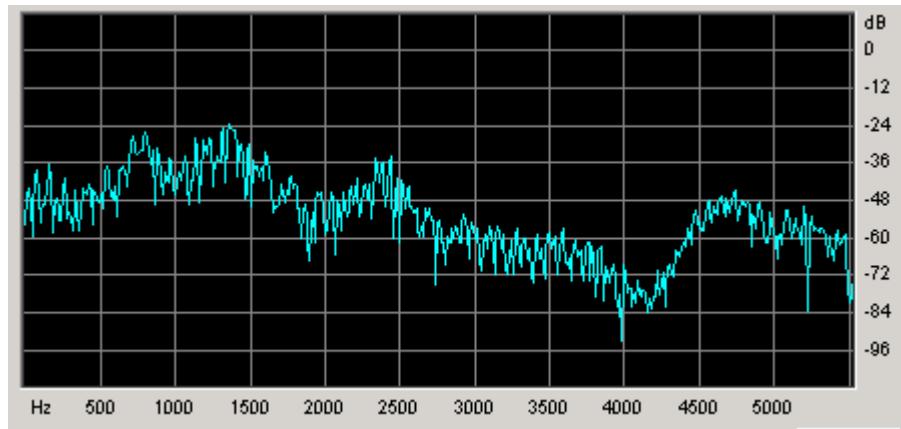


Figura 25: Stessa sezione precedente ma con finestra di Hamming

Come si può ben vedere la funzione di pesatura può avere rilevanza nella definizione di dettaglio delle armoniche calcolate.

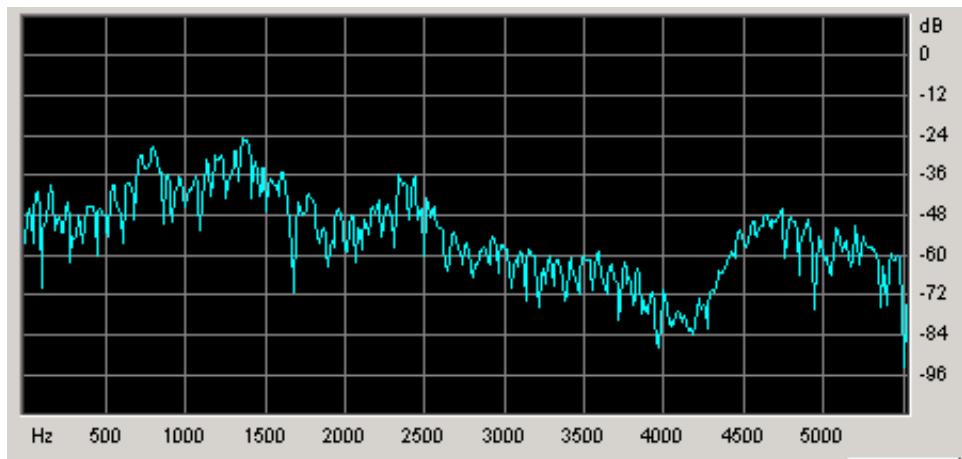


Figura 26: Stessa sezione trattata con finestra di Blackmann - Harris

Oggi si dispongono di numerose funzioni finestra da selezionare caso per caso a seconda del segnale da analizzare.

Pre - Emphasis

Di solito nel software di calcolo della FFT è disponibile un'opzione detta di 6 dB *pre-emphasis*.

Quando si abilita tale opzione il segnale viene enfatizzato alle frequenze più alte prima di essere analizzato semplicemente applicando una derivata punto-punto sul segnale.

Ovviamente ciò viene fatto solamente sul calcolo lasciando inalterato il segnale originale.

La procedura consente di "amplificare" le frequenze alte con una pendenza di 6 dB/ottava e viene usata essenzialmente dove occorre evidenziare fenomeni su frequenze che vengono naturalmente "comprese".

Analisi di un suono puro

Nelle figure seguenti si ha l'esempio di un suono puro alla frequenza di 452 Hz e della sua FFT effettuata mediante un software opportuno. La frequenza di campionamento è pari a 8 kHz e si sono applicate le relazioni indicate in precedenza per il calcolo della FFT, rappresentata in Figura 28.

Si osservi come l'algoritmo numerico porti ad avere non una linea centrata a 452 Hz bensì un picco molto ristretto (ma la cui larghezza è ben visibile) centrato in corrispondenza di questa frequenza.

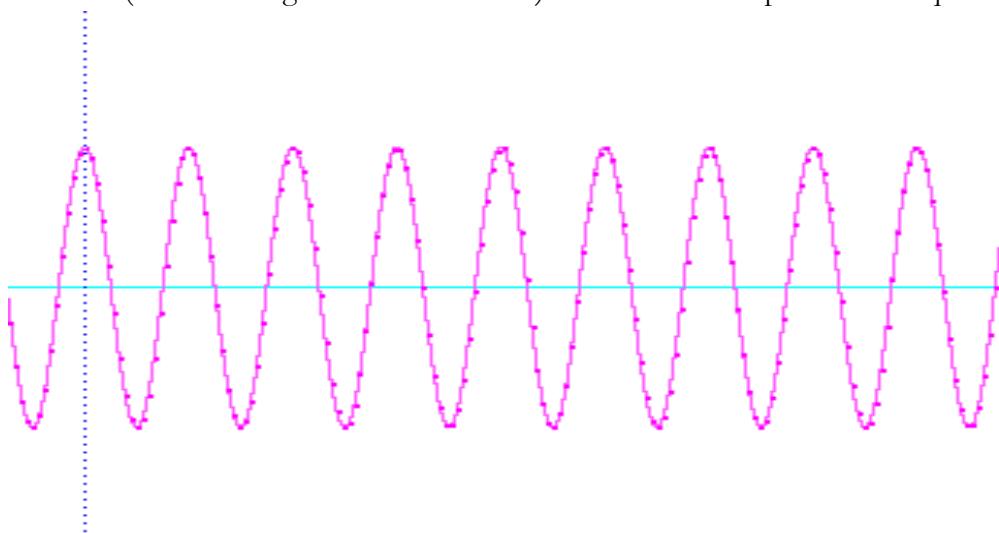


Figura 27: Suono puro a 452 Hz

L'algoritmo numerico di calcolo e di campionamento introduce, quindi un errore di troncamento nella rappresentazione spettrale che, però, non porta a conseguenze inaccettabili. Il picco, infatti, è ben centrato sulla frequenza del segnale e questo è sufficiente per l'analisi armonica.

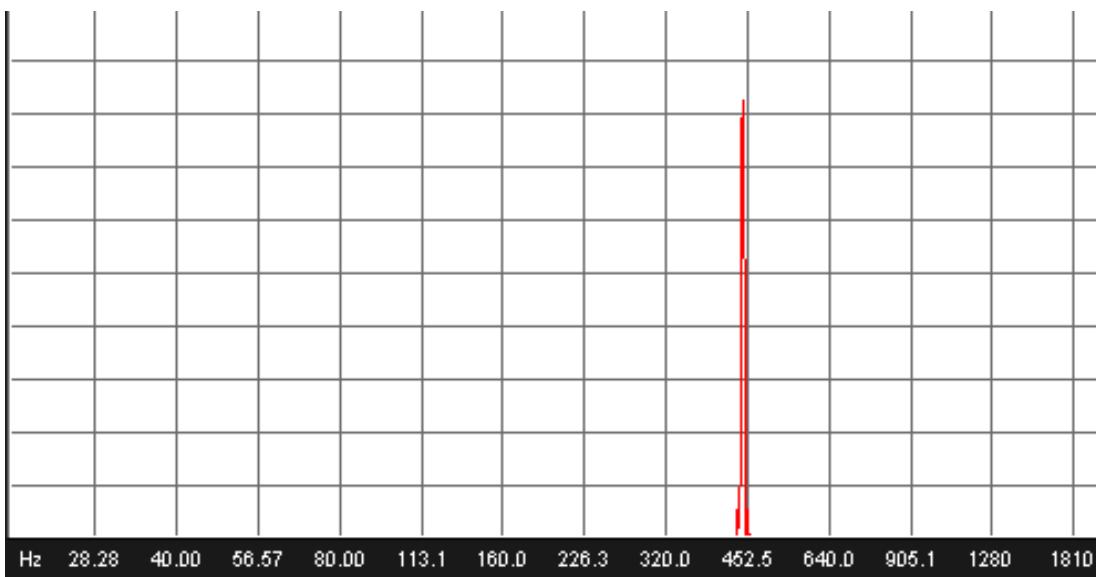


Figura 28: Spettro FFT del suono puro a 452 Hz

Se il segnale di origine è complesso (cioè è composto da più suoni puri) allora le cose si complicano un po', come visto in precedenza. Nelle figure seguenti si ha l'esempio di un suono composto da più suoni puri a varie frequenze e della sua FFT effettuata mediante un software opportuno. Si possono osservare nella Figura 30 ben cinque armoniche le cui frequenze sono facilmente desunte in ascissa.

L'effetto degli errori di troncamento dovuti al campionamento e poi al calcolo della FFT portano alla formazione di picchi, ben visibili in figura, con alla base una sorta di rumore dovuto all'errore di calcolo. Pur tuttavia le frequenze di picco sono perfettamente calcolabili.

Si suole rappresentare un segnale in uno spazio immaginario avente nei tre assi il tempo, l'ampiezza e la frequenza di ciascuna armonica componente.

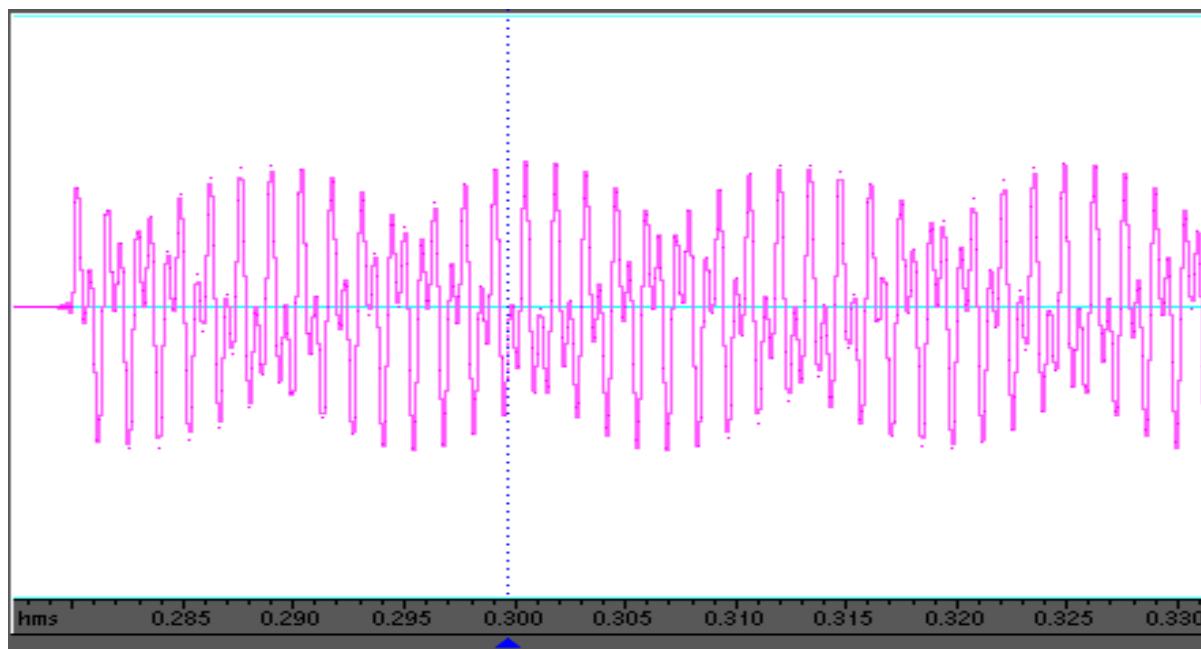


Figura 29: Rappresentazione di un suono complesso

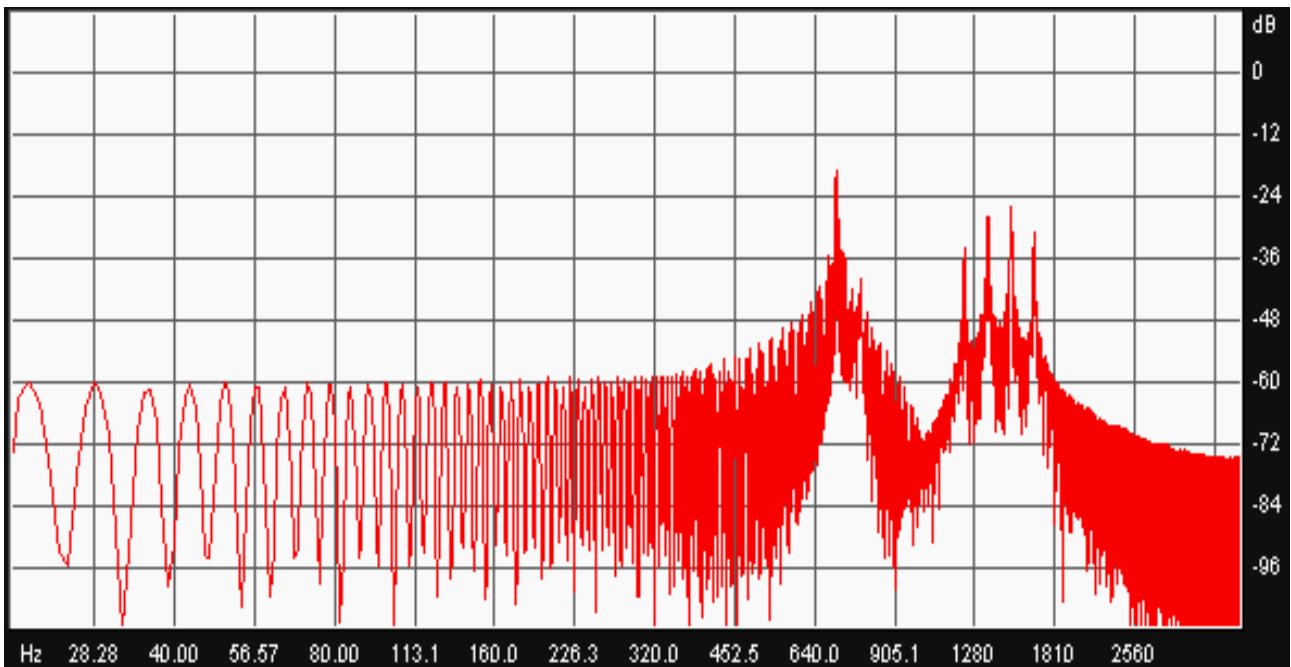


Figura 30: Analisi FFT del suono complesso

2.7. INNALZAMENTO DEI LIVELLI CON L'ALLARGAMENTO DELLA FINESTRA

Un suono complesso non periodico viene rappresentato, come già detto, nel piano della frequenza non con armoniche singole (come per un suono periodico) ma con una rappresentazione che dipende dalla larghezza delle *frame*.

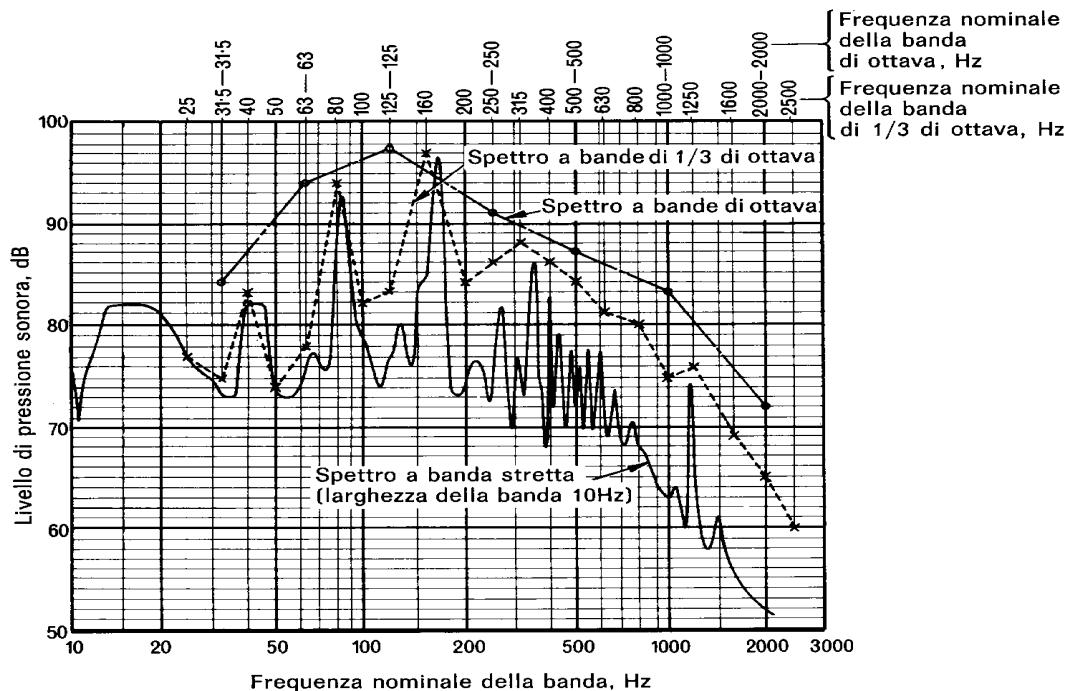


Figura 31: Rappresentazione dell'analisi frequenziale a varie larghezze di banda

In Figura 31 si riporta la rappresentazione sul piano delle frequenze di un segnale complesso in tre casi:

Frame con larghezza di banda stretta, 10 Hz;

Frame con larghezza di banda pari ad 1/3 di ottava;

Frame con larghezza di banda pari ad una ottava.

In ascisse sono rappresentate le frequenze di centro banda (di ottava o terzi di ottava o a banda stretta di pochi Hz) e in ordinata i livelli di pressione sonora.

Si osservi, in Figura 31, come al crescere della banda di frequenza utilizzata nelle *frame* per l'analisi armonica cresce anche il livello di pressione sonora per via dell'inviluppo che le bande larghe debbono creare sui valori delle bande strette.

In pratica l'analisi a banda larga porta ad avere livelli di centro banda tanto maggiori quanto maggiore è la larghezza di banda.

Non ci si meravigli, quindi se l'analisi a banda stretta (solitamente utilizzata in laboratorio o per applicazioni particolari quali l'analisi fonetica) porta ad avere livelli sonori inferiori.

Fra l'altro la banda stretta necessita di una maggiore sensibilità della strumentazione per via della minore energia trasportata dalle onde acustiche specialmente alle frequenze più elevate.

Le analisi spettrale a banda di terzi di ottava e di ottava sono richiesta dalle norme vigenti per la rilevazione dei picchi e delle bande tonali (vedi nel prosieguo).

3. CENNI DI ACUSTICA FISIOLOGICA

L'*Acustica Fisiologica* si occupa dell'interazione del suono (fenomeno puramente fisico, cioè oggettivo) con l'*Uomo* e quindi cerca di determinarne gli effetti di interazione *soggettiva*. Spesso i parametri di giudizio sono legati proprio alla soggettività dell'Uomo e ciò complica non poco lo sviluppo di questa disciplina. Occorre introdurre nuove grandezze, oltre a quelle oggettive già incontrate, che tengano conto dell'interazione con l'Uomo e delle sue capacità percettive.

Così, ad esempio, non tutti i suoni vengono percepiti dall'Uomo ma solo aventi frequenze comprese fra 20 e 20.000 Hz. Inoltre l'intensità dei suoni è correlata alle capacità di ascolto che nell'*Uomo Medio* (o *Normotipo*) varia da circa 10^{-12} W (soglia di udibilità a 1000 Hz) a 10^4 W (soglia del dolore).

3.1. LIVELLI SONORI

Quando si vuole quantificare con un numero la potenza emessa da una sorgente o la pressione sonora percepita, ci si trova di fronte ad una gamma di valori estremamente ampia: si può andare dai 10^{-7} Watt di una frase pronunciata a bassissima voce, ai 10^7 Watt prodotti, per esempio, dal motore di un razzo in partenza. Per questa ragione, ovvero per praticità, si fa ricorso alla funzione logaritmica che consente, trasformando la lunga scala di valori di pressione e potenza, la creazione di un insieme molto più limitato di valori denominato *livello di potenza sonora* o *livello di pressione sonora*.

Livello di Potenza sonora

Il livello di potenza sonora non è altro che il logaritmo del rapporto tra la potenza sonora che si vuole misurare e una potenza di riferimento che si assume convenzionalmente di $1 \mu\text{W}$

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad \text{dB} \quad [47]$$

W = potenza sonora misurata, W

W_0 = potenza sonora di riferimento: 10^{-12} W

L'unità di misura è il decibel (dB) e, come vedremo, viene utilizzata molto frequentemente nel campo dell'Acustica.

Livello di Pressione sonora

Analogamente, il livello di pressione sonora, è dato dal logaritmo del rapporto tra la pressione sonora emessa dalla sorgente ed una pressione standard di 20 Pa.

$$SPL = L_p = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad \text{dB} \quad [48]$$

P = pressione sonora misurata

P_0 = pressione sonora di riferimento ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa).

Tale definizione scaturisce da una legge fisiologica, legge di Weber, che vuole la sensibilità ad un fenomeno fisiologico inversamente proporzionale allo stimolo. Ad esempio, se poniamo nel palmo della mano un peso di 10 grammi allora possiamo sentire la variazione dello stimolo se aggiungiamo un peso di 1 grammo.

Se nella mano si ha un peso di 1 kg allora non sentiremo la variazione dello stimolo per l'aggiunta di un ulteriore grammo ma dovremo variare il peso di alcune decine di grammi. Questo comportamento fisiologico è del tipo $g = \frac{D_s}{S_0}$, ove con g si indica la variazione della sensazione e con s la variazione dello stimolo rispetto al valore iniziale s_0 . Una tale legge porta, integrata, ad una legge di tipo logaritmica che è quella utilizzata nella definizione dei livelli.

Livello di Intensità acustica

Sussiste la relazione fra intensità acustica e pressione sonora⁵:

$$/ \quad \frac{\bar{p}^2}{c} \quad [49]$$

con: c impedenza acustica del mezzo ($c=420 \text{ kg/s}$ per l'aria). Pertanto si definisce livello di intensità acustica:

$$L/S = 10 \log \frac{\bar{I}}{I_{\text{rif}}} \quad (\text{dB}) \quad [50]$$

con $I_{\text{rif}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. La [49] spiega perché si ha 20 a fattore nella definizione del *livello di pressione sonora* e non 10 come nella definizione del *livello di intensità sonora*. Anche se le i due livelli (di intensità e di pressione) hanno espressioni formali simili non vanno confuse tra di loro.

Livello di Densità sonora

Con formalismo analogo si definisce il Livello di densità sonora:

$$LDS = 10 \log \frac{\bar{D}}{D_{\text{rif}}} \quad (\text{dB}) \quad [51]$$

con $D_{\text{rif}} = 10^{-15} \text{ W/m}^3$.

Nella tabella seguente si ha una indicazione sommaria del campo di variabilità del livello di pressione sonora.

VALORI MEDI DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA

Pressione Sonora Pa	Livello di Pressione sonora dB	Ambiente o condizione	Valutazione soggettiva
200	140	Aereo militare in decollo a 30 m	
63	130	Rivettatura pneumatica (operatore)	
20	120	Sala caldaie (al massimo) di una nave	Intollerabile
6,3	110	Pressa automatica (operatore) - Laminatoio	
2	100	Tornitura automatica - Sala stampa - Metroloitalia	
0,63	90	Autocarri pesanti a 6 m - Perforatrice pneumatica	Molto rumoroso
0,2	80	Marciapiede strada con traffico intenso - Ufficio con stampanti aghi	
0,063	70	Apparecchio radio a volume alto in locali chiusi	
0,02	60	Ristorante - Grande magazzino	Rumoroso
0,0063	50	Conversazione ad 1 m - Ufficio pubblico	Tranquillo
0,002	40	Zona urbana periferica - Conversazione bisbigliata - Zona residenziale di notte	
0,00063	30		
0,0002	20	Rumore di fondo in studi televisivi di registrazione	Molto tranquillo
0,000063	10		
0,00002	0	Soglia di udibilità di un suono puro a 1000 Hz	

Tabella 5: Scala di valori delle pressioni sonore e dei livelli di pressione sonora

⁵ In realtà più che di *pressione sonora* è più corretto parlare di *pressione efficace sonora*: $\bar{P} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}$

3.2. L'ORECCHIO UMANO

L'organo che permette all'uomo di percepire i suoni è l'orecchio. Tramite quest'organo le onde sonore vengono trasformate in impulsi nervosi che, una volta trasmessi al cervello, noi percepiamo come suoni.

Da un punto di vista anatomico l'orecchio viene diviso in tre parti (vedi Figura 32): la prima parte è l'*orecchio esterno* che riceve l'onda sonora e fa vibrare la membrana del timpano, la seconda è l'*orecchio medio* che collega meccanicamente la membrana del timpano con l'*orecchio interno*, la terza parte è l'*orecchio interno* dove hanno origine gli impulsi nervosi che attraverso il nero acustico vengono trasmessi al cervello.

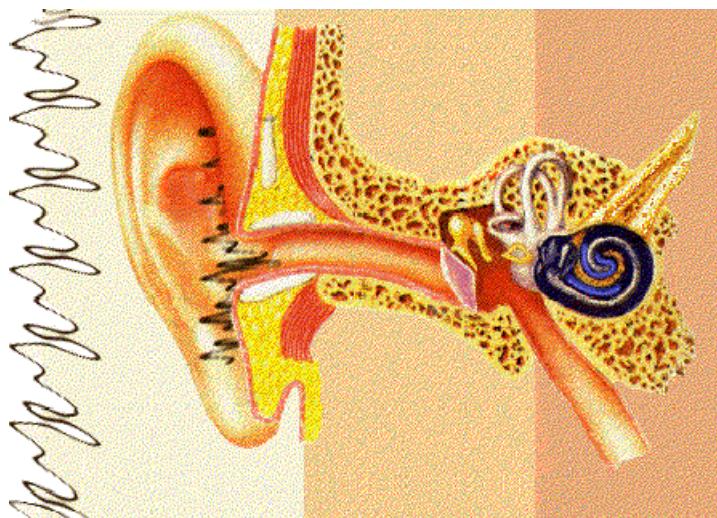


Figura 32: Vista d'Artista di un orecchio umano: orecchio esterno, medio e interno.

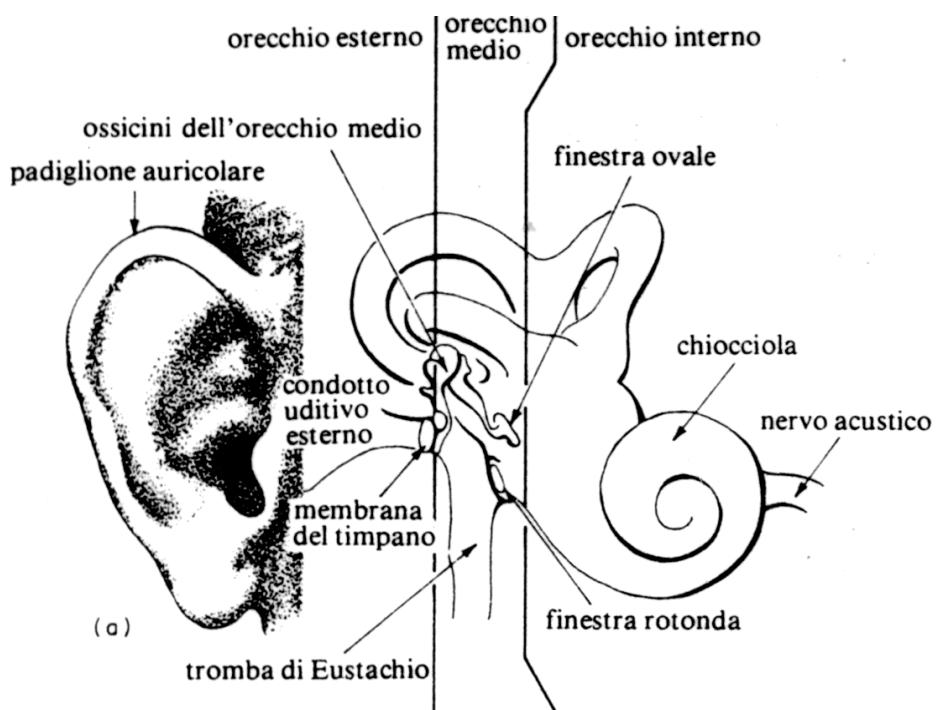


Figura 33: Struttura dell'orecchio esterno (padiglione auricolare) e dell'orecchio interno (Organo del Corti)

Il padiglione auricolare è la componente visibile dell'orecchio esterno; la sua funzione principale è di contribuire alla ricezione del suono.

E' la forma del padiglione che può influenzare l'amplificazione o l'attenuazione di determinate frequenze. Dal padiglione parte il condotto uditivo esterno che convoglia le onde sonore alla membrana del timpano.

La spiccata sensibilità dell'orecchio umano alle frequenze attorno ai 3000 Hz si spiega con il fatto che il condotto si comporta come un tubo chiuso all'estremità con una frequenza di risonanza all'incirca di 3000 Hz.

L'orecchio esterno è separato dall'orecchio medio dalla membrana del timpano: essa ha la forma di un cono piatto con un diametro di circa sette millimetri e la convessità rivolta verso l'interno.

L'orecchio medio è una cavità piena d'aria che contiene la catena di ossicini ossia tre piccole ossa, *il martello, l'incudine e la staffa*, che forniscono il movimento meccanico per far passare la vibrazione dal timpano all'orecchio interno. Il martello sta appoggiato sul timpano e quando viene messo in vibrazione colpisce l'incudine, il secondo ossicino che funge da connessione con il terzo, la staffa. Questa è a contatto con la finestra ovale, un'altra membrana che segna l'entrata della chiocciola.

La catena d'ossicini è connessa a dei legamenti e posta in tensione attraverso due piccoli muscoli: *il tensore del timpano e lo strapedio*. Il primo è connesso al martello, il secondo alla staffa. Questo sistema da una parte è un efficace meccanismo di trasmissione tra orecchio esterno e finestra ovale, dall'altra funziona come apparato protettivo in quanto limita la vibrazione trasmessa alla finestra ovale.

La presenza di aria nell'orecchio medio fa in modo di compensare la spinta della pressione atmosferica sul timpano, ciò avviene tramite il tubo di *Eustachio* che mette in comunicazione l'orecchio medio con il setto nasale. L'orecchio interno si presenta come un complesso sistema di canali colmi di liquido inseriti nell'osso temporale.

2.5 Physical Hearing System 27

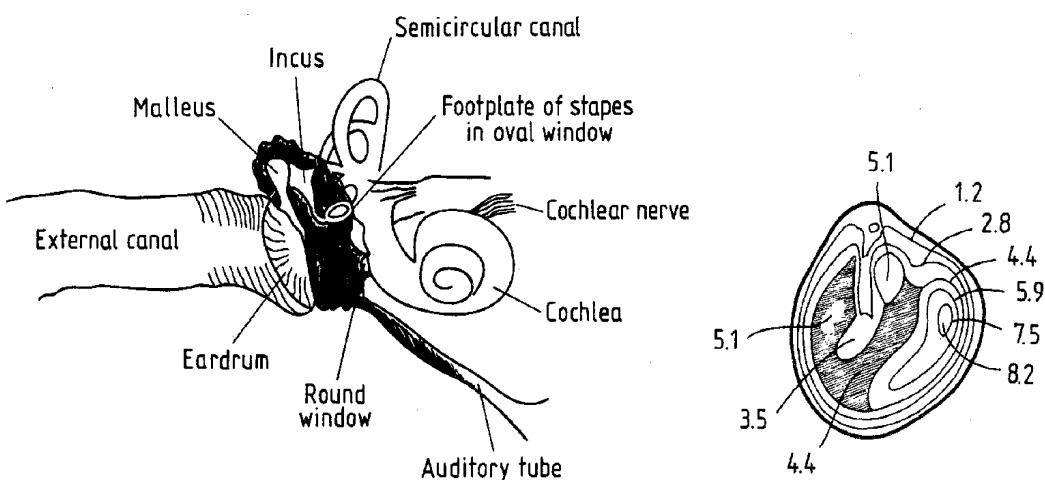


Figura 34: Struttura dell'orecchio interno e della coclea

Nell'uomo il senso dell'equilibrio e dell'udito viene dato dai nervi sensori posti all'interno di questi canali che terminano nella chiocciola. All'interno di quest'ultima troviamo una membrana detta basale che viene eccitata attraverso l'energia trasmessa alla chiocciola dalla finestra ovale.

Questa membrana a seconda della frequenza del suono risulta più eccitata in un punto rispetto ad un altro: le basse frequenze generano maggiore eccitazione all'estremità della chiocciola, le alte invece nei pressi della finestra ovale.

La stimolazione delle fibre nervose coinvolge una complessa struttura posta sulla membrana basale chiamata organo di *Corti* (vedi Figura 35).

Le cellule ciliate interne ed esterne che fanno parte di quest'organo sono le principali responsabili del processo di stimolazione nervosa, pare infatti vi sia una dipendenza diretta tra il danno subito da queste cellule e la perdita di udito dovuta al rumore.

Sezionando l'organo di Corti si ha la situazione della figura seguente: in pratica le terminazioni nervose sono comprese fra due lame di tessuto organico che, per strofinio dovuto all'eccitazione acustica, eccitano le cellule nervose in zone differenti a seconda della frequenza di eccitazione.

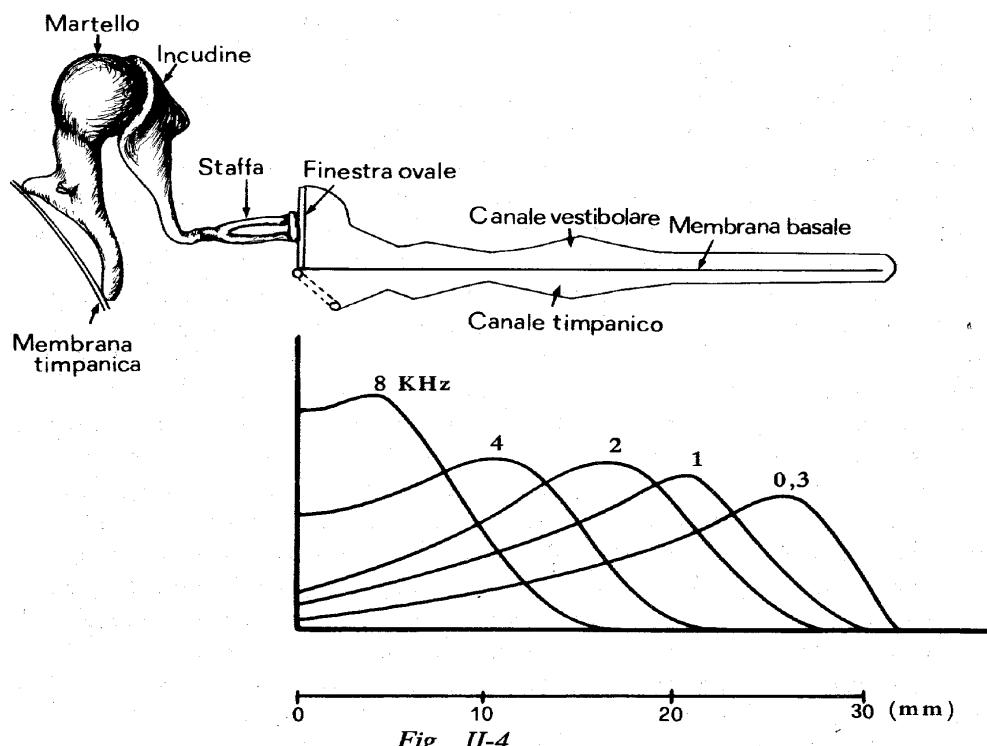


Fig. II-4

Figura 35: Excitazione delle terminazioni nervose

Le moderne teorie vedono l'orecchio come un sistema di trasmissione del segnale caratterizzato dalle tre funzioni di trasferimento relative alle tre sezioni dell'orecchio: *padiglione esterno*, *canale timpanico*, *orecchio medio*. Per l'orecchio esterno in corrispondenza del canale timpanico e del padiglione esterno si hanno le seguenti funzioni di trasferimento del segnale uditivo.

26 2. Sound Transmission Systems

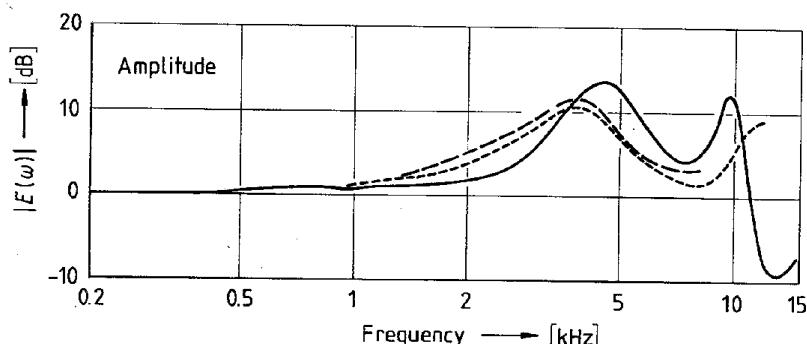


Fig. 2.14

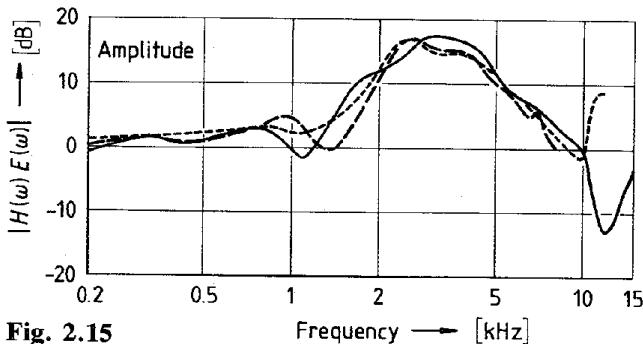


Fig. 2.15

Fig. 2.14. Transfer functions of the ear canal: (—) from [2.19]; (----) from [2.20]; and (—) from [2.18]

Fig. 2.15. Transfer functions from a sound source in front of the listener to the eardrum: (—) from [2.19]; (----) from [2.20]; and (—) from [2.18]

Figura 36: Funzioni di trasferimento dell'orecchio esterno.

Per l'orecchio medio la funzione di trasferimento determinata su cadaveri (*Békésy*) è del tipo qui rappresentato.

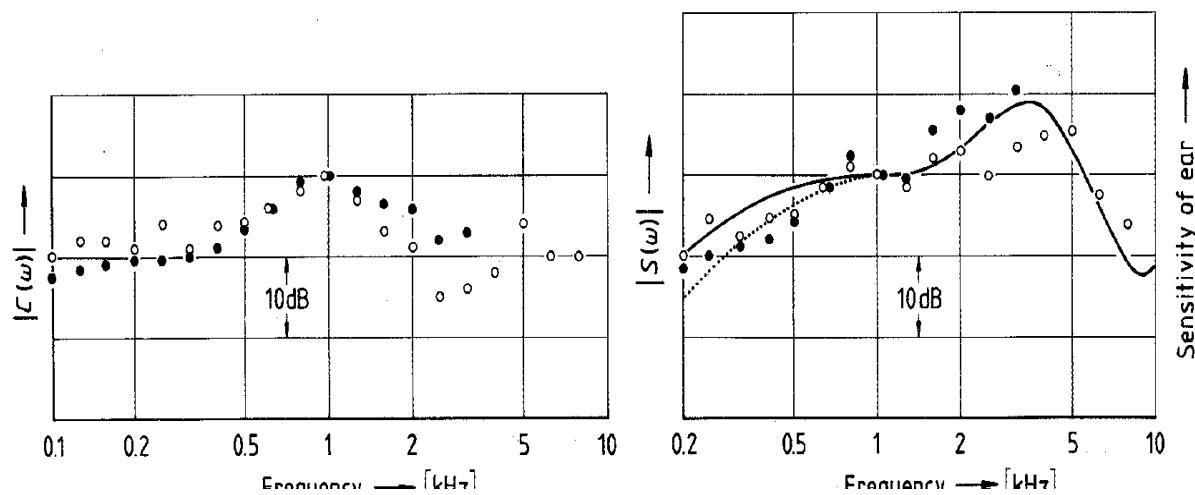


Figura 37: Funzione di trasferimento dell'orecchio interno (Von Békésy)

Per un campo sonoro libero si hanno le seguenti funzioni di trasferimento dal padiglione auricolare esterno al canale timpanico in funzione dell'angolo orizzontale di accesso.

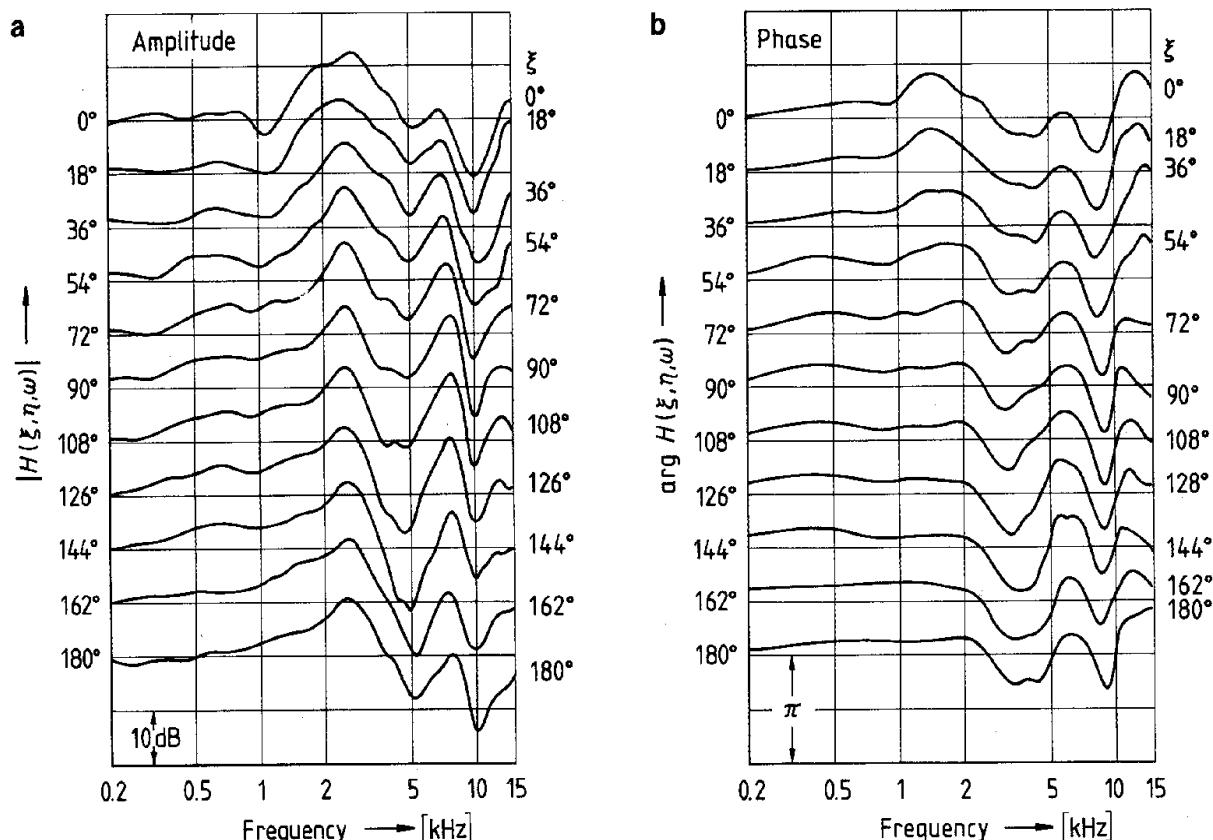


Fig. 2.13a, b. Transfer functions from a free field to the ear-canal entrance as a parameter of the horizontal angle ξ [2.18]. (a) Amplitudes; (b) phases

Figura 38: Funzioni di trasferimento del canale timpanico

La rete nervosa risulta composta come in figura da neuroni collegati fra loro da *assoni* (che hanno alla loro estremità le *sinapsi*).

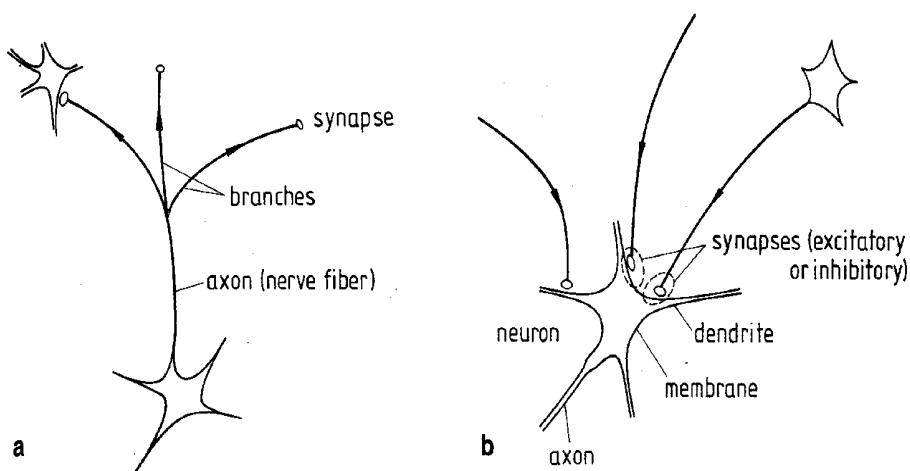


Fig. 2.24a, b. Connections of neurons. (a) Divergence; (b) convergence

Figura 39: Struttura di un neurone.

Il segnale neurale *pre* e *post-sinaptico* è rappresentato nelle seguente figura ove è visibile una variazione di potenziale da -70 a $+30\text{ mV}$ con un tempo di variazione di circa 3 ms .

Osservando la scala dei tempi si possono ritrovare giustificazioni alle frequenze caratteristiche dell'orecchio umano.

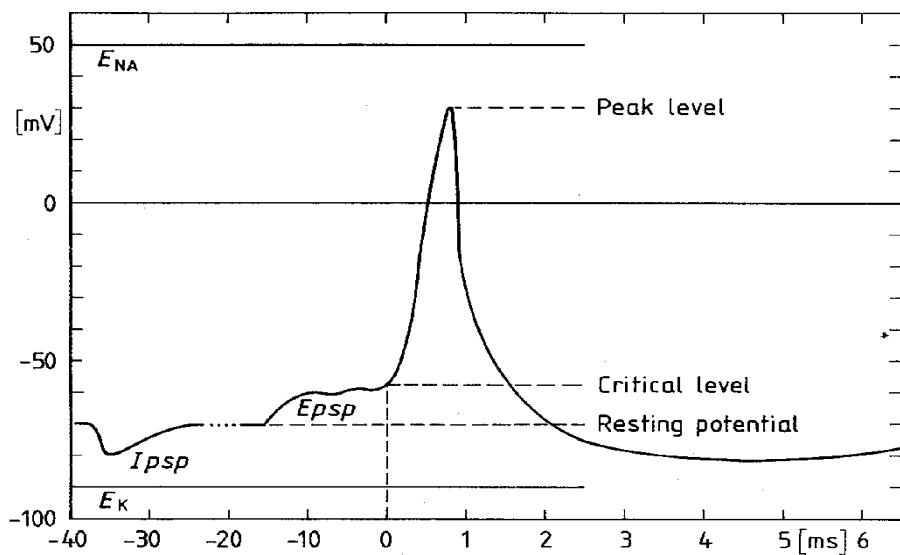


Figura 40: Segnale di attivazione sinaptico.

Agli inizi degli anni 'quaranta due studiosi americani della AT&T, Fletcher e Munson, costruirono l'abaco della Figura 41, detto **Audiogramma Normale** per suoni puri. In esso è riportata in basso, tratteggiata, la *soglia di udibilità* e poi, andando verso l'alto, le curve *isofoniche* definite in modo che ogni curva rappresenta, per ciascuna frequenza, il livello sonoro di pari effetto (*sensazione di forza*) di un suono a 1000 Hz . Questo livello è chiamati *Phon*.

Si osservi come l'orecchio umano medio sia capace di sentire in modo diverso sia al variare della frequenza che al variare del livello. Ogni curva *isofonica* ha un andamento a campana: sentiamo meglio le frequenze intermedie (quelle della zona del parlato da 500 a 2000 Hz) mentre sentiamo peggio le basse e le alte frequenze.

Inoltre al crescere dell'intensità sonora le curve si appiattiscono per effetto della maggiore tensione muscolare dei muscoli del *Timpano* e dello *Stabiale* che riducono la sensibilità dell'orecchio medio (i tre ossicini, staffa, incudine e martello).

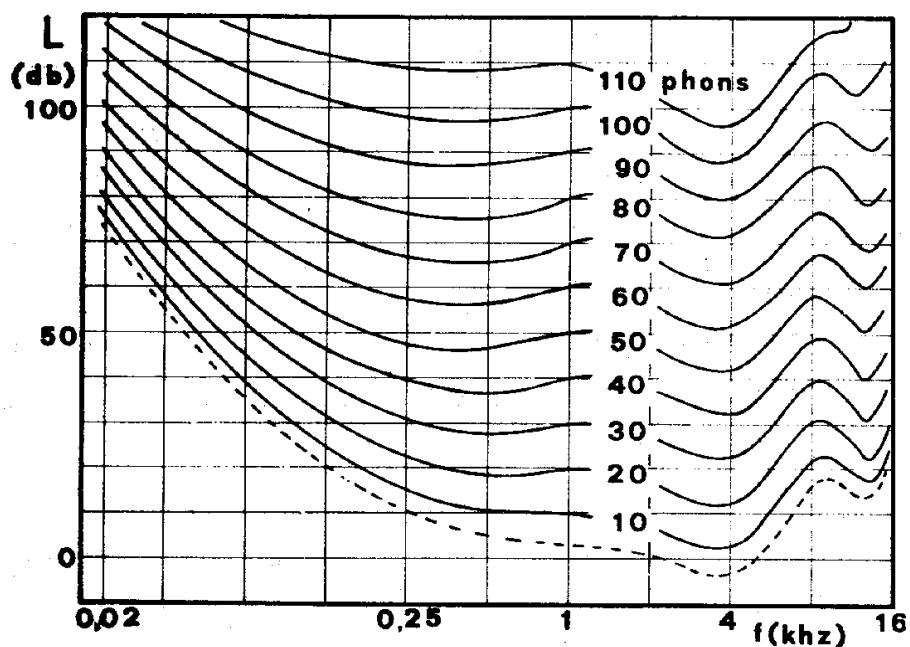


Figura 41: Curve isofoniche per toni puri (audiogramma normale di Fletcher - Munson)

L'audiogramma di Fletcher e Munson è stato per decenni l'unica informazione esterna sul funzionamento dell'orecchio umano. E' interessante osservare come, rendendo omogenei l'audiogramma (cioè capovolgendolo rispetto all'asse delle frequenze) e la curva relativa alla funzione di trasferimento dell'orecchio medio (Von Békésy, Figura 37) si ha la situazione di Figura 42.

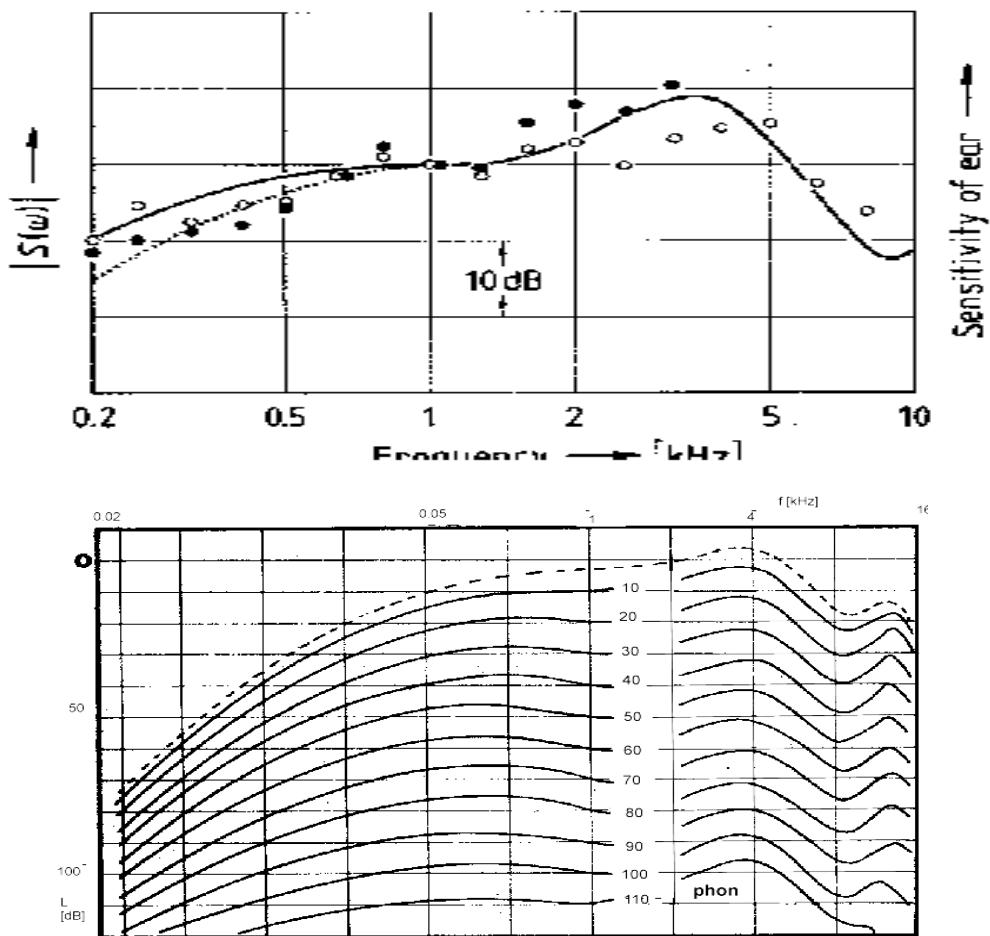


Figura 42: Confronto fra la funzione di trasferimento dell'orecchio medio e l'audiogramma normale

Sia la forma ondulante che l'andamento a campana risultano ora perfettamente spiegati: l'orecchio umano, per il solo fatto di essere costruito da madre natura in questo modo, si comporta come sintetizzato dall'audiogramma normale. La banda di frequenze fra 2500÷4000 Hz presenta una risonanza e quindi in questa zona si ha una maggiore sensibilità dell'orecchio che può portare ad effetti pericolosi fino alla parziale rottura delle terminazioni nervose (sordità parziale per effetto *Brüel*).

Si osservi che l'audiogramma normale ci informa su come l'organo di captazione del suono funziona, cioè come viene modificato il segnale prima di essere interpretato (sensazione) dal cervello. In pratica il nostro orecchio si comporta come un filtro *passa-banda* avente funzioni di trasferimento complesse date proprio dall'audiogramma di Fletcher e Munson. Di quest'osservazione si terrà conto quando parleremo del *fonometro*. È interessante osservare come l'energia acustica non arrivi all'orecchio esterno esclusivamente per via aerea dal padiglione auricolare ma anche attraverso le ossa del cranio.

Se noi chiudiamo il condotto uditivo esterno con un tappo o una cuffia avvertiamo immediatamente il suono attraverso la conduzione ossea. Questa avviene attraverso vari cammini di trasmissione: anche le vibrazioni prodotte dalle altre parti del corpo possono essere trasmesse alla membrana basale attraverso i tessuti corporei e la struttura ossea.

E' proprio a questa conduzione ossea che si deve la possibilità di percepire la direzione delle onde sonore in un piano verticale centrale rispetto alla sorgente. In pratica è la differenza di cammino dell'onda acustica fra orecchio destro e sinistro a far percepire al nostro cervello la direzione di provenienza del suono. Quando però l'orecchio è in un piano centrale simmetrico le condizioni di simmetria farebbero perdere la possibilità di individuare la direzione del suono se non ci fosse la possibilità di percepire anche differenze di cammino sonoro anche nel piano verticale per conduzione ossea.

3.2.1. SOGLIA UDITIVA

Nella Figura 43 è riportato l'audiogramma di un soggetto ricavato mediante il metodo AUDIO-CD della *Digital Recording*. Il metodo consiste nell'ascoltare un segnale di frequenza fra 20 e 20 kHz e di intensità calibrata e variabile da 0 a 80 dB e di segnare il livello di inizio ascolto (soglia). È anche riportato l'andamento della soglia normale come indicato dalla ISO e dalla Società di Audiologia.

L'audiogramma del soggetto presenta un innalzamento superiore ai 10 dB alle frequenze centrali e una apparente sordità alle frequenze superiori ai 12 kHz.

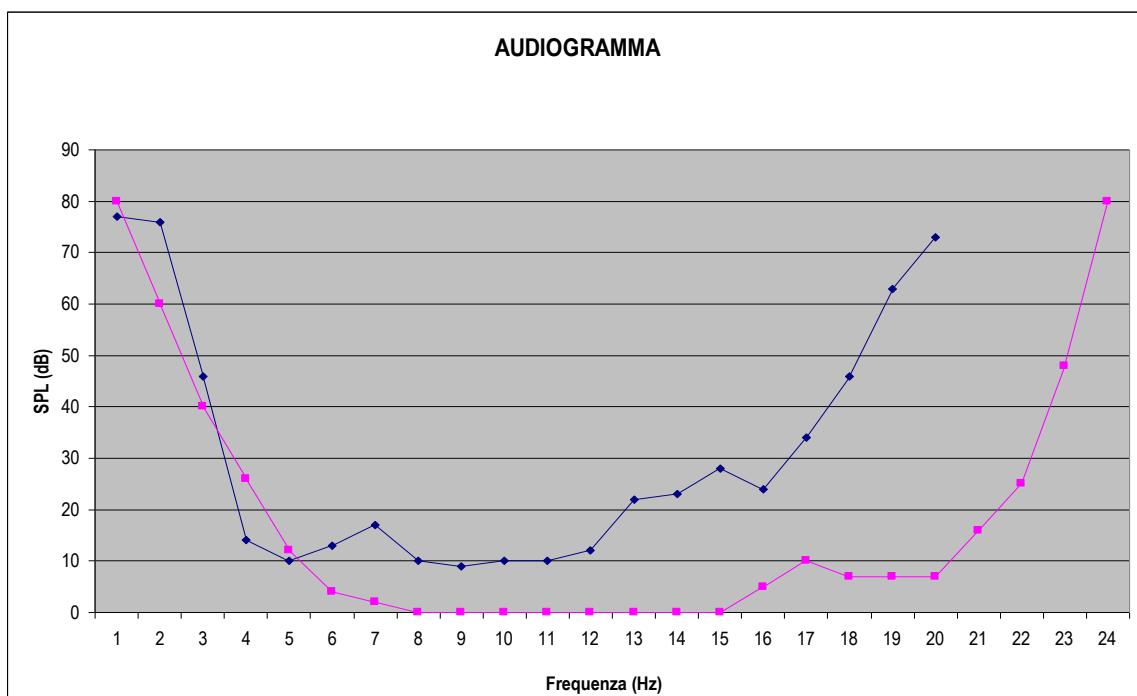


Figura 43: Curva di udibilità reale di un soggetto e confronto con la curva di soglia standard

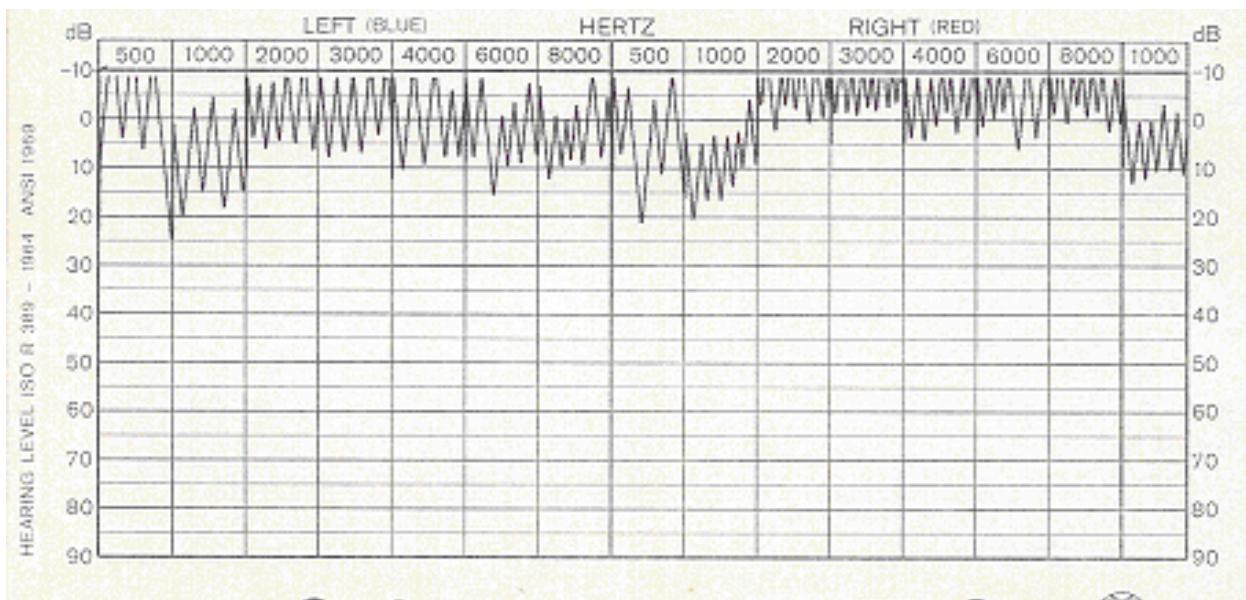


Figura 44: Esempio di audiogramma di un soggetto normale

Lo scostamento della curva di udibilità reale da quella standard è sintomo di perdita uditiva (sordità) attribuibile ad una serie di cause: l'età (che porta la presbiacusia), un danno da rumore esterno per esposizione prolungata per attività lavorativa,

Si esamineranno le problematiche del rischio uditivo nel prosieguo.

3.2.2. PERCEZIONE SOGGETTIVA DEL SUONO

La valutazione soggettiva del suono da parte dell'uomo è influenzata dall'ampia gamma di pressioni e frequenze entro la quale l'orecchio percepisce segnali utili.

L'area di sensibilità acustica, ossia l'insieme di valori all'interno del quale l'orecchio può funzionare, è delimitata a bassi livelli di pressione sonora dalla *soglia di udibilità* e ad alti livelli dalla *soglia di non-comfort, disturbo, dolore* (oltre i 120 dB).

L'organo dell'udito ha però delle limitazioni anche nella percezione delle frequenze: il "range" delle frequenze udibili viene denominato *campo di udibilità*.

Per le alte frequenze si usa convenzionalmente fissare il limite dei 20.000 Hz (anche se questo limite può variare molto da individuo ad individuo) mentre per le basse frequenze il limite è di 20 Hz; al di sotto le onde sonore si percepiscono come vibrazione del corpo piuttosto che come sensazione sonora vera e propria.

Abbiamo detto che la minima pressione sonora di un tono capace di provocare una sensazione acustica è chiamata soglia di udibilità.

Questa è funzione della frequenza ma dipende anche dal modo in cui viene riprodotto il suono (cuffie, altoparlanti) e dal punto in cui viene misurata la pressione sonora.

Una soglia misurata in presenza di altre fonti di rumore viene definita *mascherata*: è la pressione sonora alla quale un suono coperto da altri, cioè mascherato, comincia ad essere percepito.

La soglia di non comfort è stata ricavata sperimentalmente e fissata intorno ai 120 dB, livello con il quale si prova una forte sensazione di fastidio.

Intorno ai 110 dB è fissata la soglia di disturbo con sensazioni di prurito dell'apparato uditivo; a 120÷130 dB si raggiunge la soglia del dolore che può comportare la sordità temporanea o permanente anche per brevi esposizioni.

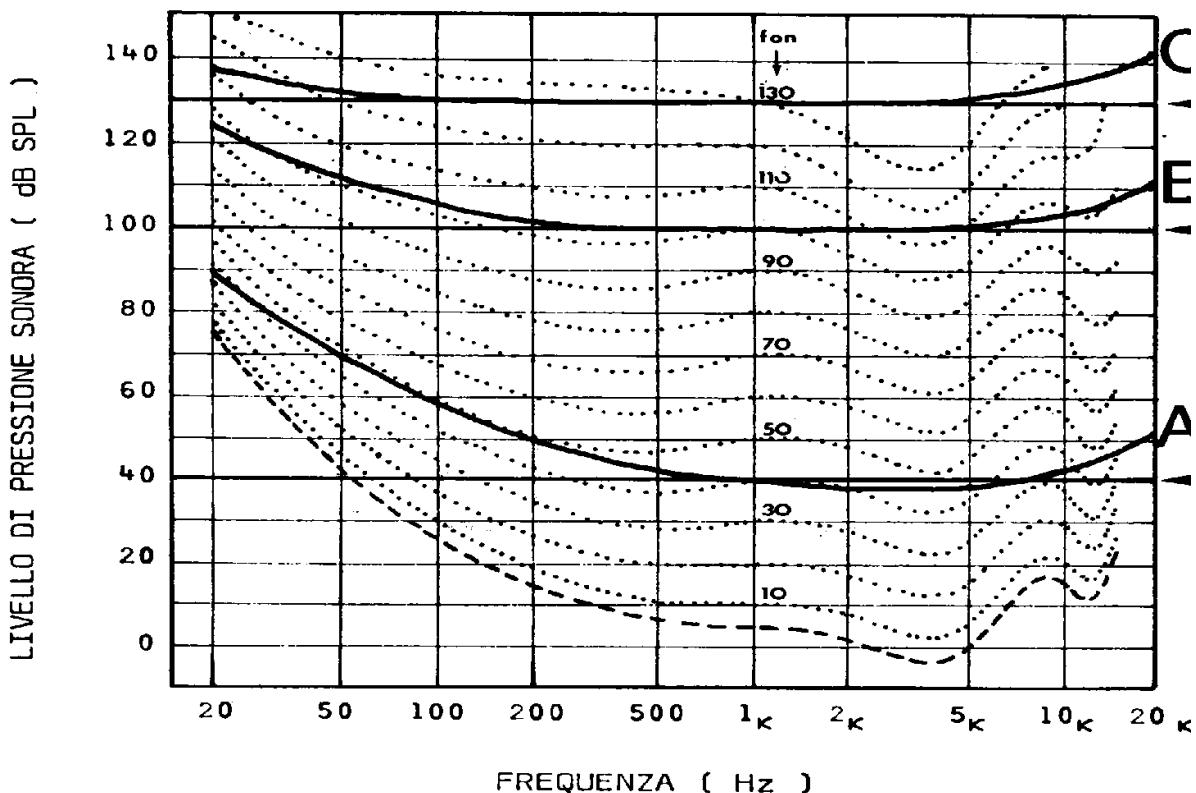


Figura 45: Confronto fra le curve fonometriche e l'Audiogramma normale

3.3. LIVELLI DI PRESSIONE PONDERATI- LE SCALE FONOMETRICHE

Nella valutazione del rumore si ha spesso a che fare con i cosiddetti livelli ponderati. I moderni strumenti per la misurazione presentano infatti dei filtri di pesatura denominati *A*, *B*, *C*. Esiste anche una scala denominata *D* utilizzata per misure di rumorosità in zone aeroportuali.

Come abbiamo già visto, la sensibilità dell'udito è incostante col modificarsi della frequenza e del livello sonoro; si presenta allora, per chiunque voglia eseguire delle misure di rumore attendibili, la necessità di adottare una strumentazione che emuli la caratteristica dell'organo uditivo.

La sensibilità dello strumento viene così regolata secondo tre curve conosciute come *curve di ponderazione A, B, C* che presentano andamenti della sensibilità leggermente diversi tra di loro anche se tutti decrescenti verso gli estremi del campo uditivo.

Le curve di ponderazione derivano da considerazioni sull'audiogramma di *Fletcher e Munson* e presentano una forte analogia con le isofoniche misurate in *Phon*, vedi Figura 45.

Il fonometro è costituito da sezioni elettroniche ben precise: microfono, amplificatore di segnali di ingresso, filtri, amplificatore di uscita e indicatore di segnali (sia analogico che digitale). Nella Figura 46 è riportata una schematizzazione di assemblaggio di un moderno fonometro capace di effettuare anche analisi spettrali (FFT, bande larghe,...) di un suono.

I livelli misurati con queste correzioni si indicano in dB anche se talvolta può succedere di incontrare la forma dB(A) per il livello ponderato A.

Quest'ultimo è il più utilizzato perché ritenuto dagli addetti maggiormente indicativo nelle misurazioni più comuni e quello meglio correlato al disturbo.

Siamo arrivati così a definire univocamente il disturbo attraverso una sola grandezza che lega assieme il dato oggettivo, la misura del rumore come ci arriva dalle sorgenti, al dato soggettivo, ciò che un ascoltatore medio percepisce come suono.

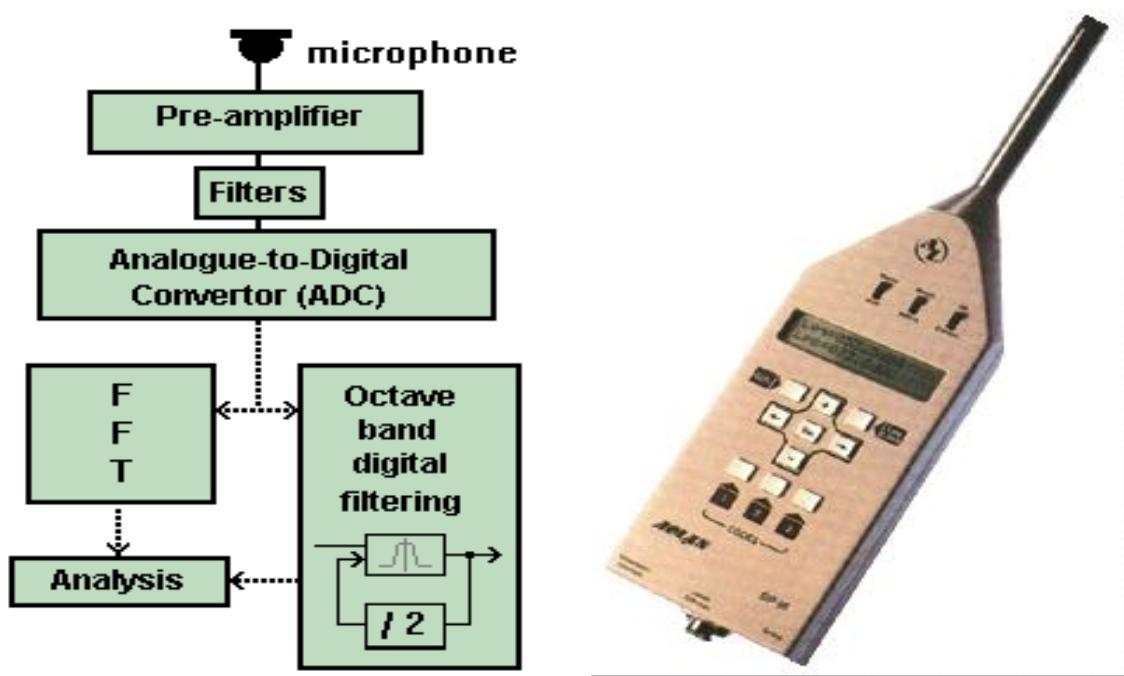


Figura 46: Diagramma a blocchi di un fonometro e un moderno modello commerciale

La scelta delle curve A,B e C si giustifica con la necessità di simulare il comportamento dell'orecchio umano medio ai livelli bassi, medi e alti, come rappresentato in Figura 45.

Nella Tabella 6 si riporta l'azione di filtraggio del fonometro (Scala A) e in Figura 47 si ha la modificazione spettrale (a banda di ottava) dovuta alla curva di ponderazione A.

Si osservi come il segnale originario resta immutato nella banda di ottava a 1000 Hz mentre viene attenuato sia alle basse che alle alte frequenze. I valori in dB differiscono di circa 5 dB.

Ricordando che l'azione dei filtri di pesatura è quella di simulare il comportamento dell'orecchio umano si conclude che l'effetto di captazione e trasmissione sonora da parte dell'orecchio comporta un'attenuazione non trascurabile del segnale originario. L'orecchio è, a tutti gli effetti, un filtro passa banda con attenuazione pronunciata verso le frequenze di taglio.

Frequency (Hz)	road traffic noise spectrum dB	A - weighting	road traffic noise spectrum dB(A)
125	106.4	-16.1	90.3
250	104.6	-8.6	96
500	101.7	-3.2	98.5
1000	99.9	0	99.9
2000	98	1.2	99.2
4000	93.1	1	94.1
global level	110.2 dB	spectra plots	105.2 dB(A)

Tabella 6: Attenuazioni dei filtri di pesatura A

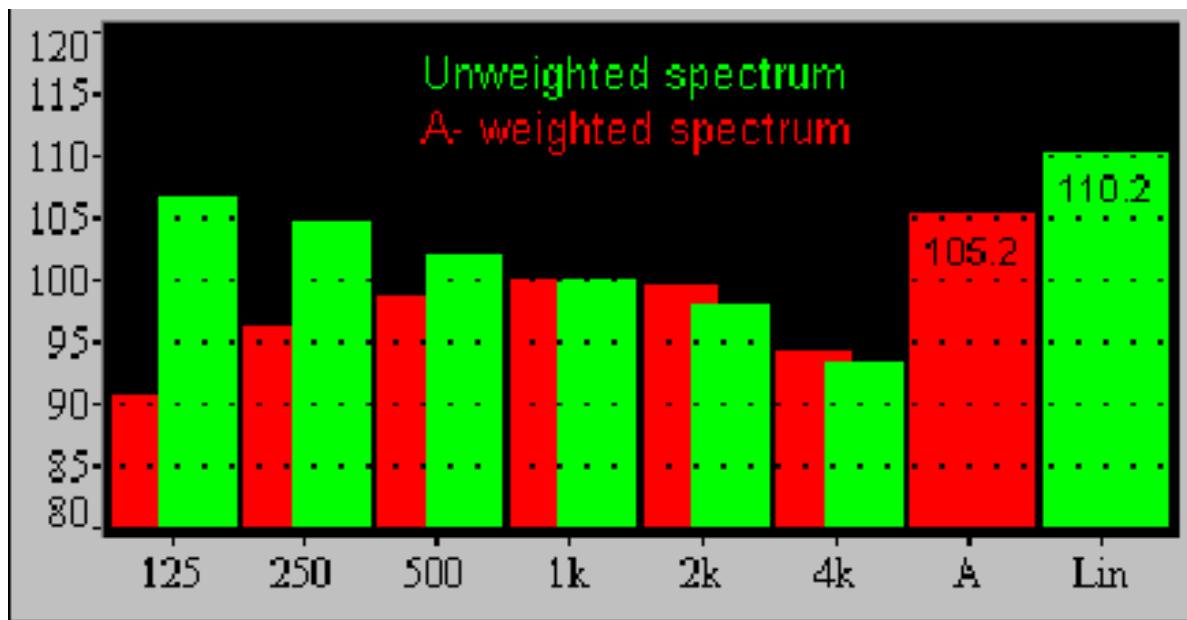


Figura 47: Spettro a banda di ottava del segnale non filtrato e di quello filtrato

3.4. LIVELLO EQUIVALENTE (LEQ)

Il livello equivalente, per il suo significato fisico, viene quasi universalmente utilizzato come riferimento nelle varie normative in materia di inquinamento acustico ambientale.

Tale parametro, essendo associato all'energia sonora di un fenomeno acustico, viene influenzato dai livelli sonori a maggior contenuto energetico ovvero dai livelli di picco; per questo motivo risulta un buon descrittore del rumore, così come il DPCM 1/3/91 lo ha definito.

L'andamento storico del L_{eq} orario offre delle informazioni interessanti, come per esempio la possibilità di distinguere se le sorgenti che lo hanno causato sono naturali o artificiali.

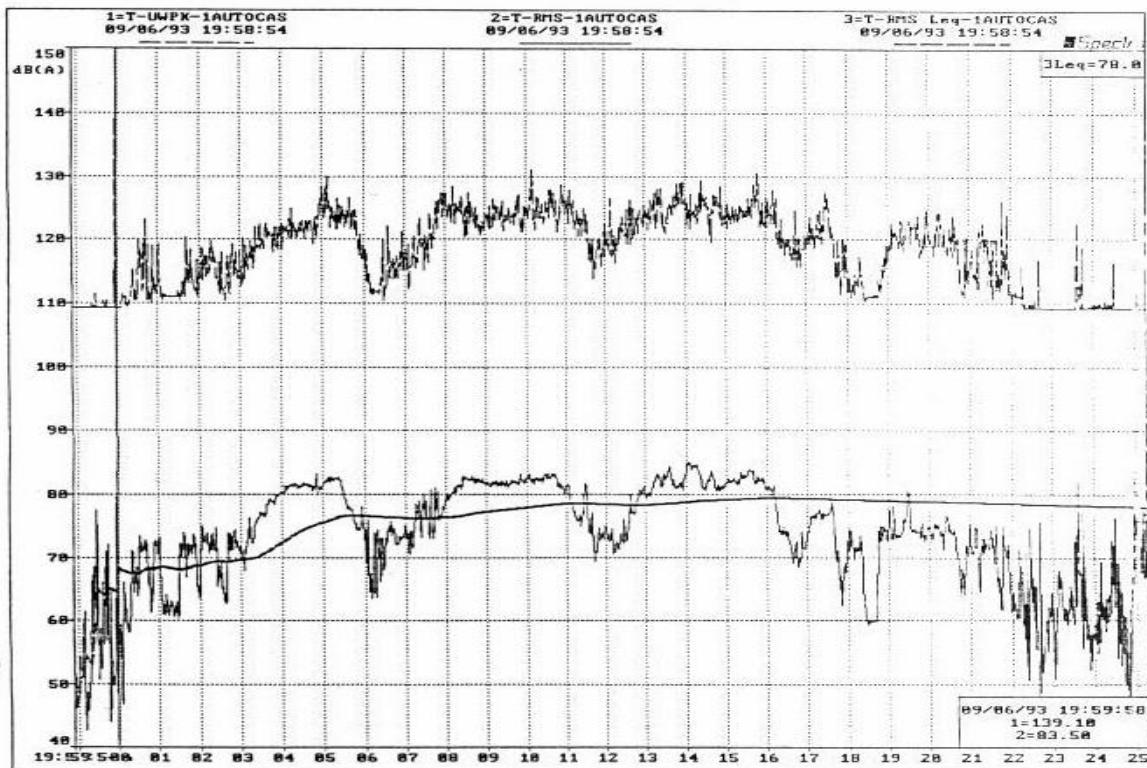


Figura 48: Andamento del LPS, Leq , L picco non pesato.

Il Livello equivalente è definito dalla relazione:

$$Leq_A = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \quad [52]$$

ove:

T = tempo di osservazione

p_t = pressione sonora istantanea ponderata A

p_0 = pressione sonora di riferimento

Nella Figura 48 si ha l'andamento temporale del livello di pressione sonora (in dB) e del livello equivalente (calcolato per un intervallo di 1 s e riportato sullo stesso diagramma del LPS): si può osservare come i picchi non siano più visibili nella sequenza temporale di Leq ma solo i valori medi.

3.5. LOCALIZZAZIONE ACUSTICA

L'ascolto del suono dalle due orecchie non serve solamente ad avere un effetto stereofonico del suono ma anche (e forse soprattutto) alla sua localizzazione spaziale.

Va precisato, inoltre, che i due lobi del cervello non lavora allo stesso modo ma quello di sinistra è specializzato nell'elaborazione di suoni complessi (ad esempio consonanti) mentre quello di destra elabora i suoni più semplici (ad esempio le vocali). I

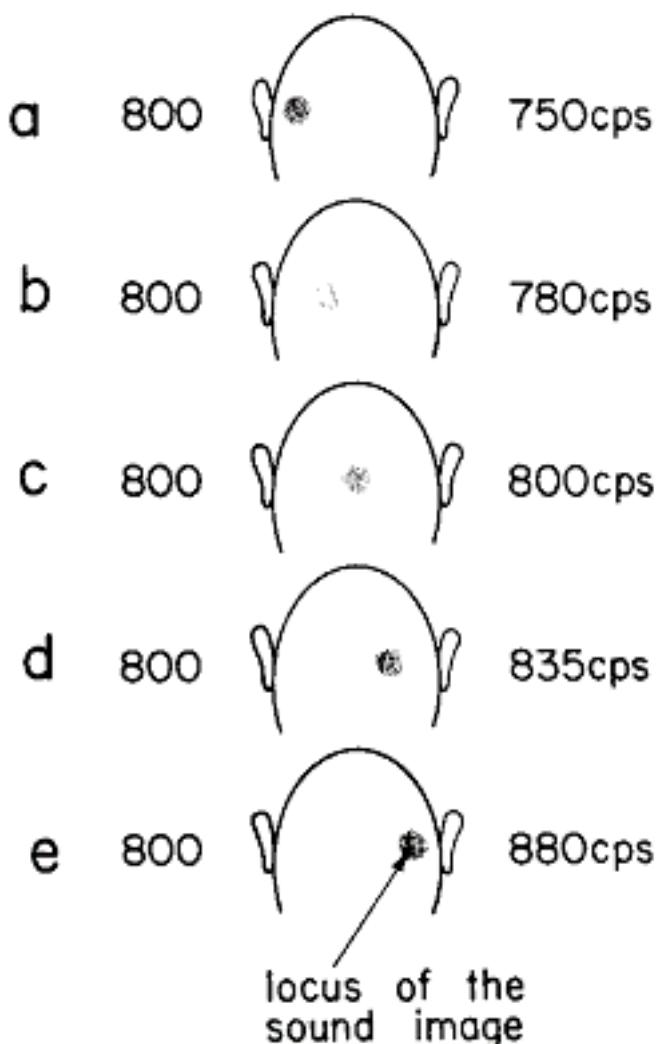


Figura 49: Localizzazione della sorgente sonora

Il nostro cervello elabora i segnali che arrivano dalle due orecchie e dal loro sfasamento temporale determina la direzione di provenienza con buona precisione.

Qualora il suono provenga frontalmente vengono utilizzati anche i segnali che provengono dalle vibrazioni corporee (ad esempio della testa o delle cartilagini dell'orecchio) per determinare la posizione verticale della sorgente.

Questa capacità di localizzazione acustica è oggi molto utilizzata negli effetti *surround* dei sistemi di riproduzione sonora.

In questo caso si fa variare di poco la fase dei segnali provenienti dalle casse acustiche in modo da ottenere una *sensazione* equivalente allo spostamento della sorgente attorno al capo.

Gli studi di psicoacustica hanno portato a meglio comprendere l'interpretazione sonora da parte del nostro cervello e a creare dispositivi artificiali (protesi acustiche) con prestazioni sempre più vicine a quelle dell'orecchio. E' recente la notizia dell'applicazione di protesi elettroniche che, sostituendo l'orecchio, hanno consentito ai soggetti non udenti di sentire.

Si osservi, ancora, che il cervello si sincronizza con l'onda acustica che per prima raggiunge l'orecchio, cioè con l'onda diretta. Le onde successive a questa sono considerate di rinforzo se il loro ritardo non è superiore a 200 ms. Oltre tale limite il cervello considera i suoni separati e ciò giustifica la formazione dell'*eco*.

Oltre all'azione di rinforzo sopra citata, il ritardo temporale fra la prima onda e le successive gioca un ruolo fondamentale nella psicoacustica del suono. Si è mostrato, infatti, che le onde aventi un ritardo di 15÷25 ms (corrispondenti a riflessioni da superfici distanti entro 6÷8 m dall'ascoltatore e che sono dette *onde di riflessione laterale vicine*) oltre a rafforzare l'onda primaria contribuiscono a creare una sensazione di *spazialità* (orizzontale o verticale a seconda del piano di provenienza) e quindi provocano una sensazione di *allargamento della scena*. Il suono sembra avvolgere l'ascoltatore che ne trae anche una sensazione di benessere acustico, di piacere dell'ascolto.

E' per questo motivo che l'ascolto della musica dal vivo è ben diverso da quello di una registrazione, per quanto fedele, fatta in cuffia: si perdono tutte le informazioni di spazialità (vedi capitolo sull'Acustica delle Sale) che fanno parte del suono originario.

Le riflessioni successive ai primi 25 ms sono onde di riverbero che, pur fornendo un rafforzamento del suono iniziale, non rivestono l'importanza fondamentale delle riflessioni vicine.

3.6. SPECIALIZZAZIONE DELL'UDITO

Recenti studi hanno mostrato una specializzazione dell'udito nel senso che i suoni complessi vengono sintetizzati nella parte destra del cervello mentre quelli più semplici dalla parte sinistra.

Ciò significa, visti i collegamenti incrociati, che l'orecchio sinistro è specializzato nell'ascolto di suoni ad alto contenuto informativo (ad esempio le consonanti) mentre l'orecchio destro è specializzato nei suoni semplici (ad esempio le vocali). L'ascolto complessivo del suono è in pratica proporzionale alla correlazione mutua dei segnali captati dalle due orecchie.

Se si effettua l'autocorrelazione di un segnale secondo la relazione:

$$() \lim_{\tau} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} p(t) p(t-\tau) dt$$

L'autocorrelazione di un segnale al tempo iniziale è pari alla potenza del segnale.

Y. Ando ha studiato l'andamento della funzione di autocorrelazione per alcuni segnali musicali e per la voce umana (lettura di una poesia da parte di una donna), vedi Tabella 7.

I segnali sono indicati in ordine a partire dalla lettera A fino alla lettera K. Il parlato è indicato separatamente.

Procedendo dalla lettera A verso la K si hanno segnali (brani musicali) via via più ricchi di note e più rapidi. Si passa, infatti, da un *parane* di Gibbons (una svilolinata settecentesca) al IV movimento della sinfonia K-V 551 Jupiter di Mozart (criticata alla presentazione come musica eccessivamente ricca di note). Gli andamenti delle funzioni di autocorrelazione sono riportati nella Figura 50.

Sound source*	Title	Composer or writer	τ_e^{\dagger}	[ms]	$(\tau_e)_{\min}^{\ddagger}$
Music Motif A	Royal Pavane	Orlando Gibbons	127	(127)	125
Music Motif B	Sinfonietta, Opus 48; IV movement	Malcolm Arnold	43	(35)	40
Music Motif B(L + R)	Sinfornietta, Opus 48; IV movement	Malcolm Arnold		45	
Music Motif C	Symphony No. 102 in B flat major; II movement	Franz J. Haydn		(65)	
Music Motif C(L + R)	Symphony No. 102 in B flat major; II movement	Franz J. Haydn		70	
Music Motif D	Siegfried Idyll; Bar 322	Richard Wagner		(40)	
Music Motif E	Symphony in C major, K-V, no. 551, IV movement	Wolfgang A. Mozart	38		
Music Motif F	§	Tsuneko Okamoto	105		
Music Motif G	§	Tsuneko Okamoto	145		
Music Motif K	Karesansui	Hozan Yamamoto	220		35
Speech S	Poem read by a female	Doppo Kunikida	10	(12)	

Tabella 7: Brani musicali analizzati da Y. Ando

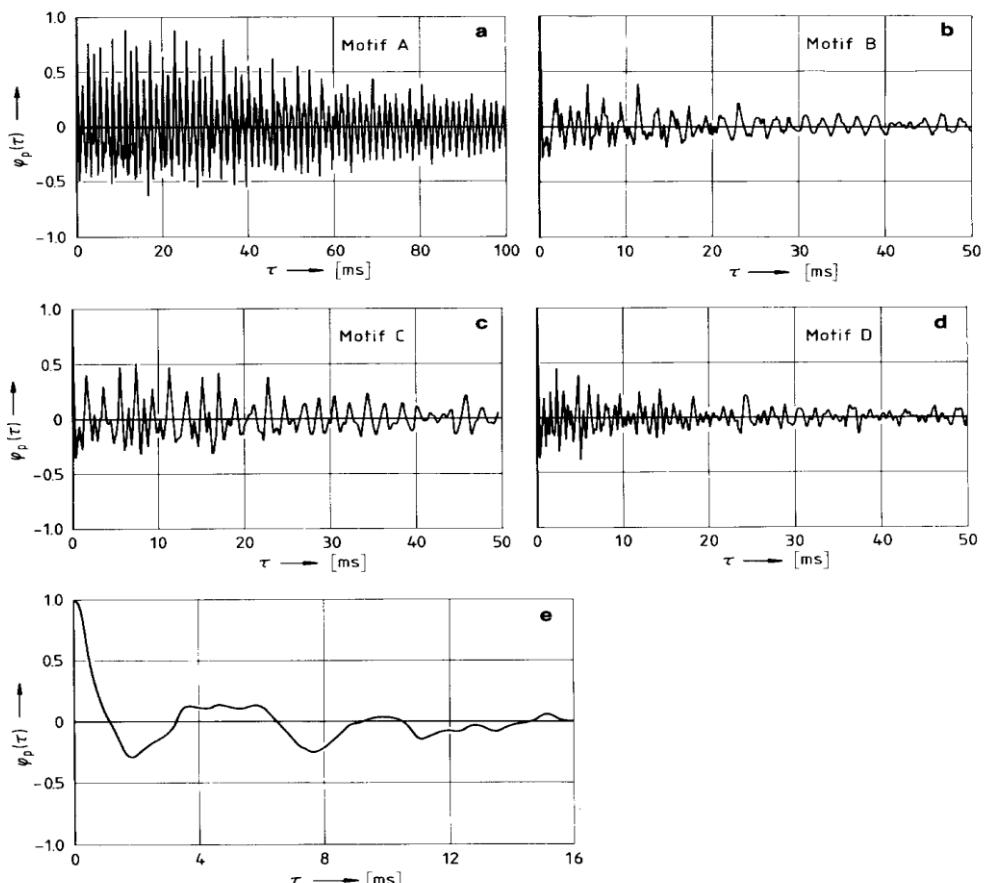


Fig. 2.2a – e. Measured autocorrelation functions of music [2.4] and speech [2.5]. The effective duration of autocorrelation function is defined by the delay τ_e at which the envelope of the normalized autocorrelation function becomes 0.1. (a) Music motif A, Royal Pavane by Gibbons, $\tau_e = 127$ ms; (b) music motif B, Sinfonietta, Opus 48, III movement by Malcolm Arnold, $\tau_e = 35$ ms; (c) music motif C, Symphony No. 102 in B flat major, II movement: Adagio by Haydn, $\tau_e = 65$ ms; (d) music motif D, Siegfried Idyll, Bar 322 by Wagner, $\tau_e = 40$ ms; (e) Continuous speech, a female reading a poem, $\tau_e = 12$ ms

Figura 50: Tempi di autocorrelazione dei brani di Y. Ando

Le funzioni di autocorrelazione per alcuni tipi di brani musicali e per una lettura di una poesia sono riportate in figura. Il **tempo di autocorrelazione** è quello necessario a far ridurre il valore della funzione di autocorrelazione all'1% del valore massimo. Un tempo di correlazione basso indica la necessità di una maggiore rapidità nella comprensione del segnale. **Il parlato ha tempi di autocorrelazione più bassi rispetto ai brani musicali** e per questi i brani più rapidi hanno tempi più ridotti dei brani lenti.

Il brano a) (*parane* del settecento) ha un tempo di autocorrelazione di circa 100 ms, il brano b) (*brano sinfonico lento*) circa 50 ms, il brano d) (tratto dalla *Jupiter* di Mozart) ancora 50 ms mentre la lettura della poesia, brano e), presenta un $t=15$ ms.

I brani F e G della Tabella 7 sono musiche di T. Okamoto e sono riportati a fianco sia lo spartito che l'andamento delle funzioni di autocorrelazione.

Y. Ando ha poi definito la funzione di correlazione incrociata fra orecchio sinistro e destro, detta IACC, che risulta molto importante per la definizione della qualità acustica di una sala.

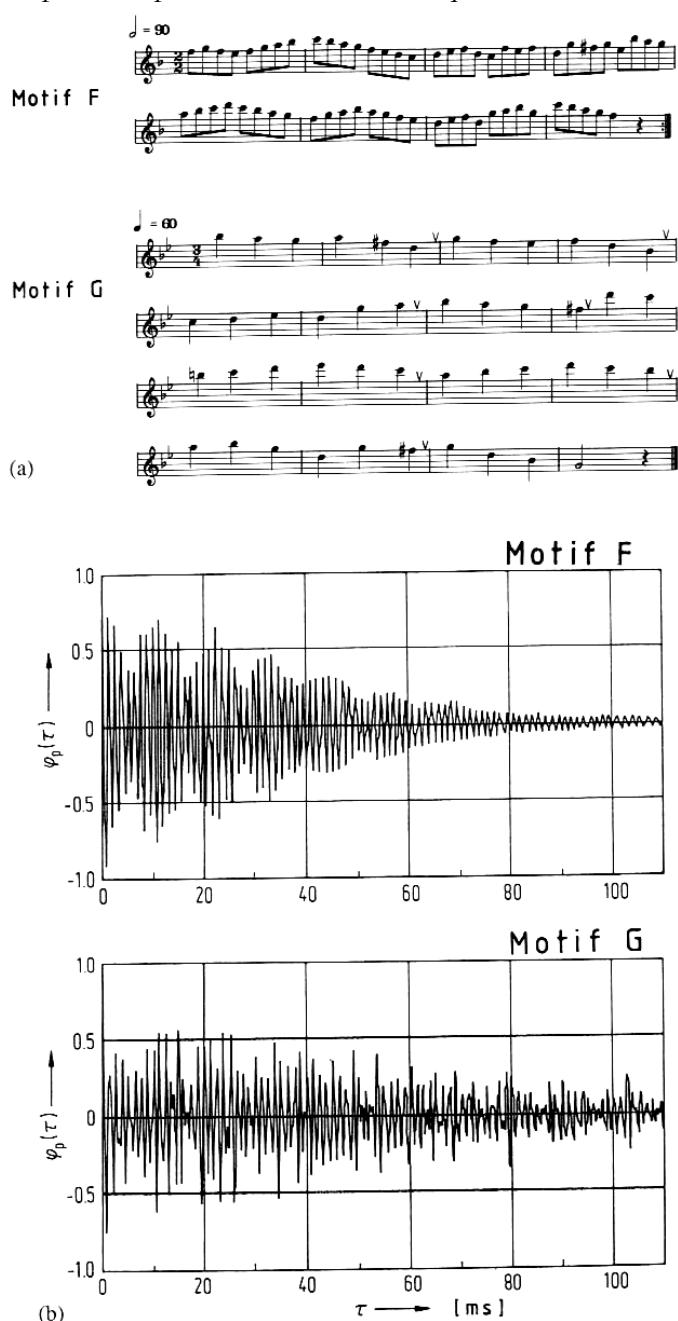


Figura 51: Brani F e G di Y. Ando e loro funzioni di autocorrelazione

4. TRASMISSIONE DEL SUONO

La trasmissione del suono è determinata da tre effetti fondamentali: l'assorbimento, la riflessione e la trasmissione attraverso il mezzo. Si tralascia qui la diffrazione generata allorquando le dimensioni fisiche del corpo sono multiple o sottomultiple della lunghezza d'onda incidente.

4.1. ASSORBIMENTO, RIFLESSIONE, RIVERBERAZIONE, DIFFRAZIONE E RIFRAZIONE

Fino ad ora abbiamo parlato del suono utilizzando tre elementi fondamentali per la sua propagazione: il trasmettitore, il mezzo e il ricevitore. Ora però proviamo a vedere cosa succede se nel proprio cammino l'onda sonora incontra un ostacolo qualsiasi.

Prendiamo una parete che separa il mezzo di trasmissione in due ambienti (Figura 52), l'energia sonora costituente il suono colpendo la parete si distribuisce in modo tale che una prima frazione di energia viene riflessa e rinviate al primo ambiente, un'altra frazione penetra nella parete e per particolari proprietà elastiche della parete stessa può essere restituita al primo ambiente, una terza parte si trasmette all'interno della parete con una velocità dipendente dal materiale stesso e viene trasformata in energia termica, una quarta parte attraversa la parete e passa al secondo ambiente seguendo la via di piccole o grandi cavità presenti nel materiale oltre che per vibrazione della parete stessa.

Il bilancio energetico dell'energia sonora incidente su di una parete ci permette di capire quali fenomeni interagiscono nella propagazione del suono attraverso un ostacolo.

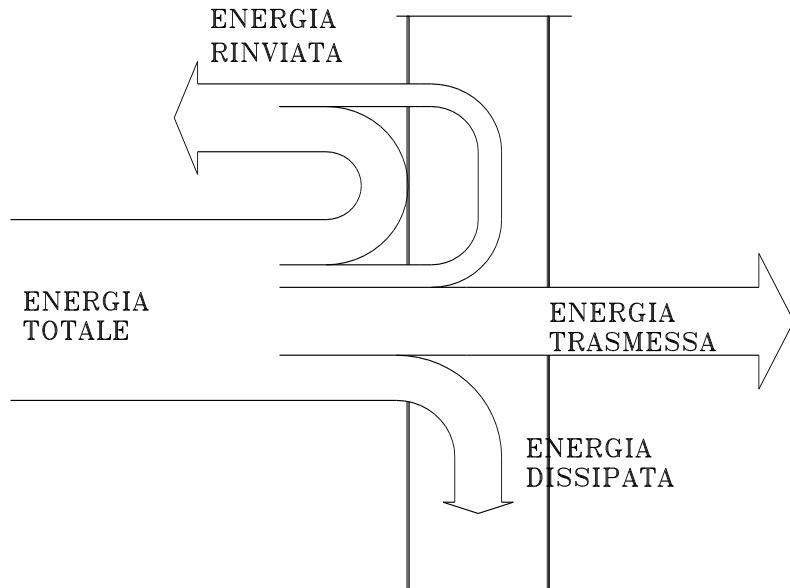


Figura 52: Bilancio di energia sonora

4.1.1. ASSORBIMENTO

Come abbiamo detto precedentemente una parte di energia sonora penetra all'interno dell'ostacolo e viene dissipata trasformandosi in calore. La percentuale di energia assorbita dalla parete si chiama fattore di *assorbimento*. Il fattore assorbimento di un materiale dipende dalla natura del materiale stesso, dalla frequenza del suono incidente e dall'angolo di incidenza con cui le onde sonore colpiscono l'ostacolo, vedi Figura 53. Un materiale poroso e flessibile è più assorbente di un materiale rigido e compatto, la porosità permette all'onda sonora di produrre delle oscillazioni di pressione all'interno dei pori cosicché il movimento dell'aria presente in essi provoca attrito e quindi una dissipazione di energia sotto forma di calore. Solitamente questo meccanismo permette l'assorbimento delle alte frequenze, mentre quelle più basse, mettendo in vibrazione il materiale stesso provocano la dissipazione per calore dell'energia prodotta per vibrazione.

Materiali compatti.
Le pareti spesse, costituite da mattoni pieni o da calcestruzzo, lisce e

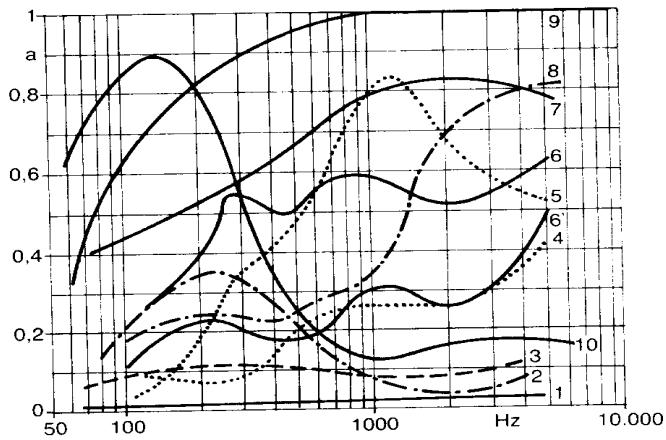


Fig. 2.23 – Fattori di assorbimento apparente.

1. Muro intonacato, spess. cm 45. - 2. Rivestimento in legno compensato, $s = 3$ mm, intercapdine d'aria di cm 5. - 3. Rivestimento in legno liscio, $s = 16$ mm, su telaio di 35 mm di interasse. - 4. Tappeto di pelo, $s = 10$ mm, su pavimento di cemento. - 5. Velluto drappeggiato, interasse. - 6. Lastre di pasta di legno, $s = 18$ mm. - 6'. id., $s = 6$ mm. - 7. Lana di massa $0,47 \text{ kg/m}^2$. - 8. Lastre di fibre di legno, $s = 20$ mm. - 9. Pubblico fitto. - 10. Rivestimento in legno vetro.
- compensato, $s = 3$ mm, intercapdine di cm 5 con lana di vetro inserita.

Figura 53: Andamento di alcuni fattori di assorbimento per materiali da costruzione.

4.1.2. RIFLESSIONE

Considerando una superficie riflettente di grandi dimensioni rispetto all'onda sonora, la riflessione del suono segue le stesse leggi fisiche della riflessione della luce.

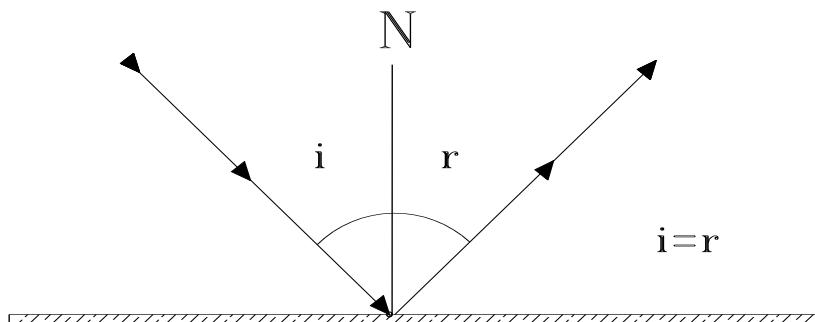


Figura 54: Riflessione di un'onda sonora

Così gli angoli formati dall'onda sonora incidente con l'onda sonora riflessa e la normale alla superficie sono uguali.

4.1.3. TRASMISSIONE E POTERE FONOISOLANTE

La frazione di energia trasmessa dalla parete è data dal *fattore di trasmissione*. Spesso, però, si utilizza una grandezza ad esso correlata detta *Potere Fonoisolante* (R) e che è definita come:

$$R = 10 \log \frac{1}{t} \quad [53]$$

Di questa grandezza si parlerà a proposito dei requisiti acustici degli edifici..

Se indichiamo con L_1 ed L_2 , vedi Figura 55, i livelli nell'ambiente dove è presente la sorgente e nell'ambiente contiguo, con S la superficie del tramezzo divisorio, allora si può scrivere, a regime stazionario, il seguente bilancio energetico:

$$\frac{I_1 S_t}{a_i S_i} = [54]$$

cioè che la potenza trasmessa dall'ambiente 1 contenente la sorgente sonora ($I_1 S_t$) sia pari alla potenza sonora assorbita dalle pareti presenti nell'ambiente 2. Applicando la definizione [53] e ricordando la definizione di livello di intensità sonora si ottiene la relazione:

$$R = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{S}{a_i S_i} \quad [55]$$

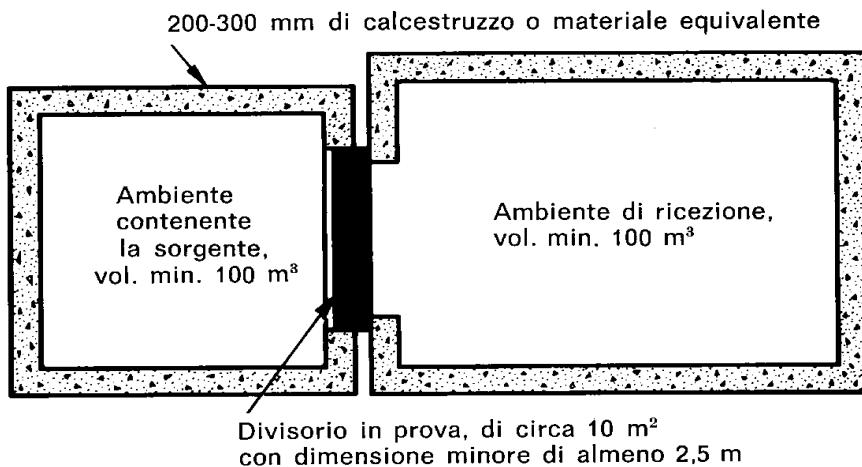


Figura 55: valutazione del potere fonoisolante di un divisorio

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori del potere fonoisolante per alcuni materiali di uso comune. Osservando i dati relativi ai vari materiali si può tracciare un andamento tipico del potere fonoisolante dato nella Figura 56.

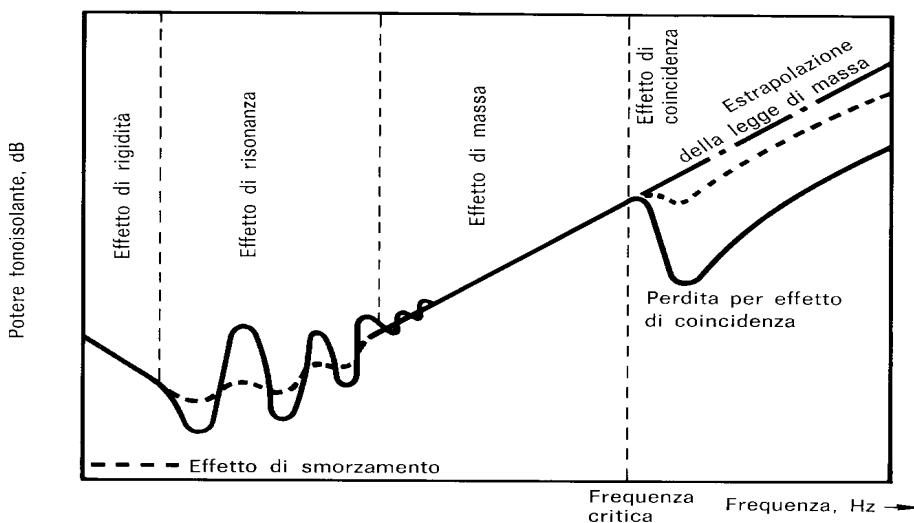


Figura 56: Andamento del potere fonoisonante

Alla basse frequenze si hanno fenomeni dissipativi dovute alle frequenze proprie dei materiali e pertanto in questa zona si utilizzano nelle applicazioni. Nella zona centrale si ha un andamento lineare e il potere fonoisolante cresce linearmente con il logaritmo della frequenza (*legge di massa*):

$$R = 18 \log f + 42.5 \quad [56]$$

ove R è la densità superficiale del materiale ed f la frequenza considerata. In Letteratura si hanno diverse relazioni che tengono conto di alcune peculiarità quali l'angolo di incidenza delle onde acustiche, il campo acustico (sferico o piano).

Si rimanda ai Manuali specializzati per altri riferimenti ed approfondimenti. Si osservi che in base alla [56] ad un raddoppio della frequenza corrisponde un incremento di:

$$18^* \log 2 = 5.4$$

del potere fonoisolante. Spesso si arrotonda questo incremento in 6 dB. Ne segue che se si conosce il potere fonoisolante alla frequenza di 1000 Hz allora si ottiene il valore a 500 Hz sottraendo 6 dB e quello a 2000 Hz aggiungendo 6 dB al valore iniziale.

Quest'osservazione risulta utile nelle applicazioni pratiche quando si progetta un isolamento acustico mediante una parete isolante.

A frequenze elevate, in corrispondenza di una *frequenza critica* per ciascun materiale, si manifesta una riduzione marcata del potere fonoisolante dovuto ad effetti di coincidenza.

In tabella sono riportate le masse superficiali e le prime frequenze critiche di alcuni materiali.

La legge di massa teorica trova riscontro nella realtà solo a tratti, come indicato nella figura seguente. I materiali hanno frequenze di risonanza a varie frequenze.

TABELLA 6.1
Frequenze critiche e masse per unità di superficie
di alcuni materiali d'uso corrente

Materiale	Frequenza critica per massa per unità di superficie Hz · kg · m ⁻²	Massa per unità di superficie per unità di spessore kg · m ⁻² · mm ⁻¹
Piombo	600.000	11,2
Acciaio	97.700	8,1
Calcestruzzo armato	44.000	2,3
Mattone	42.000	1,9
Vetro	39.000	2,5
Perspex	35.000	1,15
Cemento-amianto	33.600	1,9
Alluminio	32.200	2,7
Masonite	30.600	0,81
Lastra di gesso	32.000	0,75
Compensato	13.000	0,58

Tabella 8: Frequenze critiche per alcuni materiali

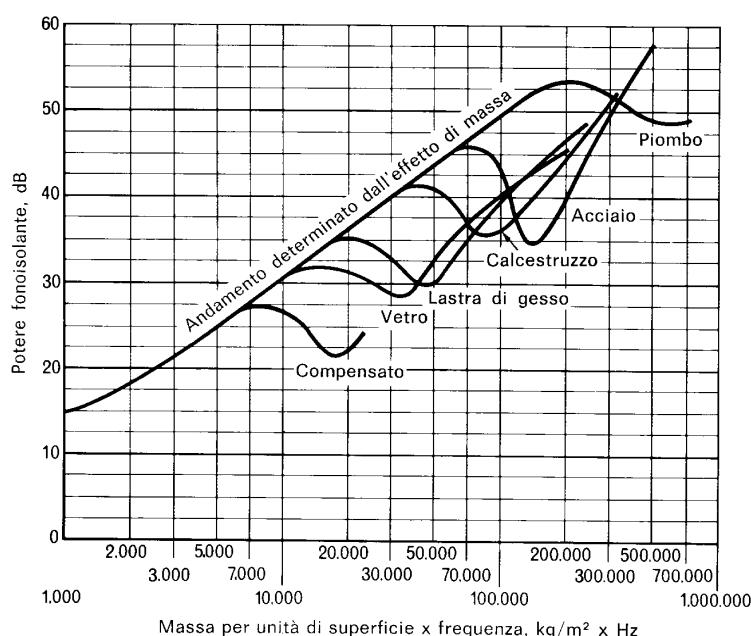


Figura 57: Frequenze critiche di alcuni materiali

4.2. ASSORBIMENTO DEL SUONO ALLE BASSE FREQUENZE

Alle basse frequenze il potere fonoisolante dei vari materiali è basso o addirittura oscillante. Per isolarcisi dalle basse frequenze dobbiamo allora utilizzare altri effetti fisici diversi dal potere fonoisolante anzidetto. In genere si tratta di fenomeni di risonanza dovuta a piccole cavità (*risuonatori di Helmholtz*) o di lastre piane che generano vibrazioni di massima ampiezza di carattere dissipativo.

Tipo di struttura	Spessore mm	Massa per unità di superficie kg/m ²	Potere fonoisolante secondo la frequenza (Hz)							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Pareti semplici in muratura</i>										
Mattoni pieni, con intonaco su entrambi i lati	125	240	30	36	37	40	46	54	57	59
Mattoni pieni, con intonaco su entrambi i lati	255	480	34	41	45	48	56	65	69	72
Mattoni pieni, con intonaco su entrambi i lati	360	720	36	44	43	49	57	66	70	72
Blocchi di clinker, 12 mm d'intonaco su ogni lato	125	145	20	27	33	40	50	57	56	59
Blocchi di clinker, non intonacati	75	85	12	17	18	20	24	30	38	43
Blocchi forati in calcestruzzo di scorie, tinteggiati con cementite	100	75	22	30	34	40	50	50	52	53
Blocchi forati in calcestruzzo di scorie, non tinteggiati	100	75	22	27	32	37	40	41	45	48
Blocchi in « Thermalite »	100	125	20	27	31	39	45	53	38	62
Mattoni di vetro	200	510	25	30	35	40	49	49	43	45
<i>Pareti doppie in muratura</i>										
Mattoni pieni, con intercapedine d'aria di 56 mm, e 12 mm d'intonaco per lato	300	380	28	34	34	40	56	73	76	78
— con traversine in profilato metallico	300	380	27	27	43	55	66	77	85	85
<i>Pareti divisorie su telaio in legno</i>										
Lastre isolanti da 12 mm fissate su montanti di 50 mm × 100 mm	125	19	12	16	22	28	38	50	52	55
Lastre di gesso da 9 mm, con intonaco di 12 mm sulle superfici esterne, fissate su montanti di 50 mm × 100 mm	142	60	20	25	28	34	47	39	50	56

Tabella 9: Potere fonoisolante di alcuni materiali

VALORI DEL POTERE FONOISOLANTE DI ALCUNE STRUTTURE D'USO CORRENTE

Tipo di struttura	Spessore mm	Massa per unità di superficie kg/m ²	Potere fonoisolante secondo la frequenza (Hz)							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Pannelli semplici</i>										
Lastra di piombo	1,5	17	22	28	32	33	32	32	33	36
» » »	3	34	25	30	31	27	38	44	33	38
Lamiera d'alluminio nervata	0,9	2,5	8	11	10	10	18	23	25	30
Lamiera zincata	0,55	6	3	8	14	20	23	26	27	35
» »	0,9	7	3	8	14	20	26	32	38	40
» »	1,2	10	8	13	20	24	29	33	39	44
» »	1,6	13	9	14	21	27	32	37	43	42
Lamiera grecata, irrigidita ai bordi	1,2	39	25	30	20	22	30	28	31	31
Lastra ondulata in conglomerato d'amianto	6	10	20	25	30	33	33	38	39	42
Truciolo su telaio di legno	19	11	14	17	18	25	30	26	32	38
Fibro-legno su telaio di legno	12	4	10	12	16	20	24	30	31	36
Lastra di gesso su telaio di legno	9	7	9	15	20	24	29	32	35	38
Compensato su telaio di legno	6	3,5	6	9	13	16	21	27	29	33
Pannello di legno (mogano)	50	25	15	19	23	25	30	37	42	46
Tavolato di legno non intonacato	25	19	0	0	2	6	6	8	8	10
Fibro-legno con 12 mm di intonaco su entrambi i lati	50	75	18	23	27	30	32	36	39	43
<i>Pannelli composti</i>										
Lastra di piombo da 1,5 mm tra due lastre di compensato da 5 mm	11,5	25	19	26	30	34	38	42	44	47
Lastra in conglomerato d'amianto da 9 mm tra due lamiere d'acciaio da 1,2 mm	12	37	16	22	27	31	27	37	44	48
« Stramit » (paglia compressa tra due lastre di masonite da 3 mm)	56	25	15	22	23	27	27	35	35	38

Tabella 10: Potere fonoisolante di alcuni materiali

Tipo di struttura	Spessore mm	Massa per unità di superficie kg/m ²	Potere fonoisolante secondo la frequenza (Hz)							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Finestre con vetro semplice</i>										
Lastra di vetro semplice in telaio pesante	6	15	17	11	24	28	32	27	35	39
	8	20	17	18	25	31	32	28	36	39
	9	22,5	18	22	26	31	30	32	39	43
	16	40	20	25	28	33	30	38	45	48
	25	62,5	25	27	31	30	33	43	48	53
<i>Finestre con doppi vetri</i>										
Vetri da 2,5 mm con 7 mm di intercedine	12	15	15	22	16	20	29	31	27	30
Vetri da 6 mm in telai separati, con 50 mm di intercedine	62	34	18	25	29	34	41	45	53	50
Vetri da 6 mm in telai separati, con 100 mm di intercedine	112	34	20	28	30	38	45	45	53	50
Vetri da 6 mm in telai separati, con 188 mm di intercedine	200	34	25	30	35	41	48	50	56	56
Vetri da 6 mm in telai separati, con 188 mm di intercedine con superfici perimetrali interne rivestite di materiale fonoassorbente	200	34	26	33	39	42	48	50	57	60
Vetri da 6 e 9 mm in telai separati, con 200 mm di intercedine, con superfici perimetrali interne rivestite di materiale fonoassorbente	215	42	27	36	45	58	59	55	66	70
<i>Porte</i>										
Comune porta tamburata normalmente incernierata	43	9	9	12	13	14	16	18	24	26
Porta in legno massiccio, normalmente incernierata	43	28	13	17	21	26	29	31	34	32
Tipica porta 'acustica' costituita da doppia lamiera di acciaio, con materiale fonoassorbente nell'intercedine, serrature speciali e sigillatura sulle battute; telaio pesante in acciaio	100	—	37	36	39	44	49	54	57	60

Tabella 11: : Potere fonoisolante di alcuni materiali

Tipo di struttura	Spessore mm	Massa per unità di superficie kg/m ²	Potere fonoisolante secondo la frequenza (Hz)							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Pavimenti</i>										
Assito in legno con giunti sigillati	21	13	17	21	18	22	24	30	33	63
Idem, rivestito inferiormente con lastre di gesso da 12 mm, intonacate a spruzzo, spessore 3 mm	235	31	15	18	25	37	39	45	45	48
Idem, ma « galleggiante » su lana di vetro	240	35	20	25	33	38	45	56	61	64
Cemento armato	100	230	32	37	36	45	52	59	62	63
	200	460	36	42	41	50	57	60	65	70
	300	690	37	40	45	52	59	63	67	72
Cemento armato da 125 mm ma « galleggiante »	190	420	35	38	43	48	54	61	63	67

Tabella 12: Potere fonoisolante di alcuni materiali

4.2.1. IL RISUONATORE DI HELMOLTZ

Una cavità può comportarsi come un risonatore di Helmoltz con frequenza di risonanza data dalla relazione:

$$f_{\text{ris}} = 55 \sqrt{\frac{S}{V}} \quad [57]$$

in Hz, con:

- S area della sezione del collo, m^2
 l lunghezza del collo, m
 V volume dell'aria contenuta nel volume, m^3 .

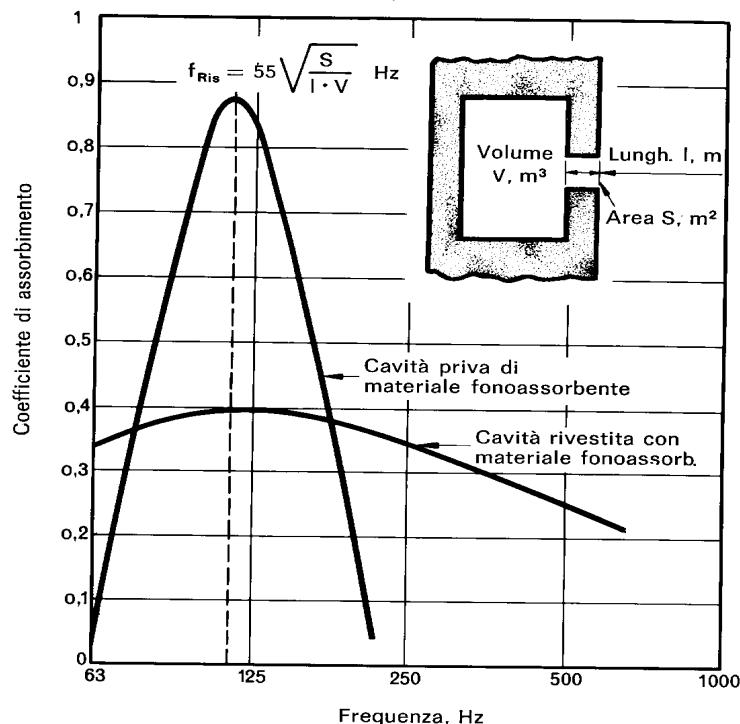
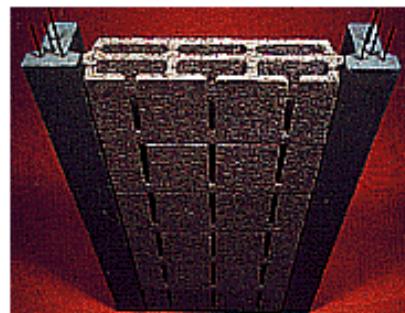


Figura 58: Cavità risonante

Scegliendo opportunamente i parametri geometrici si può avere una curva di assorbimento a basse frequenze. Un utilizzo delle cavità risonanti si ha con materiali edilizi usuali, come indicato nella seguente figura.



wall resonators



ceiling resonators

Figura 59: Materiale da costruzione utilizzato come cavità risonante

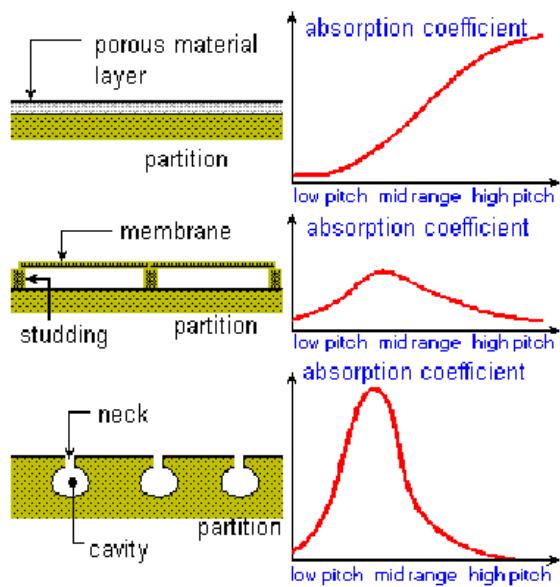


Figura 60: Tipologie di cavità risonanti di utilizzo comune

4.2.2. LE MEMBRANE ASSORBENTI

Alle basse frequenze si possono utilizzare lastre di compensato o masonite opportunamente fissate alle pareti le quali presentano una frequenza di risonanza data da:

$$f_{ris} = 60 \sqrt{\frac{1}{l}} \quad , \text{ in Hz} \quad [58]$$

con:

$$= \rho_s \quad \text{massa superficiale del pannello, } kg/m^2$$

$$l \quad \text{profondità dell'intercapedine d'aria.}$$

Dimensionando opportunamente le membrane e scegliendo bene i materiali (di solito il legno) si può avere un picco di assorbimento alle basse frequenze, come illustrato nella figura seguente.

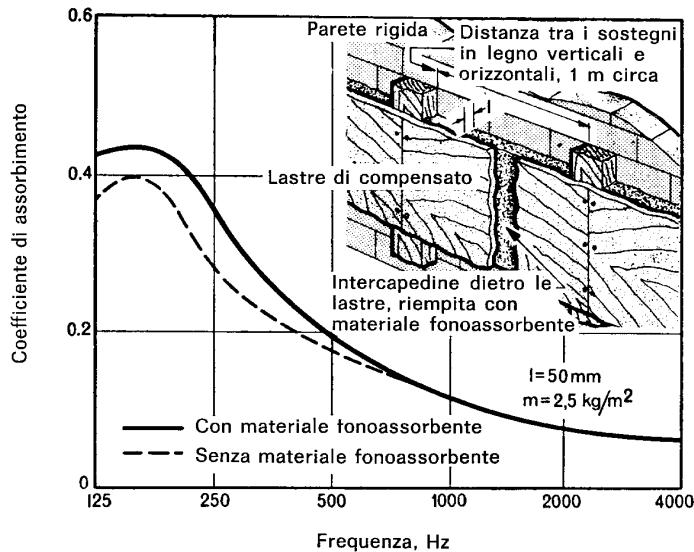


Figura 61: Assorbimento di una membrana

Nelle applicazioni pratiche le membrane sono realizzate con materiali gradevoli da vedere e che al tempo stesso forniscono l'assorbimento desiderato, come illustrato nella figura seguente.



Figura 62: Esempio di membrana assorbente realizzata con pannelli in legno

4.2.3. DIFFRAZIONE

La diffrazione è quel fenomeno che permette al suono di aggirare gli ostacoli e propagarsi anche al di fuori della visuale geometrica ed è del tutto analogo a quello che si verifica per le onde luminose.

Consideriamo per esempio una sorgente che emette onde sonore piane posta ad una certa distanza da una parete nella quale è stato praticato un foro: al di là della parete troveremo suono anche fuori dello spazio conico determinato dalla sorgente e dal contorno del foro.

In pratica succede che i punti interni al foro diventano sorgenti virtuali di onde sferiche.

Se il foro fosse più grande, l'onda piana, una volta attraversato il foro, tenderebbe a restare tale ad esclusione di una leggera curvatura alle sue estremità. La diffrazione risulta maggiore se le dimensioni del foro sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda.

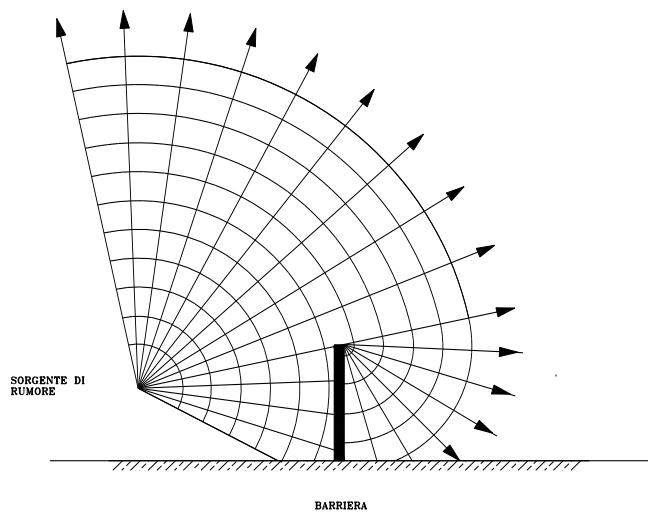


Figura 63: Diffrazione del suono da parte di un ostacolo

Il fenomeno della diffrazione serve a spiegare le zone d'ombra acustica: se un'onda sonora incontra un ostacolo una parte del suo fronte si infrange contro l'ostacolo mentre la parte che ne sfiora i contorni subisce una deviazione dalla linea di propagazione rettilinea (vedi figura) secondo le leggi della diffrazione. Se le dimensioni dell'ostacolo sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda si crea, al di là di esso, una zona d'ombra piuttosto estesa; viceversa, quando la lunghezza d'onda del suono è confrontabile con la dimensione dell'ostacolo, la zona d'ombra risulta quasi inesistente.

4.2.4. BARRIERE ACUSTICHE

Durante la propagazione in ambiente esterno, le onde sonore incontrano sul loro cammino ostacoli di ogni tipo: filari di alberi, abitazioni, colline naturali o artificiali, recinzioni ecc.

Tutti questi elementi, se sono composti di materiali “impermeabili” al rumore, si comportano come barriere che si frappongono tra la sorgente e il ricevitore ed attenuano il livello sonoro ricevuto.

Naturalmente esistono notevoli differenze nella loro capacità di schermare le onde sonore a seconda dei materiali di cui sono composte, della loro posizione e forma.

L'attenuazione per un barriera rigida e rettilinea che si trova tra il ricevitore e la sorgente è data dalla formula:

$$(A)_{\text{barriera}} = 5 \cdot 20 \log \frac{\sqrt{2} \cdot N}{tgh \sqrt{2} \cdot N} \text{ dB} \quad [59]$$

dove N è il numero di *Fresnel* esprimibile come

$$N = \frac{2}{(A+B)(R+D)} \quad [60]$$

è la lunghezza d'onda.

Con riferimento alla Figura 64, $(A + B)$ e $(R + D)$ sono rispettivamente la distanza più breve al di sopra della barriera e quella più breve in linea retta tra sorgente e ricevitore.

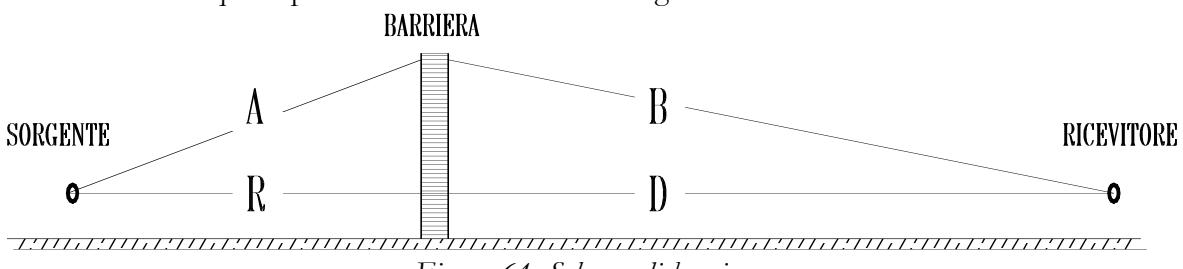


Figura 64: Schema di barriera

Come si vede dalla formula al variare di N varia l'attenuazione della barriera: per $0.2 < N < 0$ il numero di Fresnel va espresso in valore assoluto e la tangente iperbolica diventa trigonometrica.

Per $N < -0.2$ l'attenuazione della barriera è nulla.

L'efficacia della barriera varia in misura diretta a N ; più grande è il numero di Fresnel maggiore risulta l'attenuazione anche se questo avviene soprattutto alle alte frequenze.

Alcuni accorgimenti per aumentare l'efficacia della barriera possono essere il rivestimento della barriera dalla parte rivolta verso la sorgente e il rivestimento della sommità per attenuare la trasmissione per diffrazione.

4.2.5. LA RIFRAZIONE

Un'onda sonora che attraversa due mezzi di densità differente subisce una deviazione della traiettoria di propagazione (vedi figura) denominata *rifrazione*.

Questo fenomeno spiega perché un suono viene udito più facilmente di notte che di giorno: durante la giornata gli strati dell'atmosfera vicini al suolo sono più caldi e, dato che la velocità del suono cresce con la temperatura dell'aria, per rifrazione le onde sonore si allontanano dal suolo; di notte invece la situazione è opposta e le onde rifratte verso terra vanno ad aumentare l'intensità del suono percepito:

$$n_{1,2} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} \quad [61]$$

$n_{1,2}$ = indice di rifrazione

v_1 = velocità del suono nel mezzo di trasmissione 1

v_2 = velocità del suono nel mezzo di trasmissione 2

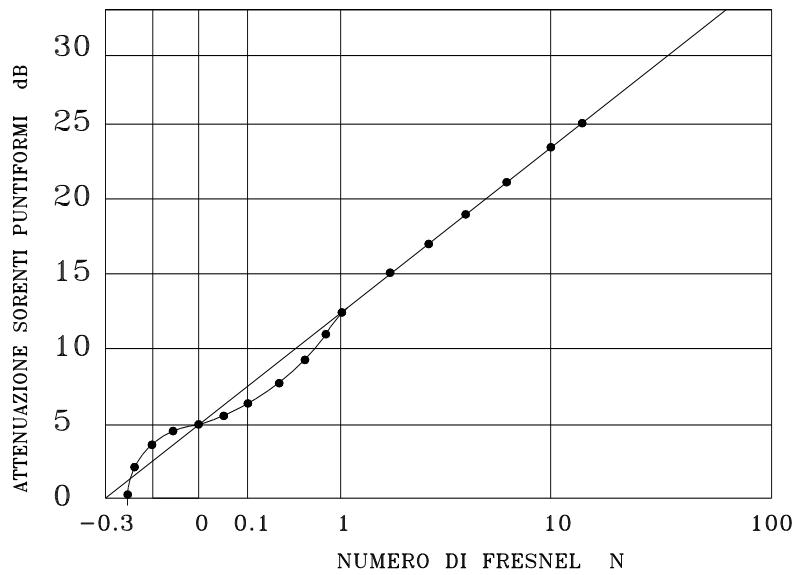


Figura 65: Andamento dell'attenuazione in funzione del numero di Fresnel

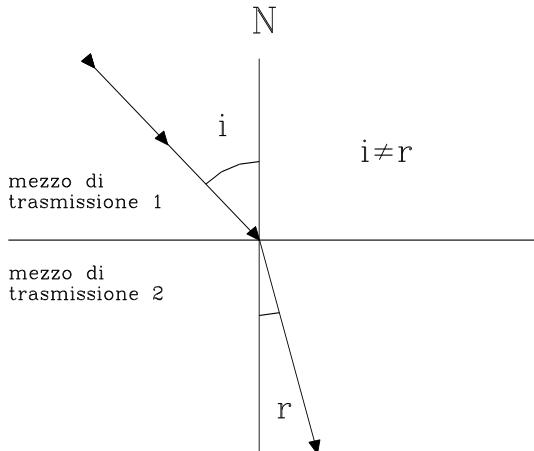


Figura 66: Rifrazione di un'onda sonora.

4.2.6. FATTORE DI DIREZIONALITÀ

Si definisce *Fattore di Direzionalità* di una sorgente sonora il rapporto fra l'intensità sonora misurata ad una certa distanza e in una certa direzione e il valore che essa avrebbe, a parità di distanza e di potenza emessa, nel caso in cui questa si comportasse come omnidirezionale.

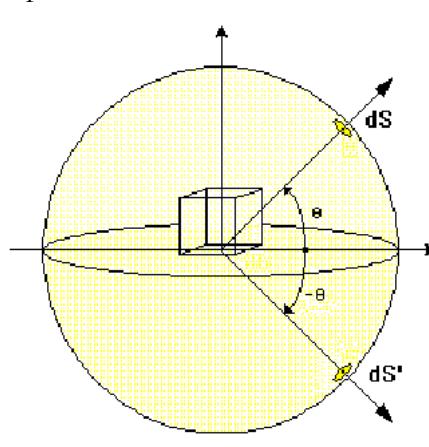


Figura 67: Definizione del fattore di direzionalità

Il fattore di direzionalità è dato dal rapporto:

$$Q = \frac{I}{I_0} = \frac{\frac{\dot{p}^2}{c}}{\frac{W}{4\pi d^2}} \quad [62]$$

ove:

- \dot{p} è il valore efficace della pressione, Pa
- I intensità acustica nella direzione , W/m^2 ,
- I_0 intensità acustica di una sorgente omnidirezionale (sferica) di pari potenza, W/m^2 ,
- d distanza dalla sorgente, m .
- W potenza della sorgente, W
- c resistenza acustica dell'aria, $Rayl$.

Quanto definito ci consente di fare alcune importanti osservazioni:

Se si dispone di una sorgente sonora puntiforme omnidirezionale davanti ad una parete piana allora la sua direttività diventa pari a 2 (si ha il rinforzo delle onde riflesse dalla parete che si somma alle onde dirette della sorgente) e il livello di potenza sonora cresce di 3 dB.

Se si dispone la stessa sorgente in corrispondenza di un diedro formato da due pareti piane si ha una direttività pari a 4 e il livello di potenza sonora cresce di 6 dB.

Se si dispone la stessa sorgente in corrispondenza di un angolo formato da tre pareti piane si ha una direttività pari a 8 e il livello di potenza sonora cresce di 9 dB.

Di queste facili osservazioni si deve tenere conto nel posizionare le sorgenti in un ambiente di lavoro. Disporle in vicinanza delle pareti significa incrementare la loro rumorosità di almeno 3 dB.

Meglio è disporle all'interno della sala. Se invece è proprio l'effetto di amplificazione che si desidera ottenere allora è bene cercare uno spigolo in modo da ottenere 9 dB di amplificazione gratuita.

E' proprio ciò che si fa nelle discoteche ponendo le casse in alto in corrispondenza degli spigoli della sala.

4.3. RIVERBERAZIONE ACUSTICA

Se poniamo alcuni ascoltatori in una stanza con una sorgente emittente le onde sonore riflesse dalla pareti arrivano alle loro orecchie in successione così rapida che questi non riescono a percepire le onde sonore come ripetizioni distinte del suono originale, mentre saranno in grado di sentire il prolungamento del suono dopo che si è spenta la sorgente fino a che questa non sarà più udibile.

Il prolungamento del suono udito si chiama *riverberazione* (Vedi capitolo sull'Acustica delle Sale) ed è quel fenomeno per cui si ha la persistenza di un suono all'interno di uno spazio chiuso dovuta alle riflessioni o deviazioni dell'onda sonora contro le pareti, dopo che la sorgente ha terminato di trasmettere.

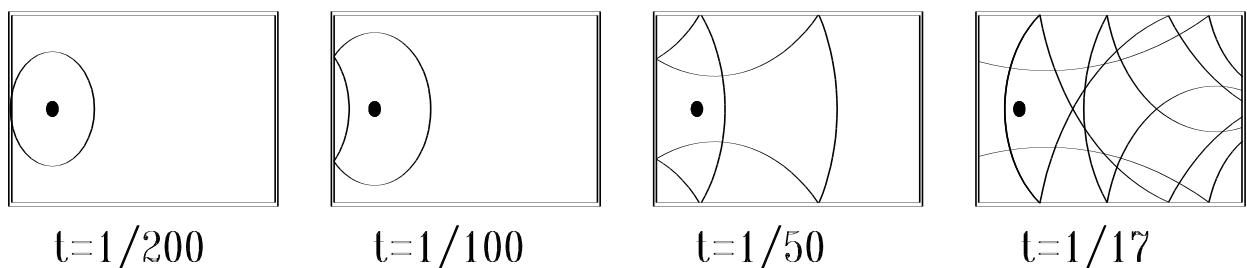


Figura 68: Propagazione di un'onda sonora all'interno di una stanza

In Figura 69 si ha la rappresentazione dei percorsi di 200 raggi acustici all'interno di un ambiente chiuso. E' facile vedere, pur con l'esiguo numero di raggi considerato, quanto sia complesso seguire i singoli percorsi e come, seppure come induzione visiva, l'addensarsi dei raggi sonori porti ad avere una densità acustica pressoché uniforme in tutto il volume dell'ambiente.

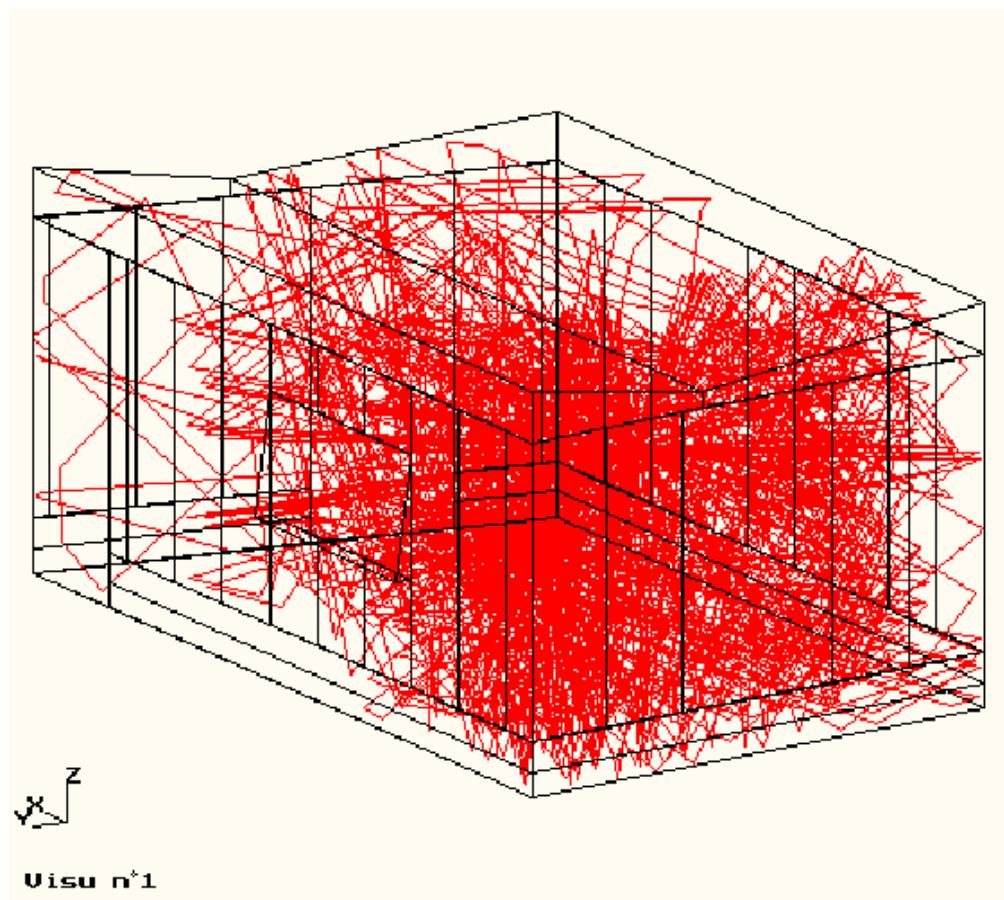


Figura 69: Schematizzazione di 200 raggi sonori riflessi in un ambiente chiuso

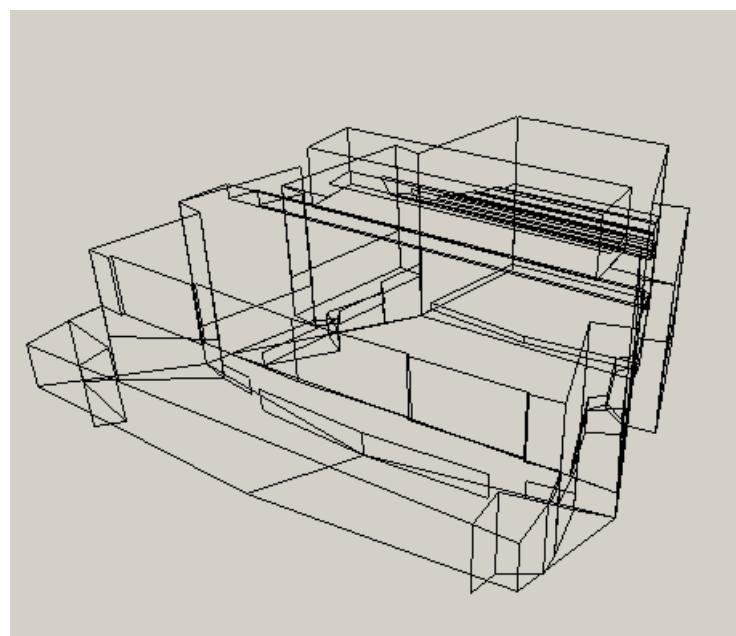


Figura 70: Esempio di un teatro

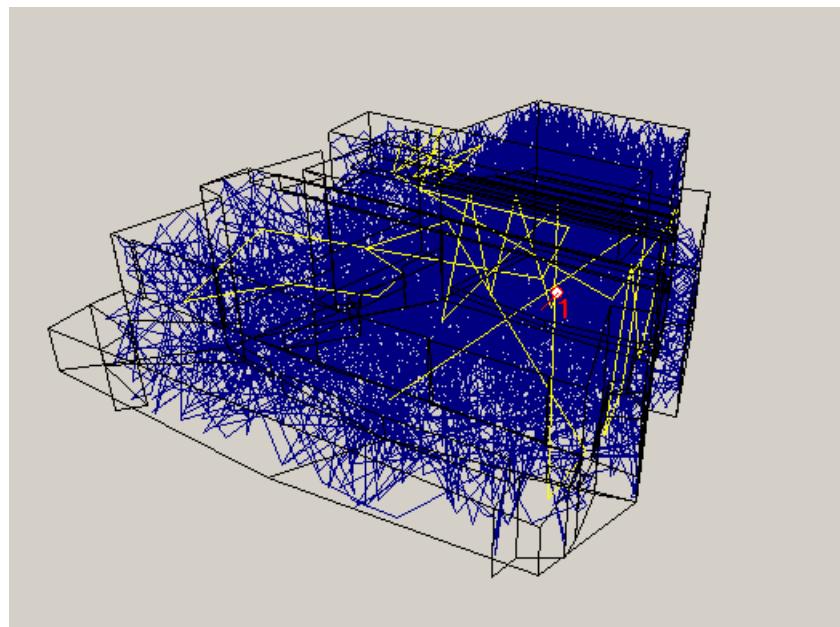


Figura 71: Situazione delle riflessioni dopo 1 s dall'avvio della sorgente

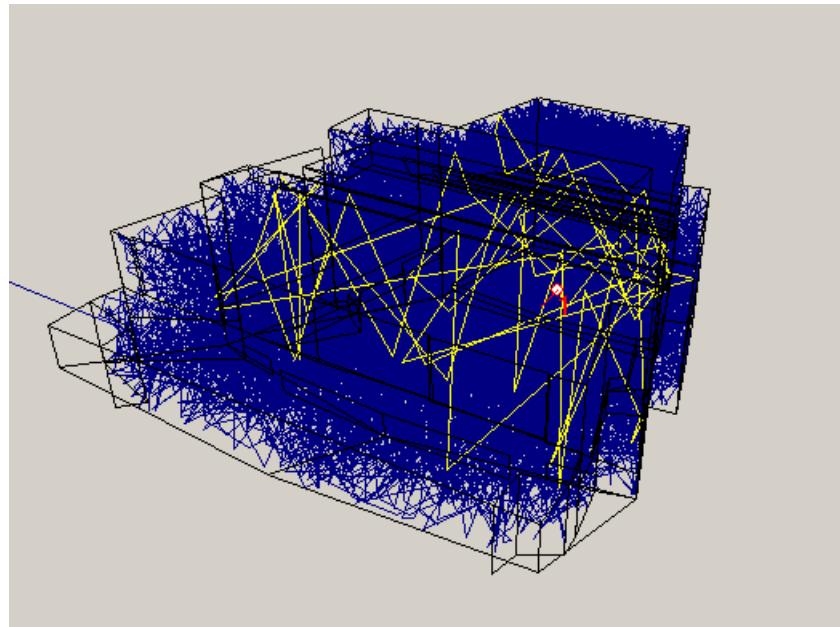


Figura 72: Situazione delle riflessioni dopo 2 s dall'avvio della sorgente

Analoga osservazione si può fare per il teatro di Figura 70 per il quale si sono considerate le riflessioni dopo 1 s dall'avviamento della sorgente sonora, come riportato in Figura 71. Anche in questo caso i raggi acustici hanno praticamente riempito lo spazio interno del teatro contribuendo ad uniformare la densità sonora all'interno. In Figura 72 si ha la situazione delle riflessioni dopo 2 s dall'avvio della sorgente sonora. Il confronto con la Figura 71 mostra una maggiore uniformità della densità sonora dovuta alla sovrapposizione delle riflessioni sonore.

In pratica la riverberazione acustica porta il suono ovunque all'interno degli ambienti chiusi e ciò indipendentemente dalla posizione relativa fra sorgente ed ascoltatore. Il campo acustico non è più geometricamente definito (ad esempio sferico, per sorgente puntiforme) bensì somma di innumerevoli riflessioni, come si può intuire anche dall'esame della Figura 68 e seguenti.

Nella Figura 73 si ha la rappresentazione schematica, detta *ecogramma*, delle onde riflesse in funzione del tempo.

In pratica si ha in ascissa il tempo trascorso dal suono diretto e in ordinate il livello corrispondente alla generica onda riflessa che arriva all'ascoltatore in una data posizione.

Proprio questa complessità del fenomeno è stata il freno principale all'evoluzione dell'Acustica delle Sale, come detto nell'Introduzione. W.C. Sabine ad inizio del secolo studiò la riverberazione acustica e pervenne ad una relazione sperimentale che porta il suo nome e che ancora oggi rappresenta uno dei parametri più significativi per definire l'acustica di una sala:

$$T_{60} = \frac{0.161}{a_i S_i} V \quad [63]$$

ove T_{60} è il tempo di riverberazione definito come *il tempo (in secondi) necessario a che l'intensità sonora scenda ad un milionesimo del valore iniziale*, ovvero che scenda di 60 dB.

Si ha:

a_i : fattore di Sabine (detto anche *apertura equivalente*) del materiale, cioè dalla somma del fattore di trasmissione e del fattore di assorbimento;

V : volume della sala (m^3);

S_i : superficie della parete o dell'oggetto interno alla sala (m^2).

Si definisce un fattore di assorbimento medio come media degli assorbimenti delle pareti ed oggetti pesata secondo le superfici:

$$a_m = \frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i} \quad [64]$$

La relazione di Sabine vale quando la sala è di forma regolare, il volume è inferiore a 20.000 mc. Il fattore di assorbimento medio deve essere inferiore a 0,4.

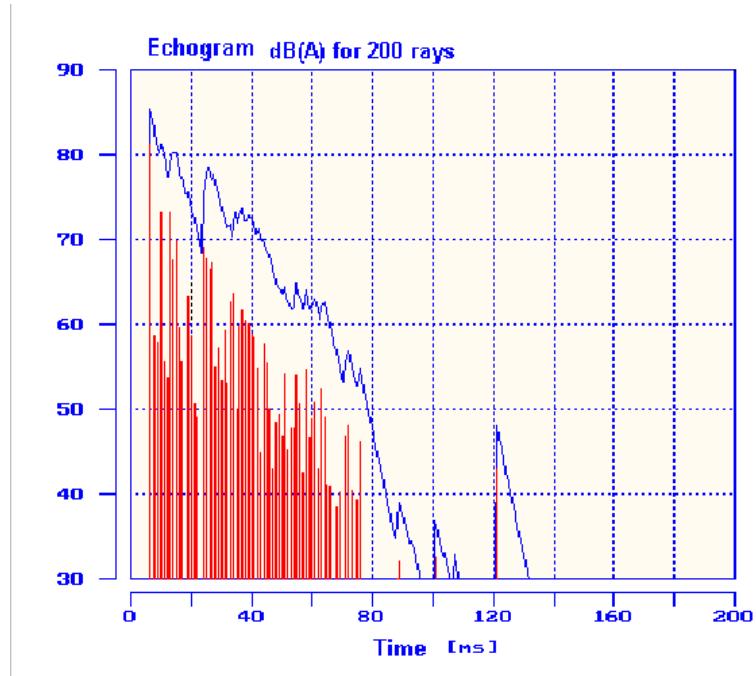


Figura 73: Ecogramma in una sala chiusa

Per una sala di forma regolare con una distribuzione di densità acustica uniforme e con assorbimento medio dei materiali non elevato (ipotesi di Sabine) si può osservare una curva di decadimento del tipo di quella rappresentata in Figura 74.

Il primo tratto viene ignorato perché fortemente influenzato da variazioni statistiche casuali. Il tempo di riverberazione è dato dall'intervallo in ascissa per cui si ottiene un abbassamento di 60 dB del livello sonoro.

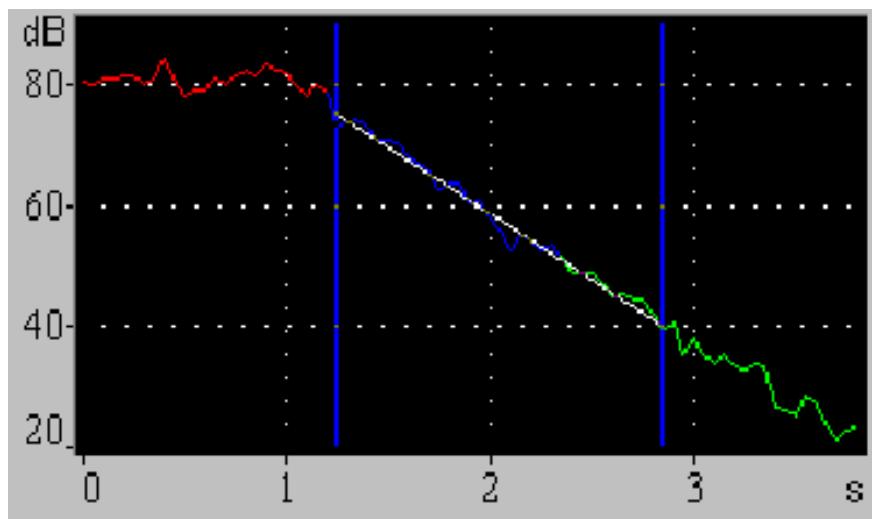


Figura 74: Decadimento sonoro all'interno di una sala

Oggi il controllo della riverberazione acustica (e di numerosi altri fenomeni che in questa sede si trascurano per brevità) porta a progettare, con l'ausilio di opportuni software acustici, in piena libertà, vedi la Figura 75, le nuove sale musicali.

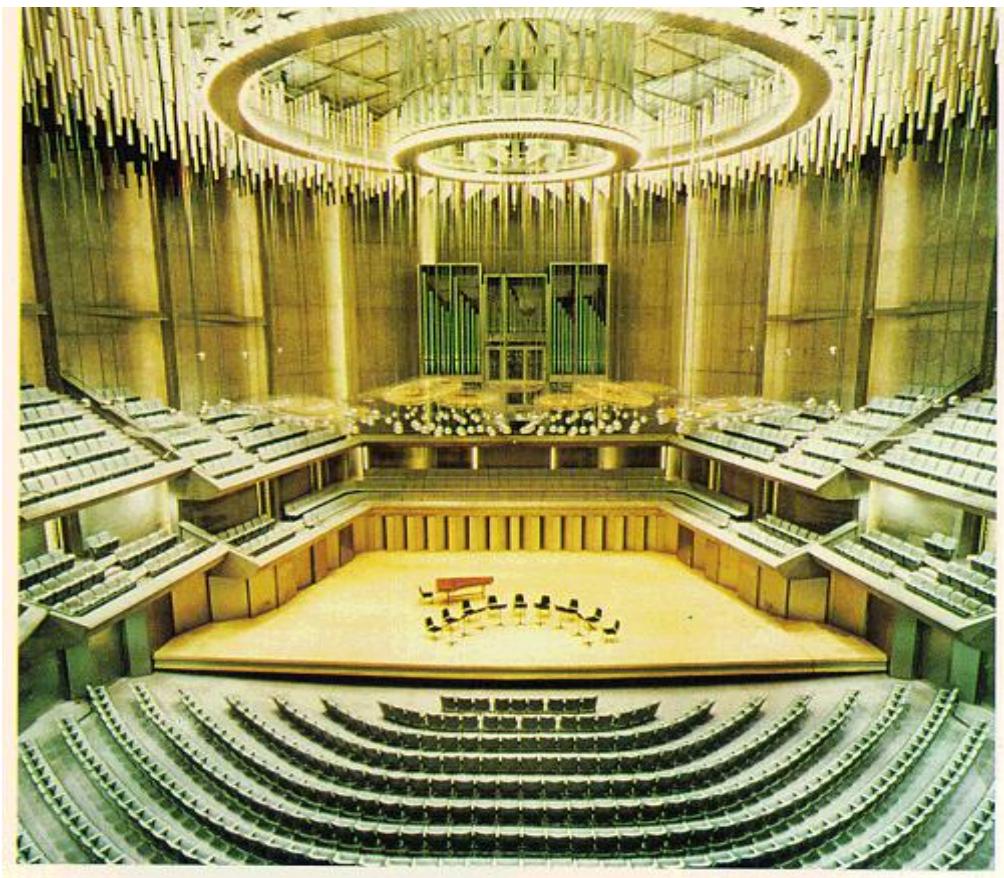


Figura 75: Il Teatro Roy Thompson Hall, Toronto

Esse rappresentano un esempio mirabile dell'ingegno umano e sono certamente fra le opere di architettura e di ingegneria più complesse. Oggi siamo perfettamente in grado di *progettare* le sale tenendo conto di tutti i numerosi parametri funzionali che debbono essere rispettati oltre quelli acustici.

4.4. ATTENUAZIONE DEI SUONI NELL'AMBIENTE INTERNO

Si consideri un ambiente confinato ed una sorgente sonora di potenza W (Watt), quale può essere, ad esempio, la potenza emessa da una macchina all'interno di uno stabilimento. Il livello sonoro in un punto distante d dalla sorgente e posto all'interno dell'ambiente chiuso è dato dalla somma del livello dovuto al campo diretto e quello del campo diffuso (riverberato). Il primo dipende dall'inverso del quadrato della distanza mentre il secondo si può dimostrare che è indipendente dalla distanza e funzione solamente dall'assorbimento delle pareti del locale. In definitiva si ha la relazione:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{4} \frac{4}{d^2} \frac{4}{R} \quad [65]$$

con :

$$L_w = 10 \log \frac{W}{10^{12}} \quad [66]$$

in Watt, e:

$$R = \frac{S_i a_i}{1 - a_m} \quad [67]$$

ove è:

$$a_m = \frac{a_i S_i}{S_i} \quad [68]$$

che dalla relazione di Sabine [63] può anche scriversi:

$$a_m = \frac{0,161 V}{S T_{60}} \quad [69]$$

Pertanto i termini:

$$L_{p,d} = L_w + 10 \log \frac{Q}{4} \frac{4}{d^2} \quad [70]$$

e:

$$L_{p,r} = 10 \log \frac{4}{R} \quad [71]$$

sono, rispettivamente, i contributi del campo diretto e del campo riverberato al livello totale.

Una rappresentazione grafica della precedente relazione è riportata nella Figura 76.

Osservando la figura si può dire che, per data sala e quindi per dato assorbimento delle pareti R , ad una distanza d dalla sorgente si può essere nella zona del campo diretto (ove L varia con d) e pertanto per ridurre tale livello è opportuno coibentare la sorgente con l'uso di cuffie afoniche.

Se invece si è nella zona ad andamento costante, detta zona *riverberata*, occorre anche agire sull'ambiente per ridurre il livello sonoro, ad esempio coibentando le pareti o usando *bandiere* appese al soffitto in modo da ridurre i cammini riflessivi delle onde sonore. Queste osservazioni sono importanti allorquando si deve progettare un sistema di protezione dal rumore all'interno di uno stabilimento o di un cantiere al chiuso. La scelta delle operazioni da effettuare dipende dalla zona da proteggere. Se si è in campo diretto occorre intervenire sulle macchine, altrimenti si deve intervenire accrescendo l'assorbimento della sala mediante l'applicazione di materiale fonoassorbente alle pareti (se possibile) o al soffitto.

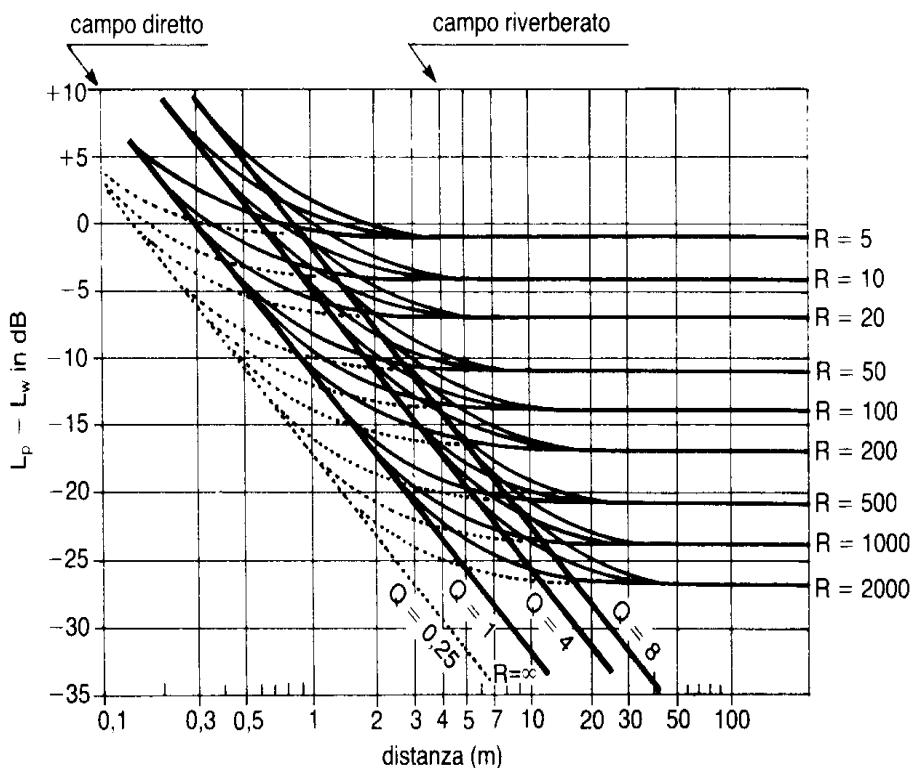


Figura 76: Andamento del livello interno in una sala per effetto del livello diretto e riverberato.

Nella Figura 77 si ha il caso di una protezione in campo diretto mediante l'applicazione di una cuffia afonica alla macchina operatrice. Nelle figure successive si hanno rappresentazioni tipiche di alcune cuffie afoniche per macchine operatrici in varie esecuzioni per consentire l'accesso alla macchina e/o l'introduzione dei materiali.

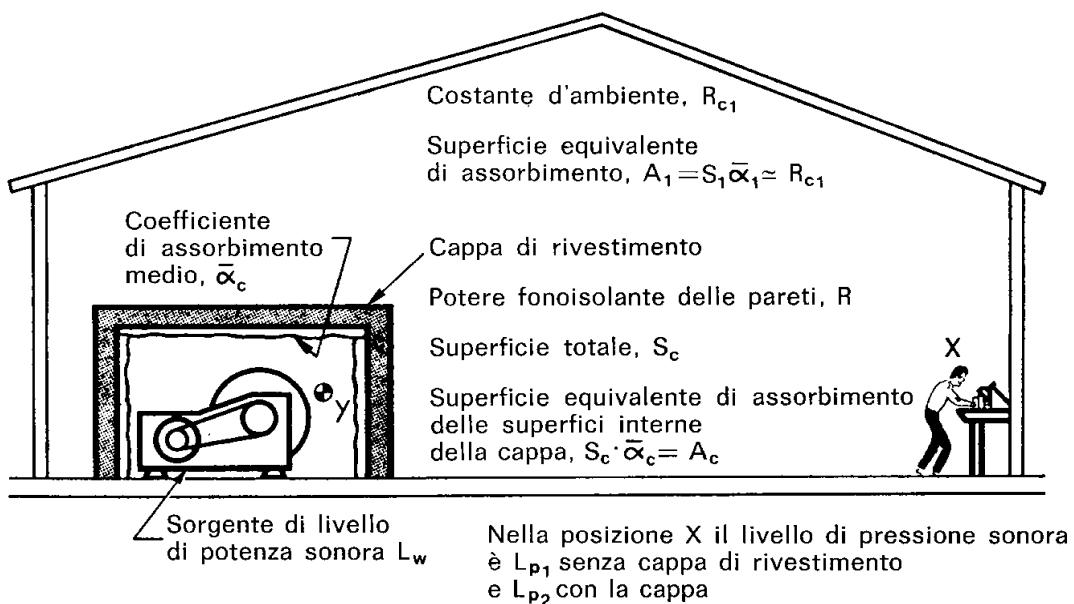


Figura 77: Esempio di applicazione di cuffia afonica

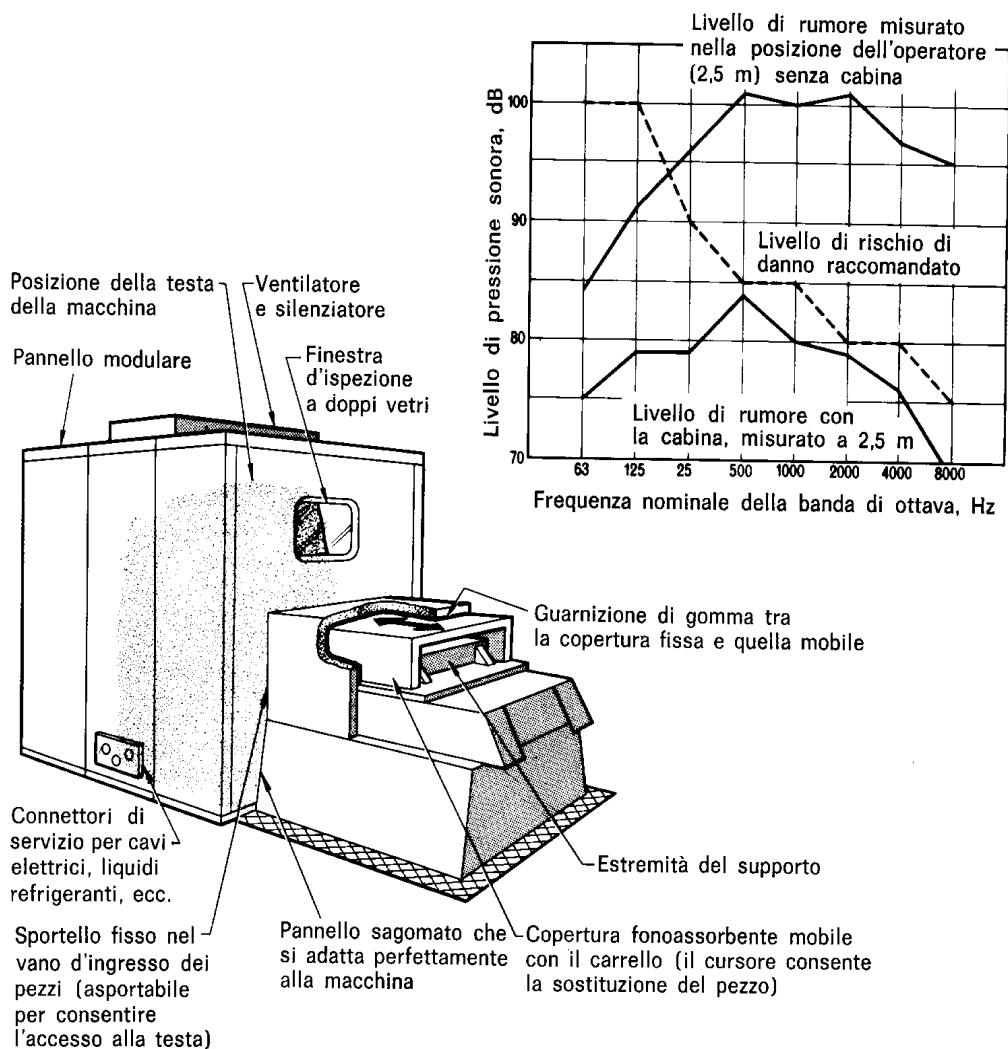


Figura 78 Tipologia di cuffia afonica per macchina operatrice

4.4.1. ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI PER RIDURRE LA RUMOROSITÀ AEREA

Spesso la miglior difesa dal rumore è la riduzione della trasmissione delle vibrazioni che le macchine o gli impianti generano per il loro funzionamento.

Queste vibrazioni vengono trasmesse elasticamente dalle strutture (di solito in cemento armato) che poi le reirradiano negli ambienti.

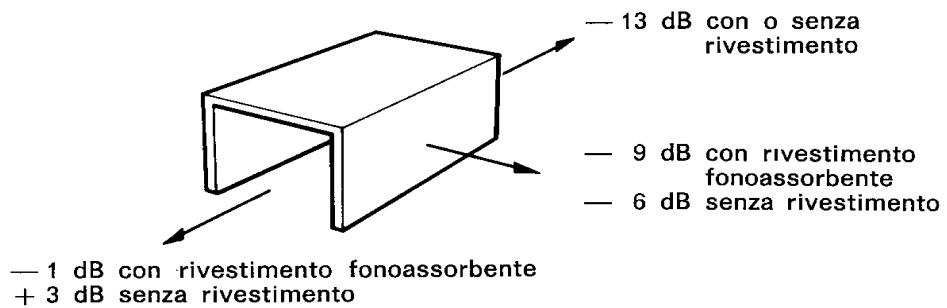
I suoni così generati sono detti *air born sound* e sono caratterizzati da una marcata indeterminazione nella provenienza. Nascono nell'aria, appunto, e quasi sempre sono di bassa frequenza.

Per ridurre le vibrazioni trasmesse si possono applicare agli appoggi opportuni isolatori elastici o a molla, come indicato in figura seguente.

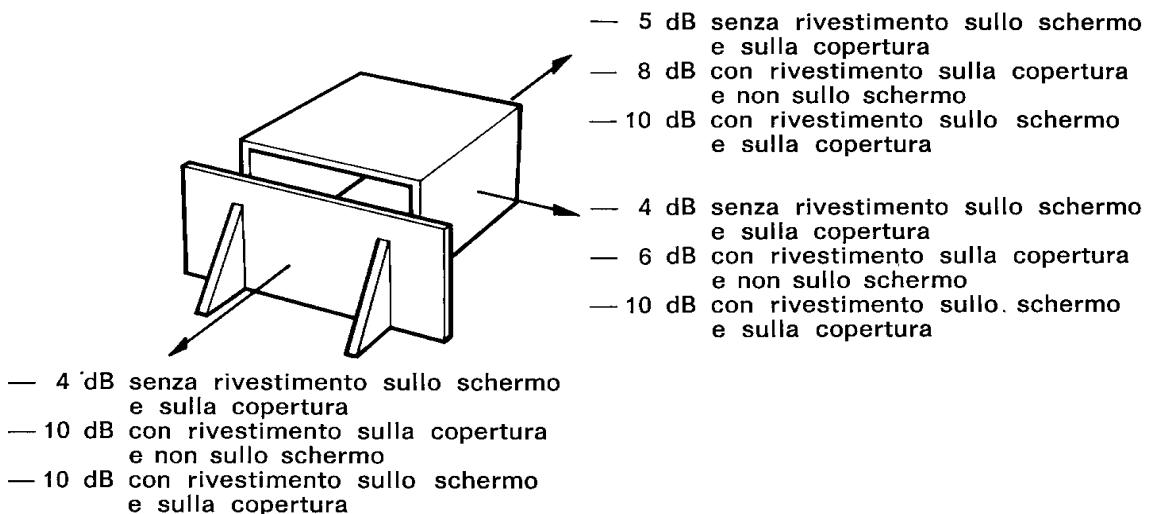
Per grossi e pesanti macchinari è sempre opportuno effettuare un progetto di basamento isolante in modo da evitare sia la trasmissione delle vibrazioni che l'insorgere di pericolosi danni alle strutture nel caso di vibrazioni di grande intensità. Una tecnica che può risultare utile nella pratica è quella del *pavimento galleggiante*.

Si tratta di un'esecuzione della posa in opera del pavimento tramite una membrana isolante ed elastica che assorbe e attenua le vibrazioni indotte dal calpestio.

COPERTURA APERTA DA UN LATO



COPERTURA APERTA DA UN LATO E CON SCHERMO MOBILE



TUNNEL

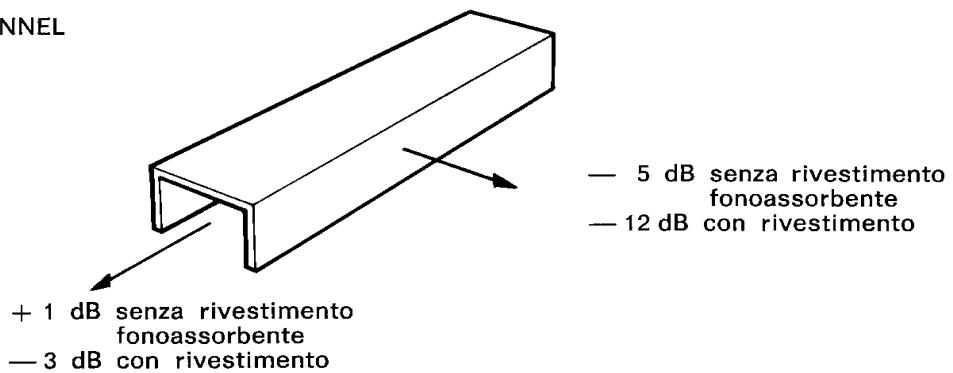
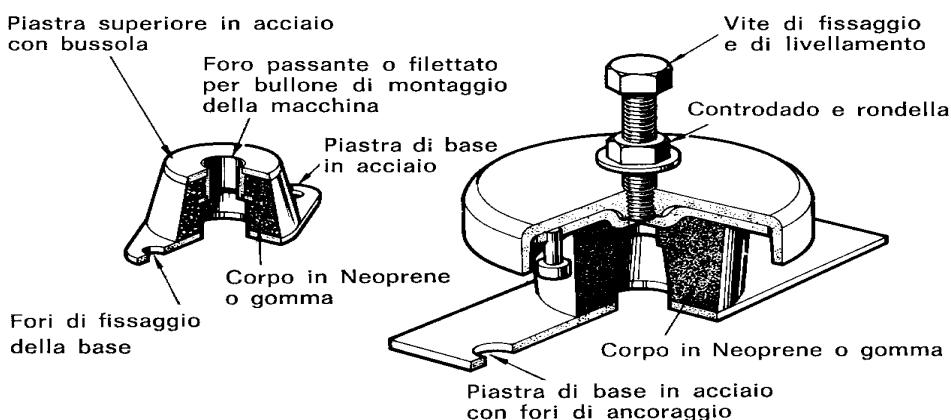
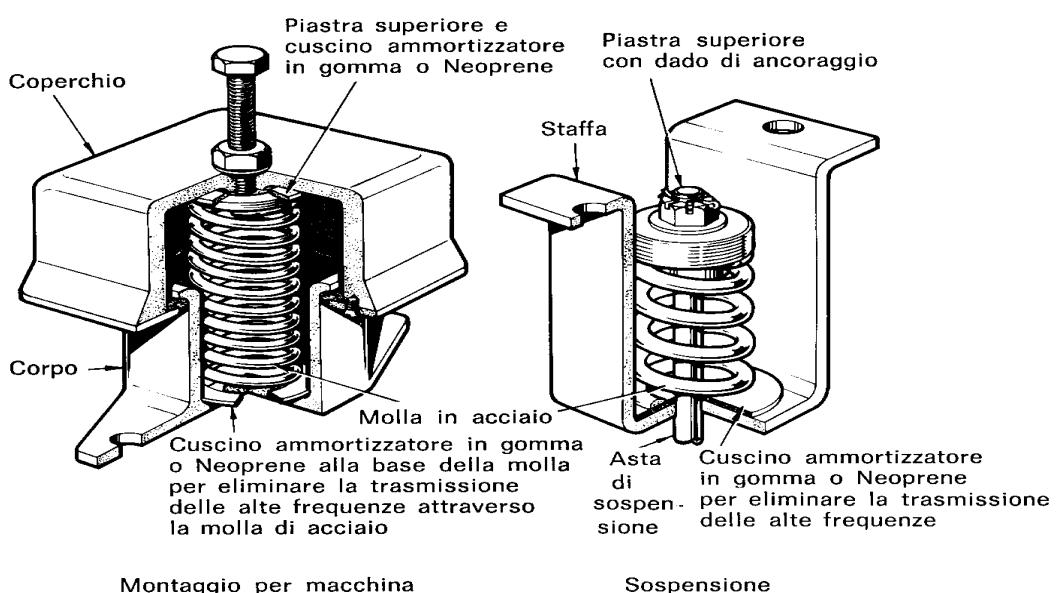


Figura 79: Cuffie afoniche per macchine con flussi di materiali entranti e/o uscenti



(a) Supporti in gomma o Neoprene lavoranti al taglio



(b) Mentre il pianista suona una slanciata deflessione

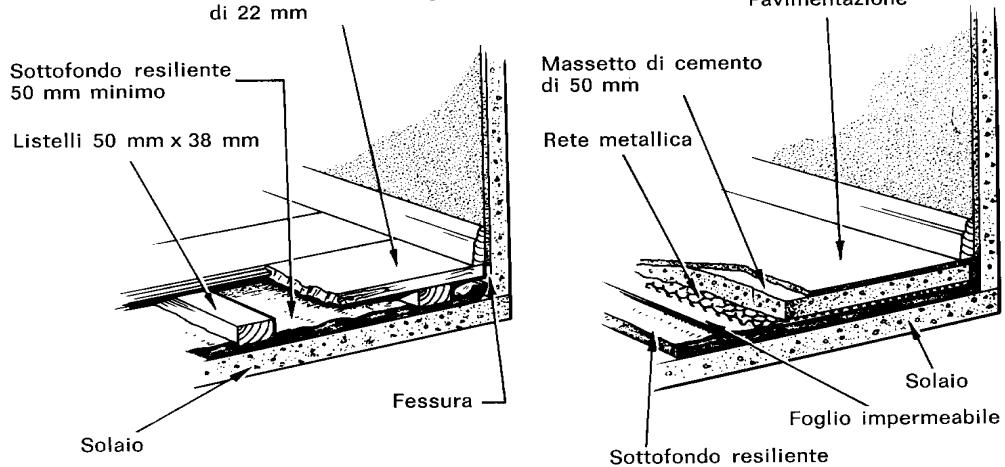


Figura 81: Esempio di pavimento galleggiante

4.5. ATTENUAZIONE DEI SUONI IN AMBIENTI APERTI

Il livello ponderato in un punto qualsiasi a distanza dalla sorgente è dato da

$$L_A = L_{A \text{ rif}} - (A_{\text{div}} - A_{\text{barrier}} - A_{\text{atm}} - A_{\text{excess}}) \quad (\text{dB}) \quad [72]$$

cioè un rumore emesso da una sorgente subisce delle attenuazioni del suo livello misurato a breve distanza dalla sorgente ($L_{A \text{ rif}}$) dovute a molteplici fattori; succede così che un eventuale ricevitore lo percepisce più o meno attenuato a seconda di

A_{div} : fattori propri del modo di propagarsi delle onde sonore come la *divergenza*

A_{barrier} : fattori dovuti ad eventi occasionali come la presenza di *barriere* naturali o artificiali

A_{atm} : fattori atmosferici

A_{excess} : fattori localizzativi come il tipo di terreno e di vegetazione

Questa è la relazione fondamentale da applicare per il calcolo dei livelli di pressione sonora in una zona, interna o esterna, da analizzare, come ad esempio in un cantiere mobile, in una officina,

4.5.1. DIVERGENZA SONORA

Quando ci troviamo vicini ad una sorgente di rumore fastidiosa pensiamo quel rumore risulterà meno disturbante, ed effettivamente all'aumentare della distanza dalla fonte di suono, il livello di pressione sonora diminuisce sempre di più. Questo fatto è dovuto alla *divergenza geometrica* dell'onda sonora. Come abbiamo avuto modo di vedere nel paragrafo dedicato all'intensità dei suoni, l'energia sonora si distribuisce su porzioni di superficie sempre più ampie mano a mano che il fronte d'onda si allontana dalla fonte di suono; nel caso in cui la sorgente sia puntiforme, il mezzo di propagazione uniforme e l'atmosfera esente da fenomeni di perturbazione come vento o gradienti di temperatura, i fronti d'onda sono sferici cosicché l'energia sonora si distribuisce su una superficie molto ampia; ecco che il livello di pressione misurato in una data direzione risulta attenuato, nel caso in esame, di *6 dB ad ogni raddoppio della distanza*.

Si potrebbe fare un parallelo con i fenomeni luminosi pensando alla luce di una lampada da tavolo. Se proviamo a togliere il riflettore alla lampadina, ci accorgeremo che la luce arriva con minore intensità sul piano di lavoro anche se una maggiore superficie della stanza viene illuminata; la luce si è quindi diffusa perdendo di intensità laddove veniva convogliata dal riflettore anche se l'energia totale irradiata è sempre costante. Le sorgenti reali non sono puntiformi ma quando la distanza dell'ascoltatore è molto grande in rapporto alle dimensioni della sorgente di rumore, possono essere considerate tali. Nel caso molto frequente, in cui vicino alla sorgente ci siano delle superfici riflettenti, l'attenuazione per divergenza non sarà più di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza, ma varierà a seconda della forma e della posizione delle superfici in rapporto quindi alla *direzionalità* della sorgente. In questi casi l'energia viene convogliata in una direzione e il suo fronte d'onda risulta meno esteso; l'intensità, essendo una potenza specifica sarà, a parità di distanza, maggiore e di conseguenza anche il livello sonoro. Ecco che l'attenuazione in questo caso risulterà minore.

4.5.2. FATTORI ATMOSFERICI

Il suono subisce una perdita di energia anche a causa del suo mezzo di trasmissione più comune: l'aria. Attraverso una serie di processi molecolari l'energia viene ceduta sotto forma di calore all'ossigeno con una attenuazione dell'intensità sonora che dipende dalla distanza, dalla frequenza, dall'umidità relativa e in parte dalla temperatura. L'attenuazione per una distanza d sarà:

$$A_{\text{atm}} = d / 100 \text{ dB} \quad [73]$$

con d coefficiente di attenuazione atmosferica.

Questo tipo di attenuazione può essere trascurata per distanze dell'ordine delle decine di metri e per frequenze basse. Diventa sensibile alle alte frequenze e quando il percorso dell'onda sonora è di centinaia di metri e oltre; in questi casi, poiché A_{atm} è di *circa 0.33 dB ogni 100 metri* alla frequenza di 500 Hz, si possono avere riduzioni di parecchi dB.

L'influenza sulla distribuzione in frequenza di questo fenomeno è evidente per i rumori molto distanti. La risposta in frequenza del rumore viene infatti modificata soprattutto nella parte alta dello spettro sonoro cosicché il suono arriva all'ascoltatore con una tonalità più grave di quella realmente emessa.

4.5.3. ATTENUAZIONI DOVUTE A FATTORI NATURALI

La vegetazione intesa come arbusti, siepi, erba produce il cosiddetto *effetto suolo*, una riduzione del rumore efficace solo per distanze superiori alla decina di metri e per sorgente ed ascoltatore posti a piccole altezze dal terreno. I valori di attenuazione dovuti a questo fenomeno possono essere di circa 5dB per frequenze comprese tra 500 e 1000 Hz a una distanza di 5 metri e 10dB a distanze oltre i 10 metri. Non bisogna confondere tuttavia questo tipo di attenuazione con quella procurata dall'effetto barriera; in questo caso infatti l'effetto assorbente è dovuto alla porosità del terreno causata dalla presenza delle radici: succede allora che il terreno si comporta come un materiale fonoassorbente.

Esiste anche un effetto barriera dovuto alla vegetazione ma perché sia apprezzabile è necessario che le foglie degli alberi siano estremamente dense così da essere equiparate ad una barriera. Altrimenti l'effetto schermante si limita alle frequenze superiori ai 2Khz ossia quando la lunghezza d'onda del suono è paragonabile alla dimensione del fogliame. L'attenuazione per effetto barriera di vegetazione composta da piante basse è data da:

$$A_{excess} = (0.18 \log f - 0.31)r \text{ dB} \quad [74]$$

dove r è la distanza sorgente-ricevitore. Per piante alte ma con fogliame denso

$$A_{excess} = 0.01 f^{1/3} r \text{ dB} \quad [75]$$

E' evidente che maggiori saranno la distanza e la frequenza maggiore sarà l'attenuazione. Anche i fattori climatici influenzano il suono. Tra questi vi sono le precipitazioni atmosferiche, la nebbia, il vento ed i gradienti di temperatura. L'influenza dei primi due fattori non è uniformemente riconosciuta dai ricercatori anche se alcuni ritengono che una qualche attenuazione dei rumori sia dovuta alla nebbia alla pioggia e alla neve; è da dimostrare se ciò sia dovuto a una reale influenza di questi eventi sul rumore o se i cambiamenti nelle abitudini della gente, nei periodi in cui questi eventi si verificano, siano alla base della riduzione di rumore. Come abbiamo già accennato, il vento e i gradienti di temperatura hanno invece una importanza dimostrata nella modifica dei rumori.

La velocità del vento tende a crescere all'aumentare della quota in modo tale da ripiegare verso il suolo quella parte del fronte sonoro che altrimenti si sarebbe propagata verso l'alto. Questo fenomeno tende a rafforzare il suono che noi percepiamo se la direzione in cui soffia il vento è uguale a quella di propagazione dell'onda sonora. Il fronte d'onda viene ripiegato anche dai gradienti di temperatura dell'atmosfera.

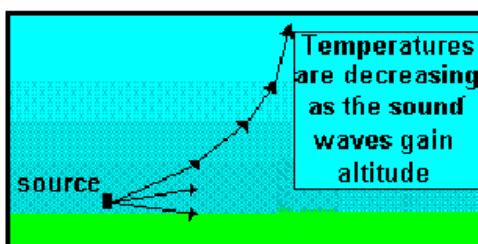


Figura 82: Effetti del gradiente di temperatura

Come sappiamo infatti, la velocità del suono è funzione diretta della temperatura dell'aria; in condizioni di temperatura costante il fronte sonoro si propaga con velocità uguale in tutte le direzioni; quando ci sono variazioni della temperatura atmosferica la velocità di propagazione si differenzia assumendo valori maggiori dove la temperatura è più alta e viceversa. Questo fatto provoca un ripiegamento dell'onda verso le zone a minor temperatura con un conseguente aumento del livello proprio. Si spiegano così quei fenomeni per cui, quando la temperatura cresce con l'atmosfera (inversione termica), suoni di livello molto basso possono essere percepiti anche a grandi distanze.

5. IL RUMORE E SUOI EFFETTI SULL'UOMO

Il rumore⁶ è uno degli agenti inquinanti più diffusi del nostro tempo. La vita dell'uomo nelle città e negli ambienti di lavoro è sottoposta continuamente a stimoli acustici che si accumulano uno dopo l'altro influenzando negativamente il benessere fisico e psichico dell'individuo.

Gli effetti nocivi del rumore non si ripercuotono esclusivamente sugli organi dell'udito ma anche, attraverso lo stress, sul sistema nervoso, cardiovascolare, digestivo ed endocrino. Purtroppo gli effetti del rumore non sono immediatamente visibili, tranne nei casi estremi di lesioni agli organi uditivi, ma si sommano nel tempo.

Un individuo soggetto a rumorosità ambientale superiore a 80 dBA è soggetto a rischi uditivi oltre che ad una serie notevole di effetti e danni di natura neurovegetativa.

5.1. PARAMETRI DA CUI DIPENDE IL RUMORE

I parametri fisici da cui dipende il rumore possono essere riassunti nel tripode del rumore (come indicato dal prof. M. Cosa):

La pressione sonora (dB)

La durata del suono (s)

La composizione spettrale (Hz)

Queste grandezze sono tutte rivelabili strumentalmente e quindi misurabili. Più complessa è la valutazione delle componenti soggettive psicofisiche ed accessorie del rumore, quali:

La saturazione

L'identificabilità della sorgente

Il controllo dell'emissione

L'effetto sorpresa

La sensibilità sensoriale

La presenza di un contenuto semantico

Queste componenti non sono misurabili strumentalmente ma attraverso un giudizio soggettivo delle persone che subiscono l'effetto del rumore. Pertanto risulta estremamente complesso caratterizzare un rumore con un unico indicatore oggettivo.

Negli ultimi due decenni si è cercato di caratterizzare il rumore con indici di valutazione connessi a particolari attività o funzioni dei soggetti interessati (vedi, ad esempio, indici NR e NC) oppure sono stati proposti descrittori complessi quali il LNP o altri più specifici per situazioni più particolari (ad esempio il TNI per il rumore da traffico veicolare).

5.2. EFFETTI DEL RUMORE SUL CORPO UMANO

Gli effetti del rumore sull'uomo possono essere di varia natura, come riportato nella seguente tabella. Gli effetti sono catalogati come:

- *Danno*: se provocano alterazioni psico-fisiche permanenti;
- *Disturbo*: se talvi effetti provocano alterazioni psico-fisiche temporanee;
- *Annoyance*: quando gli effetti provocano sensazioni di disagio o di fastidio che pone il soggetto ascoltatore in una posizione di giudizio negativo.

Nella seguente Tabella 13 si riporta un quadro sinottico dei danni che il rumore può provocare nei vari apparati dell'Uomo.

⁶ La definizione di rumore sarà data nel proseguito a proposito della legislazione vigente in Italia. Qui basti osservare che un rumore è un suono capace di produrre disturbo o danno all'Uomo. Per la valutazione del disturbo occorre un giudizio e pertanto il rumore può essere considerato come la somma di un fenomeno fisico (il suono) e di uno psicofisico (il giudizio di accettabilità che ne dà l'Uomo).

Apparato	Sintomi	Evoluzione	Soglia in dB(A)
Uditivo	- Fischi e ronzii persistenti	Sordità	> 80
Cardio-vascolare	- Accellerazione ritmo cardiaco - Aumento pressione arteriosa	Arterio sclerosi	> 75
Cerebrale	- Disadattamento	Turbe psichiche	> 95
Digerente	- Disturbi digestivi - Bruciori di stomaco	Gastrite Ulcera	< 95
Dell'equilibrio	- Vertigine e nausea	Perdita dell'equilibrio	> 110
Respiratorio	- Tachipnea - Diminuzione volume corrente		95
Visivo			> 75

Tabella 13: Danni provocati dal rumore nei vari apparati

5.3. EFFETTI DEL RUMORE SULL'UDITO

Il legame esistente tra esposizione al rumore e lesione al sistema uditivo è conosciuto e studiato da circa duecento anni.

Un'esposizione prolungata al rumore può provocare una perdita uditiva temporanea, cioè reversibile al termine dell'esposizione, oppure una perdita uditiva permanente cioè irreversibile. Le parti dell'orecchio in cui inizialmente si localizzano le lesioni sono l'orecchio esterno e medio.

La rottura del timpano, dovuta all'alta pressione di un suono violento, è una patologia che rientra in questo caso; tuttavia seppur dolorosa non è un danno gravissimo ed è in parte rimediabile per via chirurgica. Infatti le lesioni provocate all'orecchio interno sia da suoni violenti che da una esposizione al rumore prolungata nel tempo sono assai più pericolose e difficilmente rimediabili.

Un danno specifico da rumore è l'*ipoacusia* che consiste nell'innalzamento della pressione di soglia percepibile, così da rendere l'individuo sordo a suoni di particolari frequenze. Il punto in cui avvengono le lesioni è, per esposizioni sia ad alte che a basse pressioni, il giro basale della chiocciola ed in particolare, la regione nella quale vengono recepite le frequenze attorno ai 4000 Hz (effetto *Brüel*).

Una esposizione prolungata al rumore eccessivo anche se non violento, può portare alla sordità pressoché totale passando attraverso perdite graduali e variabili della sensibilità alle frequenze e all'intensità; ciò dipende sia dalla predisposizione fisica dell'individuo, sia dallo spettro sonoro del rumore a cui esso è sottoposto; gli ultrasuoni ad esempio sono più dannosi delle altre frequenze. Da statistiche mediche è risultato che, mediamente, una persona, dopo dieci anni di esposizione a rumore eccessivo (vedi ambienti lavorativi), subisce, per le frequenze attorno ai 4000 Hz, una perdita di sensibilità superiore ai 40 dB.

Il rumore produce sull'apparato uditivo danni che possiamo catalogare in temporanei e permanenti. In entrambi i casi questi possono essere facilmente rilevati mediante esami audiometrici.

Le manifestazioni misurabili della perdita della capacità uditiva possono così classificarsi:

- *stato di adattamento;*
- *fatica uditiva;*
- *trauma acustico;*
- *sordità professionale.*

Il rumore intenso può provocare:

- *stordimento,*
- *difficoltà della parola,*
- *riduzione della memoria,*
- *sensazione di fatica,*
- *cefalea, spossatezza,*
- *irritabilità e inquietudine.*

Si osservi che di tutti i danni sopra citati solo quello relativo alla sordità è oggettivamente dimostrabile con certezza mediante un esame audiometrico, osservando l'innalzamento della soglia uditiva. Tutti gli altri danni hanno molto di soggettivo e non sono suscettibili di misura e quindi di certificazione medica. Questo è il motivo per cui si valuta il rischio uditivo solamente sulla possibilità di perdita dell'udito.

5.4. EFFETTI DEL RUMORE SUL SONNO

Il rumore interferisce notevolmente con il sonno inibendo, se ad alti livelli, la fase di transizione al sonno profondo. Nella Tabella 14 si ha la scala di lesività del rumore proposta da Cosa-Nicoli.

> = 55	Possibili disturbi del sonno a finestre aperte
> = 60	Possibili disturbi del sonno e della conversazione a finestre aperte
> = 65	Possibili disturbi del sonno e della conversazione anche a finestre chiuse
> = 55	Disturbi del sonno e della conversazione; possibili reazioni

Tabella 14: Tabella di Cosa – Vicoli sulla lesività del rumore

5.5. DESCRITTORI ACUSTICI PER IL RUMORE

Oltre al livello di pressione sonora (LPS) riveste grande importanza il **Livello equivalente ponderato in scala A**, assunto ormai quale descrittore acustico fondamentale per la valutazione del rumore ai sensi del DPCM 1/3/91. Esso è definito dalla seguente relazione:

$$L_{Aeq,t} = 10 \log \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \quad \text{in dB(A)} \quad [76]$$

ove:

$L_{Aeq,t}$	è il livello continuo equivalente ponderato nella scala A
t_1	istante iniziale della misura
t_2	istante finale della misura
$T = t_2 - t_1$	periodo totale di misura
$p_A(t)$	pressione sonora ponderata in scala A.

Lo strumento che può calcolare automaticamente questo descrittore si chiama **Fonometro Integratore** ed è espressamente indicato dal D.P.C.M. 1/3/91 quale unico strumento da usare per tale misure.

Si osservi che questo *descrittore* non rispetta tutti i parametri fisici e psicofisici relativi alla valutazione del rumore ma solo alcuni parametri fisici (tempo e pressione).

La limitatezza di questo descrittore è compensata dalla facilità di misura (solo strumentale mediante il fonometro integratore) mentre la valutazione dei parametri psicofisici richiederebbe indagini sociologiche complesse e spesso imprecise. Il **Livello di Esposizione Sonoro**, L_{aeq} , è un livello di energia mediato nell'intervallo di un secondo, qualunque sia la durata della misura. In altre parole, con riferimento alla formula del Leq ove l'intervallo di integrazione è pari a $T=t_2-t_1$, si hanno, riferendo la misura ad 1 secondo, le relazioni seguenti.

$$L_{AE} = L_{eq} + 10 \log T \quad [77]$$

Spesso occorre studiare particolari eventi che hanno origine al di sopra di una certa soglia di livello sonoro. Il Livello Equivalente di questi particolari eventi viene indicato con SEL (*Short Equivalent Level*). Nella Figura 83 si ha la rappresentazione dell'evento da analizzare (in verde) e per esso si calcola il SEL.

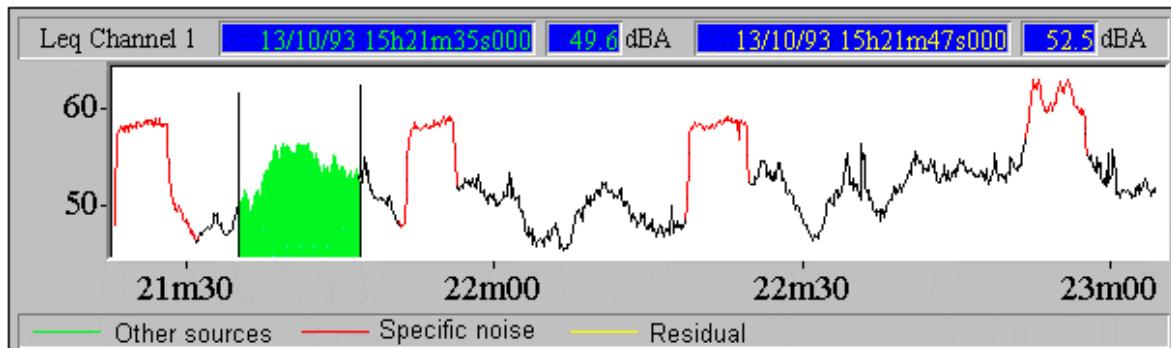


Figura 83: Short Equivalent Level

5.6. EFFETTI DELL'ESPOSIZIONE AL RUMORE NEGLI AMBIENTI LAVORATIVI.

Poiché le onde sonore trasportano energia il loro assorbimento causa nell'organismo umano (e in special modo nell'apparato uditivo) affaticamento. Si definisce **dose di rumore** la quantità di energia totale assorbita in un periodo di esposizione. Normalmente il periodo di esposizione tollerabile è correlato con il recupero fisiologico. Un'esposizione ad un rumore di elevata intensità per un certo periodo di tempo comporta l'innalzamento della soglia uditiva.

In Figura 84 si ha un'indicazione delle relazioni fra perdita temporanea dell'udito e numero di ore di esposizione a data intensità. Nella Figura 85 si ha l'andamento dello spostamento temporaneo della soglia uditiva in funzione delle ore di esposizione ad un rumore di intensità pari a 80, 85 e 90 dBA. Tale spostamento viene rilevato effettuando una misura audiometrica del lavoratore alla fine del turno lavorativo, entro i primi cinque minuti successivi.

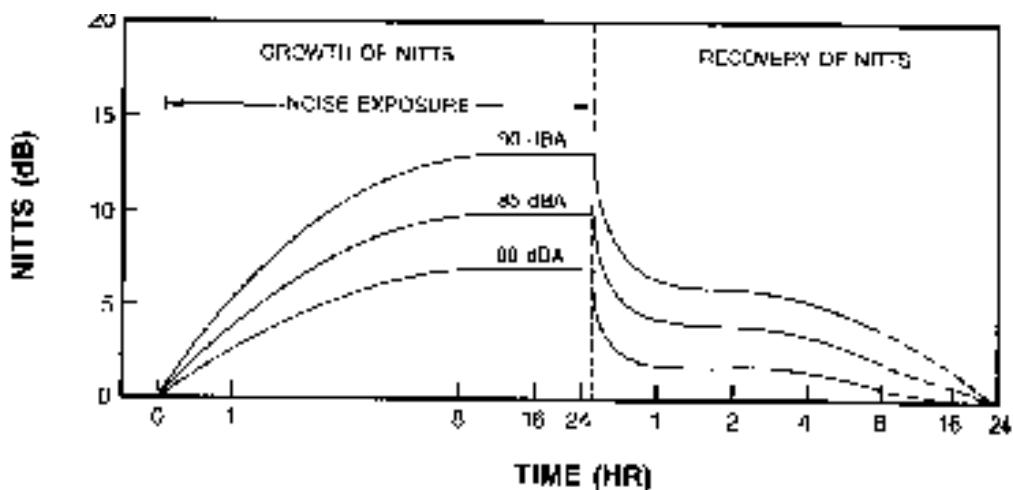


Figura 84: Andamento del NITTS in funzione del tempo di esposizione al rumore e suo recupero.

Come si può ben osservare dopo otto ore di riposo per un'esposizione ad un livello di 80 dBA si ha un recupero quasi totale del NITTS. La stessa cosa non può dirsi per un'esposizione ad un livello di 85 e 90 dBA. Per quest'ultimo caso si ha una perdita residua pari a 5 dBA.

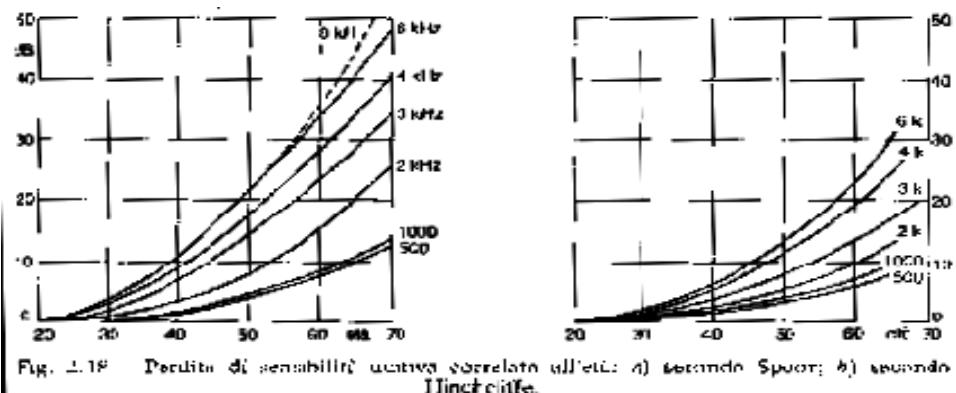


Fig. 2.18 - Perdita di sensibilità uditiva correlata all'età: a) secondo Spurter; b) secondo Tinnetti.

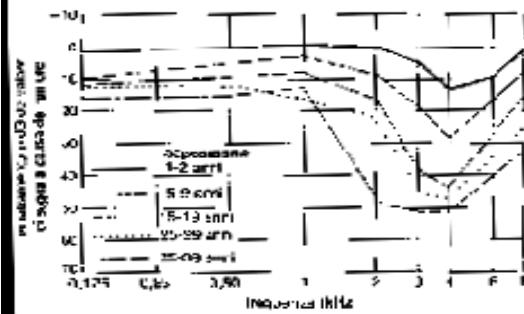


Fig. 2.19 - Curve rappresentanti la perdita di sensibilità uditiva come funzione degli anni di permanenza in un ambiente rumoreggianti. Si nota che tale perdita è particolarmente accentuata rispetto a quella dovuta all'età, nel campo di frequenze 2-4 kHz, in cui massimo è il contenuto di informazioni della comunicazione acustica.

Figura 85: Perdita dell'udito per lavoratori con anzianità lavorativa compresa fra 1 e 39 anni esposti a 80 dB.A

Per livelli superiori si avrebbero perdite residue ancora superiori e questo spiega l'attenzione a questi limiti posta dal D.Lgs 277/91 per la protezione dei lavoratori nei luoghi di lavoro. Il NIOSH ha determinato la probabilità (minima, media e massima) di handicap uditivo (cioè la probabilità di avere un incremento di 25 dB della soglia uditiva) per esposizioni giornaliere variabili per un periodo di 40 anni. Questa curva è riportata in Figura 86.

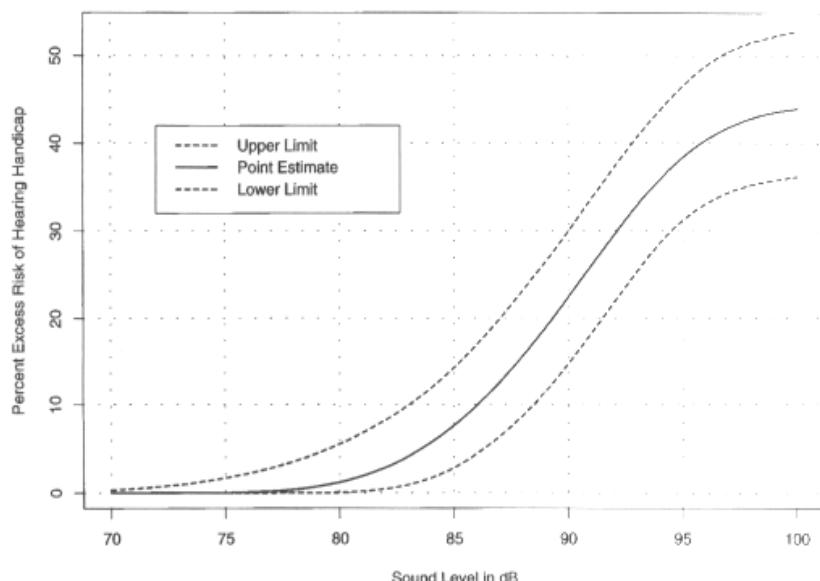


Figura 86: Probabilità di handicap uditivo data dal NIOSH

Come si può osservare fino a 80 dB la probabilità è quasi nulla e pertanto rientra nella variabilità statistica. Oltre questo valore la probabilità cresce: a 90 dB la probabilità media è circa il 22% che diviene 40% a 95 e 43% a 100 dB. Vedremo, nel prosieguo (applicazione del D. Lgs 277/91) come i limiti considerati di soglia e massimi tollerabili siano proprio di 80 dB e 90 dB. Le giustificazioni di queste scelte scaturiscono proprio da quanto sin qui osservato. A titolo esemplificativo si consideri l'audiogramma di Figura 87 che evidenzia nell'orecchio sinistro un danno dovuto all'effetto Brüel nelle frequenze di circa 4000 Hz.

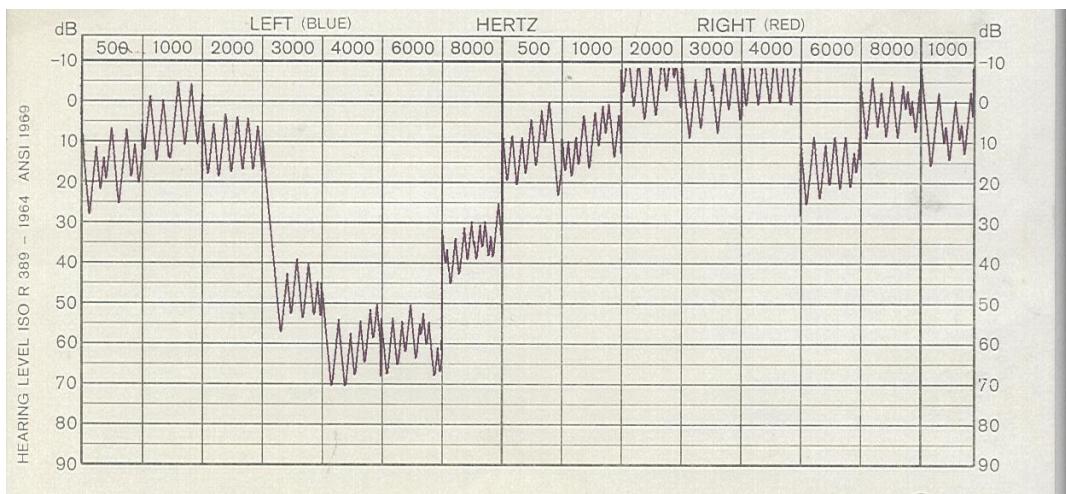


Figura 87: Audiogramma con danno di Brüel

Questo audiogramma si riferisce ad un soggetto che ha svolto il servizio militare in artiglieria.

Nella Figura 96 si ha un audiogramma di una hostess con venti anni di servizio. Si osservi l'innalzamento della soglia uditiva di oltre 30 dB e il danno più marcato nell'orecchio destro.

In Figura 89 si ha un audiogramma di un soggetto sano. Si osservi come la soglia uditiva sia al livello zero per entrambi gli orecchi.

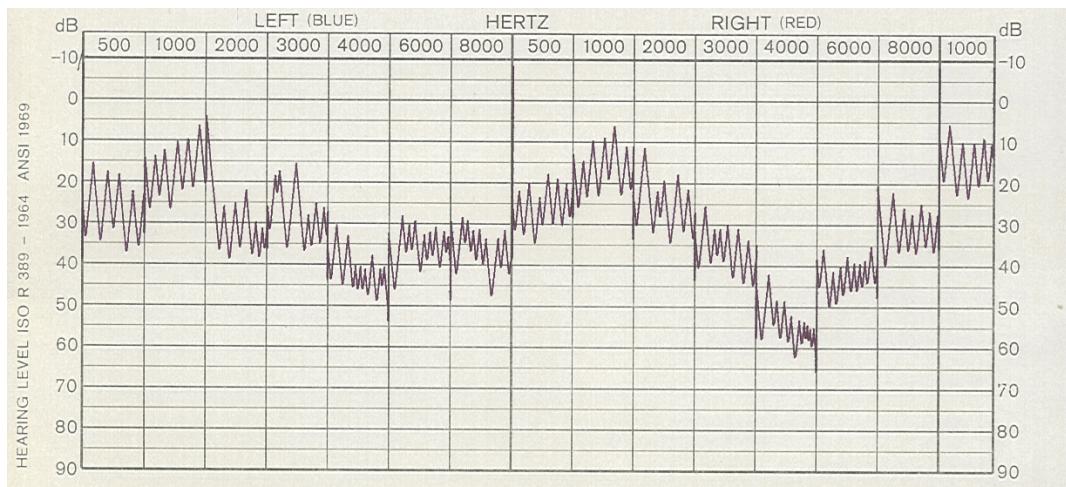


Figura 88: Innalzamento della soglia uditiva per una hostess con 20 anni di servizio

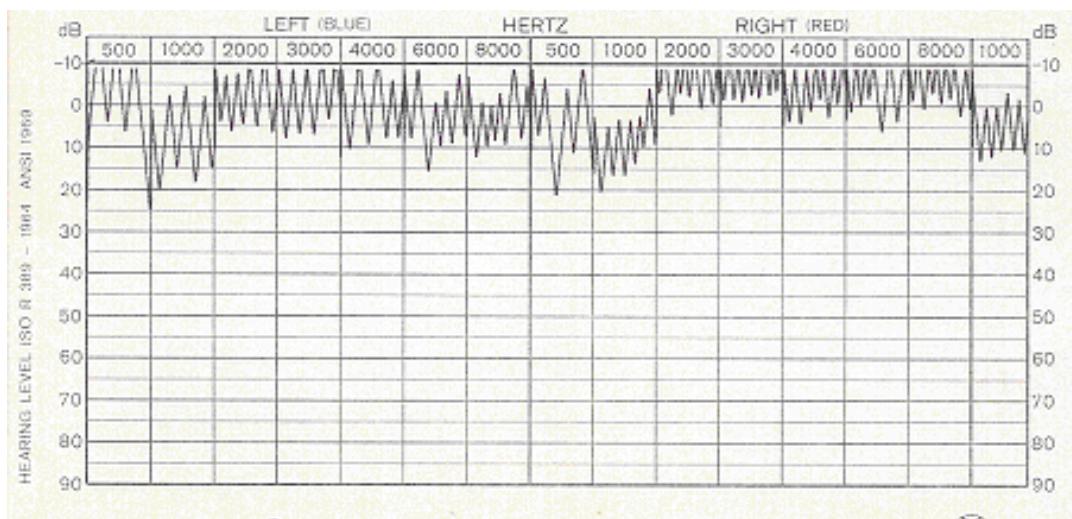


Figura 89: Soglia uditiva di un soggetto normale

6. IL D.P.C.M. 1-3-91

E' questo il primo strumento legislativo organico emesso dopo 130 anni dall'Unità d'Italia. Esso raccoglie in modo organico alcune disposizioni per la valutazione e controllo della rumorosità immessa nelle abitazioni e nell'ambiente esterno. Malgrado l'attesa di tutta la comunità per questo decreto, non si può dire che esso sia stato applicato interamente su tutto il territorio nazionale. Una sentenza della Corte Costituzionale ne ha bloccato l'efficacia nella parte più di competenza dei comuni: in particolare non è stato possibile zonizzare le aree comunali e pertanto fissare limiti di rumorosità esterna compatibili con le aree urbane. Malgrado queste limitazioni questo decreto ha messo ordine nel mondo giudiziario fornendo criteri oggettivi di valutazione del rumore nei contenziosi civili. Esso ha inoltre standardizzato le metodologie di misura ed ha indicato nel livello continuo equivalente (Leq.A) l'unico parametro fisico di riferimento per le valutazioni della rumorosità interna ed esterna. Il decreto detta nell'Allegato A le definizioni tecniche e nell'Allegato B le tecniche di rilevamento e di misura dell'inquinamento acustico. Sono escluse dal decreto le sorgenti di rumore interne a stabilimenti industriali ed artigianali che non diffondono rumore nell'ambiente esterno.

6.1. ATTIVITÀ ESCLUSE DAL DECRETO

Oltre alle sorgenti di rumore interne a stabilimenti industriali ed artigianali che non diffondono rumore nell'ambiente esterno, sono escluse dal decreto:

- le aree e le attività aeroportuali che dovranno essere regolamentate da altro decreto (ancora non emesso);
- le attività temporanee (quali cantieri edili, manifestazioni in luogo pubblico) che comportino l'uso di macchinari ed impianti rumorosi: esse debbono essere autorizzate dal Sindaco anche in deroga allo stesso D.P.C.M. 1-3-91. Per i cantieri temporanei è stata emessa la L. 494/96 che ne disciplina la sicurezza anche nei confronti delle sorgenti rumorose, in conformità al D.Lgs 277/91.

Questo decreto riveste importanza anche per la sicurezza nei cantieri lavorativi (L. 494/96) quando il rumore prodotto dai macchinari interessa le abitazioni vicine.

6.2. LA ZONIZZAZIONE ACUSTICA

L'art. 2 del D.P.C.M. 1-3-91 stabilisce che i comuni adottano la classificazione in zone riportate nella tabella I. Questa classificazione è valida solo quando non si ha la zonizzazione del territorio indicata dallo stesso DPCM 1-3-91 poi sospesa dalla Corte Costituzionale e infine ripresa dalla L. 447/95.

Zonizzazione	Limite diurno	Limite notturno
Tutto il territorio nazionale	70	60
Zona A (D.M. 1444/68)	65	55
Zona B (D.M. 1444/8)	60	50
Zona esclusivamente industriale	70	70

Lo stesso articolo fissa i limiti massimi dei livelli sonori equivalenti in relazione alla diversa destinazione d'uso del territorio nella tabella successiva. Valori dei limiti massimi del livello sonoro equivalente (Leq.A) relativi alle classi di destinazione d'uso del territorio di riferimento

Classi di destinazione d'uso del territorio	Tempi di riferimento	
	Diurno	Notturno
I) Aree particolarmente protette	50	40
II) Aree prevalentemente residenziali	55	45
III) Aree di tipo misto	60	50
IV) Aree di intensa attività umana	65	55
V) Aree prevalentemente industriali	70	60
VI) Aree esclusivamente industriali	70	70

6.3. DEFINIZIONI FONDAMENTALI (ALLEGATO A)

Il DPCM 1-3-91 fornisce alcune definizioni tecnico-legali molto importanti anche ai fini dell'applicazione dello stesso decreto sia in sede tecnica che giudiziaria.

Rumore: qualunque emissione sonora che provochi sull'uomo effetti indesiderati, disturbanti o dannosi o che determini qualsiasi deterioramento qualitativo dell'ambiente. Questa definizione lascia aperta la possibilità di interpretazioni giudiziarie non sempre oggettive poiché non sempre è facile definire quando e quanto un effetto sia *indesiderato* o anche semplicemente *disturbante*. Inoltre poiché il rumore produce un deterioramento qualitativo dell'ambiente quasi sempre i disturbi e i danni prodotti dal rumore sono anche penalmente perseguitibili perché in contrasto con la Costituzione che garantisce la salubrità dell'ambiente a difesa dei cittadini.

Sorgente sonora: qualsiasi oggetto, dispositivo, macchina o impianto o essere vivente idoneo a produrre emissioni sonore.

Sorgente specifica: sorgente sonora selettivamente identificabile che costituisce la causa del disturbo. E' su questa sorgente che deve essere valutato il livello differenziale avanti definito.

Livello residuo (L_r): è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A" che si rileva quando si escludono le specifiche *sorgenti disturbanti*. Esso deve essere misurato con le identiche modalità impiegate per la misura del rumore ambientale. E' importante individuare le sorgenti disturbanti, definite nel prosieguo.

Livello ambientale (L_a): è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A" prodotto da tutte le sorgenti di rumore esistenti in un dato luogo e durante un determinato tempo. Il rumore ambientale è costituito dall'insieme del rumore residuo (come definito al punto precedente) e da quello prodotto dalle specifiche sorgenti disturbanti.

Livello differenziale: differenza tra il livello L_{eq}(A) di rumore ambientale e quello del rumore residuo.

Rumore con componenti impulsive: emissione sonora nella quale siano chiaramente udibili e strumentalmente rilevanti eventi sonori di durata inferiore ad un secondo. Queste componenti sono penalizzate, come si vedrà più avanti, con l'aggiunta di 3 dBA al valore misurato dell'L_{eq}.

Rumore con componenti tonali: emissioni sonore all'interno delle quali siano evidenziabili suoni corrispondenti ad un tono puro o contenuti entro 1/3 di ottava e che siano chiaramente udibili e strumentalmente rilevabili. Anche queste componenti sono penalizzate, come si vedrà più avanti, con l'aggiunta di 3 dBA al valore misurato dell'L_{eq}.

6.4. IL CRITERIO DIFFERENZIALE

Il D.P.C.M. 1-3-91 stabilisce all'art. 3 che *per le zone non esclusivamente industriali* indicate in precedenza, al limite massimo assoluto per il rumore, sono stabilite anche le seguenti differenze da non superare tra il livello equivalente del rumore ambientale e quello del rumore residuo (orientale differenziale): **5 dB (A)** durante il periodo diurno e **3 dB(A)** durante il periodo notturno.

La misura deve essere effettuata all'interno degli ambienti abitativi e nel tempo di osservazione del fenomeno acustico. In pratica si accetta un raddoppio del livello di pressione sonora, durante il periodo diurno, per effetto del rumore prodotto dalla sorgente specifica. L'Art. 3.2 dell'allegato B fornisce ulteriori indicazioni sull'applicabilità del criterio differenziale. In particolare esso non si applica se il livello ambientale diurno è < **40 dB(A)** e quello notturno è < **30 dB(A)**. Inoltre se i valori di rumore ambientale supera **60 dB(A)** di giorno e **45 dB(A)** di notte non devono essere considerati accettabili ai fini dell'applicabilità del criterio del limite massimo differenziale, restando comunque valida l'applicabilità del criterio stesso per livelli di rumore ambientale inferiori ai valori sopradetti.

Le motivazioni per la scelta di questo criterio sono riconducibili alla giurisprudenza corrente soprattutto di carattere regionale (Regione Lombardia, Regione Emilia Romagna, Regione Piemonte,...) che aveva, fino al momento di emissione del decreto 1-3-91, sentenziato imponendo che il rumore indotto non dovesse produrre più del doppio del rumore di fondo.

In realtà l'applicazione di questo criterio richiederebbe che il rumore di fondo non sia esso stesso disturbante e che quindi il sovrappiù (*differenziale*) sia imputabile solo al disturbo della sorgente di rumore. Un'altra motivazione del limite di 5 dB(A) è data dalla soglia di reazione comunitaria fissata dalla Raccomandazione ISO R 1996.

6.5. STRUMENTAZIONE E MODALITÀ DI MISURA

Strumentazione: debbono essere utilizzati strumenti in classe 1, come definiti negli standard I.E.C. n. 651/1979 e 804/1985. Le misure debbono essere eseguite con misuratore di livello sonoro (fonometro) integratore o strumentazione equivalente. Ciò nasce dalla necessità di dovere calcolare il livello equivalente dato dalla relazione:

$$L_{eq,AT} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t) dt}{p_0^2}$$

Nella figura seguente si ha una rappresentazione del LPS e del Leq per un rumore urbano.

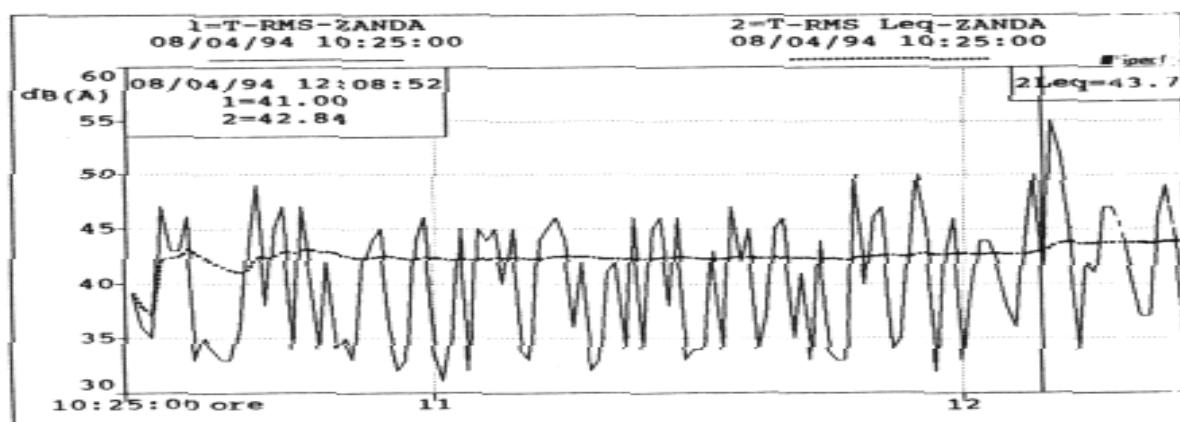


Figura 90: Andamento del LPS e del Leq.

6.5.1. RICONOSCIMENTO DI COMPONENTI IMPULSIVE NEL RUMORE

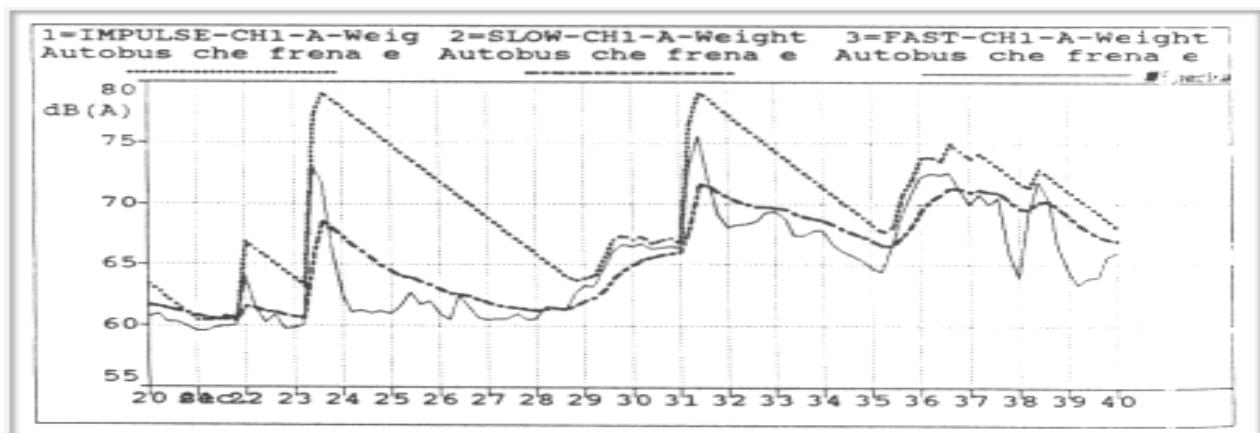


Figura 91: Rilevamento delle componenti impulsive secondo il DPCM 1-3-91

Per questa determinazione il D.P.C.M. 1-3-91 suggerisce all'art. 4 dell'All. B una semplice procedura. Si effettua la misura del livello massimo del rumore rispettivamente con costante di tempo **slow** ed **impulse**.

Qualora la differenza dei valori massimi delle due misure suddette sia superiore a 5 dB(A) viene riconosciuta la presenza di componenti impulsive penalizzabili nel rumore. In tal caso il valore del rumore misurato in Leq(A) dev'essere maggiorato di 3 dB(A).

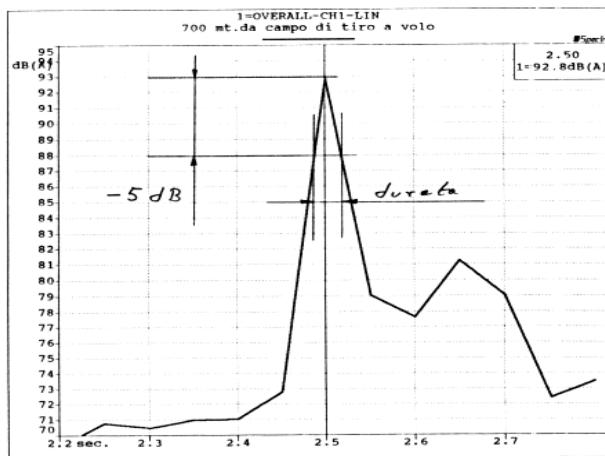


Figura 92: Criterio dell'abbassamento di -5 dB al valore di picco.

Un rumore avente durata inferiore ad un secondo e di intensità superiore a 60 dBA si definisce impulsivo e risulta particolarmente fastidioso perché la durata ($<1\text{ s}$) risulta inferiore del tempo medio di intervento dei muscoli tensore del timpano e dello stapedio. Pertanto la sensazione sonora risulta maggiore a causa del mancato intervento muscolare. Il DPCM 1-3-91 richiede che la presenza impulsiva sia rilevata mediante la contemporanea misura dell'evento sonoro e dall'essere il valore misurato con costante *impulse* superiore di almeno 5 dB a quella costante slow. Oltre a questo metodo si può controllare che la durata bilaterale del segnale a -5.0 dB da L_{Amax} . Fast sia minore di 1 secondo, come indicato nella figura 3.

6.5.2. RICONOSCIMENTO DEI COMPONENTI TONALI NEL RUMORE

Quando si riconosca la presenza di componenti tonali (suoni puri) nel rumore si procede ad una verifica indicata dall'art. 5 dell'All. B. Si effettua un'analisi spettrale del rumore per bande di $1/3$ di ottava. Quando, all'interno di una banda di $1/3$ ottava, il livello di pressione sonora di ambedue le bande adiacenti viene riconosciuta la presenza di componenti tonali penalizzabili nel rumore, vedi figura 38. In tal caso il valore del rumore misurato in $\text{Leq}(\text{A})$ dev'essere maggiorato di 3 dB(A) .

6.5.3. PRESENZA DI COMPONENTI IMPULSIVE E TONALI NEL RUMORE.

Qualora si presentino entrambi i casi visti in precedenza allora il valore del rumore misurato in $\text{Leq}(\text{A})$ dev'essere maggiorato di 5 dB(A) .

Dimostrazione della componente tonale generata da autoveicolo

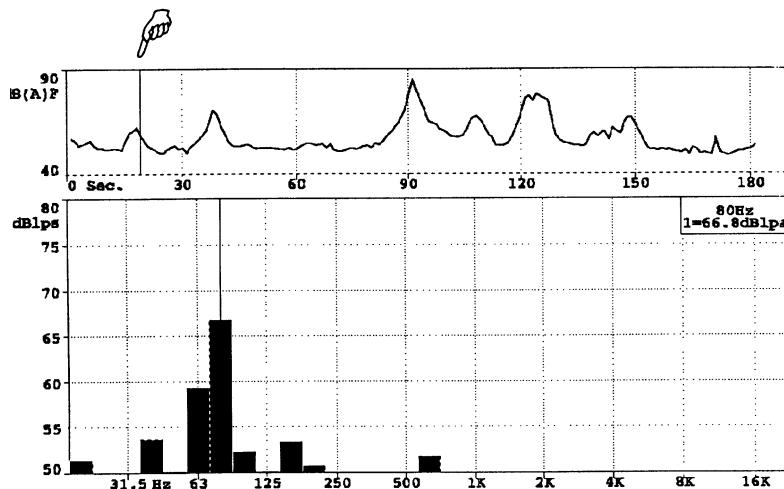


Fig. 7.4a.- Autoveicolo. Tono puro alla frequenza di 80 Hz, e 66.8 dBlps , distintamente udibile.

Figura 93: Rilievo di una componente tonale come indicato dal DPCM 1-3-91

Nel caso di rumore a tempo parziale esso deve persistere per almeno un'ora. Per durate comprese fra 15 minuti ed un'ora si diminuisce il valore di $L_{eq}(A)$ di 3 dB(A) e per quelle inferiori a 15 minuti di 5 dB(A).

6.6. DEFINIZIONI DEI TEMPI DI MISURA NEL DPCM 1-3-91.

Il D.P.C.M. 1/3/91 stabilisce in modo chiaro come effettuare le misure e in particolare definisce:

Tempo di Riferimento: l'intervallo di tempo all'interno del quale si determina la rumorosità ambientale e al quale vanno riferiti i dati rilevati. Ad esempio si può stabilire un tempo di riferimento per il periodo diurno e per il periodo notturno;

Tempo di Osservazione: All'interno del tempo di riferimento si individuano uno o più tempi di osservazione (TO) in ciascuno dei quali il livello del rumore presenta caratteristiche di variabilità omogenee;

Tempo di Misura: All'interno di ciascun tempo di osservazione si individua un tempo di misura (TM) di durata pari o inferiore al tempo di osservazione in funzione delle caratteristiche di variabilità del rumore. Ad esempio si può avere un tempo di osservazione TO = 1 ora e tempo di misura TM = 10 minuti.

Nella Figura 94 è possibile rendersi conto dei tre riferimenti temporali.

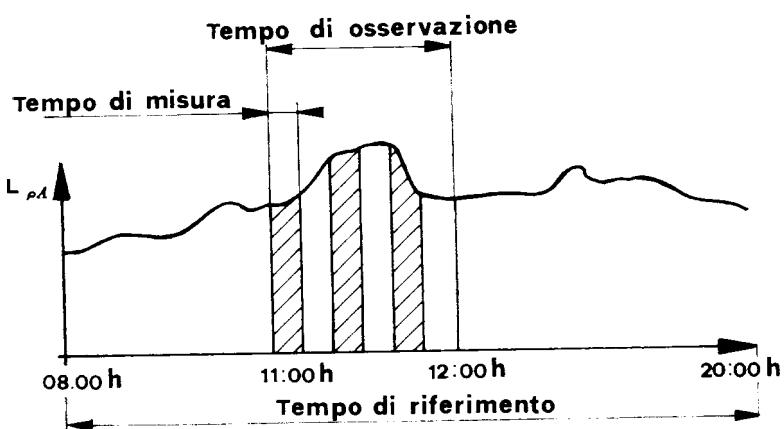


Figura 94: Tempo di riferimento, di osservazione e di misura secondo il DPCM 1-3-91

6.7. COME EFFETTUARE LE MISURE

Il D.P.C.M. 1/3/91 indica, nell'allegato B, le modalità di effettuazione delle misure di livello di pressione equivalente:

Le misure devono essere effettuate con la scala di pesatura A;

Il microfono deve essere posto ad 1,2- 1,5 m da terra e ad almeno 1 m dalle pareti o ostacoli in genere e deve essere orientato verso la sorgente di rumore la cui provenienza sia identificabile.

L'operatore deve mantenersi a sufficiente distanza dal microfono per non interferire con le misure;

Le misure debbono essere arrotondate a 0,5 dB;

Il microfono deve essere munito di cuffia antivento;

Nel caso di edifici con facciata a filo della sede stradale il microfono deve essere collocato ad 1 m dalla facciata;

Le misure all'interno degli edifici devono essere effettuate a finestre aperte e ad 1 m da esse.

La velocità del vento deve essere compresa fra 1 e 5 m/s;

Le misure non debbono essere influenzate dalle condizioni meteorologiche esterne. Nella misura in interni il microfono deve essere posto in modo che il suo asse sia nella direzione di provenienza

dell'onda diretta. Durante le misurazioni non debbono essere presenti altre persone in prossimità del microfono onde evitare effetti di schermatura (vedi Figura 95 in alto). Se sono presenti toni puri distintamente udibili si procederà alla verifica della posizione del microfono nel campo delle onde stazionarie (nodi e ventri) che necessariamente si verranno a formare: l'operatore dovrà mantenere il microfono opportunamente distante dal corpo e spostarlo nelle varie direzioni in modo da individuare il punto di misura massima (*ventre*).

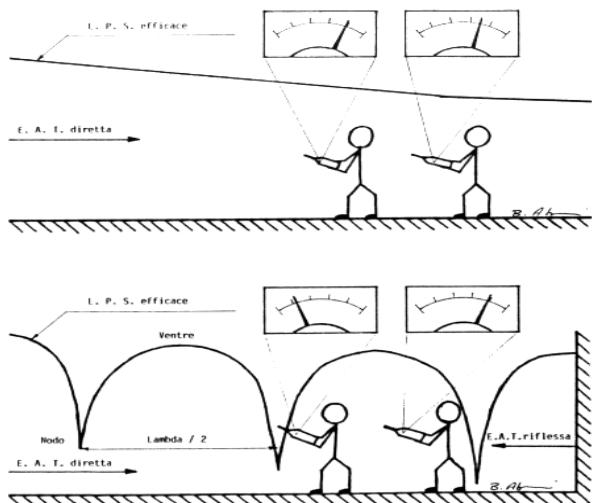


Figura 95: Tecnica di misurazione in corrispondenza di un ventre e di un nodo

I risultati delle misure effettuate debbono essere riportati nelle relazioni con tutte le descrizioni operative indicate dal Decreto. I dati raccolti in numero significativo possono essere sintetizzati in una breve analisi statistica avente le seguenti definizioni fondamentali.

Tali relazioni statistiche possono oggi facilmente essere applicate mediante un qualunque foglio elettronico che provvede a fornire sia i valori statistici che le rappresentazioni grafiche opportune. Il valore medio è dato dalla relazione:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad [78]$$

con x_i valori delle misure effettuate, N numero totale delle misure. Nel caso di più misure effettuate nello stesso sito si può effettuare il calcolo di Leq mediante la relazione:

$$L_{eqA,T} = 10 \log \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{pAi}} \quad \text{in dB(A)} \quad [79]$$

con L_{pA} livello di pressione filtrato con la scala A del fonometro. La varianza è data da:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N-1} \quad [80]$$

e la deviazione standard da:

$$D_s = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad [81]$$

I coefficienti di regressione lineare sono dati dalle relazioni:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N}} , \quad a = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - b \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad [82]$$

e l'indice di correlazione è dato dalla relazione:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \bar{x}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N y_i^2 - \bar{y}^2}} \quad [83]$$

Le relazioni statistiche sopra esposte possono oggi facilmente essere applicate mediante un qualunque foglio elettronico che provvede a fornire sia i valori statistici che le rappresentazioni grafiche opportune. Il D.P.C.M. 1/3/91 prescrive che i risultati debbono essere trascritti in un rapporto contenente almeno le seguenti indicazioni:

- data, luogo ed ora del rilevamento;
- tempo di riferimento, di osservazione e di misura;
- strumentazione impiegata e grado di precisione;
- valori di LEQ(A) rilevati del rumore residuo e del rumore ambientale e relativa differenza;
- classe di destinazione d'uso alla quale appartiene il luogo di misura e relativi valori massimi di esposizione;
- giudizio conclusivo.

E' opportuno, come indicato anche da altre normative regionali, indicare anche:

- lo scopo dell'indagine;
- la descrizione delle sorgenti di rumore, attuali o previste;
- la natura e lo stato delle superfici e degli ostacoli presenti tra le sorgenti e i punti di misura;
- le condizioni meteorologiche riscontrate durante le misurazioni (ad esempio, piovoso, secco, umido, nuvoloso, soleggiato,...).

Nel caso di rilevazioni di mappe acustiche occorre distanziare le curve di livello di 5 dB e usare colorazioni ben visibili. Oltre alle mappe si possono fornire tabelle e grafici con l'indicazione della statistica elementare dei descrittori misurati.

6.8. ADEGUAMENTO AI LIMITI DI RUMOROSITÀ

L'Art. 3 del D.P.C.M. 1-3-91 stabilisce che gli impianti a ciclo produttivo che operano nelle zone non esclusivamente industriali debbono adeguarsi al livello differenziale limite entro cinque anni dall'entrata in vigore del decreto eventualmente avvalendosi di norme di delocalizzazione degli impianti.

Le Imprese possono presentare alle Regioni un piano di graduale risanamento con l'indicazione del tempo necessario a realizzarlo. Il piano deve essere approvato dalle Regioni entro sei mesi dalla presentazione. I piani di risanamento debbono contenere le seguenti indicazioni:

- l'individuazione della tipologia ed entità dei rumori presenti, incluse le sorgenti mobili, nelle zone da risanare;
- i soggetti a cui compete l'intervento;
- le modalità ed i tempi per il risanamento ambientale;
- la stima degli oneri finanziari ed i mezzi necessari;
- le eventuali misure cautelari a carattere d'urgenza per la tutela dell'ambiente e della salute pubblica.

Le regioni, in base all'art. 3 del D.P.C.M. 1-3-91, dovrebbero predisporre un piano regionale annuale di intervento per la bonifica dall'inquinamento acustico.

7. IL D. LGS 277/91

Questo Decreto Legislativo ha come titolo: *Attuazione delle direttive n. 80/1107/CEE, n.82/605/CEE e n. 88/642/CEE in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizione ad agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro, a norma dell'art. 7 della L. 30-07-1990 n. 212.*

Esso è molto articolato e riporta limiti di tollerabilità per sostanze chimiche, fisiche e biologiche.

Nel Capitolo IV esso reca norme per la Protezione dei lavoratori contro i rischi di esposizione al rumore durante il lavoro. Esso stabilisce le misure di tutela per la sicurezza dei lavoratori durante il lavoro: in particolare si riportano qui alcune delle azioni principali che risultano essere:

- a) la valutazione da parte del datore di lavoro dei rischi per la salute e la sicurezza;
- b) utilizzazione limitata dell'agente sul luogo di lavoro;
- c) limitazione al minimo del numero di lavoratori che sono o possono essere esposti;
- d) controllo dell'esposizione dei lavoratori mediante la misurazione dell'agente;
- e) misure da attuare, quando sia superato un valore limite, per identificare le cause del superamento ed ovviarvi;
- f) misure tecniche di prevenzione;
- g) misure di protezione collettiva;
- h) uso dei segnali di avvertimento e di sicurezza;
- i) misure di protezione comportanti l'applicazione di procedimenti e metodi di lavoro appropriati;
- j) misure di protezione individuale, da adottare soltanto quando non sia possibile evitare in altro modo un'esposizione pericolosa;
- k) misure di emergenza da attuare in caso di esposizione anormale;
- l) misure igieniche;
- m) informazione e formazione completa e periodica dei lavoratori ovvero dei loro rappresentanti sui rischi connessi all'esposizione, i metodi per la valutazione dei rischi;
- n) attuazione di un controllo sanitario dei lavoratori;
- o) tenuta e aggiornamento di registri indicanti livelli di esposizione;
- p) accesso dei lavoratori o dei loro rappresentanti alle misure di esposizione;
- q) accesso di ogni lavoratore interessato ai risultati dei propri controlli sanitari;
- r) un sistema di notifica alle competenti autorità statali o locali delle attività che comportano esposizione ad agenti da controllare;

7.1. OBBLIGHI PER I DATORI DI LAVORO E PER I LAVORATORI

Il D.L. n. 277/91 prevede una serie di obblighi per i datori di lavoro, dei dirigenti o dei loro preposti che si conformano alle azioni prima elencate.

Essi debbono informare i lavoratori dei rischi che possono correre per esposizione ad agenti da controllare, permettono ai lavoratori di verificare l'applicazione delle misure di tutela della salute e di sicurezza, forniscono i necessari ed idonei mezzi di protezione, esigono e dispongono l'osservazione delle norme di sicurezza aziendali ed infine esigono l'osservanza degli obblighi di controllo da parte del medico competente.

Essi ancora debbono informare di eventuali rischi anche i lavoratori autonomi e le ditte esterne che prestano servizi all'interno dei loro stabilimenti. Questi operatori secondari debbono, a loro volta, assicurare la tutela dei loro dipendenti in relazione all'esposizione di questi ultimi all'azione di agenti da controllare. I lavoratori hanno l'obbligo di osservare le norme del D.L. e quanto predisposto dal datore di lavoro per la sicurezza e l'incolumità dei dipendenti. Debbono usare in modo appropriato i dispositivi di sicurezza, segnalano immediatamente le eventuali defezioni dei dispositivi di sicurezza, non rimuovono o modificano i dispositivi di sicurezza, non compiono di propria iniziativa operazioni o manovre non di loro competenza che possono compromettere la protezione o la sicurezza e infine si sottopongono a controlli sanitari.

7.2. OBBLIGHI DEL MEDICO COMPETENTE

Il D.L. 277/91 prevede che il Medico competente, a cura e spese del datore di lavoro, abbia i seguenti obblighi:

1. accertare lo stato di salute dei lavoratori;
2. esprimere giudizi di idoneità specifica al lavoro;
3. istituire una cartella clinica per ciascun lavoratore;
4. fornire al lavoratore spiegazioni sui controlli sanitari effettuati;
5. informare i lavoratori dei controlli sanitari effettuati;
6. visitare gli ambienti di lavoro almeno due volte l'anno;

Il medico competente può allontanare, anche temporaneamente, un lavoratore dal suo posto di lavoro per motivi sanitari. Il lavoratore può presentare ricorso avverso tale decisione all'organo di vigilanza. Il lavoratore che viene spostato dalle sue mansioni originali conserva il trattamento economico che gli competevo nella precedente mansione.

Il periodo massimo dell'allontanamento temporaneo deve essere previsto dai contratti nazionali.

7.3. CAP. IV: PREVENZIONE DEI LAVORATORI

Questo capitolo reca le disposizioni di legge per la tutela dei lavoratori per l'esposizione al rumore. Sono definite le finalità e riportate alcune definizioni importanti.

Esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore: è l'esposizione del lavoratore nelle otto ore lavorative ed è data dalla relazione:

$$L_{EP,d} = L_{Aeq,T_e} + 10 \log \frac{T}{T_e} \quad [84]$$

ove è:

$$L_{Aeq,T_e} = 10 \log \frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} \frac{p_A(t)}{P_0}^2 dt$$

con:

- T_e durata quotidiana di esposizione personale del lavoratore al rumore, ivi compresa la quota giornaliera di lavoro straordinario;
- T_D pari a 8 ore, cioè 28800 s;
- P_0 20 Pa, pressione di riferimento.

L'esposizione quotidiana personale non tiene conto degli effetti di un qualsiasi mezzo individuale di protezione.

$$L_{EP,w} = 10 \log \frac{1}{5} \sum_{k=1}^m 10^{0.1 L_{EP,d,k}} \quad [85]$$

ove $(L_{EP,w})_k$ rappresentano i valori quotidiani di $L_{EP,d}$ per ciascuno degli m giorni di lavoro della settimana considerata.

Esposizione settimanale professionale di un lavoratore al rumore: $(L_{ep,w})$: è la media settimanale dei valori quotidiani $L_{ep,d}$ valutata sui giorni lavorativi della settimana e data da:

La definizione di Livello di esposizione quotidiana al rumore è da intendersi come una definizione ad intervallo prefissato (tempo T_o di ore quotidiane di lavoro) del Livello Equivalente L_{Aeq,T_o} . Questo tipo di parametro è puramente strumentale e può essere determinato con uno strumento di misura adeguato (fonometro integratore e dosimetro personale). Gli inconvenienti che la definizione di L_{Ep} reca in sé sono di scarsa correlazione alla variabilità complessiva del rumore potendosi avere lo stesso L_{Ep} con un rumore costante di pari livello o con un rumore che vari anche fortemente attorno a questo valore.

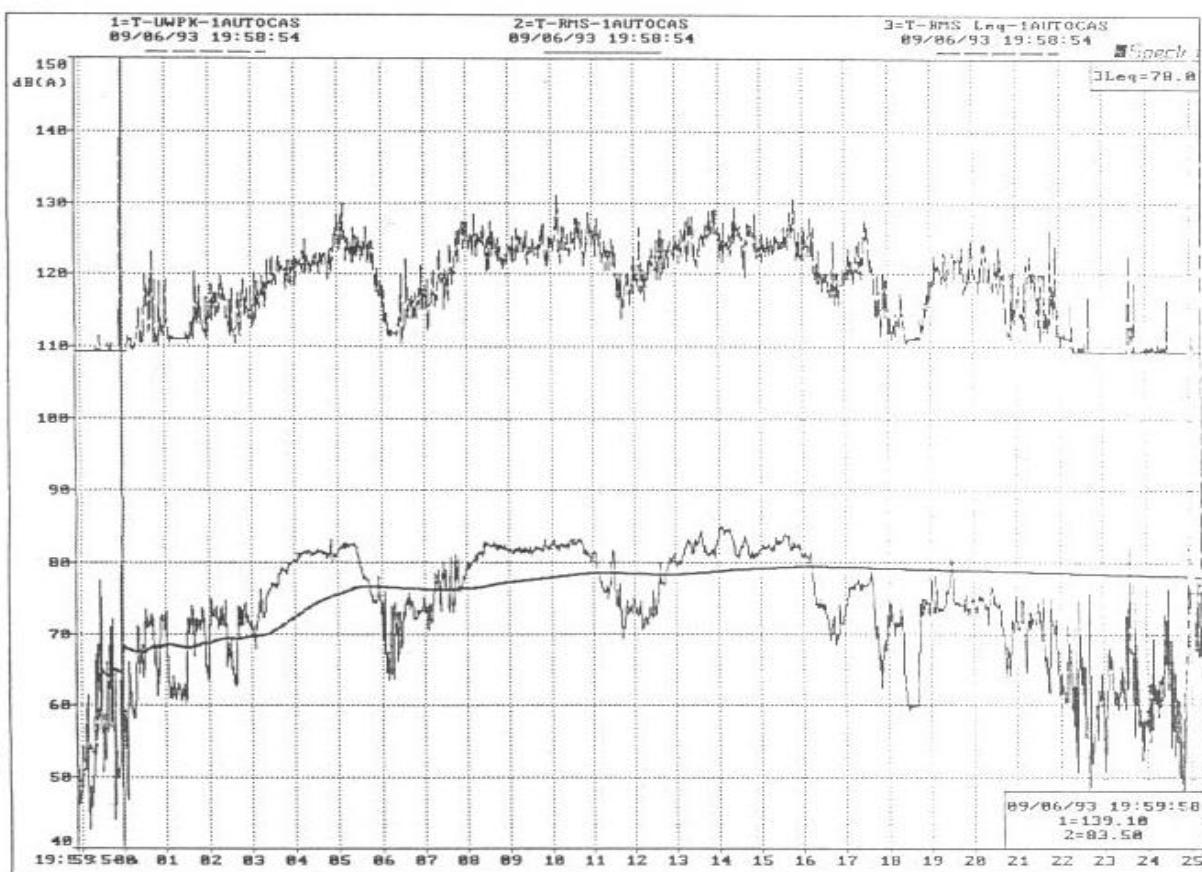


Figura 96: Andamento del LPS, del Leq e del livello massimo di picco non pesato.

Ad esempio nella Figura 96 si vede come Leq cresca con il valore medio del livello e sia poco influenzato dalle oscillazioni e quindi dai valori minimi e massimi dei livelli mentre il livello di picco massimo non pesato sia notevolmente elevato (esempio di Rumorosità interna ad un autoveicolo).

Per questo motivo il DL 277/91 prescrive che si misuri anche il livello massimo di pressione non pesato e che si controlli che questo non superi mai i **140 dBA**.

7.4. VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Il datore di lavoro procede alla valutazione del rumore durante il lavoro al fine di identificare i lavoratori ed i luoghi sui quali effettuare misure preventive e/o protettive. La valutazione è programmata e deve essere effettuata da personale competente con metodi e strumentazione adeguati.

Le misurazioni debbono essere ripetute qualora ci siano cambiamenti di macchine o cicli di lavorazione. I criteri e le modalità di misura debbono essere messi a disposizione dal datore di lavoro mediante un rapporto scritto.

Il datore di lavoro deve ridurre la minima i rischi da esposizione al rumore mediante procedure tecniche, organizzative e procedurali concretamente attuabili.

Se in un luogo di lavoro si supera la dose giornaliera di **90 dBA** oppure il livello di pressione massimo supera i **140 dB** (200 Pa) occorre esporre una segnaletica adeguata, perimetrare i luoghi e limitarne l'accesso.

Se l'esposizione quotidiana supera **80 dBA** il datore di lavoro informa i lavoratori su:

- i rischi per l'udito dall'esposizione al rumore;
- le misure adottate in applicazione delle presenti norme;
- le misure di protezione cui i lavoratori debbono conformarsi;
- la funzione dei mezzi individuali di protezione, le circostanze in cui ne è previsto l'uso e le modalità d'uso;

- il significato e il ruolo del controllo sanitario;
- i risultati ed il significato delle valutazioni effettuate.

Se l'esposizione quotidiana supera gli **85 dBA** occorre fornire al personale un'adeguata preparazione su:

- l'uso corretto dei mezzi individuali di protezione;
- l'uso corretto delle macchine e degli utensili al fine di ridurre il rischio uditivo.

7.5. USO DEI MEZZI INDIVIDUALI DI PROTEZIONE

Quando l'esposizione al rumore *può superare 85 dBA* il datore di lavoro è tenuto a mettere a disposizione dei lavoratori i mezzi individuali di protezione dal rumore. Questi debbono essere adattati alle condizioni di lavoro del lavoratore.

I mezzi di protezione individuale sono considerati validi ai fini del D.L. 277/91 solo se mantengono un livello di esposizione personale quotidiana inferiore a 90 dBA.

I lavoratori la cui esposizione giornaliera supera i 90 dBA debbono usare i mezzi di protezione individuali.

I lavoratori sottoposti ad esposizione al rumore superiore agli 85 dBA debbono sottoporsi a controllo del medico indipendentemente dall'uso di mezzi di protezione individuale.

Il controllo deve prevedere la misura della soglia uditiva, la verifica dello stato di salute generale e della sensibilità acustica individuale.

La frequenza dei controlli è stabilita dal medico e non può superare l'intervallo di due anni se l'esposizione non supera 90 dBA ed un anno se l'esposizione supera i 90 dBA.

I lavoratori esposti a rumore fra 80 e 85 dBA possono richiedere di essere controllati dal medico. Il datore di lavoro, in conformità al parere del medico, adotta misure preventive e protettive per singoli lavoratori al fine di favorire il recupero audiologico.

Tali misure possono comportare anche la riduzione dell'esposizione giornaliera mediante riorganizzazione del ciclo produttivo.

L'organo di vigilanza controlla l'applicazione del presente D.L. Il datore di lavoro comunica all'organo di vigilanza gli eventuali superamenti dei limiti di esposizione al rumore e i rimedi proposti.

7.6. DEROGHE PER SITUAZIONI PARTICOLARI

Il datore di lavoro può chiedere deroghe all'applicazione dell'art. 43 (applicazione dei mezzi individuali di protezione del rumore) se non è in grado con misure tecniche o organizzative di ridurre l'esposizione al di sotto di 90 dBA, se non è possibile evitare tale rischio con alcun mezzo.

Le richieste vanno inviate al Ministero del Lavoro e della Previdenza sociale ovvero al Ministero dell'industria, del commercio e dell'artigianato per le attività estrattive.

La concessione delle deroghe è condizionata all'intensificazione del controllo sanitario da parte del medico competente.

Le concessioni vengono rilasciate dai ministeri di concerto con il Ministero della Sanità. I lavoratori esposti a rumori che superano i limiti di 85 e 90 dBA sono iscritti nel registro previsto dal presente D.L. 277/91.

Detto registro deve essere consegnato in copia all'ISPESL e alla USL competente per territorio.

Il datore di lavoro deve anche comunicare l'eventuale cessazione del rapporto di lavoro. Il registro può essere richiesto dall'ISPESL o dalla USL per controlli periodici.

L'applicazione del D.L. 277/91 prevede al Capo V **Norme penali** sia per il datore di lavoro che per il lavoratore che non utilizza le protezioni individuali dal rumore.

7.7. SCHEDA DI VALUTAZIONE DEL RUMORE

Per la valutazione del rischio derivante dal rumore (D. Lgs 277/91) si adotta la seguente scheda che sintetizza un prontuario degli adempimenti di sicurezza.

Adempimenti	Tempi/Periodicità	Norme	Soggetti obbligati	Enti preposti	Sanzioni
Valutazione del rischio	Inizio delle attività ogni volta che vi siano mutamenti organizzativi che influiscano sulla rumorosità	D.Lgs 15.8.1991 n. 277 art. 40 a Allegato VI.	Datore di lavoro	USL	Arresto da tre a sei mesi o ammenda da L. 10 milioni a L. 50 milioni.
Formazione (sull'uso corretto dei mezzi individuali di protezione dell'udito, sull'uso corretto, ai fini della riduzione al minimo dei rischi per l'uditivo, degli utensili, macchine, apparecchiature che possono produrre un'esposizione quotidiana al rumore superiore a 85 dBA)	Entro 30 giorni da quando l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore abbia superato 90 dBA o il valore della pressione acustica istantanea non ponderata sia stato superiore a 140 dBA .	D.Lgs 15.8.1991 n. 277, art. 45	Datore di lavoro/Medico competente.	USL	Arresto da tre a sei mesi o ammenda da L. 10 milioni a L. 50 milioni.
Informazione (sui rischi derivanti dall'esposizione al rumore, sulle misure adottate, sulle misure di protezione adottate, sulla funzione dei mezzi individuali di protezione, sul controllo sanitario, sui risultati della valutazione)	Qualora l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore superi 80 dBA	Art 42, comma 1.	Datore di lavoro	USL	Arresto da 2 a 4 mesi o ammenda da L. 3 milioni a L. 15 milioni.
Controllo Sanitario	Qualora l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore superi gli 85 dBA . Tra 80 e 85 dBA solo se lo richieda il lavoratore e il Medico competente ne confermi l'utilità.	D.Lgs 15.8.1991 n. 277, art. 44 e Allegato VII	Datore di lavoro/Medico competente.	USL	Arresto da 2 a 4 mesi o ammenda da L. 3 milioni a L. 15 milioni.
Comunicazione all'organo di vigilanza delle misure per la riduzione del rumore.	Entro 30 giorni da quando l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore abbia superato 90 dBA o il valore della pressione acustica istantanea non ponderata sia stato superiore a 140 dBA.	D.Lgs 277/91 art. 45.	Datore di lavoro/Medico competente	USL	Arresto da 3 a 6 mesi o ammenda da L. 10 milioni a L. 50 milioni.
Registrazione dell'esposizione dei lavori	Qualora l'esposizione quotidiana personale al rumore sia superiore a 90 dBA .	D. Lgs 277/91, art. 49	Datore di lavoro	ISPESL - USL	Arresto da 2 a 4 mesi o ammenda da L. 3 milioni a L. 15 milioni.
Deroghe all'art 43 per situazioni lavorative particolari (Nota).		D. Lgs 277/91, Art 48	Datore di lavoro	Ministero del Lavoro per le attività estrattive e Ministero dell'Industria.	

NOTA: Il datore di lavoro ha i seguenti obblighi:

- a) consegna copia del registro all'ISPESL e alla USL competente per territorio cui comunica, ogni tre anni e comunque ogni qualvolta l'ISPESL medesimo ne faccia richiesta, le variazioni intervenute;
- b) consegna, a richiesta, all'organo di vigilanza e all'Istituto Superiore di sanità copia del predetto registro;
- c) comunica all'ISPESL e alla USL competente per territorio la cessazione del rapporto di lavoro, con le variazioni sopravvenute dall'ultima comunicazione;
- d) consegna all'ISPESL e alla USL competente per territorio, in caso di cessazione dell'attività, il registro;
- e) richiede all'ISPESL e alla USL competente per territorio copia delle annotazioni individuali in caso di assunzione di lavoratori che abbiano in precedenza esercitato attività che comportano le condizioni di esposizione di cui all'art. 41;
- f) comunica ai lavoratori interessati tramite il medico di competenza. Le relative annotazioni contenute nel registro e nella cartella sanitaria e di rischio.

Tabella 15: Adempimenti per l'applicazione del D.Lgs 277/91

7.8. TEMPO DI ESPOSIZIONE E LIVELLO DI ESPOSIZIONE PERSONALE

Qualora il livello di esposizione personale superi il valore di 80 dBA occorre variare il tempo di esposizione in modo da preservare il rischio di danno uditivo. Sono in uso due criteri detti di Intensità di scambio:

7.8.1. CRITERIO 3-DB

Poiché l'energia sonora raddoppia con un incremento di 3 dB allora si dimezza il tempo di esposizione per ogni 3 dB di incremento del livello di esposizione. Questo criterio (conservativo e cautelativo) non tiene conto del recupero fisiologico dell'uomo e dei rumori intermittenti. Esso è supportato da osservazioni epidemiologiche su popolazioni esposte a rumori continui ed è stato adottato in molte norme internazionali.

7.8.2. CRITERIO 5-DB

Osservazioni sperimentali hanno mostrato che riducendo di metà il tempo di esposizione (anche a rumori intermittenti) si può innalzare il livello di 5 dB senza aumentare il rischio di danno uditivo sull'uomo. Questo criterio tiene in parte conto del recupero fisiologico dell'uomo ed è stato adottato da numerose nazioni, fra cui gli USA.

7.9. STRUMENTI PER MISURARE IL LIVELLO DI ESPOSIZIONE

Normalmente si utilizza un particolare fonometro integratore di ridotte dimensioni e con lettura limitata dei dati detto **dosimetro** personale. Esso consente di misurare il livello di esposizione giornaliero, il livello di picco e il livello massimo.



Figura 97: Dosimetro personale per il rumore

Le dimensioni sono molto contenute e consentono di tenere il dosimetro a contatto con il corpo in modo da correlare l'effettiva esposizione del lavoratore.

I dati che si possono ottenere da un dosimetro personale sono quelli indispensabili per l'applicazione del DL. 277/91. In figura 44 si ha l'andamento di una registrazione di un segnale per un tempo di 3,5 ore.

Il grafico superiore riporta l'andamento storico del livello pesato A, del Leq(A) e del livello di picco non pesato.

In basso si hanno le curve statistiche cumulative continue e con passo di 1 dB (FAST).

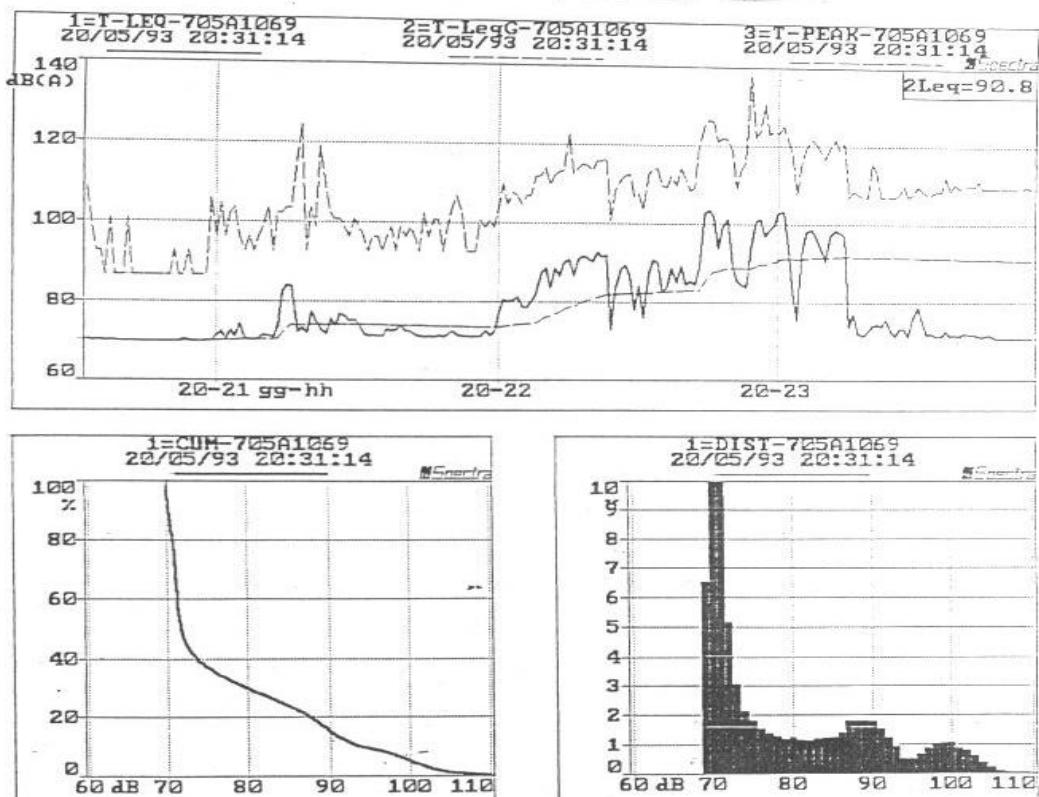


Figura 98: Risultati ottenibili mediante un dosimetro personale.

7.10. NORMATIVA NAZIONALE SULLA SICUREZZA DEI LAVORATORI PER IL RUMORE

D.P.R. 19/3/1956 n. 303 : Norme generali per l'igiene del lavoro , art 24.

D.P.R. 5/5/1975 n. 146: Indennità di rischio al personale civile di ruolo e non di ruolo ed agli operai dello Stato.

L. 19/11/1984 n. 862: Ratifica ed esecuzione delle convenzioni dell'Organizzazione internazionale del lavoro (OIL) n. 148, 149, 150, 152.

D.M. 14/6/1988 n. 385: Recepimento della Direttiva CEE n 87/56 del 18/12/1986 di modifica alla Direttiva CEE n 78/1015 relativa al livello sonoro ammissibile e al dispositivo di scappamento dei motocicli.

D.P.C.M. 1/3/91: Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno.

D.L. 15/8/91 n. 277: Attuazione Direttive CEE n 80/1107, n 82/605, n 83/477, n 86/188 e n 88/642 in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizioni di agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro, a norma dell'art. 7 della L. 3/7/1990 n. 212.

D.Lgs del 14/08/96 n. 494 : La sicurezza nei cantieri temporanei e mobili.

7.11. METODI DI CALCOLO APPROSSIMATI DEL RISCHIO UDITIVO.

Ai fini del calcolo preventivo dei livelli di esposizione al rumore si può fare riferimento a quanto il D.Lgs 494/94 recita all'art. 16:

Art. 16. Modalità di attuazione della valutazione del rumore

1. L'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore può essere ***calcolata in fase preventiva facendo riferimento ai tempi di esposizione e ai livelli di rumore standard individuati da studi e misurazioni la cui validità è riconosciuta dalla commissione prevenzione infortuni.***
2. Sul rapporto di valutazione va riportata la fonte documentale a cui si è fatto riferimento.
3. Nel caso di lavoratori adibiti lavorazioni e compiti che comportano una variazione notevole dell'esposizione quotidiana al rumore da una giornata lavorativa all'altra può essere fatto riferimento, ai fini dell'applicazione della vigente normativa, al valore dell'esposizione settimanale relativa alla settimana di presumibile maggiore esposizione nello specifico cantiere, calcolata in conformità a quanto previsto dall'articolo 39 del decreto legislativo 15 agosto 1991, n. 277.

Pertanto in fase preventiva è possibile utilizzare studi e misurazioni riconosciuti dalle commissioni di prevenzione infortuni. Uno di questi studi già oggi disponibili è quello del ***COMITATO PARITETICO TERRITORIALE PER LA PREVENZIONE INFORTUNI, L'IGIENE E L'AMBIENTE DI LAVORO DI TORINO E PROVINCIA*** che ha pubblicato un volume della serie “*Conoscere per Prevenire*” dal titolo “*VALUTAZIONE DEL RISCHIO DERIVANTE DALL'ESPOSIZIONE AL RUMORE DURANTE IL LAVORO NELLE ATTIVITA' EDILI*”.

In questo volume sono riportati numerosi dati (spettri e tabelle) utili per il calcolo preventivo del rischio uditivo con il metodo semplificato.

Si riporta qui, brevemente, la metodologia. Considerata la giornata lavorativa tipo del lavoratore di cui si desidera valutare il rischio uditivo si calcolano le frazioni di esposizione ad ogni singola sorgente derivante dalla particolare attività considerata.

Di ciascuna sorgente si conosce (perché riportati nei dati sopra indicati) i livelli di pressione (Leq.A) opportunamente misurati con l'ipotesi di regime stazionario.

Si applica, quindi, la seguente relazione di calcolo per il livello di esposizione personale giornaliero:

$$L_{ep} = 10 \log \frac{\sum p_i}{100} 10^{0.1 L_{eq,i}} \text{ dB A}$$

ove si ha il seguente simbolismo:

- L_{ep} Livello di esposizione personale giornaliero, dB.A,
- p_i percentuale di esposizione giornaliera alla *i.ma* attività;
- $L_{eq,i}$ livello equivalente della *i.ma* sorgente, dB.A.

Un esempio può meglio chiarire quanto detto. Si consideri il seguente caso:

NATURA DELL'OPERA: COSTRUZIONI EDILI IN GENERE

TIPOLOGIA: NUOVE COSTRUZIONI

GRUPPO: RESPONSABILE TECNICO DI CANTIERE (GENERICO)

ATTIVITA'	% MEDIATA DI ESPOSIZIONE	MEDIA ENERGETICA Leq (dB.A)
Attività di ufficio	45	68
Installazione cantiere	1	77
Scavi di sbancamento	1	83

⁷ Edizioni: EDILSCUOLA srl, Via Quarello 15-17, 10135 Torino

Scavi di fondazione	1	79
Fondazioni e strutture piani interrati	2	84
Struttura in c.a.	11	83
Copertura	1	78
Montaggio e smontaggio ponteggi	1	78
Murature	11	79
Impianti	7	80
Intonaci	5	86
Pavimenti e rivestimenti	3	84
Finiture	4	84
Opere esterne	2	79
Fisiologico	5	0
Lep =	80	dBA

Il risultato del calcolo è che il Lep previsto è pari ad 80 dBA. Analogamente si può procedere per altre situazioni. Ad esempio si consideri il caso:

NATURA DELL'OPERA: COSTRUZIONI EDILI IN GENERE

TIPOLOGIA: NUOVE COSTRUZIONI

GRUPPO: CAPO SQUADRA (INTONACI INDUSTRIALIZZATI)

ATTIVITA'	% MEDIATA DI ESPOSIZIONE	MEDIAENERGETICA Leq (dBA)
Preparazione malta	15	84
Spruzzatura e lisciatura	80	89
Fisiologico	5	0
Lep =	88	dBA

In questo caso si è nella situazione prevista dal D.Lgs 277/91 di Lep compreso fra 85 e 90 dB.A e pertanto occorre informare e formare i lavoratori, predisporre cartelli di avvertimento ed un numero di protezioni acustiche pari al numero di lavoratori interessati alla suddetta attività.

Va ancora tenuto presente che se alcune attività si svolgono in ambienti chiusi allora occorre tenere conto anche degli effetti del riverbero della sala⁸ e quindi di un incremento di livello aggiuntivo a quello calcolato.

Pertanto quando si calcolano livelli di esposizione vicini al limite di 90 dB.A è sempre bene procedere con cautela e considerare il calcolo effettuato in difetto rispetto alla realtà.

In situazioni particolarmente delicate e al limite di accettabilità è opportuno utilizzare anche i codici di simulazione numerica, del tipo di quelli indicati in precedenza, che meglio tengono conto della geometria dei luoghi e della fenomenologia degli eventi.

⁸ Vedi quanto detto nel paragrafo 3.2.

7.12. PROTEZIONE DELL'UDITO: MISURE DI SICUREZZA

Il rumore è spesso presente nei cantieri per il funzionamento contemporaneo di varie macchine o per lavorazioni particolari.

In considerazione del fatto che la protezione dal rumore offerta dai presidi in uso non è completa e che sono presenti effetti collaterali, è opportuno prevederne un uso limitato, privilegiando il ricambio degli operatori nelle postazioni a rischio e favorendo l'intervento tecnico di riduzione della rumorosità.

I mezzi personali di protezione più comunemente usati sono le cuffie e gli inserti o tappi: a seconda delle loro caratteristiche questi protettori hanno un diverso grado di attenuazione della rumorosità e quindi la scelta del mezzo di protezione deve essere rapportata al rumore presente nonché, alla sua frequenza.

In presenza di rumori elevati le cuffie sono le migliori protezioni da usare anche se pesanti e ingombranti, la compressione sulle orecchie risulta spesso fastidiosa, sono mal tollerate in ambiente caldo perché, provocano surriscaldamento dei padiglioni auricolari, isolano l'individuo dall'ambiente esterno: non sono quindi adatte per un uso prolungato.

Gli inserti o tappi danno una attenuazione del rumore inferiore rispetto alle cuffie.

A differenza delle cuffie danno un limitato surriscaldamento dell'orecchio e un minore isolamento dell'individuo dall'ambiente esterno, possono essere quindi portati più a lungo.

Possono presentare però alcuni inconvenienti, quali irritazioni o processi infettivi. Il livello di esposizione non deve essere superiore ai 90 dBA.

NORME DI LEGGE: Art. 24 DPR 164/1956, Decreto Legislativo 15.8.1991 n. 277.

7.13. CUFFIE DI PROTEZIONE DAL RUMORE ED INSERTI ACUSTICI.

Nella Figura 99 è rappresentata una cuffia acustica di protezione dal rumore, ai sensi del D.Lgs 277/91. Tutti gli strumenti di protezione debbono garantire una dose massima giornaliera inferiore a 90 dB.A.



Figura 99: Cuffia di protezione dal rumore conforme alle specifiche del D.Lgs 277/91

Qualora la dose quotidiana personale di esposizione al rumore supera il limite di 90 dB.A o 140 dB di picco massimo non pesato occorre far ricorso ad interventi sulle sorgenti (isolamento, insonorizzazione con cuffie afoniche, trattamento dei locali,...) ovvero a strumenti di protezione personale costituiti essenzialmente da cuffie e da inserti auricolari da inserire nel canale timpanico esterno.

VALORI MEDI DI PROTEZIONE E STANDARD DEVIATION							
Tipo	Frequenza [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Inserti Auricolari</i>							
Valori medi	25	24	26	28	36	36	39
Standard deviation	3	4	4	4	3	5	7
<i>Cuffie</i>							
Valori medi	12	21	29	40	40	41	38
Standard deviation	2	2	3	4	4	5	5
<i>Cuffie e Inserti auricolari</i>							
Valori medi	33	42	46	41	52	56	45
Standard deviation	4	5	7	5	5	5	5

Tabella 16: Valori medi di protezione standard per cuffie ed inserti

La protezione fornita è mediamente riportata nella seguente tabella (valori medi e deviazione standard). Alle basse frequenze agiscono bene gli inserti auricolari. Per valori elevati di protezione occorre utilizzare entrambi i dispositivi.

7.13.1. DATI UTILI PER LA RUMOROSITÀ IN CANTIERE

Viene qui riportata una tabella riepilogativa⁹ per le lavorazioni ed apparecchiature comuni nei cantieri edili. In ciascuna riga si ha l'indicazione della fonte di rumore, lo spettro a bande di ottava e il livello globale in dB.A.

DENOMINAZIONE	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	dB.A
Addetto Clipper Norton CS1P10	78,2	87	84,6	86,7	84,6	84	83,1	90	88,3	80,8	94,1
Addetto martello demolitore	96,9	100,1	105,8	102,3	98,1	92,2	91	93,1	94,3	90,3	101,6
Addetto motopompa Geo-Astra 350 SC	80,1	86,6	89,2	89,1	89,6	90,6	87,2	85,4	84,6	80,4	94,9
Addetto motosega taglio legname tetto	74,9	85,4	103	97,5	98	100,4	93	80	79	72,9	101,7
Addetto pistola	94,6	84	80,7	80,2	83	88,7	86,6	90,8	90,2	90,5	96
Addetto sabbiatura interni	82,4	85,1	89,3	92,3	94,9	97,9	100,7	94,3	89,3	75	104,4
Addetto scanalatrice elettrica	83	88,7	92,9	94,1	94,6	91,1	91,4	87,9	87,8	79,3	97,9
Addetto trapano per rimozione rivestimento	82	88,7	88,3	89,1	92,5	96,3	94,8	84,5	77,9	69,7	100
Battipavimenti	73	80,6	87,7	87,2	91,8	90,5	82,9	70,5	66,8	58,9	93,5
Battitura piastrelle	69,4	85,1	94,8	91,7	91,3	83,2	78,2	71,2	64,5	55	90,9
Bocciardatura nodiglioni in pietra	86,7	90,9	95,5	95,2	89,1	90,4	91,5	87,1	86,9	76,7	96,9
Buco soletta a blocchi con trapano Spit 375	73	70,5	74,5	83,6	87	87,3	83,5	93,7	94,4	92,7	98,2
Cabina escavatore Vaiacar (posa ghiaia)	97,1	91	85,5	86,1	87	85,2	83,7	83	82,7	83,2	91,5
Chiodatura listelli con pistola Hold Her	92	90,9	92	87,4	87,4	88,5	89,1	87,7	88,9	86,6	95,6
Clipper '88 paramano	73,5	74	79,9	82,7	87,6	85,1	88	85,3	78	67,3	92,9
Clipper '92 taglio blocchi cemento umido	70,9	76,2	78,9	82,9	96,6	100,8	96	87,4	83,8	73,9	103,1
Clipper paramano secco	73,5	79,3	84,2	88,1	95,6	96,3	99,9	93,1	86,4	73,5	103,4
Clipper paramano umido	68	75,5	73,6	81,7	95,1	92	91,6	83,7	77,2	66,1	97,3

⁹ Fonte: Comitato Paritetico territoriale per la prevenzione infortuni, l'igiene e l'ambiente di lavoro di Torino e provincia

Clipper taglio blocchi cemento secco	72,2	77,5	80,2	84,2	97,9	102,1	97,3	88,7	85,1	75,2	104,4
Compressore Vangard 5HP	88,6	84	82,4	83	77,9	78,6	90,6	83	83,8	84,6	93,3
Decespuglio con zaino	74,3	90,4	81,5	87,8	91	83,7	81,5	74,8	70,7	63,4	90,6
Demolizione attrezzi manuali	81,3	86,5	86,7	87,1	86,3	89,8	85,2	77,8	74,1	66,9	92,5
Demolizione cls con martello pneumatico	96,9	105,3	103,5	105,5	106,6	98,4	94,9	88,8	89,1	75,2	105,3
Demolizione intonaco con martello medio	76,7	85,2	94,6	91,8	90,2	87,2	84,2	90	92,7	92	96,7
Demolizione intonaco con martello medio	76,7	92,6	101	100,4	98,7	95,1	91,7	95	99,7	93,1	103,5
Demolizione muratura perimetro portante	78,2	90,6	92,1	91,3	92	95,2	90,6	79,2	74,2	64,9	97,8
Demolizione pavimento con martello elettr.	83,4	93,5	91,1	92,7	97,4	97,4	93,8	83,6	78,8	68,9	100,8
Disarmo solaio (impatto al suolo)	69,7	68,7	72,6	77,8	78	84,5	88	85,9	81,4	73,5	92,4
Escavatore Bobcat 743 '89	79,5	107,8	91,7	88,2	89,9	89,6	83,3	79,5	73,2	68,6	93,1
Flessibile taglio binari	95,9	86,9	100,4	90	101,1	92,6	92,9	89,2	84,9	91,4	101
Foratura e avvitatura traversine	94,1	88,5	85,7	86,3	85	85,2	85,5	83,5	82,9	82,9	91,7
Foratura e avvitatura viti su traversine	101,2	94,9	93,3	98,6	96,4	94,4	93,4	90,8	86,6	84,7	100,3
Foratura muratura piena trapano HILTI-TE 52	68,8	71,7	71	67,9	69,5	69	76,7	84,6	89,9	88,6	91,3
Foratura muro mattoni e pietre Hiltites HILTI-TE 52	84,4	84,8	84,5	82,8	83,7	85,2	89	93,5	97	94,4	99,5
Grader aperto	77,9	104,1	89,5	90,3	89,2	87,6	83,4	80,1	71,6	63,5	92,1
Grader chiuso	76,9	103,1	88,5	89,3	88,2	86,6	82,4	79,1	70,6	62,5	91,1
Levigatrice piccola e grande	97,6	88,2	85	84,2	84,8	86,4	85,8	85,2	84,6	85	92,7
Macchina battipavimenti	74	79,5	86,4	88,4	92,7	94,2	87,9	76	68,5	59,6	96,5
Macchina per paratie	103,7	93,8	93,5	89,7	89,3	89,1	89	89,1	89	89,3	96,3
Martello compressore	81	94,7	94,6	89,1	85,9	81	85	90,1	89,5	86,8	94,8
Martello Demol silenziato	75	90,3	86,8	90,8	91,5	91,8	93,8	90,9	88,9	82,7	98,9
Martello Demol silenziato (grande)	86,8	98,9	93,2	97,1	88,7	86,1	87,6	91	90,4	86,1	96,9
Martello Demol silenziato piccolo	86,6	97,3	96,6	97,7	96	94,4	91,4	96,5	103,6	94,1	105
Martello demolitore muratura perimetro in c.a	74	85,4	98,3	93,2	95,3	89,6	89,1	93	95,3	93,3	99,8
Martello piccolo - compressore	74,4	87,4	85,2	84	81,8	82	85,1	89,6	95,9	86,7	97
Motocoltivatore Carraro con fresa 14 HP	93	96,4	94,3	92,9	88,1	87,9	85,6	77,1	72,6	65,6	92,6
Operatore Matisa esterno	99,8	90,2	86,5	88	89,4	87,8	85,4	84,5	84,4	84,6	93,5
Operatore quadro comando a terra Matisa	99	89	86,2	87,2	87,4	85,5	85,2	84,2	84,2	88,6	92,6
Operatore Tandem (caterpillar) con vibrazione	108,4	102,5	94,7	90,9	89,5	86,8	84,9	81,6	77	69	92,6
Pala gommata Fiat Allis	91,5	112,7	99,2	93,6	90,6	84	78,1	62,6	61	63,7	92,7
Pannelli con travi Kaufman (disarmo)	75,3	79,2	77,3	87,7	89,9	85,6	87,3	75,8	69,2	61,1	92,3
Paratie monolitiche (op. in cabina)	104,4	92,9	96,7	90,3	90,1	89,1	86,7	83,9	83,5	85,3	94,4
Perforatore elettrico	69,5	75,2	76	82,2	87,4	90,2	90,6	76,8	72,6	66,5	94,7
Perforazione	84,4	81,6	85,3	86,9	91,6	92,5	94,8	90,5	85,9	77,3	99,2
Piastra battente	78,1	88,3	90	86,6	88,8	86,4	83	81,8	78,3	73,7	91,5
Picchiatello su Fiat Hitachi	77,3	84,9	84,9	88	95,1	88,8	85,9	81,7	74,3	64,3	95
Picchiatello su Fiat Hitachi	81,7	91,6	92,7	94,5	95,7	93,8	89,2	87,1	78,2	67,9	98,1
Picchiatello su Fiat Hitachi	85,4	95,3	96,4	98,2	99,4	97,5	92,9	90,8	81,9	71,6	101,8
Pistola	64,7	67,8	73,5	89,5	86,6	86,2	83,9	74,6	69,8	61,2	90,5

Pistola per intonaco	103,4	93,6	90,2	89,3	89,1	89,5	89,8	89,4	89,3	89,7	96,7
Pistola per intorno modello Tigre	75,8	76,5	83,6	82,5	84,7	88	92,4	94,9	96,1	93,2	100,2
Pistola per intorno modello Tigre	75,1	75,8	82,9	81,8	84	87,3	91,7	94,2	95,4	92,5	99,5
Pistola per scagliola intonaco	72,8	68,1	87,9	83,9	87,2	84,9	86,2	72,1	68,1	61	90,7
Posa battiscopa con trapano e avvitatore	58,3	60,7	62,8	68,1	76	83,5	87,2	89,4	83,3	81,2	93,5
Posa guaina (cannello)	79,3	89,3	91,9	91,2	89,8	86,9	78,9	68,9	63,6	58,1	91,1
Rifinitrice Marini P230	72,2	108,3	95,8	91,8	95,9	94,5	90,6	88,7	84,9	77,2	98,9
Rincalzatrice Matisa porte aperte	94	83,3	81,3	82,6	86,9	87,9	85,3	78,6	74,7	72,8	91,6
Rincalzatrice Matisa porte chiuse	101,8	91,3	86,6	92,9	87,4	86,5	82,1	78,6	78,1	80,3	91,4
Rullo "Bitelli"	79,2	90,7	102,6	89	88,7	85,6	79,3	64,6	59,4	57,8	91,4
Rullo compressore Bitelli	75	82,6	84	83,6	90,2	88,7	83,3	69,8	64,8	58,4	92
Rullo compressore DTV 25 Bitelli	93,6	105	105,4	95,6	94,5	91,6	89,5	86,5	83,6	74,8	97,9
Rullo compressore Dynapac	92,8	105,8	101,8	96,2	98	89,9	85	70,9	66,1	57,6	97,4
Rullo compressore Dynapac aperto gommato	100,7	107,2	104,4	103,8	93,8	92,2	85,7	68,7	62,6	57,7	98,7
Rullo compressore Dynapac aperto gommato	115,9	110,5	106,8	99,9	96,3	93,2	84,3	68,4	59,2	61,1	98,7
Rullo compressore Dynapac chiuso gommato	101,8	108,3	105,5	104,9	94,9	93,3	86,8	69,8	63,7	58,8	99,8
Rullo compressore Dynapac chiuso gommato	101,8	108,3	105,5	104,9	94,9	93,3	86,8	69,8	63,7	58,8	99,8
Rullo EL-MA RAE 100 gommato vibrato	102,9	100,5	100,6	94,9	85,5	84,9	81,3	74,5	67,1	59,1	91,6
Scalpellatura su soletta c.a. 425 al 300	71,7	71,7	69,2	71,6	73,8	77,5	80,9	85,5	88,4	79	90,9
Scanalatrice elettrica	85	88,7	89,8	90	92,9	94,1	94,2	93,4	88,9	79,8	100,2
Scanalatrice elettrica a denti	76,9	91,5	98	95,2	91,6	94,3	89,4	79	72,5	63,5	97,2
Scanalatrice elettrica a denti	79,6	88,1	87,9	88,9	91,2	93,1	94,7	85	78	66,5	98,5
Scanalatura manuale	88,7	100,6	95,1	93,2	91,4	89,7	86,1	82	72,5	65,9	94,4
Scavo con martello insonorizzato	91,5	102,7	104,2	101,9	94,6	86,2	84	86,1	89	84,7	97,9
Scrostatura con martello elettrico Hilti	87,2	81,5	84,4	95,6	95,5	89,2	88,8	80,5	74,7	67,1	96,2
Sega circolare	71,9	72,2	69,3	74,8	82,8	82	92	87,2	82,6	66,6	95
Sega circolare	68,9	77,1	74,8	79,2	83,7	87,3	92,2	94,1	92,8	89,2	98,9
Sega circolare	63,1	70	69,8	78,3	84	89,9	87,7	80	79,3	67,5	93,2
Sostituzione binari e scambi	104	92,2	92,4	84,7	86,8	93,6	91,8	85,6	82,3	83,1	97,2
Spicconatura cls	80,8	97,1	100,8	101,1	97,9	90,3	92,3	84,5	91,1	74,7	99,9
Spicconatura facciate	79,2	85,3	86,3	87,1	91,7	92,8	94,1	94,1	88,8	75,2	99,9
Tagliapiastrelle Mefran K300	63,6	66	84,8	69,8	79,4	85,9	88	89,5	87,9	84,7	94,7
Tagliasfalto	77,6	95,7	87,8	83,3	85,1	85,9	85,4	84,5	83,7	74,7	92
Tagliasfalto a disco	87,2	94,6	93,2	87,9	89,2	86,5	85,7	85,4	79	63,2	93
Tagliasfalto a disco	96,6	104	102,6	97,3	98,6	95,9	95,1	94,8	88,4	72,6	102,4
Tagliasfalto a disco Fast Verdi	92,8	102,5	102,1	106,2	105,1	102,1	98	96,5	90,8	75	107,2
Tagliasfalto a disco Fast Verdi	88,9	81	90,3	97,4	99,7	95,1	92,3	93,9	93	85,3	101,9
Tagliasfalto a disco Fast Verdi	103,5	94	97,9	104,5	102,7	97,7	96,4	97,1	92,7	87	105,2
Tagliasfalto a martello	90,5	95,2	93,2	91,6	93,7	93,3	93,9	85,8	76,9	63,1	98,6
Tagliasfalto a martello	80,1	98,2	92,2	87,2	89,8	89,4	89,7	88,9	86,8	80,3	96,1
Tagliasfalto a martello	82,7	80,2	82,6	87,3	85,4	87,3	85,8	86	82	74,2	92,8
Tagliasfalto a martello	83	80,5	82,9	87,6	85,7	87,6	86,1	86,3	82,3	74,5	93,1

Taglio assette con flex Black e D. SA3628	67,1	69,9	67,2	69,9	81,2	90,7	91,7	90,3	92,3	89,1	97,8
Taglio con flessibile	84,8	91	93,3	95,7	98	102,2	101,9	92,6	90,3	81,9	106,4
Taglio con flex e posa pavimenti in pietra	65,6	70,8	71,1	74,9	81,9	88,7	91,4	91,6	92,6	88,9	97,8
Taglio con flex e posa piastrelle con battitura	59,7	64,9	65,2	69	76	82,8	85,5	85,7	86,7	83	91,9
Taglio con motosega e chiodatura listelli	58,6	59,5	70,3	80,3	85,6	85,5	87,8	80,6	76	66,3	91,8
Taglio con motosega e chiodatura tavole	96,4	87,3	85,1	85,2	86	86,2	84	84	84,3	84,2	92
Taglio tavellone armato con flessibile	74,4	76	78,8	103,6	97,4	101	95,6	88,4	83,7	72,1	103,9
Taglio tavole con circolare	101,6	91,8	88,4	87	87	87,3	90,2	88,9	89,7	88,3	96,1
Taglio tavole con motosega	101,3	91	92,5	90,3	89,6	87,8	88,9	88,3	88,5	87,2	95,7
Taglio tavole con sega circolare	95,1	85,8	81,5	81,4	82,3	86,2	94,9	92,6	91,3	85	99
Tosaerba Flyno MW100	70,1	95,7	89,9	89,3	88,3	86,2	84,6	73,8	64,5	63,2	91,2
Tosaerba Flyno MW100S	69,7	95,9	91,2	92,6	88,6	86,8	84,4	71,4	66,7	60,7	91,8
Tosaerba Titan professionale 90	88,8	99,7	97,4	96,3	94	89,4	88,2	77,8	72,8	66,6	95,8
Trapano per fori centro volta	70,2	75,3	75,5	75,4	84,7	91,2	87,7	79,9	75,7	67,4	93,8

Tabella 17: Valori degli spettri e della rumorosità globale per alcune macchine operatrici

Nel valutare la pericolosità delle sorgenti si tenga presente che, per quanto detto sull'acustica fisiologica, a causa della minor sensibilità dell'orecchio umano medio alle basse frequenze e alle alte, risultano più pericolose le rumorosità aventi spettri con livelli maggiori nella zona centrale della banda uditive, cioè fra 1000 e 4000 Hz. Quest'aspetto va tenuto in conto anche nel selezionare le protezioni uditive. Si riporta, a tal proposito, quanto previsto dalla direttiva macchine.

7.13.2. VALORI DI RIFERIMENTO DELL'ISTITUTO DI FISICA TECNICA DI CATANIA

Nel 1998-99 è stata svolta dall'ex Istituto di Fisica Tecnica della Facoltà di Ingegneria di Catania (ora Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica) una campagna di misure su macchine da cantiere in Sicilia. L'indagine aveva lo scopo di misurare gli effettivi livelli personali di esposizione in cantieri esistenti operanti con macchine operatrici nuove ed usate. Per alcune situazioni si è adoperato il codice Raynoise® per il quale, oltre alla modellazione geometrica dei siti, si sono utilizzati dati relativi ai livelli di potenza delle macchine affidabili e realistici. Qualora possibile è sempre opportuno rilevare le potenze delle macchine direttamente mediante misure ad 1 m di distanza da esse e a 1,6 m di altezza dal suolo. Risulta, in base a quanto già detto nell'*Acustica Fisica*: $L_p = L_w - 20 \log d - 8$ (dB)

e quindi per $d=1\text{ m}$ è:

$$L_w = L_p + 8 \quad (\text{dB})$$

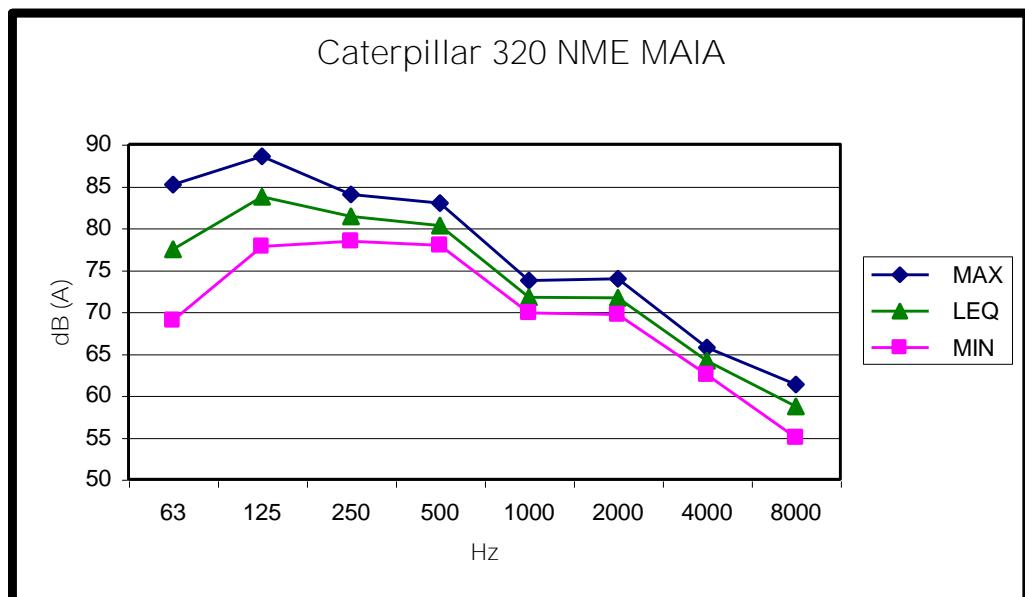


Figura 100: Modalità di misura dei livelli di potenza

Le misure sulle macchine di cantiere sono state effettuate in campo aperto, a distanza di un metro dalla sorgente e pesando le misure in scala "A". Per la misure è stato utilizzato il fonometro *real time Larson e Davis* 2900.

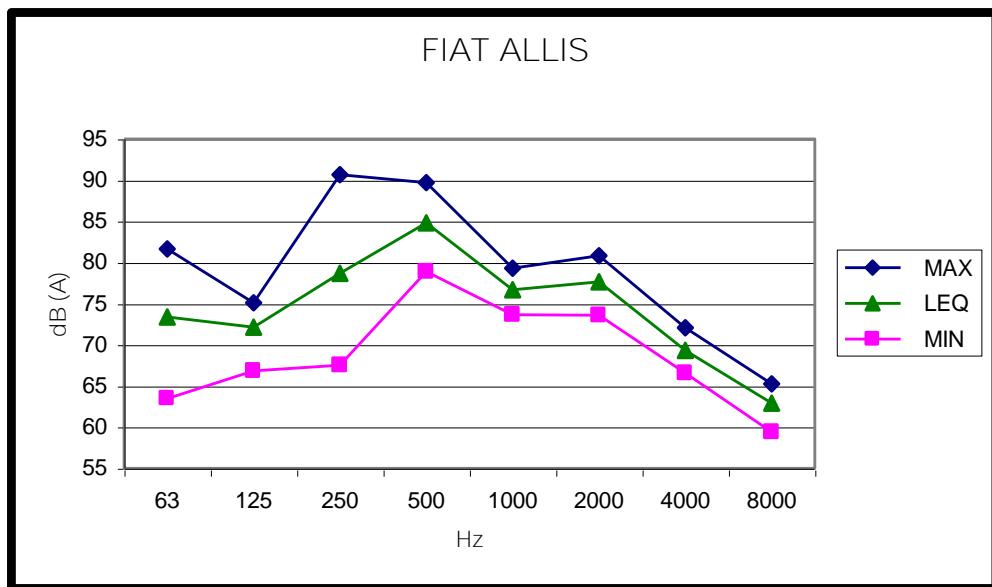
Caterpillar 320 NME Maia

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	85,182	88,545	83,983	82,995	73,729	73,917	65,733	61,288
MIN	68,931	77,821	78,385	77,915	69,872	69,66	62,511	54,985
LEQ	77,421	83,7	81,372	80,243	71,73	71,683	64,11	58,701
Lw	85,421	91,7	89,372	88,243	79,73	79,683	72,11	66,701



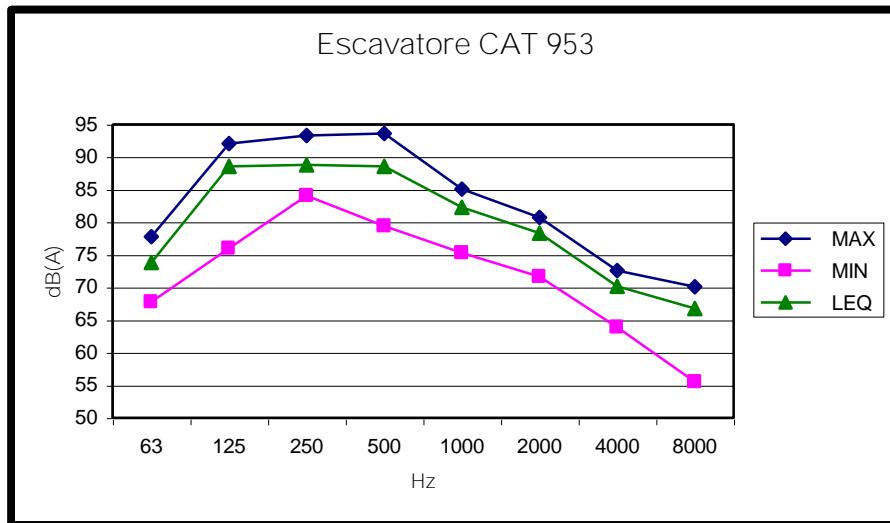
Fiat Allis fl6

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	81,631	75,116	90,638	89,674	79,279	80,808	72,106	65,239
MIN	63,499	66,862	67,497	78,856	73,682	73,611	66,532	59,43
LEQ	73,353	72,177	78,715	84,829	76,692	77,633	69,354	62,887
LW	81,353	80,177	86,715	92,829	84,692	85,633	77,354	70,887

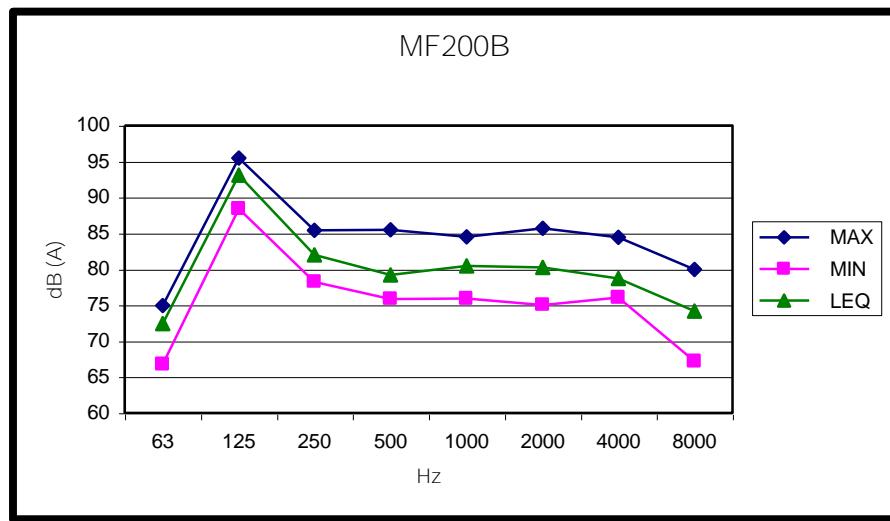


Escavatore CAT 953

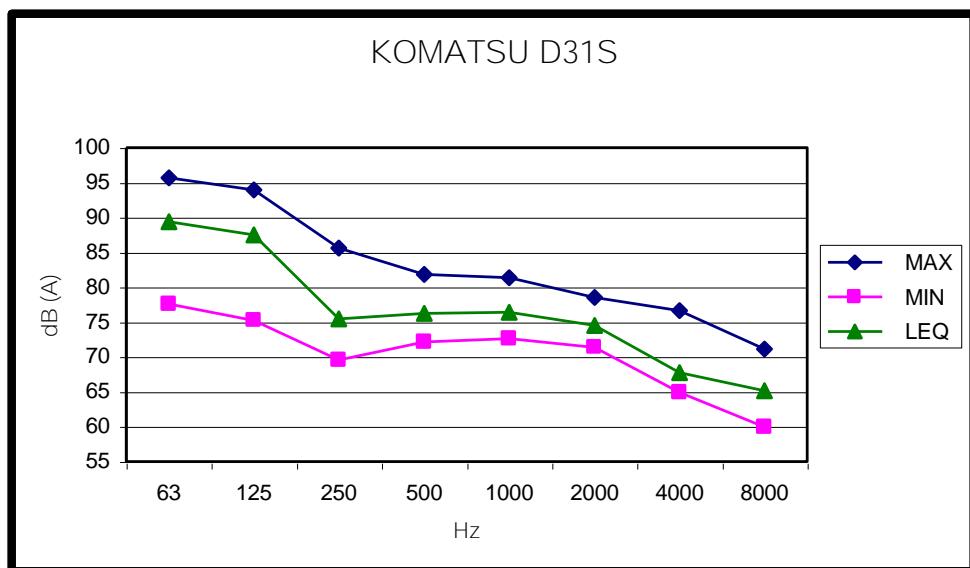
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	77,774	92,026	93,319	93,578	85,088	80,69	72,6	70,131
MIN	67,732	75,987	84,03	79,42	75,328	71,683	63,851	55,526
LEQ	73,799	88,569	88,827	88,545	82,266	78,315	70,154	66,72
Lw	81,799	96,569	96,827	96,545	90,266	86,315	78,154	74,72

**Pala meccanica MF200B**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	74,952	95,436	85,417	85,464	84,477	85,699	84,43	79,938
MIN	66,744	88,428	78,197	75,822	75,916	75,022	76,081	67,214
LEQ	72,412	93,108	81,96	79,185	80,455	80,22	78,715	74,176
Lw	80,412	101,11	89,96	87,185	88,455	88,22	86,715	82,176

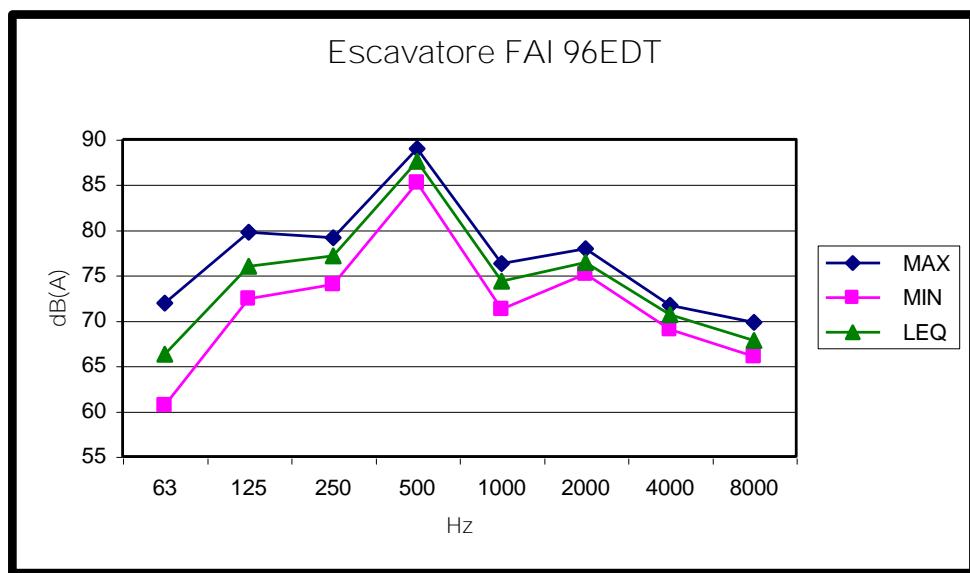
**Escavatore Komatsu d31s**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	95,695	93,978	85,582	81,843	81,325	78,526	76,598	71,095
MIN	77,586	75,187	69,59	72,153	72,6	71,33	64,933	59,994
LEQ	89,368	87,51	75,469	76,269	76,433	74,505	67,779	65,145
Lw	97,368	95,51	83,469	84,269	84,433	82,505	75,779	73,145



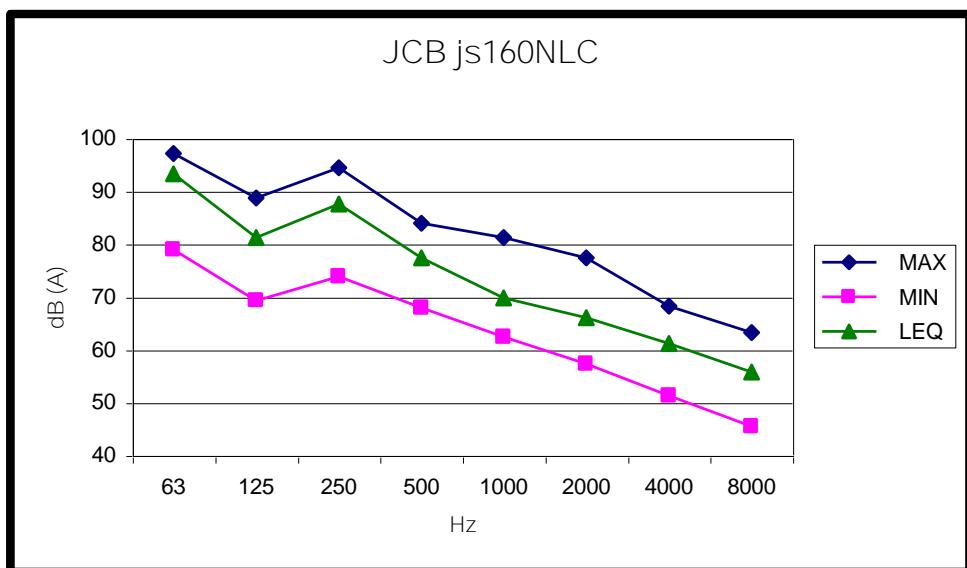
Escavatore Fai 96edt

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	71,894	79,726	79,161	88,992	76,316	77,915	71,683	69,801
MIN	60,653	72,388	73,964	85,229	71,283	75,116	69,025	66,015
LEQ	66,297	75,987	77,115	87,557	74,34	76,433	70,624	67,826
Lw	74,297	83,987	85,115	95,557	82,34	84,433	78,624	75,826



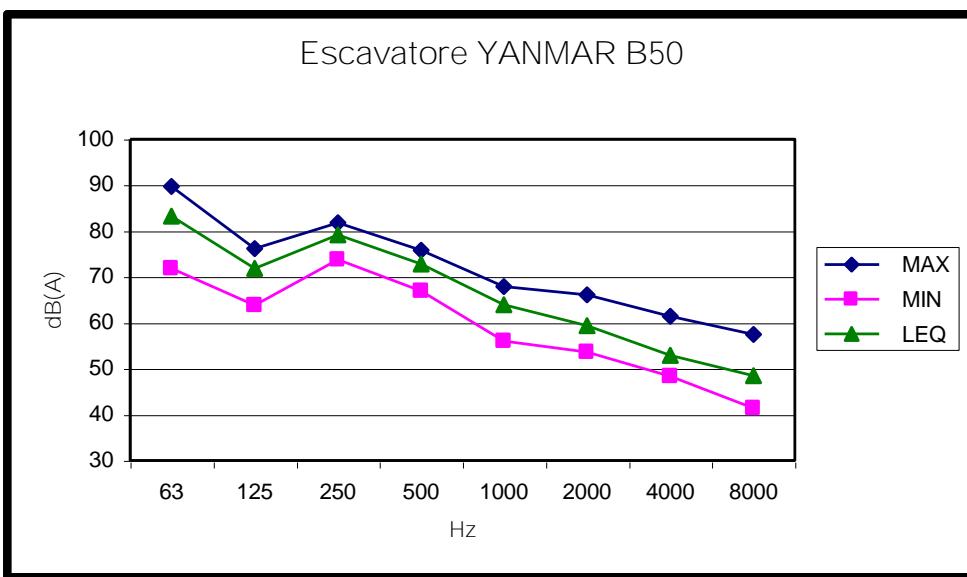
Escavatore JCB JS 160 NLC

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	97,2	88,733	94,448	83,959	81,302	77,445	68,249	63,334
MIN	79,044	69,331	73,94	67,967	62,417	57,337	51,293	45,46
LEQ	93,343	81,325	87,581	77,445	69,872	66,109	61,217	55,855
Lw	101,34	89,325	95,581	85,445	77,872	74,109	69,217	63,855



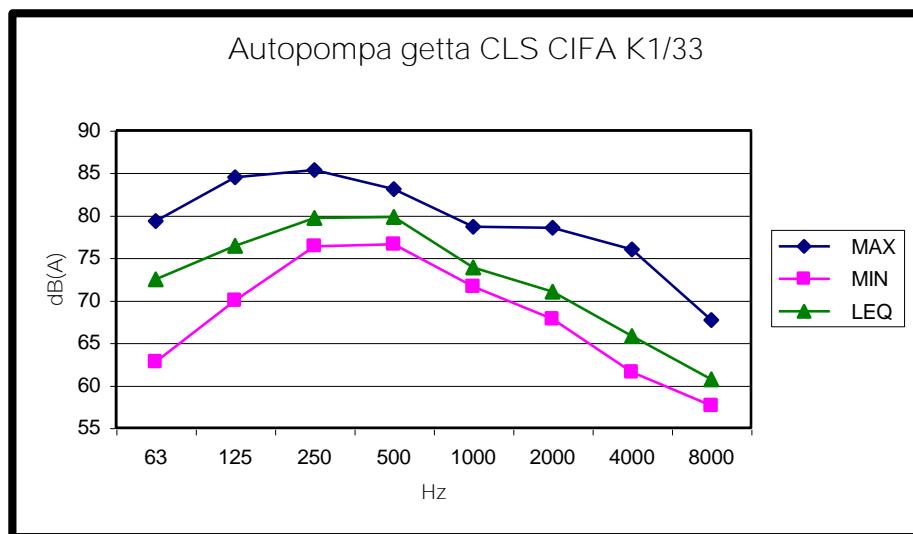
Escavatore Yanmar B50

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	89,721	76,151	81,748	75,845	67,92	66,133	61,452	57,501
MIN	71,777	63,804	73,799	66,862	55,996	53,574	48,282	41,392
LEQ	83,183	71,847	79,138	72,765	63,945	59,383	52,868	48,423
Lw	91,183	79,847	87,138	80,765	71,945	67,383	60,868	56,423

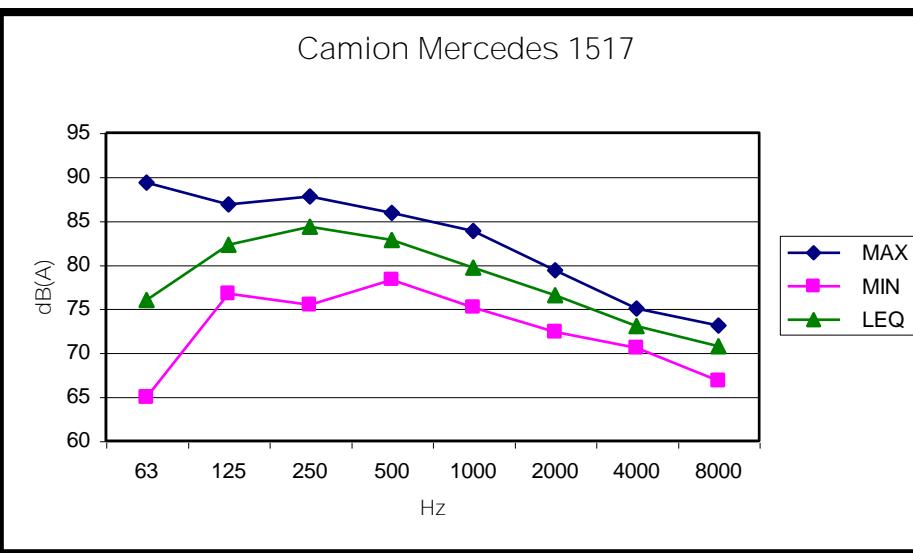


Cifa

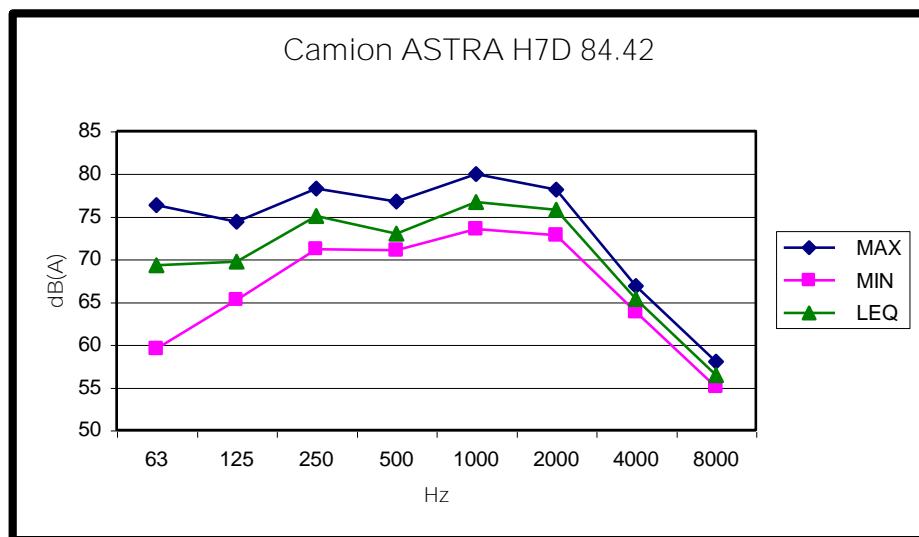
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	79,326	84,453	85,3	83,065	78,644	78,526	75,987	67,661
MIN	62,793	69,989	76,363	76,575	71,612	67,826	61,57	57,619
LEQ	72,459	76,386	79,679	79,82	73,893	71,001	65,827	60,676
Lw	80,459	84,386	87,679	87,82	81,893	79,001	73,827	68,676

**Camion Mercedes 1517**

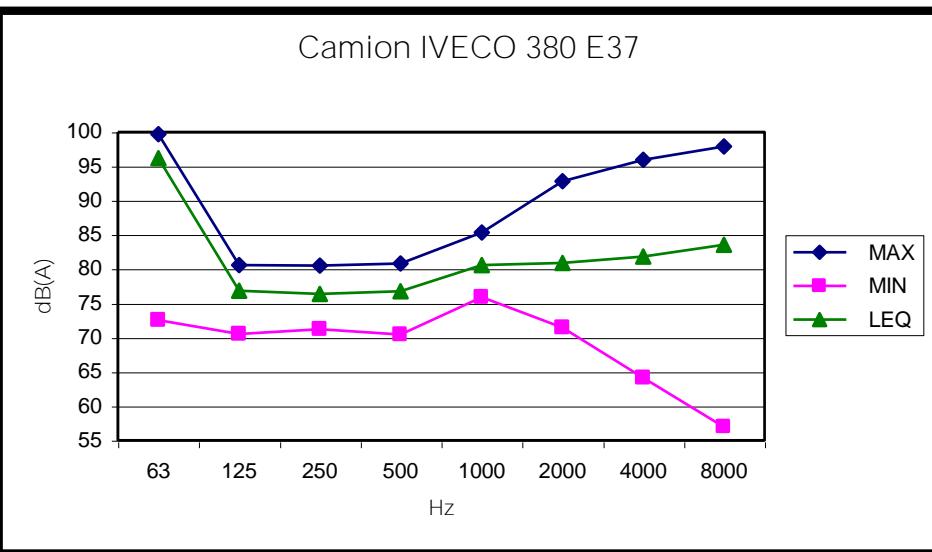
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	89,298	86,852	87,769	85,864	83,818	79,373	75,046	73,117
MIN	64,933	76,692	75,469	78,268	75,163	72,388	70,577	66,815
LEQ	75,963	82,242	84,335	82,783	79,655	76,551	73,047	70,742
Lw	83,963	90,242	92,335	90,783	87,655	84,551	81,047	78,742

**Camion Astra H7d 84.42**

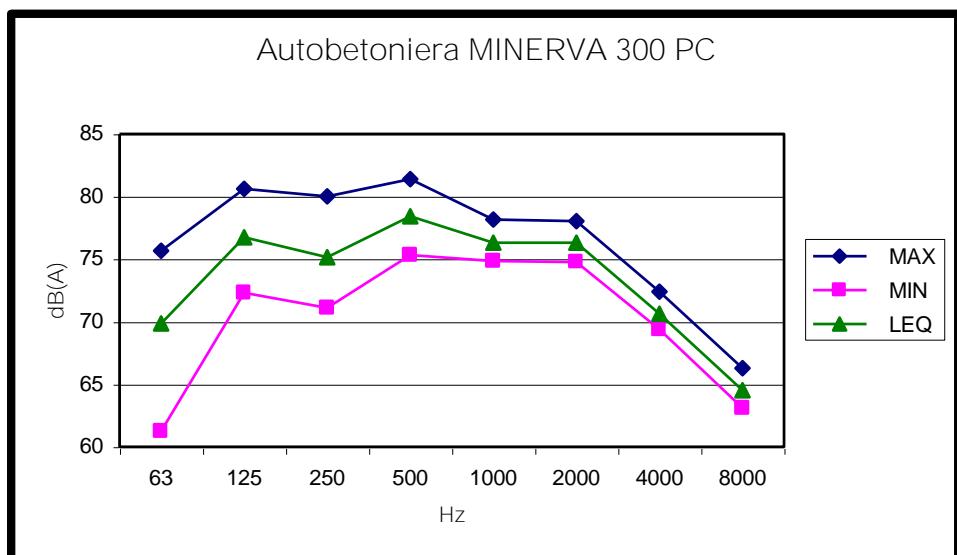
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	76,339	74,364	78,291	76,739	79,961	78,174	66,885	57,995
MIN	59,547	65,215	71,189	71,071	73,541	72,812	63,851	55,009
LEQ	69,284	69,707	75,022	73	76,669	75,775	65,356	56,42
Lw	77,284	77,707	83,022	81	84,669	83,775	73,356	64,42

**Camion Iveco 380 E37**

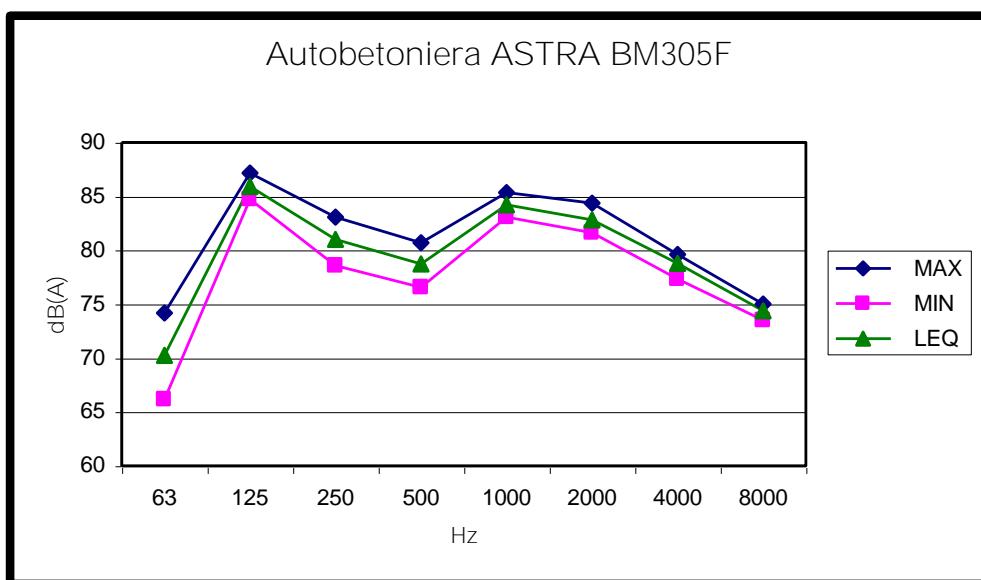
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	99,693	80,573	80,478	80,831	85,37	92,825	95,93	97,905
MIN	72,553	70,483	71,189	70,436	75,916	71,424	64,11	56,937
LEQ	96,165	76,857	76,339	76,786	80,549	80,925	81,843	83,583
Lw	104,16	84,857	84,339	84,786	88,549	88,925	89,843	91,583

**Autobetoniera Minerva 300 PC**

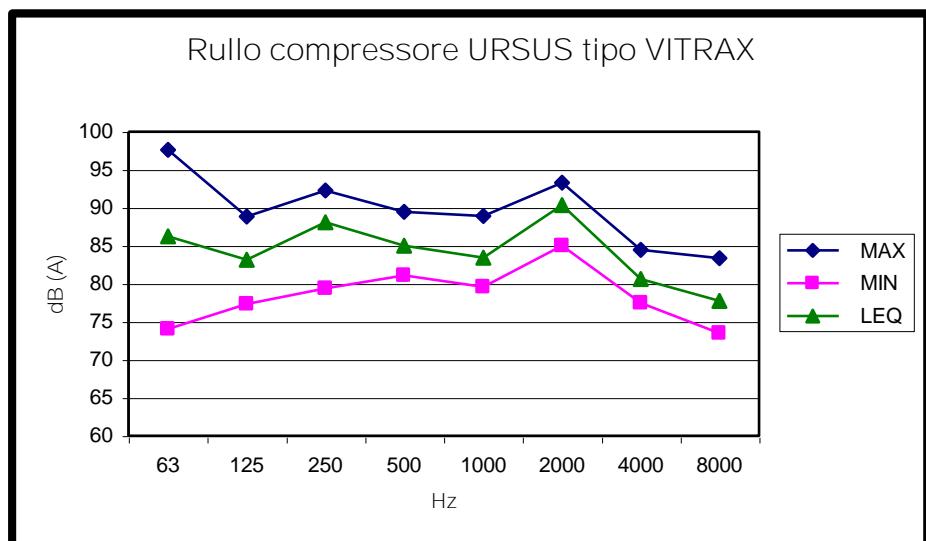
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	75,657	80,62	80,008	81,372	78,15	78,009	72,388	66,297
MIN	61,241	72,318	71,095	75,305	74,858	74,74	69,378	63,099
LEQ	69,848	76,739	75,14	78,432	76,292	76,292	70,648	64,51
Lw	77,848	84,739	83,14	86,432	84,292	84,292	78,648	72,51

**Autobetoniera Astra BM305F**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	74,176	87,134	83,065	80,69	85,37	84,382	79,585	75,022
MIN	66,156	84,735	78,574	76,551	83,065	81,631	77,351	73,517
LEQ	70,225	85,935	81,019	78,738	84,194	82,807	78,762	74,387
Lw	78,225	93,935	89,019	86,738	92,194	90,807	86,762	82,387

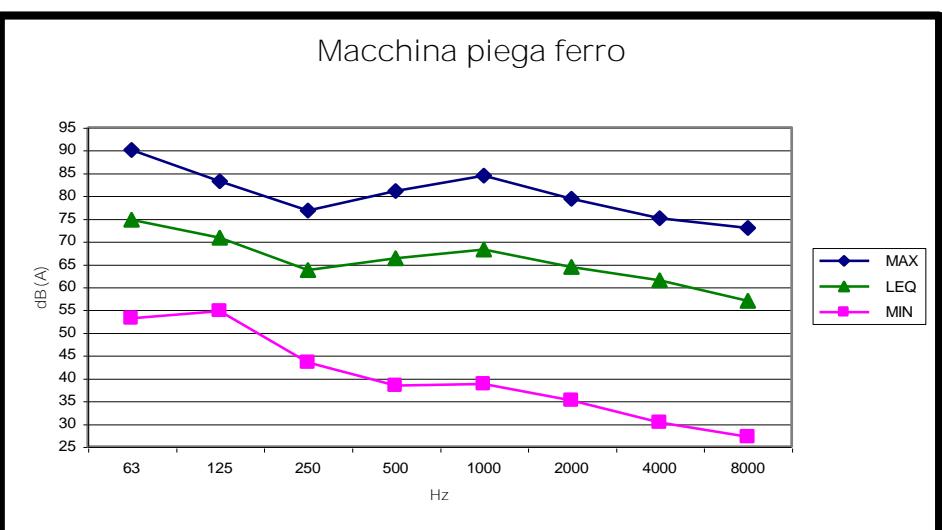
**Rullo compressore Ursus Vitrax**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	97,6	88,851	92,285	89,462	88,898	93,272	84,477	83,324
MIN	74,011	77,304	79,397	81,066	79,585	85,017	77,492	73,517
LEQ	86,264	83,183	88,098	84,97	83,395	90,333	80,62	77,75
Lw	94,264	91,183	96,098	92,97	91,395	98,333	88,62	85,75



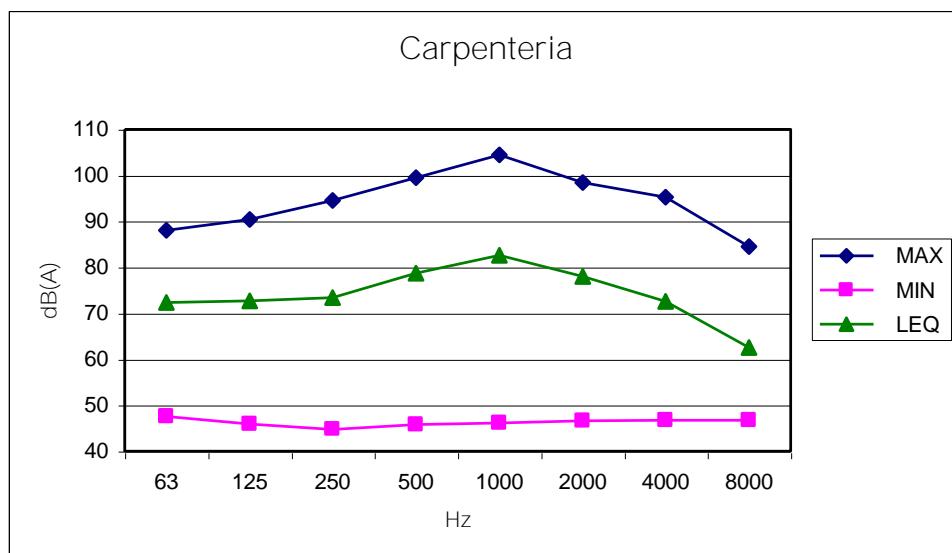
Macchina piegaferro

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	90,097	83,16	76,786	81,043	84,406	79,373	75,093	72,929
MIN	53,127	54,726	43,414	38,405	38,781	35,089	30,315	27,116
LEQ	74,717	70,766	63,663	66,344	68,202	64,439	61,476	56,984
LW	82,717	78,766	71,663	74,344	76,202	72,439	69,476	64,984

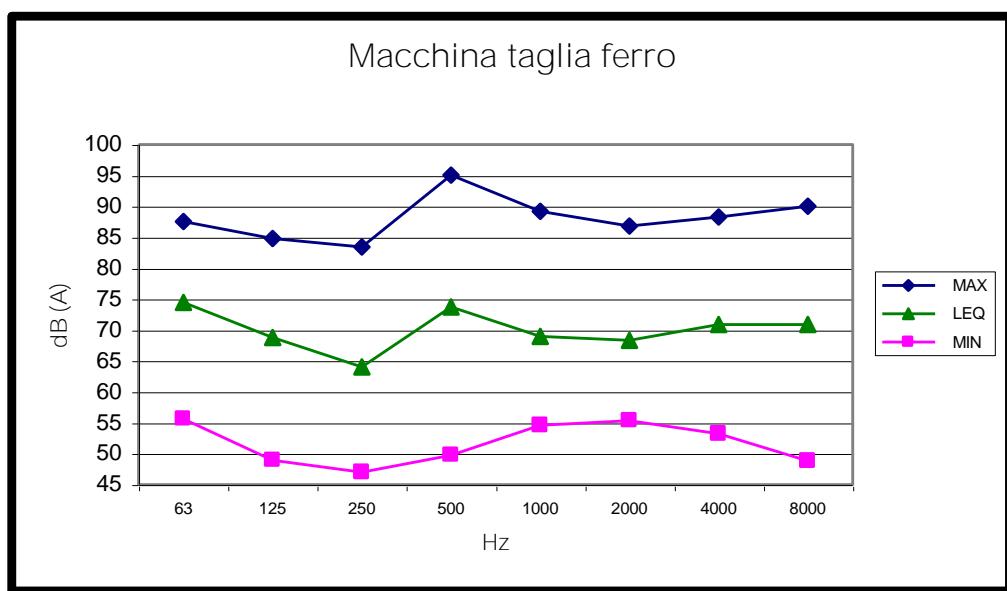


Lavori di carpenteria

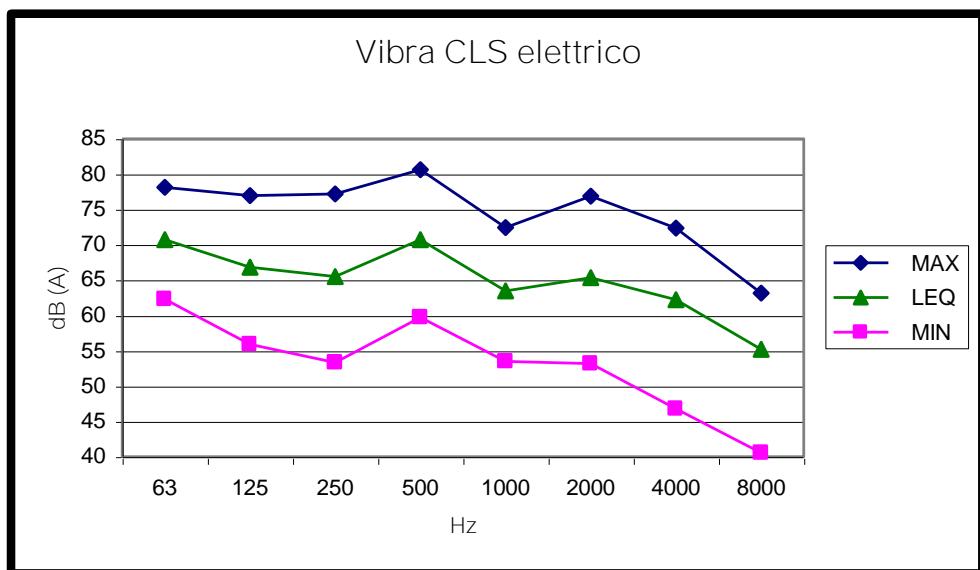
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	88,098	90,356	94,589	99,457	104,47	98,446	95,271	84,477
MIN	47,6	45,954	44,684	45,742	46,189	46,613	46,73	46,777
LEQ	72,341	72,718	73,4	78,762	82,642	78,033	72,6	62,581
Lw	80,341	80,718	81,4	86,762	90,642	86,033	80,6	70,581

**Macchina tagliaferro**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	87,557	84,806	83,465	95,083	89,227	86,852	88,263	90,05
MIN	55,644	48,894	46,989	49,741	54,632	55,385	53,245	48,823
LEQ	74,481	68,79	64,063	73,776	68,955	68,343	70,883	70,907
LW	82,481	76,79	72,063	81,776	76,955	76,343	78,883	78,907

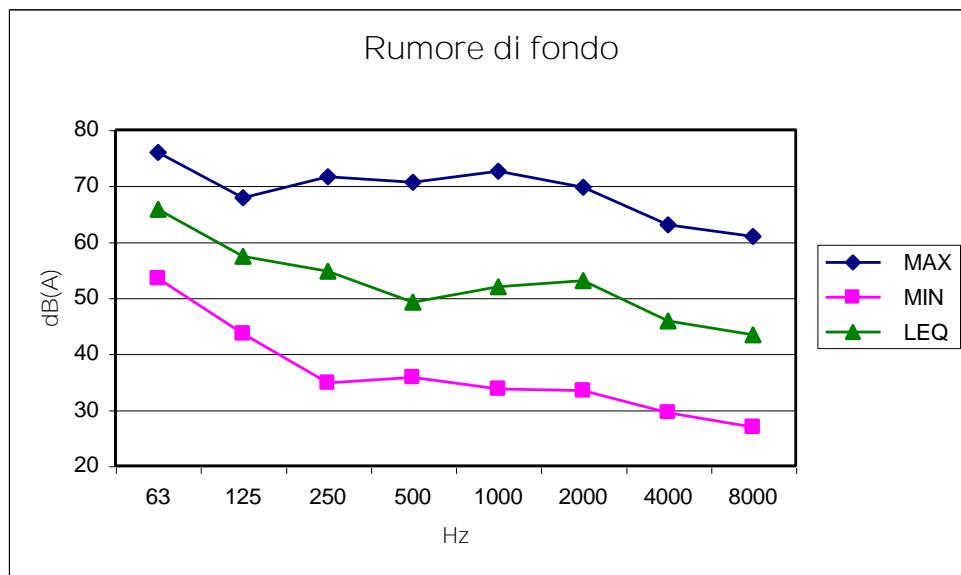
**Vibra cls elettrico**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	78,127	76,951	77,209	80,667	72,459	76,927	72,341	63,169
MIN	62,276	55,879	53,315	59,736	53,48	53,174	46,754	40,545
LEQ	70,719	66,838	65,521	70,742	63,451	65,356	62,205	55,244
LW	78,719	74,838	73,521	78,742	71,451	73,356	70,205	63,244



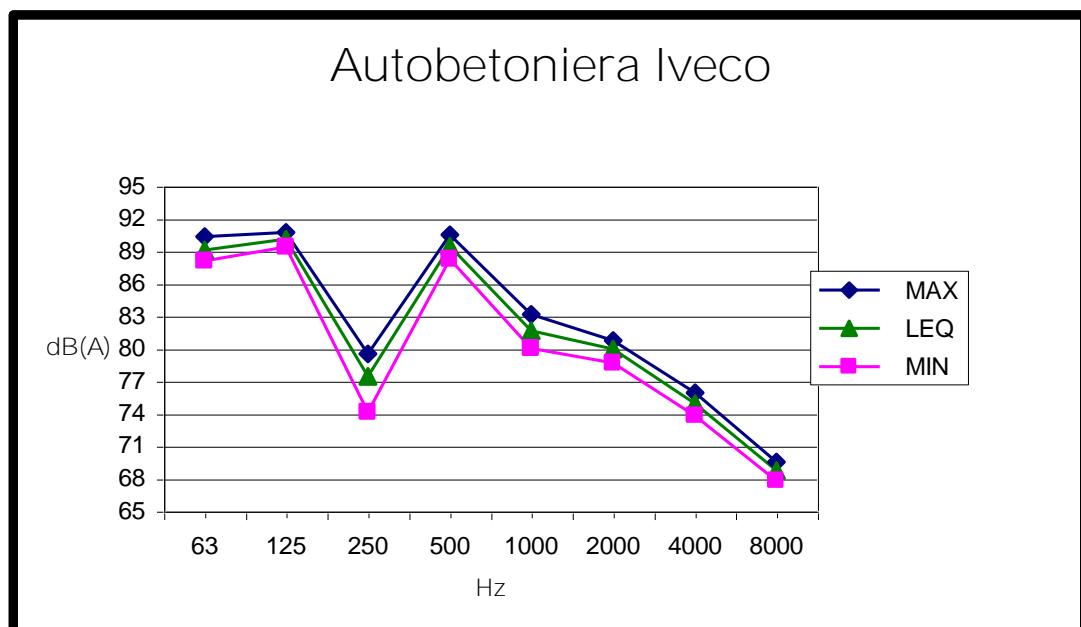
Rumore ambientale

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	75,963	67,896	71,612	70,671	72,647	69,731	62,981	60,935
MIN	53,456	43,579	34,83	35,794	33,748	33,466	29,444	26,952
LEQ	65,756	57,431	54,726	49,223	51,998	53,104	45,884	43,367
Lw	73,756	65,431	62,726	57,223	59,998	61,104	53,884	51,367

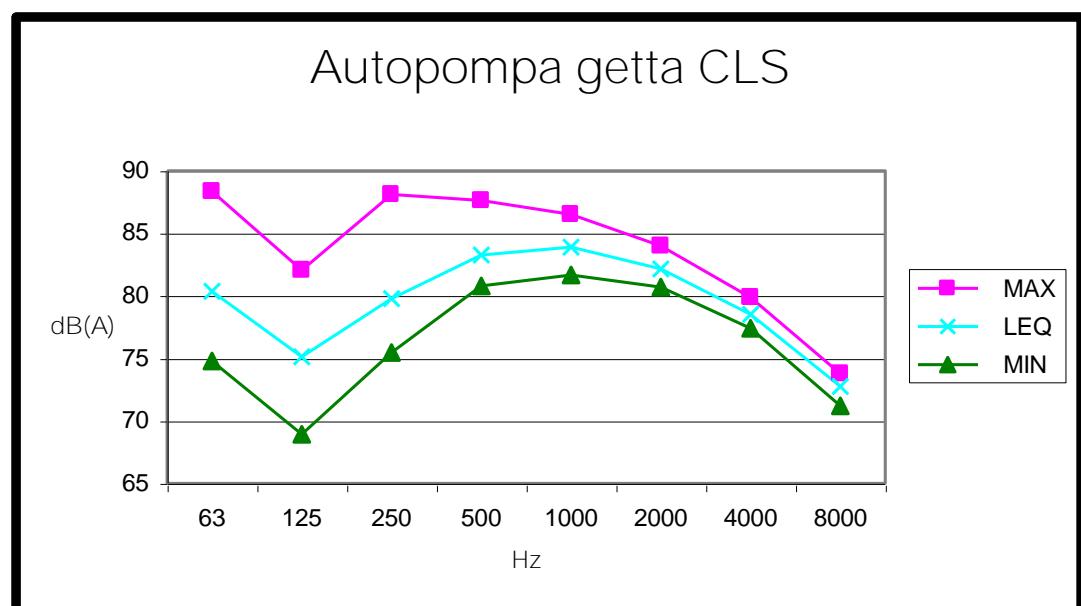


Autobetoniera Iveco

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	90,356	90,732	79,514	90,497	83,183	80,761	75,916	69,519
MIN	88,098	89,392	74,152	88,263	80,032	78,668	73,799	67,802
LEQ	89,086	90,121	77,445	89,462	81,631	79,985	74,905	68,767
LW	97,086	98,121	85,445	97,462	89,631	87,985	82,905	76,767

**Autopompa getta cls**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	88,333	82,031	88,098	87,628	86,523	84,006	79,891	73,752
MIN	74,787	68,931	75,446	80,808	81,654	80,714	77,398	71,212
LEQ	80,337	75,116	79,773	83,277	83,889	82,148	78,503	72,741
LW	88,337	83,116	87,773	91,277	91,889	90,148	86,503	80,741



7.13.3. DIRETTIVA 2003/10/CE DEL 06/02/03

Nella *Gazzetta Ufficiale* n. 42/L dell'Unione Europea è stata pubblicata la Direttiva 2003/10/CE del Parlamento europeo e del Consiglio sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (rumore).

La direttiva stabilisce prescrizioni minime di protezione dei lavoratori contro i rischi per la loro salute e sicurezza che derivano, o possono derivare, dall'esposizione al rumore e, segnatamente, contro il rischio per l'udito.

I nuovi limiti di esposizione e i valori di esposizione che faranno scattare l'azione a livello di esposizione giornaliera al rumore e alla pressione acustica di picco sono:

Valori limite di esposizione:

$L_{EX,8h} = 87 \text{ dB(A)}$ e $p_{peak} = 200 \text{ Pa}$ rispettivamente;

Valori superiori di esposizione che fanno scattare l'azione:

$L_{EX,8h} = 85 \text{ dB(A)}$ e $p_{peak} = 140 \text{ Pa}$ rispettivamente;

Valori inferiori di esposizione che fanno scattare l'azione:

$L_{EX,8h} = 80 \text{ dB(A)}$ e $p_{peak} = 112 \text{ Pa}$ rispettivamente;

In particolari circostanze, per le attività in cui l'esposizione giornaliera al rumore varia significativamente, il livello di esposizione giornaliero al rumore potrà essere sostituito dal livello di esposizione settimanale. Questo potrà avvenire a condizione che: il livello di esposizione settimanale al rumore, come dimostrato da un controllo idoneo, non ecceda il valore limite di esposizione di 87 db(A); e siano adottate adeguate misure per ridurre al minimo i rischi associati a tali attività.

Attualmente, secondo il quanto stabilito dal Decreto Legislativo 227/91 descritto in precedenza, vengono superati i valori limite quando l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore risulta superiore a **90 dBA** od il valore della pressione acustica istantanea non ponderata risulta superiore a **140 dB** (200Pa).

E' presumibile che diversi datori di lavoro, per rientrare nei nuovi limiti, se consideriamo che la differenza di 3 dB tra due fenomeni sonori significa che uno è il doppio dell'altro, dovranno adottare nuove misure tecniche, organizzative e procedurali.

Gli Stati membri dovranno conformarsi alla direttiva entro il 15 febbraio 2006.

8. L. 447 DEL 26/10/95: LEGGE QUADRO SUL RUMORE

Questa legge stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo dall'inquinamento acustico.

Dopo avere stabilito alcune definizioni fondamentali questa Legge definisce le competenze per:

lo Stato

per le Regioni

per le Province

per i Comuni.

Non sono delineate normative tecniche specifiche ma si rimanda a leggi e decreti che dovranno emettere le regioni, le province e i comuni in uno alle competenze generali dello Stato.

Saranno le regioni a dovere emanare norme tecniche per la zonizzazione acustica del territorio che dovrà poi essere attuata dai comuni. E' questo uno dei passi fondamentali per l'avvio del processo applicativo della Legge.

La Legge prevede all'art. 7 piani di risanamento acustico che dovranno essere approvati dal consiglio comunale. Questi debbono contenere l'individuazione delle sorgenti acustiche, dei soggetti cui compete l'intervento, le priorità del risanamento, la stima degli oneri finanziari, le misure cautelari per la tutela dell'ambiente. Nei comuni con popolazione superiore ai 50.000 abitanti il consiglio comunale presenta una relazione biennale sullo stato acustico del comune.

8.1. DISPOSIZIONI IN MATERIA DI INQUINAMENTO ACUSTICO

La Legge 477/95 prevede che i progetti sottoposti a valutazione di impatto ambientale siano redatti in conformità alle esigenze di tutela dall'inquinamento acustico delle popolazioni interessate.

Sono previste relazioni specifiche di impatto acustico per le seguenti opere: aeroporti, eliporti, autostrade, strade extraurbane principali, strade urbane di scorrimento, strade urbane di quartiere, strade locali, discoteche, circoli ove siano installati macchinari o impianti rumorosi, impianti sportivi e ricreativi, ferrovie.

Occorre produrre una valutazione previsionale del clima acustico delle aree interessate alla realizzazione delle seguenti tipologie di insediamenti:

scuole ed asili nido;

ospedali;

casa di cura e di riposo;

parchi pubblici privati ed extraurbani;

nuovi insediamenti residenziali.

Le domande di concessione edilizia per nuovi impianti ed infrastrutture adibiti ad attività produttive, sportive e ricreative, postazioni di servizi commerciali e polifunzionali debbono contenere una documentazione di impatto acustico.

Le attività che si prevede possano produrre valori di emissioni superiori ai limiti di legge debbono presentare una relazione alle competenti autorità comunali ove siano descritte le misure per ridurre ed eliminare le emissioni rumorose causate dalle stesse attività e dagli impianti.

8.2. IMPLICAZIONI SULLA SICUREZZA NEI LUOGHI DI LAVORO

La *Legge Quadro sul Rumore* n. 477/95 può certamente influenzare i piani della sicurezza non appena avrà espresso tutta la sua efficacia. In particolare le Regioni stanno per emanare, alcune lo hanno già fatto, norme per la zonizzazione comunale.

I comuni potranno così zonizzare e pertanto i limiti di rumorosità esterna saranno quelli riportati nella legge, cioè:

<i>Zonizzazione</i>	<i>Limite diurno</i>	<i>Limite notturno</i>
I) <i>Aree particolarmente protette</i>	50	40
II) <i>Aree prevalentemente residenziali</i>	55	45
III) <i>Aree di tipo misto</i>	60	50
IV) <i>Aree di intensa attività umana</i>	65	55
V) <i>Aree prevalentemente industriali</i>	70	60
VI) <i>Aree esclusivamente industriali</i>	70	70

I responsabili della sicurezza dovranno, quindi, assicurare non solo le condizioni di dose di esposizione quotidiana indicate dal D.Lgs 277/91 ma anche rispettare i limiti di rumorosità esterna per le abitazioni, le strade e gli spazi comuni vicini al cantiere in conformità alla succitata tabella.

Non sarà facile rispettare questi limiti soprattutto nelle zone urbane protette e residenziali. Ciò implicherà l'utilizzo di barriere acustiche mobili al confine dell'area di cantiere, la previsione della rumorosità esterna (ad esempio con codici di calcolo) e l'aggiornamento delle protezioni ogni volta il cantiere subisce una modifica.

9. CRITERI DI VALUTAZIONE DEL RUMORE

Essendo il rumore un fenomeno complesso la cui stessa definizione risulta difficile a causa del giudizio soggettivo di disturbo dato dall'uomo ne consegue che non è possibile ottenere una scala di misura univoca ma occorre di volta in volta *valutare* il rumore in funzione dell'attività svolta dal soggetto ascoltatore.

9.1. LE CURVE NOISE CRITERIA (NC)

Per valutare il disturbo prodotto da un rumore all'interno di edifici si può utilizzare il Criterio delle curve NC. Si traccia sopra le curve lo spettro del rumore rilevato a bande d'ottava e si determina la curva che inviluppa esternamente tale spettro. Il valore di questa curva (eventualmente interpolato fra quelle indicate nell'abaco) indica il valore dell'indice NC (vedi Figura 101). Esso è correlato al disturbo che il rumore produce nel linguaggio parlato. Viene penalizzata la banda più energetica.

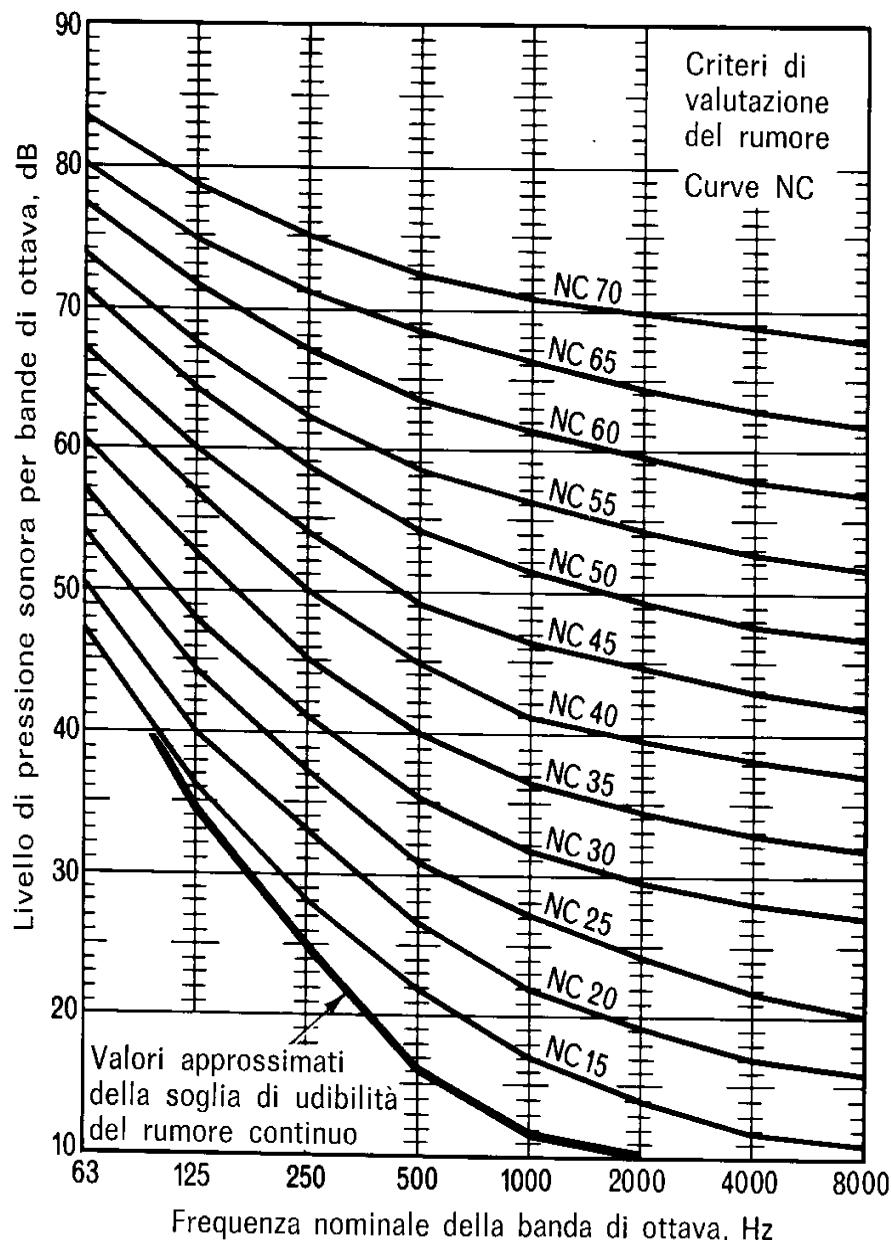


Figura 101: Curve NC per la valutazione del rumore.

9.2. LE CURVE NOISE RATING (NR)

Più recentemente sono state proposte in Europa ed accettate dalla ISO le curve NR, (vedi Figura 102), in sostituzione delle curve NC (di origine USA).

Il loro utilizzo è del tutto simile alle NC.

9.3. VALORI DI RIFERIMENTO NC ED NR

I valori di riferimento relativi alle curve NC ed NR sono riportati nella seguente Tabella 18 in funzione della destinazione d'uso dei locali nei quali valutare le prestazioni acustiche.

9.4. NORMA ISO -R 1996 - COMPOSITE NOISE RATING

Per la valutazione della rumorosità interna si può applicare il criterio CNR indicato dalla Norma ISO -R 1996, così come indicato nella seguente Tabella 19. In pratica si sceglie un criterio base per la valutazione che si desidera effettuare.

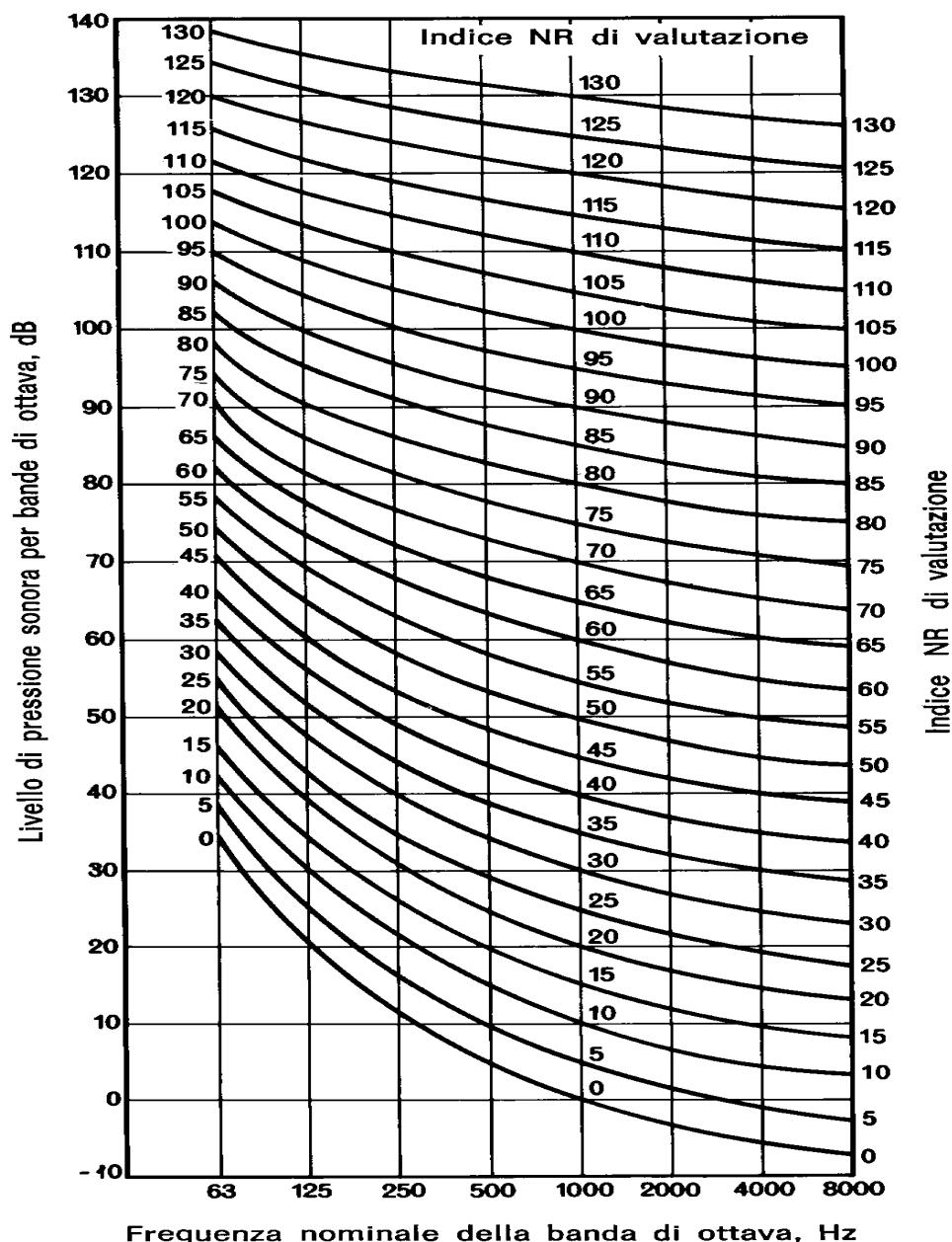


Figura 102: Curve di valutazione NR

TABELLA 2.3
Livelli NC raccomandati in vari tipi di ambiente

<i>Ambiente</i>	<i>Gamma di livelli di probabile tollerabilità</i>
Fabbriche (industria pesante)	NC 55 ÷ 75
Fabbriche (industria leggera)	NC 45 ÷ 65
Cucine	NC 40 ÷ 50
Piscine ed aree sportive	NC 35 ÷ 50
Grandi magazzini e negozi	NC 35 ÷ 45
Ristoranti, bar, mense	NC 35 ÷ 45
Uffici meccanizzati	NC 40 ÷ 50
Uffici in genere	NC 35 ÷ 45
Uffici privati, biblioteche, aule d'udienza, aule scolastiche	NC 30 ÷ 35
Case private, camere da letto	NC 25 ÷ 35
Corsie d'ospedale, sale operatorie	NC 25 ÷ 35
Cinematografi	NC 30 ÷ 35
Teatri, sale da riunione, chiese	NC 25 ÷ 30
Sale da concerto, teatri d'opera	NC 20 ÷ 25
Studi di registrazione e di trasmissione	NC 15 ÷ 20

TABELLA 2.4
Livelli NR raccomandati in vari tipi di ambiente

Officine	NR 60 ÷ 70
Uffici meccanizzati	NR 50 ÷ 55
Palestre, piscine	NR 40 ÷ 50
Ristoranti, bar, mense	NR 35 ÷ 45
Uffici privati, biblioteche, aule d'udienza	NR 30 ÷ 40
Cinematografi, ospedali, chiese, piccole sale da conferenza	NR 25 ÷ 35
Aule scolastiche, studi televisivi, grandi sale da conferenza	NR 20 ÷ 30
Sale da concerto, teatri	NR 20 ÷ 25
Cliniche diagnostiche, cabine audiometriche	NR 10 ÷ 20

Tabella 18: Valori di riferimento NC ed NR

Al valore di base NR si applicano poi una serie di correzioni (*composite*), prese ciascuna con il proprio segno, che tengono conto del luogo, delle attività, della durata temporale, etc.., come indicato nella tabella. Il valore così corretto di NR viene detto CNR.

Occorre quindi effettuare il confronto fra il valore CNR calcolato e valore NR del rumore da valutare.

Se la differenza è inferiore a 5 dB il rumore non disturba altrimenti si hanno disturbi non accettabili o reazioni comunitarie forti.

Si osservi come i criteri del livello differenziale massimo di 5 dB sua stato recepito dal DPCM 1/3/91 e dal DPCM 14/11/97.

TABELLA 2.6

Sommario del metodo di previsione del disturbo arrecato alla comunità secondo le curve NR (da Kosten e Van Os)

Scelta del criterio

Criterio base per l'interno di camere da letto	NR 25
Criterio base per l'interno di locali di soggiorno	NR 30

Correzione da sommarsi al numero NR di base

Presenza di toni puri o di altre caratteristiche tonali facilmente distinguibili	— 5
Rumore impulsivo e/o intermittente	— 5
Rumore presente solo durante le ore lavorative	+ 5
Rumore presente solo per il 25% del tempo	+ 5
6%	+ 10
1,5%	+ 15
0,5%	+ 20
0,1%	+ 25
0,02%	+ 30
Tipo di area: suburbana molto tranquilla	— 5
suburbana	0
urbana residenziale	+ 5
urbana in prossimità di qualche industria	+ 10
area industriale vera e propria	+ 15

Il criterio corretto si ottiene dalla somma del criterio base e delle appropriate correzioni.

Valutazione

Se lo spettro a bande d'ottava misurato supera, in una banda qualsiasi, la curva corrispondente al criterio NR corretto

- di meno di 5 dB, il rumore è giudicato marginale;
- di 5 ÷ 10 dB, il rumore è giudicato difficile da accettare;
- di più di 10 dB, il rumore è giudicato inaccettabile.

Tabella 19: Applicazione del metodo ISO R 1996

10. REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI

Nella Legge quadro N. 447 del 26.10.1995 si stabiliscono, come già indicato in precedenza, i principi fondamentali “per la tutela dell’ambiente esterno e dell’ambiente abitativo dall’inquinamento acustico”. Essa contiene una serie di importanti “definizioni”¹⁰, assegna i compiti e/o le competenze di Comuni, Province e Regioni (sostanzialmente tenuti a eseguire la classificazione acustica del territorio e, ove necessario, i relativi piani di risanamento acustico), e fissa le competenze dello Stato.

Tra queste ricordiamo la facoltà di determinare i valori limite di immissione, emissione, attenzione e qualità; definire la normativa tecnica per collaudo e omologazione; fissare le tecniche di misura dell’inquinamento acustico; coordinare le attività di ricerca; definire i requisiti acustici passivi degli edifici; i requisiti degli allarmi acustici, i requisiti dei locali di pubblico spettacolo, i criteri di misura del rumore nei trasporti; nonché predisporre campagne di informazione sul rumore e definire la figura di “tecnico competente”. A corredo della Legge 447, sono stati poi pubblicati una serie di decreti attuativi, che alla data attuale sono i seguenti:

1. D.M. 11.12.96: “Applicazione del criterio differenziale per gli impianti a ciclo produttivo continuo” (G.U. 4.3.97)
2. DPCM 14.11.97: “Determinazione dei Valori limite delle sorgenti sonore” (G.U. 1.12.97)
3. D.M. 31.10.97: “Metodologia di misura del rumore aeroportuale” (G.U. 15.11.97)
4. DPCM 18.9.97: “Determinazione dei requisiti acustici delle sorgenti sonore nei luoghi di intrattenimento danzante” (G.U. 6.10.97)
5. DPCM 19.12.97: “Proroga dei termini per l’acquisizione e l’installazione delle apparecchiature di controllo e registrazione nei luoghi di intrattenimento danzante...”
6. DPCM 5.12.97: “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici” (G.U. 22.12.97)
7. D.M. 16.3.98: “Tecniche di rilevamento e misura dell’inquinamento acustico” (G.U. 1.4.98)

Come si vede, si tratta di una ricca serie di testi di legislativi che hanno movimentato parecchio l’ambiente di professionisti e tecnici del settore. Tra questi spicca per interesse, in questa sede, quello che prescrive le caratteristiche acustiche degli edifici nei confronti del rumore proveniente dall’esterno e dall’interno del corpo di fabbrica (DPCM 5.12.97). Prima però di avviarcisi all’esame puntuale del testo di legge, è importante capire con quali livelli di rumore urbano l’edificio deve confrontarsi e da quali immissioni deve difenderci. Ciò sarà sinteticamente discusso nella sezione seguente.

10.1. REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DEGLI EDIFICI

Dei requisiti acustici passivi degli edifici parla il DPCM 5.12.97. Si tratta di un testo brevissimo, che contiene definizioni di grandezze acustiche caratteristiche, alcuni rinvii a norme UNI e ISO, una tabella di classificazione degli edifici e un’altra che riporta i valori limite delle succitate grandezze caratteristiche. I componenti edili che il testo di legge considera e che effettivamente costituiscono barriera al rumore sono tre: i tramezzi, le facciate e i solai. Ciascuno di questi viene caratterizzato da una grandezza acustica che, in quanto espressa da un sol valore numerico, prende il nome di “indice”.

Si ha nei tre casi quanto evidenziato in Tabella 20. La norma impone che per gli edifici, classificati secondo la Tabella 21, siano rispettati i valori limite espressi nella Tabella 22.

Si preannuncia quindi un confronto tra valori sperimentali e valori limite. Ora, il confronto tra grandezze acustiche può risultare problematico per via della loro dipendenza dalla frequenza.

¹⁰ Alcune delle quali meritevoli di considerazione, quale quella di “inquinamento acustico”: qui oggetto dell’attenzione non è solo l’uomo (con il suo ambiente abitativo e l’ambiente esterno), ma anche gli “ecosistemi”, i “beni materiali” e i “monumenti”. Anche questi elementi possono essere in effetti deteriorati da emissioni di rumori (e vibrazioni). Rilevanti sono altresì le definizioni dei limiti di emissione, di immissione, di attenzione e di qualità, che concorrono a caratterizzare il clima acustico delle aree urbane, quantitativamente precisati nei successivi decreti attuativi.

Esse si presentano infatti solitamente in formato vettoriale, ossia come “spettro” di valori. Al fine di rendere il confronto immediato e inequivocabile, conviene ricorrere agli “indici”.

Il problema allora si sposta a dedurre l’indice dallo spettro; ciò che si fa, come illustrato tra breve, con delle procedure “normalizzate” (ossia convenzionali, ma universalmente accettate), alquanto semplici e rapide. Prima di inoltrarci nella descrizione nelle procedure di valutazione delle grandezze di pratico interesse per le verifiche di legge, è necessario richiamare alcune cognizioni fondamentali.

Tabella 20: Nomenclatura del DPCM 5.12.97

Componente edile	INDICE CARATTERISTICO	
	NOME	SIMBOLO
Tramezzi	Potere fonoisolante apparente di partizione tra ambienti	R_w
Facciate	Isolamento acustico standardizzato di facciata	$D_{2m,n,T,w}$
Solai	Livello del rumore di calpestio	$L_{n,w}$

Tabella 21: Classificazione degli edifici secondo DPCM 5.12.97

CATEGORIA	EDIFICI ADIBITI A
A	Residenze o assimilabili
B	Uffici o assimilabili
C	Alberghi, pensioni ed attività assimilabili
D	Ospedali, cliniche, case di cura o assimilabili
E	Attività scolastiche a tutti i livelli o assimilabili
F	Attività ricreative o di culto o assimilabili
G	Attività commerciali o assimilabili

Tabella 22: Valori limite degli indici acustici caratteristici secondo DPCM 5.12.97

Classe	Edifici	R_w (*)	$D_{2m,n,T,w}$	$L_{n,w}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
		DB	dB	dB	dB(A)	dB(A)
D	Ospedali	55	45	58	35	25
A,C	Residenze & alberghi	50	40	63	35	35
E	Scuole	50	48	58	35	25
B,F,G	Uffici & negozi	50	42	55	35	35

(*) Valori riferiti a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari

10.1.1. TEMPO DI RIVERBERAZIONE

E’ definito (come già indicato in precedenza) come il tempo che intercorre dalla disattivazione della sorgente sonora perché il livello di pressione sonora in ambiente diminuisca di 60 dB. Viene solitamente indicato con T_{60} o più semplicemente con T.

E’ adatto a caratterizzare gli ambienti confinati dal punto di vista acustico. Si capisce infatti che, all’estinzione della sorgente, il livello di pressione sonora decade esponenzialmente tanto più rapidamente quanto più acusticamente assorbente è il locale. Viceversa, tale transitorio di estinzione sarà tanto più lento quanto più questo è riverberante. Naturalmente il maggiore o minore grado di riverberazione dipende dalle caratteristiche geometriche e acustiche della sala..

Da un bilancio dell’energia sonora in ambiente è possibile ricavare la relazione fondamentale di calcolo, che porta anche il nome di formula di Sabine:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{A}$$

dove V (m^3) è il volume ambiente e A (m^2) è il cosiddetto “assorbimento acustico”, dato da:

$$A = \sum_k S_i \alpha_i$$

essendo S_i la generica superficie del materiale di rivestimento del locale ed α_i il suo coefficiente di assorbimento acustico, alla data frequenza f .

Dunque anche A e T_{60} dipendono dalla frequenza. Il tempo di riverberazione, oltre che calcolarsi a tavolino con le relazioni precedenti, può, più immediatamente e più attendibilmente (soprattutto per gli ambienti arredati), ricavarsi per via sperimentale, con una misura in situ.

Allo scopo, tra le tante tecniche disponibili, si può operare con un generatore di rumore bianco (allo scopo di eccitare con uguale probabilità tutti i modi propri della sala), che una volta portato a regime viene istantaneamente spento.

Un fonometro regista la coda sonora e da questa, per via automatica o manuale, è possibile risalire al T_{60} .

Procedendo sistematicamente per tutte le frequenze, ne discende lo spettro dei valori T_{60} necessari a caratterizzare l’ambiente.

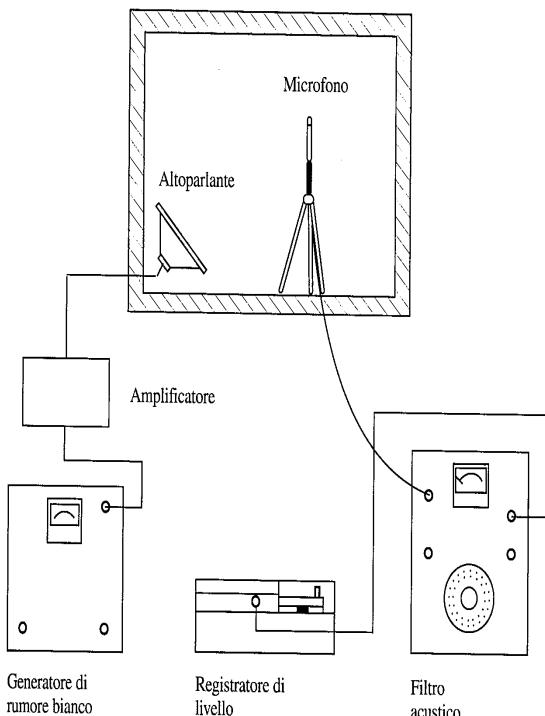


Figura 103: Apparato sperimentale per la misura del tempo di riverberazione T_{60}

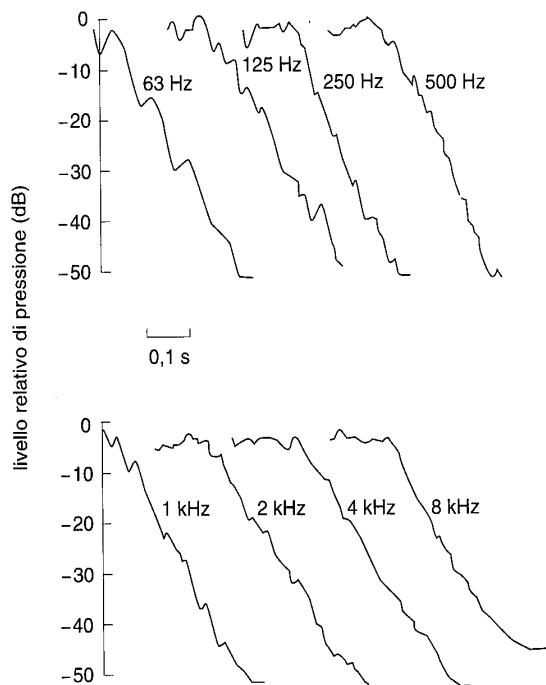


Figura 104: Esempi di code sonore alle varie frequenze

10.1.2. POTERE FONISOLANTE

Il potere fonoisolante, anch'esso definito e studiato in precedenza, è proprio dei divisorì acustici, ossia di quegli elementi che costituiscono barriera acustica tra l'ambiente disturbante e l'ambiente disturbato. Tali elementi possono essere i muri di tamponamento all'interno di una stessa unità immobiliare, le pareti di confine tra due unità immobiliari, le facciate degli edifici, i solai etc. Detto il coefficiente di trasmissione sonora, espresso come rapporto tra l'energia trasmessa rispetto a quella incidente, il potere fonoisolante R è dato dalla seguente relazione:

$$R = 10 \log \frac{1}{A}$$

Ancora sulla base di semplici considerazioni energetiche, è possibile correlare R alle caratteristiche dei due locali e a quelle del divisorio :

$$R = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{S_d}{A} \quad [86]$$

Qui¹¹ L_1 ed L_2 sono il livello di pressione sonora rispettivamente dell'ambiente disturbante e dell'ambiente disturbato quando nel primo è in funzione la sorgente sonora; S_d è la superficie del divisorio e A è l'assorbimento acustico dell'ambiente disturbato. Quest'ultima grandezza può a sua volta essere determinata indirettamente attraverso una misura del T_{60} . La formula di uso pratico è pertanto:

$$R = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{S_d}{0.16 V / T_{60}} \quad [87]$$

In Figura 105 è riportato l'assetto sperimentale necessario per la determinazione di R .

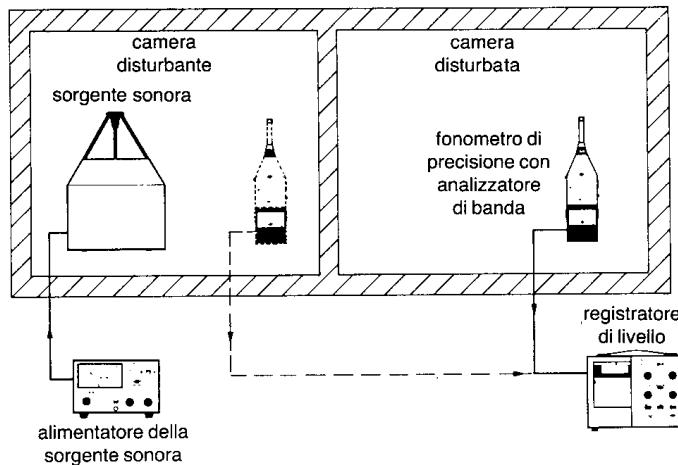


Figura 105: Disposizione sperimentale per la misura del Potere Fonoisolante

10.1.3. INDICE DI VALUTAZIONE DEL POTERE FONISOLANTE

Il potere fonoisolante a sua volta dipende dalla frequenza. Come sopra ricordato, è utile poter disporre di una quantità che esprima in forma sintetica le caratteristiche acustiche dell'elemento in esame. Quest'esigenza si verifica, ad esempio, nelle prescrizioni dei requisiti di capitolato, nella classificazione di elementi costruttivi, nelle dichiarazioni di idoneità di componenti edilizi, ecc.

Il problema è affrontato nella Norma UNI 8270/7 (conforme alle Norme EN-ISO e richiamata dal DPCM 5.12.97) nella quale sono contenuti criteri per dedurre questo indice a un sol numero. Nella terminologia italiana questo prende anche il nome di "indice di valutazione".

¹¹ Questa relazione in verità trascura il contributo delle trasmissioni laterali del rumore (flanking transmission), ossia quelle che giungono in ambiente attraverso le strutture di contorno del divisorio.

Il metodo consiste nel confronto tra la curva sperimentale del potere fonoisolante e una curva limite convenzionalmente assunta (Figura 106).

Per tentativi o con l'aiuto del calcolatore, si ricerca una condizione di accordo tra le due curve definita dalla seguente condizione: "la media degli scarti sfavorevoli della curva sperimentale rispetto alla curva limite non deve superare i 2 dB".

Per scarto sfavorevole si intende, in questo caso, lo scarto negativo, tra la curva limite e quella sperimentale.

Allorché la condizione di accordo è stata trovata, l'indice di valutazione viene ricavato dal valore dell'ordinata corrispondente a 500 Hz sulla curva limite.

La Figura 107 riporta l'esempio di determinazione dell'indice di valutazione, relativo ad una misura di potere fonoisolante.

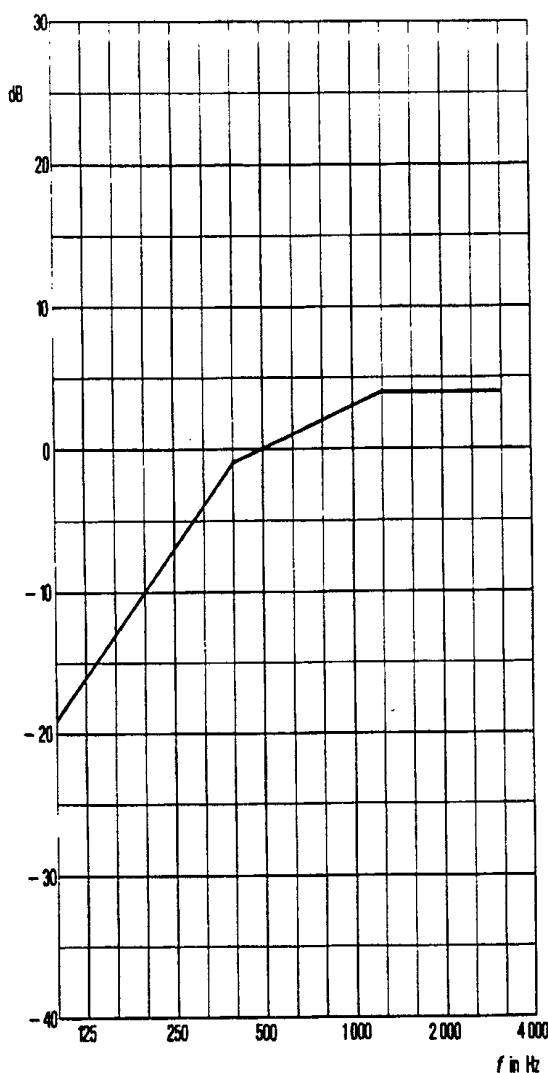


Figura 106: Curva limite per divisorì e facciate

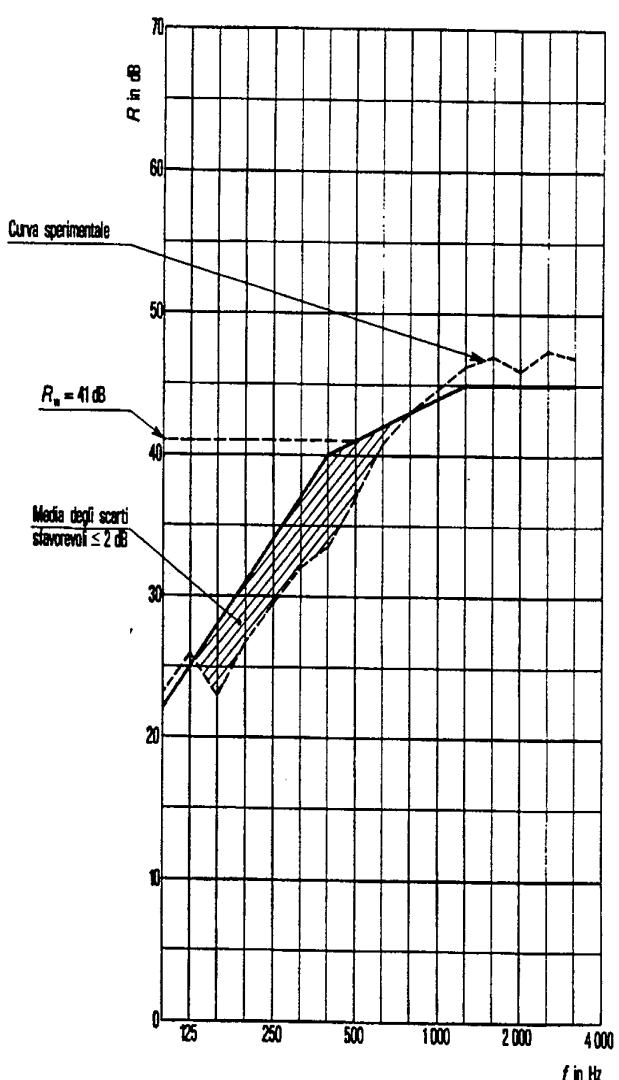


Figura 107: Esempio di determinazione dell'indice di valutazione

10.1.4. ISOLAMENTO ACUSTICO

L'isolamento acustico è un'altra grandezza atta a caratterizzare il grado di protezione dal rumore offerto da un componente edile nei confronti di una sorgente sonora posta al di là di questo. Detti allora L_1 ed L_2 i livelli di pressione sonora misurati rispettivamente nell'ambiente disturbante e disturbato, si definisce isolamento acustico la differenza:

$$D = L_1 - L_2. \quad [88]$$

Tale grandezza non è tuttavia perfetta nel caratterizzare il detto componente in forma assoluta, in quanto dipende ancora dalle caratteristiche acustiche dell'ambiente disturbato.

Al fine di risolvere questa dipendenza, e quindi permettere confronti tra divisorì, si può pensare di riferire l'isolamento acustico a un ambiente ricevente fittizio avente un valore di assorbimento acustico convenzionalmente prefissato $A_o = 10m^2$; il tutto a parità di potere fonoisolante R e di superficie S_d del divisorio che separa i due ambienti reali. Si ha pertanto :

$$R = \underbrace{L_1 - L_2 - 10\log \frac{S_d}{A}}_{\text{Ambiente reale}} \quad \underbrace{(L_1 - L_2)_n - 10\log \frac{S_d}{A_o}}_{\text{Ambiente fittizio}}$$

da cui :

$$D_n = (L_1 - L_2)_n - L_1 + L_2 - 10\log \frac{A_o}{A} \quad [89]$$

D_n viene ad assumere il nome di "isolamento acustico normalizzato". Dalla formula di Sabine si ricava per D_n una forma più utile per la pratica e cioè:

$$D_n = L_1 - L_2 - 10\log \frac{T}{T_o} \quad (T_o = 0.5 s)$$

L'ambiente di riferimento è caratterizzato da un tempo convenzionale di riverberazione $T_o = 0.5$ secondi. Il DPCM 5.12.97 adotta questa grandezza per valutare l'isolamento acustico delle facciate degli edifici. La formula che impone è la seguente:

$$D_{2m,n,T} = L_{1,2m} - L_2 - 10\log \frac{T}{T_o} \quad [90]$$

Qui $L_{1,2m}$ è il livello di pressione sonora prodotto dal traffico veicolare e misurato a 2m dalla facciata¹². T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente, $T_o = 0.5$ s è il tempo di riverberazione convenzionale e L_2 è il livello di pressione sonora dell'ambiente disturbato.

Quest'ultimo va calcolato sulla base della seguente formula:

$$L_2 = 10\log \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n 10^{L_k/10} \quad [91]$$

dove n è l'intero immediatamente superiore ad un decimo del volume ambiente V (m^3) e comunque non inferiore a 5; in formule: $n = \frac{V}{10} \geq 5$. Le misure di livello vanno eseguite in terze d'ottava.

Finalmente dalla curva dell'isolamento acustico normalizzato per le facciate si può ricavare l'indice di valutazione.

A questo scopo il DPCM 5.12.97 e Norma Uni 8720/7 ivi richiamata, prescrivono che ciò si faccia con la stessa curva limite adottata per i divisorì e con le stesse procedure di calcolo.

¹²

oppure da altoparlante con incidenza del suono a 45° sulla facciata.

10.2. VERIFICHE DI LEGGE PER DIVISORI E FACCIADE

10.2.1. VERIFICA DEI DIVISORI

Il procedimento da seguire è il seguente:

1. Predisporre il rumore bianco nell'ambiente 1
2. Misurare L_1 ed L_2 in almeno tre posizioni casuali ma a distanza $d > 1$ m dalle pareti
3. Se la differenza tra il livello misurato e quello di fondo in una qualsiasi frequenza è superiore a 10 dB, correggere le misure ottenute secondo i valori della Tabella 23 (da UNI 8270/4)
4. Eseguire la misura del T_{60} nell'ambiente disturbato
5. Calcolare: $R = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{S_d}{0.16V/T_{60}}$
6. Eseguire la procedura grafica per la determinazione dell'Indice di valutazione R_w con la curva limite in Figura 106.
7. Confrontare il valore R_w così ottenuto con quello di legge (in Tabella 22).

10.2.2. VERIFICA DELLE FACCIADE

Il procedimento da seguire è il seguente:

1. Eseguire la misura del rumore da traffico veicolare $L_{1,2m}$
2. Valutare $L_2 = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n 10^{L_k/10}$ ed eseguire la misura del T_{60} nell'ambiente disturbato
3. Calcolare l'isolamento acustico normalizzato di facciata dalla formula: $D_{2m,n,T} = L_{1,2m} - L_2 - 10 \log \frac{T_{60}}{T_o}$. Eseguire la procedura grafica per la determinazione dell'Indice di valutazione $D_{2m,n,T,w}$ con curva limite in Figura 106.
4. Confrontare il valore $D_{2m,n,T,w}$ così ottenuto con quello di legge (Tabella 22).

Differenza tra il livello misurato con la sorgente sonora in funzione e il rumore di fondo. (dB)	Quantità da sottrarre al livello misurato con la sorgente sonora in funzione. (dB)
3	3
Da 4 a 5	2
Da 6 a 9	1

Tabella 23: Correzione dei livelli in funzione del rumore di fondo

10.2.3. VERIFICA DAL RUMORE DA CALPESTIO

Il rumore da calpestio è quello che si trasmette attraverso i solai. Per simulare in maniera convenzionale il rumore nell'ambiente ricevente, si utilizza una macchina particolare, detta *generatore di calpestio normalizzato*, le cui caratteristiche sono precisate nella Norma¹³ UNI 8270/4.

Qui si prescrive che tale macchina sia costituita da una serie di cinque martelletti, del peso di 5 kg ciascuno, disposti in linea ed equidistanti che cadono sequenzialmente da un'altezza di 40 cm ((Figura 108)¹⁴.

¹³ La Norma UNI 8270/4 a sua volta riflette la ISO 170/4,

¹⁴ Si richiede inoltre che i martelletti abbiano ciascuno una superficie d'impatto di 7 cm² e realizzino 10 impatti al secondo. La parte di martello che colpisce il pavimento deve essere un cilindro d'acciaio di 30 mm di diametro,

La grandezza cui si fa riferimento per caratterizzare la capacità isolante ai suoni impattivi è il livello di pressione sonora misurato nell'ambiente disturbato (sottostante al solaio su cui agisce il generatore di calpestio). Al solito, per rendere questa grandezza indipendente dalle caratteristiche acustiche del locale ricevente, si può ragionare come nel caso dei divisorì, ossia a parità di R e S_d , e giungere alla relazione :

$$L_n = L_2 + \log \frac{T}{T_o}$$

sempre con $T_o = 0.5$ s. In questa forma L_n prende il nome di "Livello normalizzato del rumore di calpestio". Ai fini della misura di L_2 la stessa Norma UNI 8270/4 raccomanda che la macchina sia posta in almeno quattro posizioni diverse sul pavimento dell'ambiente d'emissione, con una distanza minima tra questa e i bordi del pavimento maggiore di 0.5 m. Nel caso di strutture portanti non omogenee (solai nervati, misti etc.) la linea congiungente i martelli deve essere orientata a 45° rispetto all'asse delle travi¹⁵.

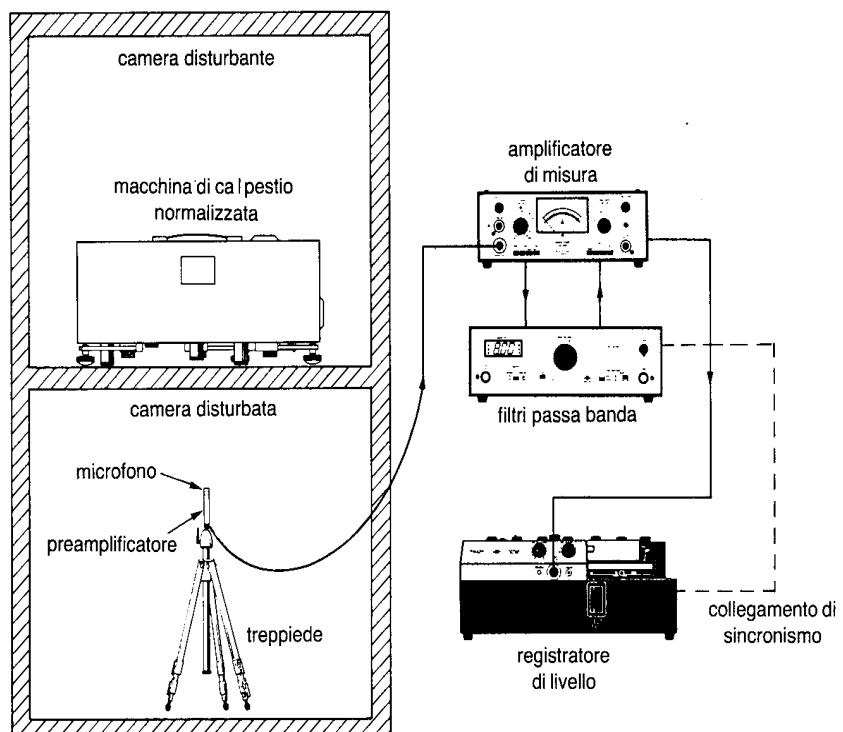


Figura 108: Disposizione operativa della macchina di calpestio

10.2.4. INDICE DI VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI CALPESTIO

Per ricavare l'indice di valutazione $L_{n,w}$ corrispondente al livello di calpestio normalizzato L_n , si opera analogamente a quanto visto per i divisorì, ma adottando la curva limite in Figura 109.

La condizione di accordo tra le due curve è sempre quella per cui la media degli scostamenti sfavorevoli sia inferiore a 2 dB. In questo caso lo scostamento è "sfavorevole" quando la curva sperimentale sovrasta la curva limite (Figura 110).

con una terminazione sferica di 500 mm di raggio. La distanza tra la linea congiungente i martelli e i supporti al suolo deve essere di almeno 100 mm

¹⁵ Resta ancora da segnalare che la UNI 8270/8, sebbene specificatamente prevista per la misura in laboratorio del rumore di calpestio, al §7.2 prescrive che "se in una banda di frequenza qualsiasi il livello di pressione sonora nel locale di ricezione è minore di oltre 10 dB del livello di rumore di fondo, si deve misurare quest'ultimo appena prima e appena dopo la determinazione del livello di pressione sonora in esame, applicando una correzione secondo quanto specificato nella Tab. 7".

La Norma UNI 8270/7 prescrive a questo punto che, una volta determinato $L_{n,w}$, ai fini delle verifiche di legge, questo valore sia assunto tal quale se ottenuto da misure in terze d'ottava, mentre sia diminuito di 5 dB se ottenuto da misure in banda d'ottava¹⁶.

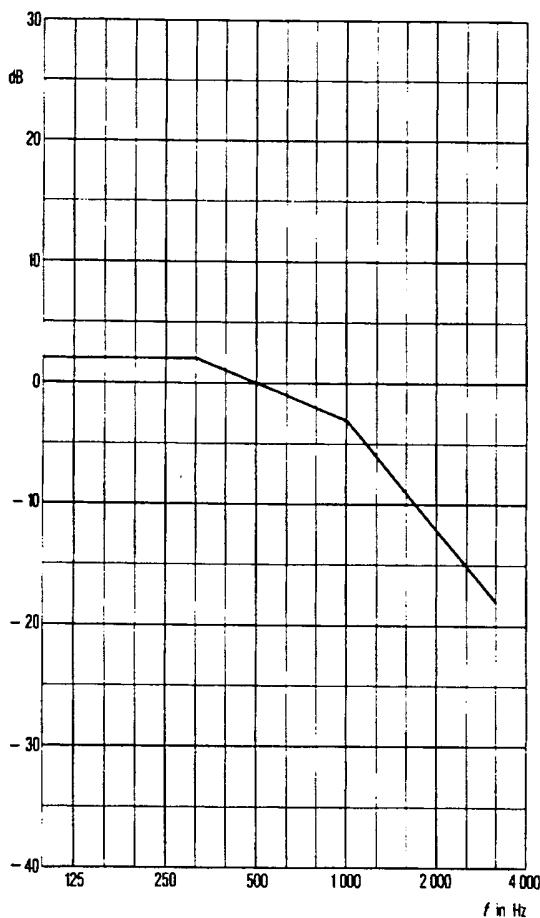


Figura 109: Curva limite per i solai

10.2.5. VERIFICHE DI LEGGE PER I SOLAI: RIFERIMENTO UNI 8270 & UNI 8270 & UNI 8270

1. Eseguire la misura del rumore di fondo nell'ambiente disturbato.
2. Attivare il generatore di calpestio normalizzato nell'ambiente disturbante
3. Misurare L_2 nell'ambiente disturbato
4. Eseguire i controlli sulla differenza tra livello misurato e rumore di fondo e, se del caso, applicare le correzioni di cui alla Tabella 23
5. Misurare il tempo di riverberazione T nell'ambiente disturbato.

Calcolare il livello del rumore di calpestio normalizzato: $L_n = L_2 + \log \frac{T}{T_o}$

¹⁶ A chiarimento, si riporta quanto detto nella Nota al §5.2 della UNI 8270/7: "A differenza delle altre grandezze considerate in questa norma, che derivano da differenze di livelli, il valore di L_n rappresenta in assoluto un livello di pressione sonora e dipende dalla larghezza di banda del filtro utilizzato per l'analisi. In conformità alla ISO 717 e norme analoghe di altri Paesi, il calcolo dell'indice di valutazione viene effettuato sulla base di risultati ottenuti da analisi per bande di 1/3 d'ottava. D'altra parte le analisi per bande d'ottava sono largamente adottate anche in acustica edilizia, soprattutto per le misure in opera e sono previste sia norme nazionali (8270/4) che internazionali (ISO 140/7). Al fine di evitare errori di giudizio in eventuali confronti tra i risultati ottenuti con metodi d'analisi diversi, si ritiene opportuno normalizzare gli indici di valutazione ricavati da curve per bande d'ottava, riportandoli al valore che si otterebbe, per lo stesso fenomeno in esame, da una curva per bande di 1/3 d'ottava (-5dB=10log(1/3))".

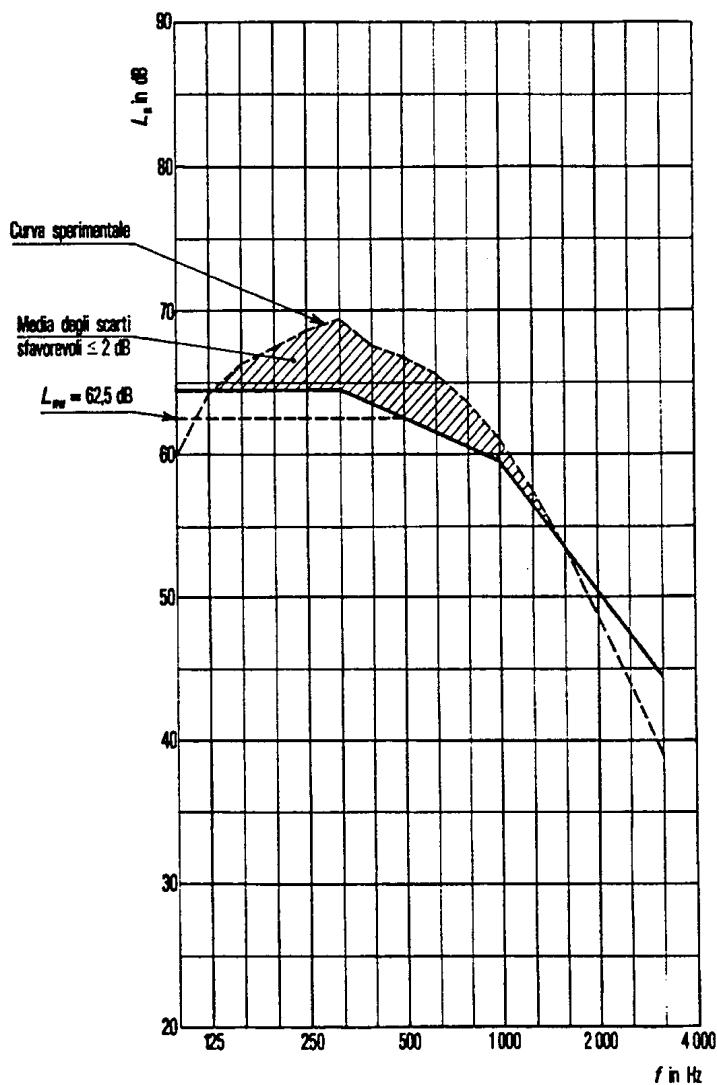


Figura 110: Esempio di determinazione dell'indice di valutazione

6. Determinare l'Indice di valutazione $L_{n,w}$ con l'ausilio della curva limite in Figura 109
7. Confrontare il valore $L_{n,w}$ così ottenuto con quello di legge (Figura 42).

10.2.6. RIFERIMENTI ALLA PRECEDENTE LEGISLAZIONE

Agli addetti ai lavori non sarà certo sfuggito che l'attuale normativa riflette da vicino una certa pregressa legislazione.

Il riferimento alle curve limite per divisorie, facciate e solai, l'adozione dell'indice di valutazione quale descrittore delle caratteristiche acustiche dei componenti edili, e procedure di rilevazione e calcolo del tutto simili a quelle qui illustrate, si trovano già nei seguenti testi di legge:

1. Circolare Ministero Lavori Pubblici No. 1769 del 30.4.1966: "Requisiti acustici nelle costruzioni edilizie"
2. Circolare Ministero Lavori Pubblici No. 3150 del 22.5.1967: "Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici degli edifici"
3. D.M. 18.12.1975 Cap. 5.1 "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica"

10.2.7. IL RUMORE PRODOTTO DAGLI IMPIANTI TECNOLOGICI

Per completare l'esame del DPCM 5.12.97, resta da trattare il problema del rumore generato dagli impianti tecnologici del quale si parlerà ampiamente nel prossimo capitolo.

Nel testo si prospetta la seguente suddivisione:

1. Servizi a funzionamento discontinuo:

- Ascensori
- Scarichi idraulici
- Bagni e servizi igienici
- Rubinetteria

2. Servizi a funzionamento continuo:

- Impianti di riscaldamento
- Impianti di condizionamento
- Impianti di aerazione

Le prescrizioni sul rumore sono dati in termini di

L_{Aeq} : Livello equivalente continuo ponderato in scala A

L_{ASmax} : Valor massimo del livello equivalente continuo ponderato in scala A con costante di tempo "Slow"

Il rumore risulta ammissibile se:

$L_{Aeq} < 35 \text{ dB(A)}$ per gli impianti a funzionamento discontinuo

$L_{ASmax} < 25 \text{ dB(A)}$ per gli impianti a funzionamento continuo

La legge prescrive infine che:

le misure siano eseguite nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato

tal ambiente deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina.

Qui occorre fare un'ultima osservazione. Gli stessi parametri L_{Aeq} ed L_{ASmax} sono citati assieme agli altri valori limite nella Tabella 22.

Ma mentre il limite per il livello L_{ASmax} è 35 dB(A) per tutte le categorie di edifici (trovandosi in ciò conferma che questo valore dipende dall'impianto e non all'edificio), il limite per L_{Aeq} è, a seconda dei casi ora 25 dB(A), ora 35 dB(A), contraddicendo il carattere assoluto della precedente posizione.

10.3. CONSIDERAZIONI SUI REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI

Di punti critici, questioni sospese, nodi irrisolti in questo apparato tecnico-legislativo ce ne sono dunque parecchi. Cosa del resto comprensibile, se si pensa alla vastità e alla complessità del settore che il Legislatore si propone di regolamentare.

A mio avviso, gli elementi veramente problematici sono due:

- 1) il limite eccezionalmente basso per il rumore emesso dagli impianti tecnologici; il che mette fuori legge la totalità degli impianti esistenti e rende di fatto inapplicabile il decreto per quelli di nuova realizzazione.
- 2) il criterio seguito per la compilazione della Tabella 22 sui valori limiti dell'isolamento acustico dei componenti edili, in relazione alla destinazione d'uso degli edifici, nella forma attuale, appare incomprensibile, se non contraddittorio. Una benevola ipotesi è quella dell'errore di stampa...

Ma allora c'è da chiedersi, a quando le correzioni?

La difficoltà nasce dal fatto che trattasi di un testo di legge e non di una norma tecnica, di per sé emendabile per vie più rapide. Ciò di cui si sente il bisogno è in effetti un "*Testo Unico*", dove tutto sia armonizzato e coerente, oppure un corredo sistematico e organico di *Norme UNI*, più rapide a formularsi e ad aggiornarsi di un testo di legge.

Notizie attendibili riferiscono che è in questa direzione che si sta pensando e forse già lavorando.

Resta un problema di fondo: queste leggi si applicano ai nuovi edifici, al più a quelli in via di ristrutturazione. E il parco edilizio esistente?

Si sa. Finché si opera sul nuovo, si raccoglierà poco. In fatto di interventi legislativi sugli edifici l'Italia ha avuto un'esperienza parallela con le leggi sul risparmio energetico (ex Legge 373 e ora Legge 10): i benefici sono stati modestissimi. Tra i tanti motivi, cito il fondamentale: il parco edilizio italiano, ormai da parecchio tempo, si rinnova meno dell'1% l'anno.

Quindi qualunque intervento sul nuovo è pressoché infruttuoso. Se si vuole realmente incidere sulla realtà, e portare a casa risultati concreti, occorre intervenire sull'esistente. Si tratta naturalmente di trovare il modo giusto.

Riferimento Normativo	Campo di applicazione	Impianto a funzionamento	
		Continuo L_{Aeq} dB(A)	Discontinuo L_{ASmax} dB(A)
Legislazione attuale	DPCM 5.12.97	Tutti gli edifici	25
Delibera Regione Lombardia(*)	15.12.1977	Edilizia residenziale pubblica	35
Delibera Regione Trentino (Bolzano) (*)	Legge Prov. 20.11.78 No.66 DPGP 6.3.89 No.4	Edilizia residenziale pubblica	30
Delibera Regione Trentino (Trento) (*)	Legge Prov. 18.3.91, No.6 DPGP 4.8.92 No.12-65/Leg.	Edilizia residenziale pubblica	30
Circolare Ministero Lavori Pubblici	No. 1769 30.4.66	Edilizia sovvenzionata	33(**) 36(***)
Circolare Ministero Lavori Pubblici	No. 3150 22.5.67	Edilizia sovvenzionata	40
Decreto Ministeriale	18.12.1975	Edilizia scolastica	40
			50

(*) Citato in G. Elia, G. Geppetti: "Progettazione acustica di edifici civili e industriali" La Nuova Italia Scientifica , 1994

(**): isolamento superiore

(***): isolamento normale

Tabella 24: :Comparazione dei limiti di legge per il rumore prodotto dagli impianti tecnologici

10.4. PREVISIONE DEL POTERE FONOISOLANTE

Allo scopo di prevedere, in fase progettuale, il potere fonoisolante dei vari elementi costitutivi di un edificio, si riportano qui le correlazioni più utilizzate in letteratura.

10.4.1. POTERE FONOISOALNTE DELLE PARETI

Per frequenze fra 200 e 3200 Hz e per onde normali si può usare la più volte citata *legge di massa*:

$$R = 20 \log f - 42.5 \quad [92]$$

con R densità superficiale della parete.

Per campi diffusi (incidenza casuale) si ha:

$$R = R_0 + 10 \log 0.23 R_0 \quad [93]$$

con R_0 dato dalla [92].

Una relazione sperimentale dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IENGF) valida per tutto il campo di frequenze è la seguente:

$$R_w = 20 \log R_0 \quad [94]$$

con R_w densità superficiale della parete.

Per pareti composte si hanno notevoli complessità di calcolo e in letteratura si hanno varie relazioni per i casi pratici più usuali. Per pareti composte con elementi di diverso potere fonoisolante (ad esempio, porte, finestre,...) si ha una riduzione del potere fonoisolante totale rispetto ad una parete omogenea. La relazione utilizzata per il calcolo di R è:

$$R = 10 \log \frac{1}{S} S_i 10^{R_i/10} \quad [95]$$

con:

- S superficie totale della parete, m^2
- S_i superficie del componente *i.esimo*, m^2
- R_i potere fonoisolante del componente *i.esimo*, dB.

10.4.2. POTERE FONOISOLANTE DEI SERRAMENTI

In genere i serramenti costituiscono il punto debole di una parete. La superficie vetrata si comporta come una superficie omogenea e per essa valgono le relazioni precedenti. I valori sperimentali di R per i vetri sono inferiori a quelli indicati dalla legge di massa [92] e pertanto è più utile utilizzare la relazione sperimentale proposta dall'IENGF:

$$R_w = 12 \log 17 \quad [96]$$

Come si vede un raddoppio dello spessore della lastra vetrata porta ad un incremento di 3÷4 dB di R. Nella precedente relazione deve essere kg/m^2 .

Per aumentare R si possono usare più lastre vetrate purché di spessore maggiore di 4 mm. Per aumenti significativi occorre utilizzare doppi serramenti distanziati di almeno 10 cm e con rivestimento assorbente della superficie perimetrale interna fra le due finestre.

10.4.3. PREVISIONE DELL'ISOLAMENTO IMPATTIVO E DI CALPESTIO

Il livello di calpestio dipende dalla costituzione dei solai e delle strutture murarie che trasmettono le vibrazioni nell'ambiente. Per la previsione teorica si possono utilizzare le seguenti relazioni.

Solai Omogenei

Supponendo la densità costante e lo spessore uniforme il livello di calpestio (cioè il livello generato dalla *macchina di calpestio*) è dato da:

$$L_n = 10 \log \frac{4 c_0^2}{5.1 \rho c_L h_p s^3 \rho_0^2 A_0} \quad [97]$$

con:

- A_0 Area equivalente di assorbimento acustico pari a 10 m^2 ;
- ρ densità dell'aria, kg/m^3 ;
- c_0 celerità del suono, m/s ;
- c_{rad} efficienza acustica (se $f > f_c$ allora è pari ad 1);
- ρ_p densità del solaio, kg/m^3 ;
- h_p fattore di smorzamento;
- s spessore, m;
- c_L celerità longitudinale del suono, m/s .

Si osservi che L_n è indipendente dalla frequenza e che raddoppiando lo spessore del solaio si ha un incremento di 9 dB di L_n . Inoltre per solaio omogeneo si ha una relazione che lega R ed L_n :

$$L_n = R + 43 - 30 \log f - 10 \log (c_{rad} D_L) \quad [98]$$

ove D_L è l'effetto di attenuazione del pavimento sopra il solaio ed f la frequenza di centro banda.

Si osservi che le precedenti relazioni, proprio per l'ipotesi di omogeneità del solaio, debbono essere utilizzate con cautela nei calcoli pratici. Nei manuali specializzati si possono trovare relazioni specifiche per le varie tipologie costruttive.

Pavimento con rivestimento

Agendo sul rivestimento del solaio si può attenuare notevolmente il livello di calpestio. Nella pratica si utilizzano materiali elastici quali il sughero, la gomma, l'asfalto, la moquette, tappeti, L'effetto di attenuazione prodotto da questi rivestimenti vale:

$$D_L = 40 \log \frac{f}{f_0} \quad [99]$$

con f_0 frequenza critica data dalla relazione:

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{A_h E}{m h}} \quad [100]$$

ove:

- f_0 frequenza critica o di taglio, Hz;
- A_h area della superficie di percussione dei materiali della macchina di calpestio, pari a 7 cm^2 ;
- m massa del martello, 0.5 kg;
- h spessore del rivestimento, m;
- E modulo elastico del rivestimento, N/m².

Alcuni valori usuali di D_L sono riportati nella seguente tabella.

Materiale	Spessore (mm)	D_L (dB)
Gomma Industriale	4	11.8
	4	12.1
	5	10.6
	5	16.8
Piastrelle Viniliche	2	3.7
	2.5	8.3
	3.5	11.4
Tappeti vinilici	3	17.7
	3.5	15.7
	3.5	18.9
	4	17.4
Moquette	4	19.3
	4	20.6
	4	21.5
	4	23.6
	5	20.9
	6	26.3
	7	29.4
	8	28.4
	8	30.0
	10	33.5
	12	35.6
	14	36.8

Tabella 25: Attenuazione di alcuni rivestimenti per solai

Pavimento galleggiante

Il pavimento galleggiante ha un rivestimento che lo ricopre interamente impedendo la propagazione anche laterale delle onde impattive. L'efficacia di isolamento dipende fortemente dalla

capacità di attenuazione del materiale utilizzato e dalla sua frequenza naturale di risonanza in corrispondenza della quale si ha il massimo della trasmissione. Questa vale:

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad [101]$$

ove ρ è la massa superficiale del pavimento galleggiante (kg/m^2) e k la rigidità del materiale elastico interposto (N/m^2). E' bene avere f_0 inferiore a 90 Hz e ciò lo si può ottenere mediante l'utilizzo di materiale di elevata densità superficiale e con bassa costante elastica.

Soffitti sospesi

Per ridurre la trasmissione dei rumori impattivi si può intervenire anche sulla superficie opposta del pavimento e cioè a soffitto dell'ambiente sottostante.

I materiali utilizzati sono identici a quelli indicati per i pavimenti e valgono ancora le stesse relazioni di calcolo.

Si osservi che nella messa in opera dei soffitti sospesi si debbono evitare le connessioni meccaniche rigide che trasmettono vibrazioni dannose. Inoltre per accrescere l'attenuazione è opportuno inserire materassini di materiale assorbente (lana di roccia) fra il soffitto sospeso e la superficie inferiore del solaio.

11. DPCM 14-11-97: LIMITI DI EMISSIONE, DI IMMISSIONE E DI QUALITÀ

In attuazione dell'art. 3 della L. 447/95 (*Legge Quadro sul Rumore*) è stato emanato di recente il DPCM 14/11/97 che vuole armonizzare i provvedimenti di limitazione delle emissioni sonore (anche in ossequio alle indicazioni dell'Unione Europea).

Questo decreto, che riprende in parte quanto già introdotto dal DPCM 1/3/91 e lo sostituisce nelle parti innovative, fissa due serie di valori limite:

1. Valori limite di emissione sonora (riportati nella Tabella B);
2. Valori limite assoluti di immissione sonora, (riportati nella Tabella C).

Per le emissioni sonore valgono i limiti riportati nella tabella B fino a quando non sarà emessa un'apposita norma UNI. Le sorgenti mobili ed i macchinari sono altresì soggetti alle norme di omologazione e certificazione (vedi direttive europee). Le immissioni sonore sono regolate dalla tabella C che riprende i valori già visti per il DPCM 1/3/91 e indicati anche nella L. 447/95. Sono escluse da questi limiti le fasce di rispettiva pertinenza (indicate nei relativi decreti attuativi) delle infrastrutture ferroviarie, stradali, marittime ed aeroportuali. Pur tuttavia al di fuori delle fasce di pertinenza le queste sorgenti concorrono al livello di rumorosità ambientale. Il DPCM 14/11/97 conferma la validità del valore limite differenziale fissandolo a 5 dB per il giorno e 3 dB per la notte. Esclude da questi limiti se il rumore misurato a finestre aperte è inferiore a 50 dB di giorno e 40 di notte o se il rumore misurato a finestre aperte è inferiore a 35 dB di giorno e 25 dB di notte.

Inoltre il criterio differenziale non si applica per i rumori prodotti dalle infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali e marittime o da attività non connesse alle esigenze produttive, commerciali e professionali o da servizi di impianti fissi adibiti ad uso comune e limitatamente all'interno dell'edificio di appartenenza

11.1.1. DETERMINAZIONE DEI VALORI LIMITE DELLE SORGENTI SONORE

L'articolo 6 del DPCM 14/11/97 indica i valori di attenzione calcolati per il periodo di riferimento (già indicato dal DPCM 1/3/91 e riportato in tabella C) che per il lungo periodo (TL).

Quest'ultimo è definito come un multiplo intero del periodo di riferimento tale da caratterizzare dal punto di vista acustico il territorio.

Il valore di TL è prestabilito in funzione delle realtà specifiche locali. I valori di attenzione per i lunghi periodi si calcolano aggiungendo 10 dB ai valori diurni e 5 dB a quelli notturni indicati in tabella C (vedi dopo). Per l'adozione dei piani di risanamento acustico (già previsti dall'art. 7 della L. 447/95) basta superare uno dei due valori di attenzione. Infine il DPCM 14/11/97 riporta i valori di qualità (indicati dall'art. 2 della L. 447/95) in tabella D.

Tabella 26: Tabella A del DPCM 14/11/97

CLASSE I: aree particolarmente protette: rientrano in questa classe le aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione: aree ospedaliere, scolastiche, aree destinate al riposo ed allo svago, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, etc ...
--

CLASSE II: aree destinate ad uso prevalentemente residenziale: rientrano in questa classe le aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali e artigianali.

CLASSE III: aree di tipo misto: rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione, con presenza di attività commerciali, uffici, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici
--

CLASSE IV: aree di intensa attività umana: rientrano in questa classe le aree urbane interessate

da traffico veicolare locale o di attraversamento, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali, uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali, le aree con limitata presenza di piccole industrie.

CLASSE V: aree prevalentemente industriali: rientrano in questa classe le aree interessate da insediamenti industriali e con scarsità di abitazioni.

CLASSE VI: aree esclusivamente industriali: rientrano in questa classe le aree esclusivamente interessate da attività industriali e prive di insediamenti abitativi.

Tabella B: Valori limite di emissione – Leq in dB(A)

Classi di destinazione d'uso del territorio	TEMPI DI RIFERIMENTO	
	Diurno (06-22.00)	Notturno (22.00-06.00)
I aree particolarmente protette	45	35
II aree prevalentemente residenziali	50	40
III aree di tipo misto	55	45
IV aree di intensa attività umana	60	50
V aree prevalentemente industriali	65	55
VI aree esclusivamente industriali	65	65

Tabella C: Valori limite di immissione – Leq in dB(A)

Classi di destinazione d'uso del territorio	TEMPI DI RIFERIMENTO	
	Diurno (06-22.00)	Notturno (22.00-06.00)
I aree particolarmente protette	50	40
II aree prevalentemente residenziali	55	45
III aree di tipo misto	60	50
IV aree di intensa attività umana	65	55
V aree prevalentemente industriali	70	60
VI aree esclusivamente industriali	70	70

Tabella D: Valori di qualità – Leq in dB(A)

Classi di destinazione d'uso del territorio	TEMPI DI RIFERIMENTO	
	Diurno (06-22.00)	Notturno (22.00-06.00)
I aree particolarmente protette	47	37
II aree prevalentemente residenziali	52	42
III aree di tipo misto	57	47
IV aree di intensa attività umana	62	52
V aree prevalentemente industriali	67	57
VI aree esclusivamente industriali	70	70

Tabella 27: Tabelle B, C, D del DPCM 14/11/97

12. CENNI DI ACUSTICA DELLE SALE

L'acustica delle sale teatrali è conquista culturale relativamente recente nel panorama della tecnica delle costruzioni da spettacolo. Fin dall'antica Grecia i luoghi di spettacoli erano prevalentemente all'aperto e quindi non eccessivamente influenzati dai problemi delle riflessioni acustiche delle pareti, come normalmente avviene nei teatri chiusi.

Le teorie di *Aristosseno* sulla propagazione circolare delle onde sonore, riportate anche da *Vitruvio*, sono state alla base della costruzione dei teatri greci all'aperto del tipo a ventaglio (vedi l'esempio mirabile del teatro di *Epidauro* illustrato nell'Introduzione di questo volume) e poi dei teatri romani a forma ellittica. Secondo questa teoria le onde sonore si propagano "come le onde in uno stagno ma si spostano anche in altezza e non solamente sul piano".

Diversa situazione si ha nelle sale teatrali chiuse: in questo caso le onde acustiche interagiscono con le strutture dell'edificio determinando un campo sonoro misto la cui influenza sull'acustica delle stesse sale risulta di difficile previsione.

A parte gli studi iniziali di *Sabine* a fine secolo scorso solo dal 1960 si sono sviluppate nuove teorie sia nell'ambito dell'acustica delle sale che nell'ambito della psico-acustica che alla prima è strettamente correlata. L'ascolto dell'uomo, infatti, non è un fatto oggettivo e quindi deterministicamente bensì fortemente soggettivo e legato anche a situazioni psico-fisiche momentanee che portano il soggetto a variare il giudizio in funzione dello stato d'animo, dell'attenzione, delle circostanze, dei luoghi (sensazioni di spazialità, colore, calore,...).

Conoscere questi giudizi soggettivi risulta determinante al fine del raggiungimento delle desiderate prestazioni acustiche e nella valutazione delle sale musicali e pertanto debbono essere tenuti in considerazione con parametri acustici di nuova definizione e che vanno oltre la definizione del classico (anche se utilissimo) ma limitato tempo di riverberazione proposto da *Sabine*.

In pratica l'architettura delle sale teatrali si è evoluta negli ultimi secoli in base a considerazioni pratico-sperimentali dettate più da un apparente sesto senso dei progettisti che da vere considerazioni scientifiche.

Spesso alla base delle passate progettazioni vi era la presunzione di validità del criterio guida delle linee-visive: se la sala consente una buona visione della scena allora essa consente anche una buona acustica. Ciò, in effetti, alla luce dell'acustica geometrica, rende conto solo di alcuni aspetti dell'Acustica delle Sale e dimostra come ancora una volta un'intuizione fortuita sia produttrice di grandi opere. Vale la pena di osservare che ancora oggi i progettisti si affidano spesso a questo criterio considerando l'acustica della sala solo un effetto indotto, cioè un beneficio che viene da solo dalla normale progettazione architettonica. E spesso ci si meraviglia se tali risultati non sempre si ottengono!

Questa mancanza della cultura acustica è in gran parte dovuta, a mio giudizio, anche alla carente preparazione di base dei corsi di laurea in Ingegneria e in Architettura che spesso ignorano o relegano in secondo ordine i corsi di *Acustica* e *Acustica Architettonica*. Non a caso le sale teatrali (ma anche i teatri all'aperto) hanno forme architettoniche molto simili. Il progetto di una nuova sala teatrale ha sempre presentato rischi nascosti che nessun progettista è stato disposto a correre, almeno fino al secolo scorso, e pertanto il progetto dei vari teatri è stato quasi un plagio di teatri esistenti, noti per la buona acustica.

A partire dal secolo scorso, anche in considerazione dello sviluppo e del diffondersi della musica da camera e della musica sinfonica, si sono costruite numerose sale da concerto con la sperimentazione di nuove geometrie e nuove soluzioni architettoniche. Molte delle sale così costruite hanno avuto vita breve in considerazione anche dei modesti risultati ottenuti. Alcune, le migliori, sopravvivono ancora oggi e costituiscono un punto di riferimento per lo studio sistematico e scientifico dell'*Acustica delle Sale*.

Solo in tempi relativamente recenti (sono di *Sabine* di fine secolo scorso ed inizio secolo le prime riflessioni e i primi studi sull'acustica teatrale) si sono avuti i primi criteri progettuali e le prime relazioni analitiche in grado di mettere il progettista nelle condizioni di prevedere un qualche risultato acustico che poi è stato sempre necessario verificare sul campo con incerti risultati.

Con Sabine si è passati dalla progettazione qualitativa all'inizio della progettazione quantitativa utilizzando il parametro che egli stesso ha suggerito: il tempo di riverberazione della sala.

Negli ultimi due decenni si sono sviluppati metodologie di calcolo e di progettazione (programmi di CAD acustico) in grado di fornire ai progettisti tutte le informazioni necessarie alla corretta progettazione e simulazione delle sale acustiche. Recenti sale teatrali (vedi ad esempio l'Opera della Bastiglia a Parigi o, più di recente, il Lingotto a Torino) sono state interamente progettate con CAD acustici e verificate sia con modelli in scala.

I risultati ottenuti sono stati eccellenti, tanto da far fiorire uno sviluppo informatico dedicato all'acustica architettonica.

Lo sviluppo degli studi sull'Acustica delle Sale ha portato alla formulazione di nuovi indici (detti indici oggettivi) di valutazione delle prestazioni acustiche delle sale ai quali si sono affiancati metodi sofisticati e sempre più perfezionati di valutazione soggettiva dell'ascolto nelle sale musicali.

Già da qualche decennio il tempo di riverberazione è apparso limitativo quale unico descrittore dell'acustica di una sala, pur essendo ancora un parametro ancora valido per qualificare l'acustica complessiva delle sale.

Né i parametri qualitativi suggeriti da L. Beranek possono in qualche modo migliorare la situazione da un punto di vista progettuale: pochi sono, infatti, quelli calcolabili a priori su base progettuale mentre molti sono i parametri calcolabili (o verificabili) a posteriori in sale già costruite.

12.1. QUALITÀ ACUSTICHE PROPOSTE DA L. BERANEK

Alcune qualità acustiche suggerite da *L. Beranek* sono definibili mediante giudizi di esperti. Queste qualità sono:

- la vivezza o pienezza dei toni legata al tempo di riverberazione a media frequenza;
- la chiarezza o definizione che definisce la capacità di distinguere suoni che si susseguono nel tempo e che dipende in modo inverso dal tempo di riverberazione;
- l'intimità o presenza che fornisce all'ascoltatore la sensazione delle dimensioni spaziali della sala e che dipende dal ritardo fra l'onda diretta e la prima riflessione;
- il calore che rappresenta la pienezza dei suoni di bassa frequenza (< 250 Hz);
- la brillanza che rappresenta la vivezza di un suono per la presenza di un grande numero di armoniche e si manifesta in un ambiente vivace alle alte frequenze;
- la diffusione che rappresenta la spazialità del suono riverberato;
- il bilanciamento che rappresenta il giusto peso fra le varie sezioni di un'orchestra;
- la fusione che rappresenta la mescolanza dei vari strumenti dell'orchestra;
- l'accordo (o ensemble) che rappresenta la capacità dei musicisti di suonare all'unisono e quindi dipende fortemente dalla capacità di sentirsi l'un l'altro;
- l'attacco o immediatezza di risposta che indica la prontezza di una sala alla risposta di una nota;
- la tessitura che fornisce una sensazione all'ascoltatore del percorso fatto da un'onda sonora e che è legato alle varie riflessioni dell'onda;
- l'ampiezza dinamica che rappresenta la differenza di livello acustico fra i suoni più intensi e più flebili percepiti in una sala;
- la qualità totale che rappresenta la bellezza del tono;
- l'uniformità che fornisce un indice di eguale comportamento della sala e quindi di assenza di zone morte nelle quali il suono non è percepito con sufficiente chiarezza.

Ciascuno di questi indici di qualità è legato ad un giudizio soggettivo e, malgrado gli sforzi fatti dallo stesso *Beranek*, difficilmente correlabili analiticamente alle proprietà geometriche e progettuali di una sala. Queste qualità non sono additive *sic et simpliciter* per cui non possono compensarsi vicendevolmente, come Beranek aveva in qualche modo lasciato intravedere.

Questi studi, iniziati a metà degli anni cinquanta, hanno costituito il primo vero passo in avanti nell'acustica delle sale dai tempi di Sabine.

12.2. LE PROBLEMATICHE DI UNA SALA MUSICALE

Una sala musicale é un sistema molto complesso che deve soddisfare a requisiti di vario tipo fra i quali si ricordano quelli:

Architettonico: si deve fruire di un volume attrezzato con finalità precise di tipo culturale-edenistico e che deve risultare esteticamente gradevole ed indicativo del tipo di costruzione. Da sempre un teatro, qualunque sia la sua destinazione, ha rappresentato uno status symbol per la città o la nazione che lo ha costruito e pertanto si é cercato di offrire un'opera unica che ne rappresentasse lo stile, la grandezza e ne incarnasse l'anima;

Acustico: il volume attrezzato deve garantire un ascolto ottimale del prodotto musicale che si intende ascoltare. Non é cosa facile definire l'ascolto ottimale essendo questo requisito dipendente da un giudizio soggettivo, cioè legato a valutazioni personali dei singoli individui. Proprio la definizione di criteri soggettivi definisce l'insieme di qualità acustiche tendenziali che, al fine della corretta progettazione della sala, occorre perseguire per l'ascolto ottimale;

Funzionale: ad esclusione delle prime due qualità (che pure rientrano nella funzionalità in genere di una sala), si desidera raggiungere specifiche funzionali ben precise dettate dalla tipologia della sala (per concerto, per opere liriche, per musica da camera, per teatri in genere) e quindi tendenti alla fruibilità, capacità, organicità dei servizi, La progettazione di una sala é oggi più che mai una progettazione funzionale e quindi deve essere impostata fin dall'inizio nel modo corretto.

12.3. LE VARIABILI IN GIOCO

Abbiamo due insiemi di variabili da correlare:

Le **variabili fisico-oggettive**: cioè le variabili legate alle dimensioni e all'evoluzione di fenomeni fisici ben precisi che possono essere descritti con relazioni di validità generale (dette relazioni oggettive). Il suono è un fenomeno fisico che può essere descritto con leggi pienamente note. L'ambiente nel quale il suono viene generato e trasmesso si comporta anch'esso in modo (almeno teoricamente) fisicamente noto, nel senso che si può pensare di risolvere matematicamente il problema della trasmissione del suono note le equazioni differenziali che la definiscono e le condizioni al contorno. Vedremo alcuni parametri oggettivi in grado di descrivere le fenomenologia della trasmissione sonora all'interno delle sale;

Le **variabili soggettive**: cioè quell'insieme di giudizi che possono essere dati sulle qualità acustiche di una sala. E' proprio quest'aspetto dell'interazione dell'ambiente costruito con l'uomo (ossia con l'interpretazione soggettiva delle prestazioni acustiche della sala) che rappresenta il cambiamento concettuale più importante di questi ultimi tre decenni.

Si é, pertanto, abbandonato l'idea di costruire una sala avendo di mira solamente le sue funzionalità oggettive e si sta sempre più cercando di correlare nel modo migliore l'insieme oggettivo dei dati e quello soggettivo dei giudizi che esprime il gradimento dell'uomo fruitore della sala.

12.3.1. ECCEZIONALITÀ DI UN EVENTO MUSICALE

Un'esecuzione musicale rappresenta un evento unico nel tempo sia perché gli esecutori possono essere diversi e/o perché l'esecuzione strumentale di ciascun orchestrale é sempre diversa.

La riproduzione di una registrazione musicale non é mai fedele all'originale in quanto l'acustica della sala di ascolto (che condiziona il campo sonoro di ascolto) é diversa da quella della sala originale di produzione (che ha condizionato il campo sonoro di partenza). A tutto ciò si aggiunga la complicazione del giudizio soggettivo che é di per sé unico per ciascun individuo e che qui si vuole generalizzare in una forma prevedibile (e quindi analitica) e valida su grande scala. Occorre, infatti, conciliare lo spazio fisico-oggettivo (cioè le prestazioni della sala) con lo spazio soggettivo (cioè le preferenze dei fruitori): ottimizzare il solo spazio fisico-oggettivo senza tenere conto delle preferenze soggettive equivale a progettare una sala con alta probabilità di insuccesso, come la storia recente della Royal Festival Hall di Londra (1951) e della New York Philharmonic Hall (1962) hanno dimostrato.

Forse è proprio da questi clamorosi insuccessi che ha preso il via la ricerca attuale sull'Acustica delle Sale con i risultati che saranno (almeno parzialmente) esposti nel prosieguo.

Particolarmente interessante sono gli studi che *Y. Ando, M. Barron, J. Bradley, L. Cremer, V.L. Jordan, H.A. Muller, M.R. Schroeder* e numerosi altri hanno effettuato e che hanno dato una svolta che si può considerare storica nello studio dell'*Acustica delle Sale*.

La *psico-acustica* è entrata prepotentemente nella definizione di standard operativi e nell'individuazione dello spazio soggettivo di cui si è detto in precedenza.

12.4. IL COMPORTAMENTO IDEALE DI UNA SALA

E' lecito chiederci quale sia il comportamento ideale di una sala almeno dal punto di vista fisico-oggettivo. La relazione di W.C. Sabine per il tempo di riverberazione è stata dimostrata analiticamente nell'ipotesi di campo diffuso mediante la teoria statistica della riverberazione.

In pratica l'ipotesi fondamentale è che la diffusione del campo sonoro sia completa (ideale) per il che occorrono che ci siano le seguenti condizioni:

- la media temporale della densità di energia in tutti i punti della sala è costante (condizione di omogeneità);
- la direzione di arrivo dei raggi sonori in ciascun punto deve essere egualmente probabile;
- la media temporale del flusso di energia in ciascun punto deve essere costante (queste ultime due definiscono le condizioni di isotropia).

Le due condizioni di omogeneità e di isotropia sono fortemente correlate ed è lecito pensare che una sala avente forte disomogeneità sia soggetta anche a forte anisotropia. L'omogeneità richiede in pratica che la densità acustica sia uniforme in tutti i punti della sala e pertanto (almeno nelle zone non immediatamente vicine alle sorgenti sonore) non debbono esserci zone di addensamento dei raggi acustici o di forte assorbimento degli stessi.

La condizione di isotropia dipende sia dalla forma geometrica della sala che dai materiali utilizzati per i rivestimenti delle pareti. Appare evidente, infatti, che una parete fortemente assorbente condiziona fortemente le condizioni del campo acustico in modo tale da non vedere rispettate le ultime due condizioni.

E pertanto risulta accettabile l'ipotesi che un'uniforme densità acustica richiede anche un comportamento isotropo del locale.

La condizione di isotropia è di essenziale importanza per il buon comportamento acustico di una sala tanto che inizialmente si è considerato un buon indice di qualità l'avere un elevato grado di diffusione.

Una buona progettazione deve tendere al raggiungimento delle due ipotesi di omogeneità e di isotropia mediante l'uso di materiali appropriati e la scelta di geometrie opportune. Considerato che il grado di libertà che queste scelte comportano è elevato si può intuire come una buona progettazione debba essere sempre intesa come un processo di ottimizzazione imperfetto o meglio perfettibile.

12.5. I DESCRITTORI ACUSTICI OGGETTIVI

I moderni criteri progettuali delle sale musicali hanno portato ultimamente alla focalizzazione dell'analisi della risposta acustica oggettiva caratterizzata da una misurabilità e ripetitività strumentale a stimoli acustici preselezionati.

Questa risposta è un legame stretto fra causa ed effetto e rappresenta una sorta di firma distintiva (*signature*) della sala, tale da caratterizzarla pienamente nel comportamento acustico. Da essa possono derivarsi molti parametri energetici, alcuni dei quali saranno presentati nel prosieguo.

M. Schroeder (1965) ha dimostrato, ad esempio, che anche il tempo di riverberazione può essere proficuamente calcolato dalla risposta impulsiva della sala.

La necessità di una descrizione oggettiva si rende necessaria a causa della complessità del legame di causa-effetto sopra indicato.

La sala tende a creare un campo sonoro distinto nelle varie posizioni e che dipende dall'interazione del suono prodotto con la stessa sala.

Fra i descrittori proposti risultano di notevole interesse quelli legati al contenuto energetico dei segnali e in particolare quelli derivati dalla risposta impulsiva della sala.

I descrittori oggettivi (o parametri energetici) che ci interessano sono anche quelli che hanno significato per l'ascolto: in pratica desideriamo qui studiare come la definizione geometrica e le proprietà acustiche di una sala possano modificare il campo sonoro e come questo venga interpretato dall'uomo (giudizio soggettivo).

La ricerca di parametri oggettivi per la caratterizzazione di una sala è stata lunga e complessa anche per effetto di un risveglio notevole della ricerca nel campo dell'acustica delle sale.

Il primo parametro oggettivo per l'acustica delle sale è stato il tempo di riverberazione proposto dall'architetto americano W.C. Sabine agli inizi del secolo a coronamento di studi iniziati alla fine del secolo scorso.

Egli comprese per primo l'importanza del fenomeno della riverberazione acustica dovuto agli effetti delle riflessioni multiple all'interno di una sala. Proprio questo fenomeno differenzia, infatti, l'acustica dei teatri all'aperto da quelli al chiuso. La relazione che Sabine propose è la seguente:

$$RT = \frac{0,161V}{a_i S_i}$$

ove a_i è il fattore di assorbimento (detto fattore di Sabine) della superficie S_i (vedi Tabella 28).

Le ipotesi di validità di questa relazione sono così riassumibili:

- sala di forma regolare e campo diffusivo uniforme;
- volume non tanto grande da esaltare l'assorbimento dell'umidità dell'aria;
- assorbimento medio non superiore a 0,4.

Il valore scientifico e culturale di questa relazione è enorme poiché ha dato inizio all'acustica delle sale in senso moderno ed ha finalmente fornito uno strumento quantitativo di valutazione e di calcolo.

Questo parametro è, nelle ipotesi sopra indicate, riferito a tutta la sala e ne rappresenta una sintesi mirabile del comportamento acustico. Si è già sottolineato come il tempo di riverberazione (fin dall'inizio intuito da Sabine come parametro energetico) sia rimasto per lungo tempo l'unico parametro utilizzato per l'acustica delle sale ed anche l'unico ad essere misurabile con relativa facilità. In realtà una progettazione che tenga conto del solo tempo di riverberazione può produrre specifiche generali per il solo volume della sala; la forma che questa assume è scarsamente rilevante e non è considerata nel calcolo dello stesso tempo di riverberazione, così come è irrilevante la presenza di schermi riflettenti o la disposizione delle superfici assorbenti.

Molti progettisti hanno considerato questo fatto come una specie di carta bianca per potere scegliere liberamente la forma architettonica da assegnare alle sale musicali senz'altro vincolo se non il rispetto del solo tempo di riverberazione e del rispetto delle linee visive. Tutto ciò ha prodotto spesso risultati non sempre accettabili e pur tuttavia pochi progressi sono stati fatti nella direzione della buona progettazione nel corso di numerosi decenni.

La forma della sala è risultata fondamentale al crescere delle dimensioni della sala medesima non potendosi più utilizzare semplici considerazioni di *omotetia* con sale più piccole (al di sotto di 1000 posti). Le implicazioni della formula di Sabine per il tempo di riverberazione sono ben distinte per le sale musicali.

Il tempo ottimo per sale per musica sinfonica, alle medie frequenze, è ritenuto essere compreso fra 1,8 e 2,2 secondi, sebbene in qualche caso può risultare necessario prevedere tempi anche maggiori, specialmente nel progetto di riflessioni dirette. Tempi così lunghi si possono raggiungere con sale di grande volume, soffitti alti più di quanto necessario per gli scopi visivi. Per esempio in una sala senza galleria e con il pavimento tutto ricoperto di orchestrali e pubblico si richiede un'altezza di almeno 13 m. Alla luce delle moderne teorie sull'acustica delle sale il tempo di riverberazione alle varie frequenze dovrebbe variare secondo quanto indicato nella curva di figura seguente.

Materiale	Frequenza (Hz)				
	125,00	250,00	500,00	1000,00	2000,00
Pubblico ed orchestra	0.39	0.57	0.80	0.94	0.92
Poltrona tappezzata, vuota	0.32	0.50	.073	0.87	0.85
Poltrone rivestite in pelle leggera, vuota	0.12	0.20	0.28	.034	.034
Intonaco o legno spesso ¹⁾	0.19	0.14	0.09	0.06	0.06
Intonaco su blocchi di calcestruzzo ¹⁾	0.12	0.09	0.07	0.05	0.05
Calcestruzzo o cemento a faccia vista	0.02	0.02	0.02	0.04	0.05
Pannelli in legno leggero ¹⁾	0.42	0.21	0.10	0.08	0.06
Tendaggi, drappeggi	0.06	0.31	0.44	0.80	0.75

¹⁾ Dati rilevati da Beranek (1969)
²⁾ Vedi § 4.5

Tabella 28: Valori di assorbimento di alcuni materiali

Ad alte frequenze vi è un inevitabile decremento dovuto all'aumentare del fattore di assorbimento dei materiali: è bene però cercare di installare il minimo dei materiali assorbenti onde ottenere più brillanza della sala. Un incremento del tempo di riverberazione alle basse frequenze contribuisce ad accrescere il senso di calore: si raccomanda a 125 Hz un valore più elevato del 50% rispetto a quello delle frequenze intermedie.

Spesso è sensibilità del progettista ed una sua scelta preferenziale avere tempi di riverberazione alle basse frequenze diversi da quelli indicati sopra. Poiché l'assorbimento dei materiali diminuisce con la frequenza, l'incremento del tempo di riverberazione è automatico nelle sale massivamente arredate.

Le difficoltà di una buona progettazione acustica crescono sensibilmente al crescere del numero di posti: si consiglia un numero massimo di 3000 posti come valore assoluto. Oltre tale limite i problemi progettuali divengono veramente ardui da superare. In realtà non è tanto importante il numero di spettatori quanto l'area occupata da essi poiché è questa che determina in modo preponderante l'assorbimento totale che influenza il tempo di riverberazione e il livello sonoro totale.

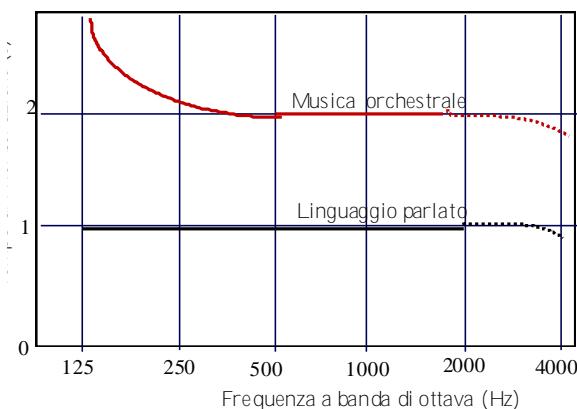


Figura 111: Tempi di riverberazione ottimali per vari usi della sala

12.6. DISTRIBUZIONE DEL LIVELLO SONORO

Il livello totale (*loudness*) è un fattore importante ai fini di una buona acustica nelle sale (M. Barron, 1973) anche se per molti anni esso non è stato ritenuto di grande peso. Per il linguaggio parlato il livello sonoro deve essere sufficientemente elevato rispetto al rumore di fondo. Nel caso di sale musicali molti ascoltatori sembrano reagire in modo entusiastico ad un suono più intenso.

Il senso soggettivo di *loudness* è determinato dal livello sonoro oggettivo, misurato in decibel. La teoria tradizionale della riverberazione produce anche una relazione per calcolare la distribuzione del livello totale sonoro. Naturalmente la distribuzione del livello sonoro dipende da quello di emissione ma anche dalle caratteristiche acustiche della sala. Sia la distanza dalla sorgente che l'assorbimento totale influenzano il livello totale. Quest'ultimo è somma di due componenti: il livello dovuto al suono diretto e quello dovuto al suono riflesso.

Il suono diretto decade di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza mentre il suono riflesso si può considerare grosso modo costante nello spazio. La componente riflessa è funzione dell'assorbimento totale: un sala musicale con una grande platea ha un livello sonoro più basso. La distanza per la quale le componenti diretta e riflessa sono eguali è detta raggio di riverberazione ed è circa 5 m per una sala musicale normale. Ciò significa, considerate le normali dimensioni dei teatri, che la maggior parte degli ascoltatori riceve energia sonora più attraverso le riflessioni laterali che dal suono diretto.

Quanto detto presuppone una certa uniformità nella distribuzione sonora. Spesso alcune anomalie geometriche causano un allontanamento da questa ipotesi. Ad esempio sotto la galleria si ha un livello sonoro inferiore che non nella sala. Ciò porta a considerare solo approssimativa l'ipotesi di componente riflessa costante. Misure recenti (Barron e Lee, 1982) hanno mostrato una diminuzione del livello della componente riflessa con la distanza con un difetto di 3 dB nella parete di fondo rispetto alla teoria classica. Questa differenza è senza dubbio significativa se si pensa che un raddoppio delle dimensioni dell'orchestra produce un incremento del livello sonoro di 3 dB. Gli ascoltatori compensano psicologicamente questa diminuzione del livello se hanno l'impressione di un campo sonoro intenso e la presenza di riflessioni vicine contribuisce a formare questa convinzione (Barron, 1983).

12.6.1. LE PROBLEMATICHE DEI DESCRITTORI OGGETTIVI

Uno dei maggiori problemi incontrati con i descrittori oggettivi è che essi non sono immediatamente fruibili come lo è stato il tempo di riverberazione: esso, infatti, è sufficientemente generalizzato per tutta la sala e poco dipendente (nell'ipotesi di campo sonoro diffuso) dalla posizione di ascolto. Il tempo di riverberazione è certamente un parametro distintivo e caratteristico di una sala, facilmente misurabile o calcolabile anche in fase progettuale e ciò giustifica il successo avuto fin dalla sua proposizione da parte di W.C. Sabine.

Le nuove misure oggettive sono quasi sempre fortemente dipendenti dalla posizione di ascolto o della sorgente sonora e l'utilizzo di un valore medio è spesso di poca utilità. Inoltre mentre il tempo di riverberazione è facilmente misurabile con apparecchiature commerciali standard (fonometro e registratore di livello) e i risultati sono di immediata interpretazione, ciò non si può dire dei nuovi descrittori oggettivi che richiedono apparecchiature speciali e costose e necessitano di un'analisi interpretativa quasi sempre non semplice e rapida.

E ancora i nuovi descrittori oggettivi non sono spesso calcolabili a priori dai dati architettonici, come invece può farsi con il tempo di riverberazione. Tutto ciò ha limitato la loro diffusione a pochi specialisti in grado di avere le apparecchiature sofisticate necessarie e i programmi di calcolo per la loro valutazione. Tuttavia il grande vantaggio dei descrittori oggettivi è di potere fornire indicazioni analitiche (e non solo lessicali o qualitative, come fatto da Beranek) di qualità acustiche delle sale e dell'ascolto che altrimenti non potrebbero essere date. Il numero dei descrittori suggeriti negli ultimi tempi è andato sempre crescendo: in questa sede si considerano alcuni fra quelli più accettati o consolidati e utilizzati nella pratica.

Il tempo di riverberazione di W.C. Sabine, pur se definito e richiamato in numerose occasioni, lo si ritiene un concetto già noto.

12.7. NUOVO APPROCCIO ALL'ACUSTICA DELLE SALE

La sala può essere rappresentata come in Figura 112. Essa riporta un sistema fisico che sollecitato a determinati ingressi (segnali acustici) fornisce risposte (uscite) determinate dal proprio comportamento fisico-acustico. La conoscenza del legame fra ingresso ed uscita dei segnali consente di prevedere il comportamento acustico della sala.

Nella Figura 112 è rappresentato lo schema equivalente di un sistema acustico avente in ingresso un segnale di eccitazione di tipo impulsivo e in uscita la risposta della sala a tale segnale detta risposta impulsiva. Purtroppo il segnale teorico impulsivo non può essere generato nella pratica: non si dispone, infatti, di un segnale reale di durata così bassa e con contenuto energetico tale da eccitare sufficientemente la sala. Si ricorre spesso a segnali pseudo-impulsivi costituiti da emissioni sonore di breve durata (ma non istantanea) e di forte intensità, per quanto possibile.

Si usano, ad esempio, spari con pistole caricate a salve o scariche elettriche amplificate mediante altoparlanti omnidirezionali. Va però sottolineato che nessuno di questi segnali può effettivamente considerarsi impulsivo e che pertanto la risposta della sala non è la risposta impulsiva vera e propria.

Oggi si utilizzano metodi di eccitazione della sala che fanno uso di sequenze di segnali di piccola intensità (sequenze di Galois o le sequenze di massima lunghezza).



Figura 112: Schematizzazione del nuovo approccio all'Acustica delle Sale

L'andamento in scala lineare del segnale di risposta della sala all'impulso è del tipo riportato in figura. In esso sono già visibili le tracce dell'onda diretta e delle varie riflessioni pervenute al microfono posto nella posizione di ascolto. Utilizzando la scala dei tempi è anche possibile determinare il ritardo fra l'onda diretta e le varie onde riflesse.

Una sala per teatro o per auditorium può essere vista come un sistema complesso e quindi trattato con i metodi classici della Teoria dei Sistemi. In quest'ottica si può immaginare la sala come una scatola nera (black box) che riceve in ingresso uno stimolo acustico (segnale di ingresso) e fornisce in uscita il campo sonoro di ascolto all'interno della sala.

L'interazione del segnale di ingresso con la sala risulta molto complesso da prevedere anche perché l'interazione delle onde acustiche con i materiali di rivestimento e con gli oggetti presenti nella sala dipende dalla loro lunghezza d'onda.

Si dimostra, però, che se si conosce di un sistema qualsivoglia la risposta ad un segnale impulsivo (un segnale che in pratica si realizza con una forte intensità ma in un brevissimo intervallo di tempo) allora (teorema di Duhamel) si può avere la risposta a qualunque segnale mediante un integrale di convoluzione del segnale dato con la risposta all'impulso. Su questo teorema si basa lo studio della risposta impulsiva $h(t)$ delle sale.

In pratica nota la risposta $h(t)$ in un punto della sala si può sapere a priori quale sarà la risposta se al posto della sorgente impulsiva si mette un segnale puro (registrato in camera anecoica in modo da non avere effetti riflessivi esterni). Con i moderni sistemi di simulazione si può, ad esempio, direttamente sentire in cuffia quale sarà il suono reale che un ascoltatore seduto nel punto considerato potrà sentire.

La risposta impulsiva può essere rappresentata anche in scala logaritmica, come nella figura sottostante. In essa sono ben visibili gli istanti di arrivo delle onde dirette e riflesse nonché il decadimento temporale del segnale.

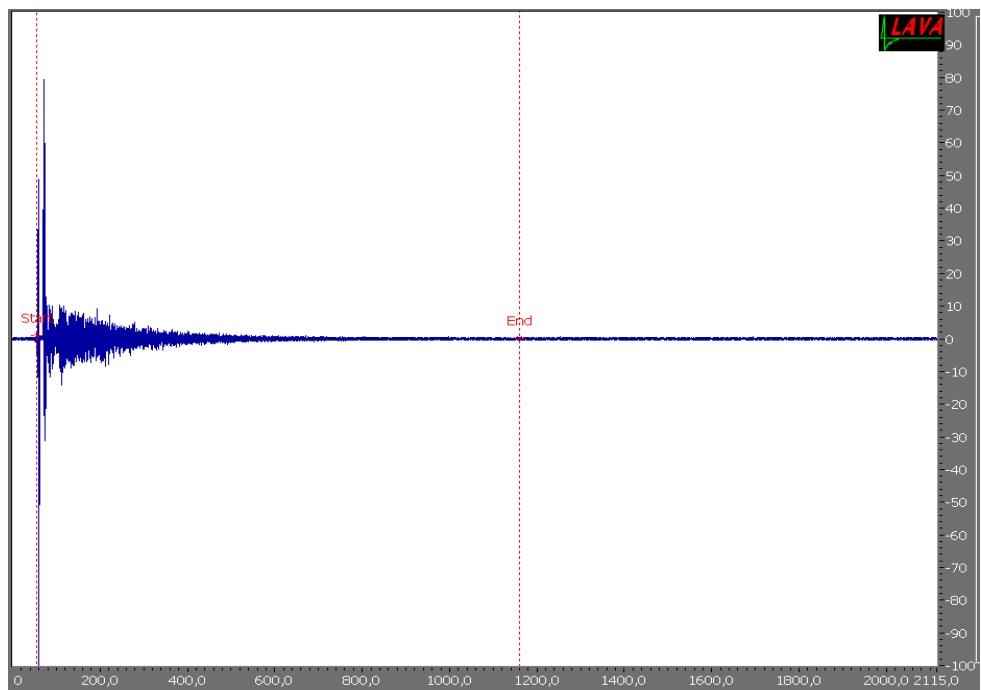


Figura 113: Risposta impulsiva di una sala

Questa risposta è un legame stretto fra causa ed effetto e rappresenta una sorta di firma distintiva (*signature*) della sala, tale da caratterizzarla pienamente nel comportamento acustico. Da essa possono derivarsi molti parametri energetici, alcuni dei quali saranno presentati nel prosieguo.

M. Schroeder (1965) ha dimostrato, ad esempio, che anche il tempo di riverberazione può essere proficuamente calcolato dalla risposta impulsiva della sala.

La necessità di una descrizione oggettiva si rende necessaria a causa della complessità del legame di causa-effetto sopra indicato. La sala tende a creare un campo sonoro distinto nelle varie posizioni e che dipende dall'interazione del suono prodotto con la stessa sala

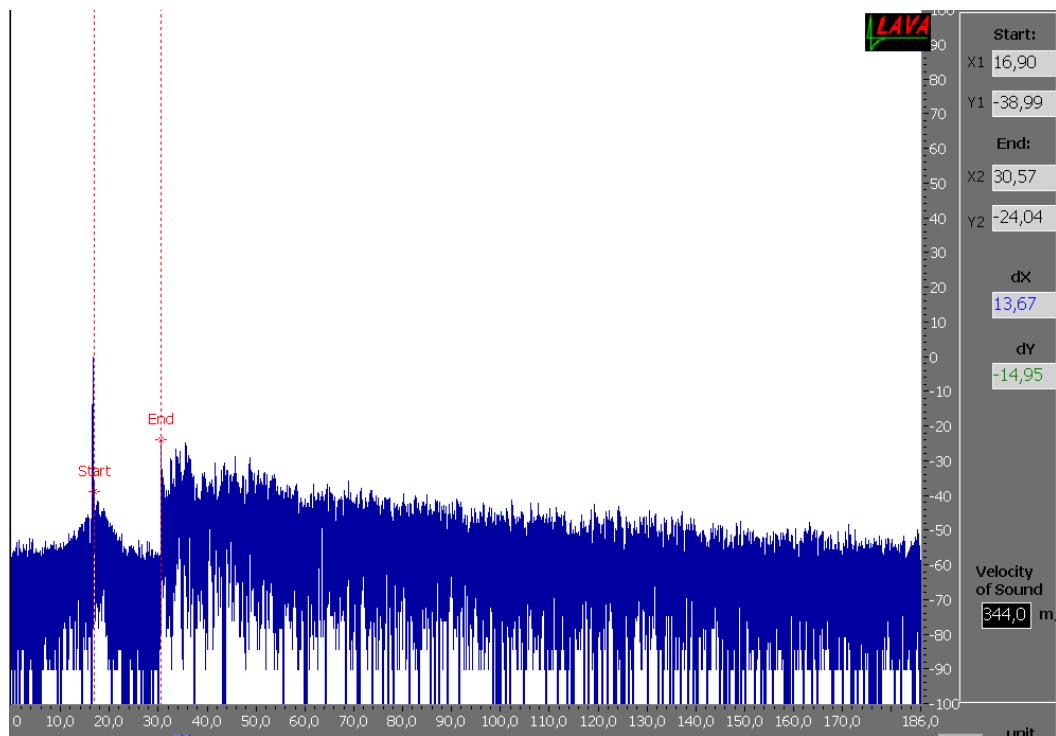


Figura 114: Risposta impulsiva logaritmica

12.7.1. INFORMAZIONI OTTENIBILI DALLA RISPOSTA IMPULSIVA

Nella Figura 115 sono rappresentati due ecogrammi (meglio detti anche reflectogrammi) di una stessa sala musicale ma in due siti diversi: in a) si ha l'ecogramma rilevato della risposta impulsiva in un posto vicino alla sorgente e in b) si ha l'ecogramma in un posto lontano dalla sorgente.

Nei posti vicini alla sorgente il suono diretto è dominante rispetto alle riflessioni laterali che sono ben distinte e nette. Nei posti lontani le riflessioni immediate sono addensate e intense quasi quanto il suono diretto. Molti dei descrittori oggettivi possono essere derivati dalla risposta impulsiva della sala. Ogni descrittore energetico si basa sul calcolo di frazioni di energia di decadimento che si possono calcolare dalla risposta quadratica della pressione mediante semplice integrazione. In pratica basta calcolare l'area sottostante i picchi nell'ecogramma.

In figura è illustrato un tipico esempio di calcolo dell'RT (o anche T60) e l'EDT (detto anche T10) noto l'ecogramma: assegnata la curva integrale con tempo inverso basta calcolare la pendenza della curva da 0 a -60 dB.

Con questo metodo si ottiene il vantaggio di una curva integrale che non contiene fluttuazioni casuali come avviene nei normali diagrammi di decadimento del livello sonoro.

Pertanto il metodo di calcolo (detto di *Schroeder*) risulta oggi molto utilizzato per la sua maggiore affidabilità e relativa facilità con strumenti adeguatamente predisposti.

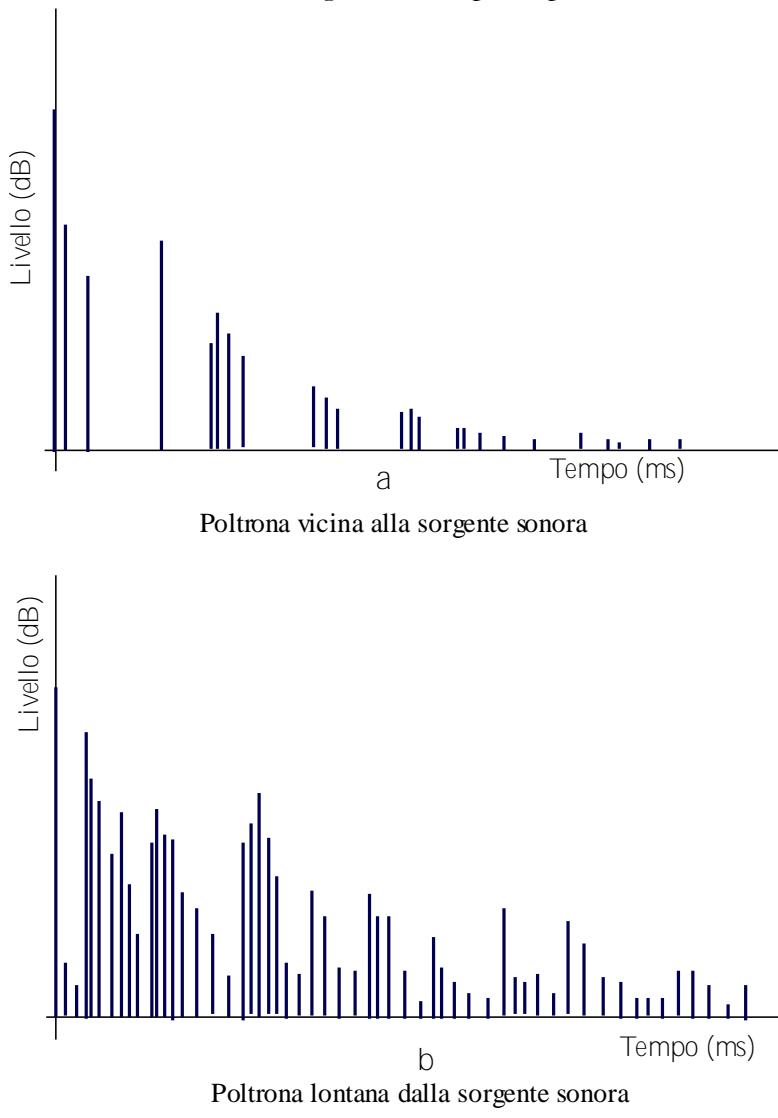


Figura 115: Schematizzazione della risposta impulsiva. Il refletogramma

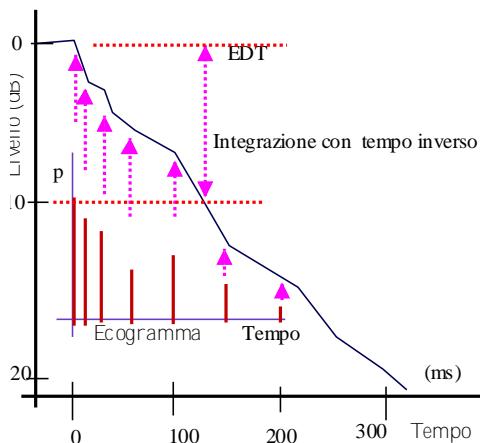


Figura 116: Calcolo dei descrittori oggettivi dalla risposta impulsiva: Integrale inverso di Schroeder

12.8. I DESCRIPTORI ACUSTICI PRINCIPALI

Nella seguente tabella sono riassunti i descrittori acustici principali

Descrittori Acustici Oggettivi	Symboli, unità	Definizione o espressione matematica	Proposto da	Attributi soggettivi in letteratura
Tempo di Riverberazione	RT60 (s)	Slope of best fit straight line to sound level decay curve from -5 to -25 dB or -30 or -35 dB, extrapolated to -60 dB	Sabine 1923	Reverberance - Liveness
Early Decay Time	EDT (s)	Slope of best fit straight line to sound level decay curve from 0 to -10 dB, extrapolated to -60 dB	Jordan 1975	Reverberance or Liveness
Chiarezza	C-80 (dB)	$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$	Reichardt 1975	Music clarity and blend
Definizione	D-50 (%)	$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}$	Thiele 1953	Speech intelligibility & Sound Definition
Rapporto Segnale/Rumore	S/N (dB)	$S/N = 10 \log \frac{\int_0^{95ms} (t)p^2(t) dt}{\int_0^{95ms} p^2(t) dt}$	Lochner & Burger 1964	Speech Intelligibility
Rapid Speech Transmission Index	RASTI (ratio)	RASTI = [(S/N)media+15]/30	Steeneken & Houtgast 1980	Speech Intelligibility

Tabella 29: Definizione dei descrittori acustici oggettivi utilizzati nelle comparazioni

12.9. EARLY DECAY TIME (EDT)

E' la misura della rapidità di caduta dei primi 10 dB del segnale acustico e viene espresso in secondi come il tempo di riverberazione. Per una sala musicale altamente diffondente, dove il decadimento del livello sonoro è lineare, EDT e RT (acronimo di *reverberation time*) sono solitamente eguali. Qualora la sala ha irregolarità diffuse (volumi accoppiati, accumuli energetici, riflessioni ritardate,...) allora EDT e RT hanno spesso valori che possono essere molto diversi.

L'*Early Decay Time*, proposto da V.L. Jordan, è secondo Schroeder e Sessler (1965) meglio correlato al giudizio soggettivo di ascolto del più tradizionale RT perché l'EDT prende meglio in considerazione l'influenza delle prime riflessioni che sono più vicine alla risposta soggettiva di spazialità degli spettatori. In realtà numerose indagini recenti (T. Nishi, V.L. Jordan, S. Wu) hanno dimostrato

un'elevata correlazione mutua fra EDT e RT tanto da ritenere indifferente la scelta dell'uno o dell'altro nella correlazione con i criteri soggettivi.

Si è anche osservato che l'EDT varia molto più di quanto non faccia RT in funzione del posto occupato nella sala musicale e pertanto è necessario esprimere il valore medio su più punti di misura.

L'EDT sembra meglio correlare i passaggi musicali rapidi e articolati allorquando si percepisce solamente la parte iniziale del decadimento dei picchi della pressione sonora più intensi mentre la rimanente parte è mascherata da eventi successivi, solitamente arrivi di onde riflesse ritardate.

Il campo di valori ottimali suggerito in letteratura per musica sinfonica per questi due criteri, EDT ed RT, è (vedi V.L. Jordan):

$$1,8 < EDT < 2,8 \text{ s}$$

$$1,4 < RT < 2,8 \text{ s}$$

Di solito entrambi gli indici EDT e RT sono misurati a varie frequenze (analisi per ottave o per terzi di ottave). In passato si consigliava un aumento del tempo di riverberazione alle basse frequenze ed una modesta riduzione alle alte. Oggi, però, si tende a preferire un andamento pressoché costante

12.10. CHIAREZZA O(C80) EARLY-TO-LATE SOUND INDEX

Questo indice, proposto da Reichardt, correla il bilancio fra chiarezza percepita e il tempo di riverberazione ed è molto indicativo per l'ascolto della musica con passaggi delicati.

La sua definizione matematica è la seguente:

$$C80 = 10 \log \frac{\int_{0}^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}) [102]$$

ove il termine $p^2(t)$ è proporzionale all'energia istantanea e quindi la precedente relazione rappresenta, in decibel, il rapporto fra l'energia ricevuta nei primi 80 ms (*early energy*) e l'energia ricevuta negli istanti successivi (*late energy*). Si parlerà diffusamente nel prosieguo delle differenze fra queste forme energetiche e della loro importanza nella qualità dell'ascolto.

L'energia nei primi 80 ms comprende quella diretta e quella di riflessione immediata (*early reflections*) e quindi C80 fornisce un indice direttamente correlato alla comprensione del linguaggio parlato o alla comprensione dei passaggi musicali delicati, laddove è necessario percepire legami rapidi e meno intensi rispetto a note lunghe e più intense.

I valori ottimali suggeriti in letteratura sono definiti dal seguente intervallo:

$$-2 < C80 < 2 \text{ dB}$$

Questa relazione ci dice che esiste un campo ottimale dell'indice di chiarezza; in pratica una chiarezza eccessiva o insufficiente sono indesiderate nell'ascolto musicale perché viene meno il legame fra le note e quindi l'armonia complessiva oppure si perde di definizione e quindi di riconoscibilità del suono. Alcuni valori misurati di C80 sono i seguenti:

Sala Musicale	Valore minore	Valore medio	Valore maggiore
Gross Musikhvereinsalle (Wien)	-5.30	-2.90	-0.30
Salle Pleyel (Paris)	-3.37	-0.70	4.37
Auditorium M. Ravel (Lyon)	-3.07	-0.13	2.88

Tabella 30: Alcuni valori di C80 di sale musicali reali

In generale valori centrati intorno 0 dB sono preferibili per la musica sinfonica. I limiti di variazione consigliati per la musica sono:

$$-2 < C80 < 2 \text{ dB}$$

Per i teatri lirici (vedi capitoli seguenti) si consigliano valori compresi nell'intervallo:

$$1 < C80 < 4 \quad dB$$

Si osservi che C80 è negativo allorquando l'energia dopo gli 80 ms supera l'energia compresa nei primi 80 ms. Esso è positivo nel caso opposto.

12.11. INDICE DI DEFINIZIONE (D), INVILUPPO O EFFICIENZA LATERALE, LE

Questo indice è alquanto simile alla chiarezza ed è stato introdotto da Thiele con la seguente definizione:

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)dt}{\int_0^{80ms} p^2(t)dt} \quad [103]$$

Esso è il rapporto fra l'energia totale nei primi 50 ms e l'energia totale ricevuta.

Diversamente da C80 viene imposto un intervallo di tempo ancora più ristretto per considerare solamente l'effetto delle riflessioni laterali immediate (*early reflections*).

Il limite di tempo di 50 ms appare più indicato per il linguaggio parlato mentre un limite di 80 ms è indicato maggiormente per un linguaggio

L'Efficienza Laterale, proposta da Marshall (1981), si riferisce all'impressione di spazialità ed è definito dalla relazione:

$$LE = \frac{\frac{\int_{25ms}^{80ms} p_{mic.8}^2(t) \cos^2 q dt}{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t)dt}}{\frac{\int_{25ms}^{80ms} h_{mic.8}^2(t) \cos^2 q dt}{\int_{0ms}^{80ms} h^2(t)dt}} \quad [104]$$

La frazione di energia a numeratore è misurata con un microfono a figura di otto (da cui il pedice mic.8 indicato nelle relazione precedente) posto perpendicolare alla direzione del suono diretto. LE può essere calcolata anche dalla risposta impulsiva della sala e la precedente definizione può essere riscritta nella forma:

$$LE = \frac{\frac{\int_{25ms}^{80ms} h_{mic.8}^2(t) \cos^2 q dt}{\int_{0ms}^{80ms} h^2(t)dt}}{\frac{\int_{25ms}^{80ms} h^2(t)dt}{\int_{0ms}^{80ms} h^2(t)dt}} \quad [105]$$

con $h(t)$ risposta impulsiva della sala. L'angolo q è relativo alla direzione del suono incidente con la direzione di massima intensità (cioè verso le pareti laterali).

Un metodo di calcolare LE per sale uniformemente diffondenti è stato proposto da V.L. Jordan che suggerisce che debba essere

$$LE > 0.20 \div 3$$

Ricerche recenti hanno dimostrato che l'effetto spaziale è anche influenzato dal livello sonoro della musica: i livelli più elevati rafforzano la sensazione di spazialità che non i livelli più bassi (vedi Y. Ando, op. citata).

13. LE PROBLEMATICHE DELL'ILLUMINOTECNICA

Il comfort visivo è oggi preso in seria considerazione per i molteplici aspetti che presenta nella vita quotidiana. Con l'acuirsi di una maggiore sensibilità verso il risparmio energetico si sono sviluppati nuovi criteri di progettazione e di verifica dell'illuminazione (artificiale e diurna) sia per ridurre i consumi che per il raggiungimento di condizioni ottimali di comfort visivo.

In questi ultimi mesi si assiste, inoltre, ad un fiorire di regolamenti comunali che regolano il progetto delle finestre al fine di ottenere una corretta illuminazione naturale. In campo industriale si hanno corpi illuminanti più efficienti e flessibili rispetto a quelli disponibili una decina di anni fa. Contemporaneamente si assiste ad uno sviluppo anche di CAD illuminotecnici per la progettazione e verifica luminosa non solamente di impianti tradizionali di illuminazione artificiale ma anche per l'illuminazione di monumenti (illuminazione artistica), di sale museali, ...

13.1. DEFINIZIONI PRINCIPALI

Per una migliore comprensione di quanto indicato nel presente testo si adottano le definizioni contenute nella pubblicazione CIE¹⁷ 17 e seguenti. Molte di queste definizioni saranno studiate con maggiore attenzione nei prossimi capitoli.

13.1.1. L'OCCHIO E LA VISIONE

Adattamento: processo mediante il quale le caratteristiche ottiche del sistema visivo sono modificate in relazione alla luminanza del campo visivo o alla distribuzione spettrale dello stimolo luminoso.

L'adattamento è assicurato da tre tipi di meccanismi:

Modificazione del diametro pupillare: miosi (restringimento pupillare) e midriasi (dilatazione pupillare);

Adattamento retinico: la retina reagisce a livello biochimico all'aumento ed alla diminuzione dell'intensità luminosa mediante generazione ed esaurimento (sbiancamento) della rodopsina;

Meccanismo nervoso; quando l'occhio passa dal buio alla luce i mutamenti biochimici (50 s circa) sono sovrapposti dai più veloci adattamenti nervosi, così che l'adattamento alla luce è soprattutto un fenomeno nervoso.

Accomodazione o accomodamento: modifica del potere diottrico del cristallino al fine di mettere a fuoco sulla retina l'immagine di un oggetto situato ad una data distanza dall'occhio.

Acuità visiva:

a) qualitativamente: capacità di percepire nitidamente oggetti o dettagli di oggetti, molto vicini tra di loro;

b) quantitativamente: reciproco del valore (generalmente espresso in minuti di grado) della separazione angolare di due oggetti vicini (punti e linee) che l'occhio può appena vedere separati.

Contrasto:

a) in senso soggettivo: valutazione della differenza dell'aspetto di due zone del campo visivo viste simultaneamente o successivamente;

b) in senso oggettivo: valore della grandezza definita per stabilire una correlazione con la valutazione soggettiva del contrasto, generalmente espressa mediante formule basate sulla

luminanza¹⁸ dominante dello sfondo (L_1) e dell'oggetto (L_2) visti simultaneamente: $\frac{L_2}{L_1}$.

¹⁷ Commissione Internationale pour l'Eclairage, è l'Ente che sovrintende all'emissione di standard nel campo dell'Illuminotecnica.

¹⁸ La luminanza sarà definita nel prosieguo insieme alle altre grandezze illuminotecniche.

quando i valori di luminanza delle zone considerate sono diversi ma di ordine comparabile, si può definire un valore medio espresso dalla seguente relazione: $\frac{L_2 + L_1}{0,5(L_2 + L_1)}$

Brillanza: attributo della sensazione visiva secondo il quale un'area appare emettere, trasmettere e riflettere radiazione visibile. E' il corrispondente soggettivo della luminanza.

Abbagliamento: condizione che genera fastidio e riduce la capacità di distinguere gli oggetti in conseguenza di una distribuzione o di un livello inadeguati della luminanza oppure di contrasti eccessivi nel campo visivo.

Abbagliamento da luce riflessa: abbagliamento (3.1.6) prodotto dalla riflessione di oggetti luminosi, soprattutto se l'immagine appare nella direzione dell'oggetto osservato o vicino ad essa.

Campo visivo: superficie o estensione di uno spazio fisico che l'occhio vede fisso in una direzione assegnata.

Compito visivo: oggetto della visione.

Intorno del compito visivo: insieme dello spazio che può essere visto da una posizione precisata quando si muovono la testa e gli occhi. *Nota: in fisiologia si usa il termine "mira".*

Postura: posizione abitualmente assunta dal corpo del lavoratore durante l'esecuzione della singola operazione (per esempio: eretta, seduta, etc.)

Interni e sistemi di lavoro

Sistema di lavoro: combinazione di persone ed attrezzature che interagiscono nel processo di lavoro, per effettuare il compito di lavoro, nello spazio di lavoro, all'interno dell'ambiente di lavoro, sotto le condizioni imposte dal compito di lavoro.

Spazio di lavoro: spazio dedicato a una o più persone nel sistema di lavoro (3.2.1) per completare il compito di lavoro.

Piano di lavoro: piano sul quale è svolto il compito visivo.

Piano di lavoro di riferimento: piano orizzontale sul quale è calcolato l'illuminamento medio nella fase di progetto¹⁹.

Illuminazione generale: illuminazione progettata per illuminare una intera area approssimativamente in modo uniforme.

Illuminazione localizzata: illuminazione progettata per un interno al fine di ottenere anche una maggiore illuminazione sopra una o più parti dei locali.

Illuminazione locale: illuminazione per uno specifico compito visivo (3.1.9) complementare e controllabile separatamente dalla illuminazione generale.

Luce: agente fisico che stimolando l'occhio permette di vedere le cose che ci circondano. Può essere inteso, relazionando le due teorie corpuscolare ed ondulatoria, come un flusso di particelle, i *foton*i, i cui fenomeni possono essere spiegati dall'elettrodinamica quantistica (*QED: Quantum Electrodynamics*). Il Fotone è il quanto elementare di energia della luce; si misura in Joule ed è dato dalla relazione:

$$E = hf \quad (106)$$

ove *h* è la costante di *Planck* (J/s) ed *f* la frequenza (s).

Diottria: misura ottica definita come il reciproco della distanza focale (espressa in metri) di un sistema ottico.

Nel prosieguo si introdurranno i concetti fondamentali di Illuminotecnica Fisica e poi si vedranno alcuni cenni storici sulla teoria della luce anche per comprendere la complessità del fenomeno. Successivamente si vedranno le condizioni di comfort visivo alla luce delle più recenti teorie e ricerche.

¹⁹ Se non altrimenti indicato, il piano di lavoro di riferimento è assunto ad una altezza di 0,85 m sopra il suolo; per le scrivanie, per esempio, l'altezza secondo le UNI 7368 e UNI 9095 è di 0,72 m.

14. ILLUMINOTECNICA: PRINCIPALI UNITÀ DI MISURA

Le leggi fondamentali e le unità di misura dell'Illuminotecnica sono qui riassunte. Prima di procedere avanti occorre subito osservare che le grandezze illuminotecniche differiscono da quelle energetiche, viste per l'irraggiamento, solo per il fatto che si riferiscono all'Uomo e quindi tengono conto della risposta soggettiva dell'occhio umano medio.

14.1. GRANDEZZE SOGGETTIVE E GRANDEZZE OGGETTIVE

La grandezza che definisce questo passaggio, da energetica a soggettiva o illuminotecnica, è il **flusso luminoso** per la cui definizione occorre anticipare due concetti che saranno ripresi e discussi ampiamente nel prossimo capitolo.

Innanzitutto l'**occhio umano medio** è sensibilizzato (volgarmente diciamo che *vediamo*) da radiazioni elettromagnetiche con lunghezze d'onda fra 380 e 780 nm. Poi la visibilità (fenomeno soggettivo connesso alla visione, di cui di parlerà nel prosieguo) non è uniforme per tutte le lunghezze d'onda ma varia secondo la curva di Figura 117 (anch'essa ripresa nel prosieguo). Il massimo di visibilità è associato ad un valore pari a 680 lumen/Watt e rappresenta anche il valore di passaggio fra le grandezze illuminotecniche (soggettive) e quelle energetiche (oggettive).

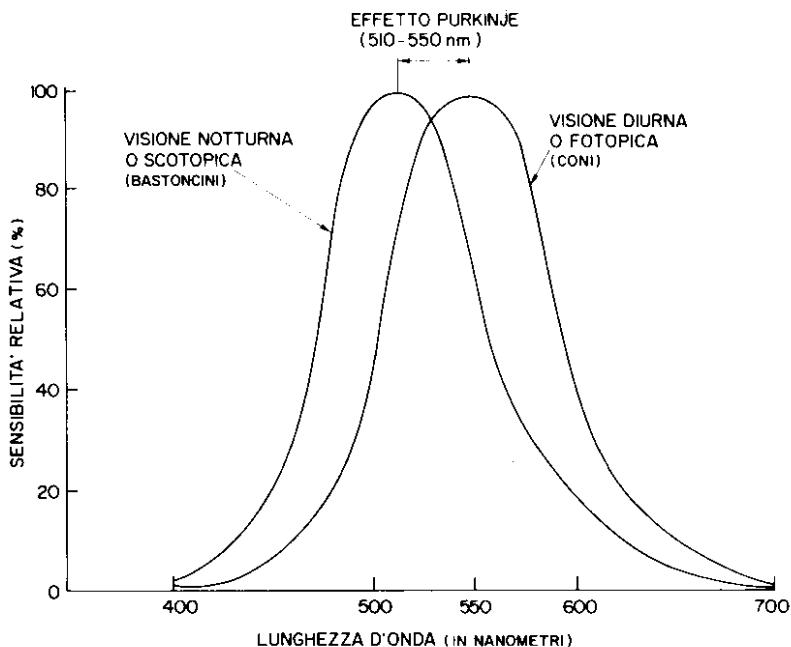


Figura 117: Curve di visibilità relativa fotopica e scotopica

La lunghezza d'onda di massima visibilità è di 555 nm corrispondente alla luce gialla verdastra. Si osservi che la curva agli estremi si annulla: in effetti a 380 nm si ha luce viola (a sinistra della quale si hanno i raggi ultra violetti, non visibili) e a 780 nm si ha il rosso (a destra del quale si hanno i raggi infrarossi, non visibili). Non si confonda la visibilità con l'attenzione che il colore rosso genera nell'Uomo medio. In effetti illuminare un ambiente con luce rossa (vedi, ad esempio, gli studi di riproduzione fotografica) non porta ad avere un buon confort visivo, anzi si ha un grande sforzo di adattamento. La **curva di visibilità relativa** va considerata come rapporto fra effetti prodotti da radiazioni di data lunghezza d'onda rispetto a quella di massima emissione.

In Figura 117 si hanno due curve: una relativa alla **visione fotopica** nella quale l'occhio può pienamente percepire i colori (vedi nel prossimo capitolo) ed una relativa alla **visione scotopica** nella quale si possono percepire sono i grigi.

Quest'ultimo caso è relativo a scarse illuminazioni (o meglio a bassi valori di luminanza) e non trovano applicazioni nell'impiantistica a luce artificiale dove, al contrario, si persegue la condizione di massimo comfort visivo in visione fotopica.

14.1.1. FLUSSO LUMINOSO

In base a quanto detto se $w(\lambda)$ è la distribuzione di flusso di una sorgente radiativa, chiameremo **flusso luminoso** l'integrale:

$$\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} K(\lambda) w(\lambda) d\lambda, \quad \text{Lumen} \quad (107)$$

ove $K(\lambda)$ è il **fattore di visibilità assoluto** e $w(\lambda)$ la **radianza** mono energetica della sorgente.

L'integrale è esteso fra 380 e 780 nm che corrisponde all'intervallo di visibilità dell'occhio umano medio. Si osservi che la precedente relazione è il legame fra la grandezza fisica (oggettiva) $w(\lambda)$ e la visione dell'Uomo. Normalizzando il fattore di visibilità assoluta si può anche scrivere:

$$683 \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} k(\lambda) w(\lambda) d\lambda, \quad \text{Lumen} \quad (108)$$

con 683 lumen/Watt valore massimo di $K(\lambda)$.

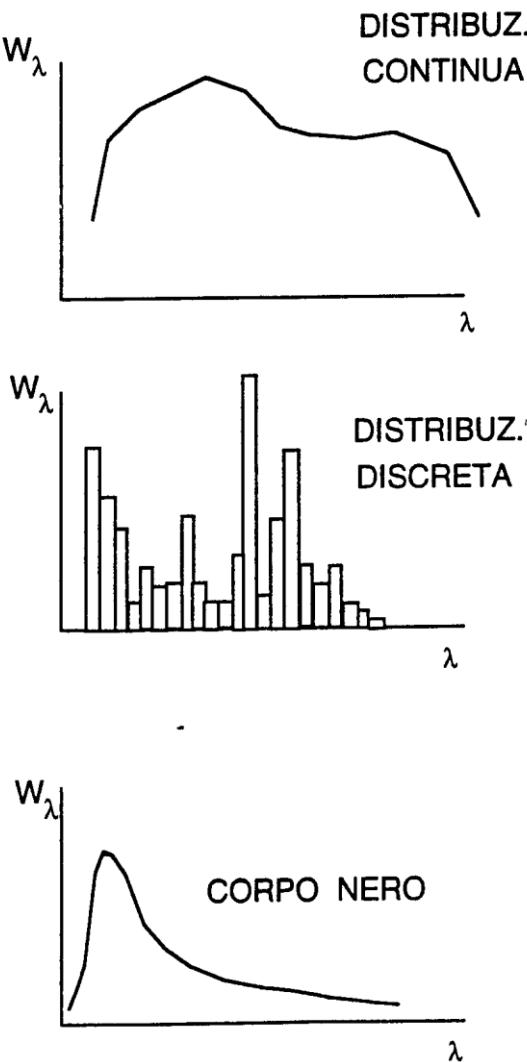


Figura 118: Tipi di sorgenti luminose

Il tipo di distribuzione spettrale dipende dalla sorgente luminosa. In Figura 118 sono rappresentate le tre tipologie ricorrenti:

- 1° Distribuzione continua: tipica delle sorgenti che emettono radiazioni luminose per effetto termico (ad esempio, filamenti delle lampade ad incandescenza);
- 2° Distribuzione discreta a righe: tipica dell'emissione nelle lampade a scarica nei gas (a luminescenza, ad Hg, Na, Ar,...). Le righe sono corrispondenti ai salti quantici dei livelli elettronici dello elemento utilizzato in questo tipo di lampade);
- 3° Distribuzione normale del corpo nero: si tratta di una distribuzione ideale relativa ad un corpo ideale (il corpo nero). Nella realtà anche i corpi grigi emettono una distribuzione continua omotetica a quella del corpo nero secondo l'emissività . In figura si ha un esempio dei tre tipi di sorgenti luminose: a distribuzione continua (come si ha nelle lampade ad incandescenza), a distribuzione discreta (vedi, ad esempio, nelle lampade a fluorescenza) e ideale (corpo nero secondo la legge di Planck).

Per calcolare il *flusso luminoso* occorre risolvere l'integrale (107), vedi Figura 119, e ciò può essere fatto con metodi numerici (ad esempio con il metodo di *Simpson*). Si osservi che l'azione di filtro della curva di visibilità diminuisce l'effetto di visibilità delle sorgenti luminose.

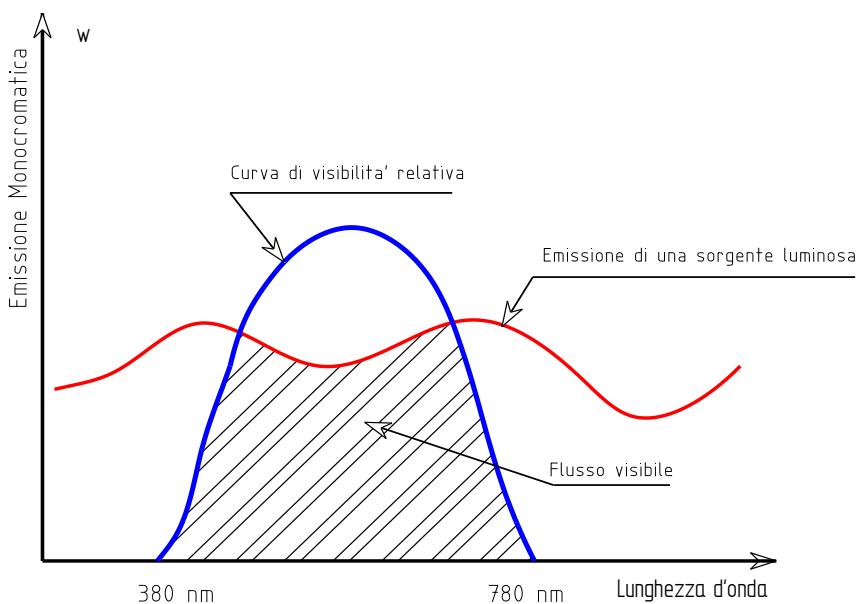


Figura 119: Significato di Flusso Luminoso

Noi vediamo in un intervallo ristretto di frequenze e, all'interno di questo intervallo 380÷780 nm, con efficienze diverse. Vedremo nel prosieguo quali effetti produce questa osservazione sull'efficienza luminosa delle lampade.

14.1.2. INTENSITÀ LUMINOSA

L'intensità luminosa è il flusso luminoso che ricade nell'unità di angolo solido, cioè si ha:

$$I = \frac{d}{d} \quad \text{Candeles} \quad (109)$$

per cui risulta anche:

$$1 \text{ cd} = K_{\max} \frac{1}{683} \left(\frac{W}{sr} \right) \quad (110)$$

da cui:

$$K_{\max} = 683 \frac{cd \ sr \ lm}{W} \quad (111)$$

L'unità è la **Candela** definita come l'intensità di una sorgente luminosa emessa nell'angolo solido di 1 sr, di $\lambda=555$ nm e di potenza pari a 1/683 W. È questa l'unità di misura fondamentale dell'Illuminotecnica e pertanto tutte le altre grandezze sono derivate da questa mediante relazioni inverse. Dalla precedente si ottiene che il flusso luminoso vale:

$$I = I_0 d \quad (112)$$

ove l'angolo solido è dato da:

$$d = \frac{dA \cos \theta}{r^2} \quad (113)$$

Per i corpi lambertiani che emettono in un semispazio secondo la legge del coseno è:

$$I = I_0 \cos \theta$$

$$Id = 2 \int_{0}^{\pi/2} I_0 \sin \theta \cos \theta d\theta = I_0$$

$$I_0$$

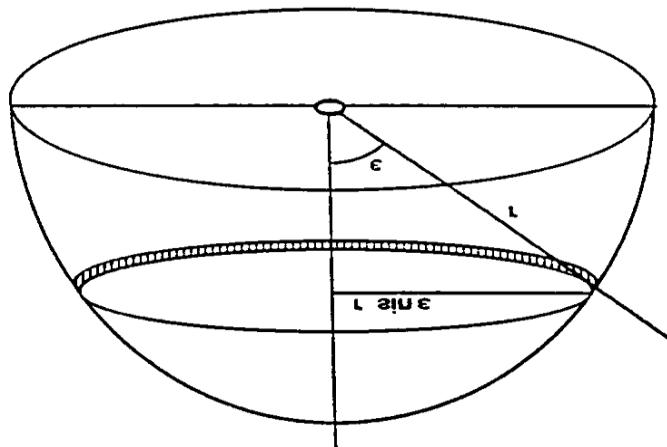
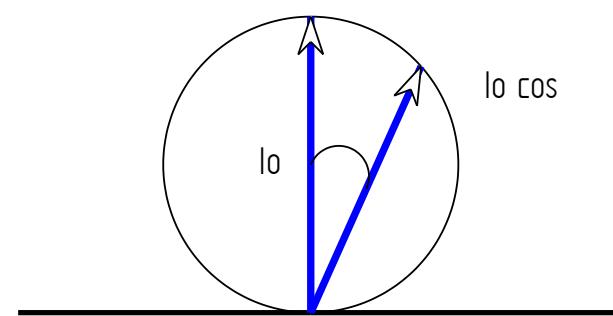


Figura 120: Relazione fra intensità ed angolo solido



Corpo Lambertiano che emette nel semispazio

Figura 121: Intensità per corpi lambertiani

Per le sorgenti puntiformi che emettono uniformemente in tutto l'angolo solido si ha, ponendo $I=I_0$ in tutte le direzioni:

$$= Id = I_0 \int_{0}^{\pi/2} d\theta = I_0 \cdot \pi/2 = 4 \pi I_0$$

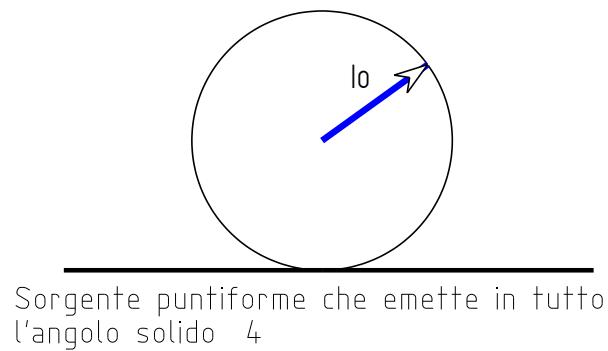


Figura 122: Sorgenti puntiformi

14.1.3. LUMINANZA

La luminanza è definita dalla relazione:

$$L = \frac{dI}{dA \cos} = \frac{dE}{dA \cos} \quad Nit (cd/m^2) \quad (114)$$

Le unità utilizzate sono:

$$L \quad \frac{Cd}{m^2} \quad Nit \quad \text{Stilb} \quad \frac{Cd}{cm^2} \quad 10^4 \text{ Nit}$$

Un confronto con la definizione dell'intensità energetica, definita a proposito dell'Irraggiamento, porta a riconoscere nella luminanza la grandezza analoga in campo illuminotecnico.

Per i corpi lambertiani si ha che la luminanza non dipende dalla direzione :

$$L = I_0 \cos$$

e quindi:

$$L = \frac{I}{S \cos} = \frac{I_0 \cos}{S \cos}$$

cioè:

$$L = \frac{I_0}{S}$$

14.1.4. ILLUMINAMENTO

Una grandezza molto utilizzata nella pratica (forse quella maggiormente nota, anche per l'utilizzo che se fa in fotografia) è l'illuminamento dato dalla relazione:

$$E = \frac{dI_{ricevuto}}{dA_{ricevente}} \quad Lux \quad (115)$$

Combinando con la relazione dell'intensità si ottiene anche l'importante relazione:

$$E_P = \frac{dI_{ricevuto}}{dA_{ricevente}} = \frac{d}{dA} \frac{d}{dA} \frac{d}{dA} I \frac{d \cos}{dA} / R^2 \quad (116)$$

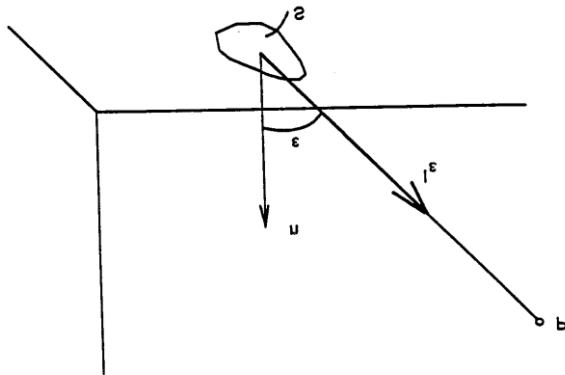


Figura 123: Luminanza per corpi lambertiani

$$E_p = I \frac{\cos \epsilon}{R^2} \quad (117)$$

Si utilizza questa relazione per la verifica illuminotecnica degli impianti di illuminazione artificiali.

Se vi sono più sorgenti luminose si applica il principio di sovrapposizione degli effetti per cui si

ha:

$$E_p = E_R + E_B = I_1 \frac{\cos \epsilon_1}{R_1^2} + I_2 \frac{\cos \epsilon_2}{R_2^2} \quad (118)$$

E' opportuno osservare che la luminanza si riferisce alla superficie apparente della sorgente emittente mentre l'Illuminamento si riferisce alla superficie ricevente il flusso luminoso. Nel caso di superfici trasparenti si ha:

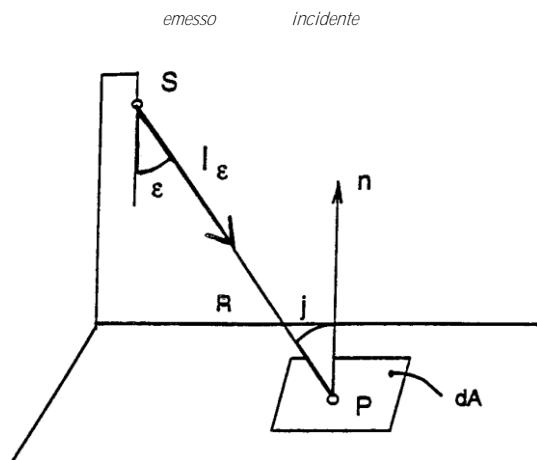


Figura 124: relazione fra flusso ed Intensità

Essendo E_{emesso} per superfici lambertiani si ha:

$$\frac{incidente}{A} = \frac{I_0}{S}$$

ossia:

$$E = L$$

da cui:

$$L = \frac{E}{S}$$

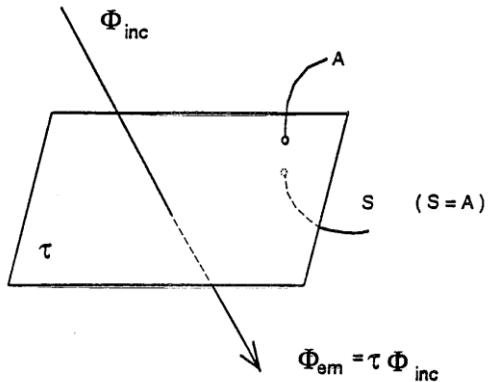


Figura 125: Luminanza per superfici trasparenti

Per superfici lambertiani si ha:

$$\text{emesso} \quad \text{incidente}$$

Essendo per superfici lambertiani si ha:

$$\frac{\text{incidente}}{A} = \frac{I_0}{S}$$

ossia:

$$E = L$$

da cui:

$$L = \frac{E}{\rho}$$

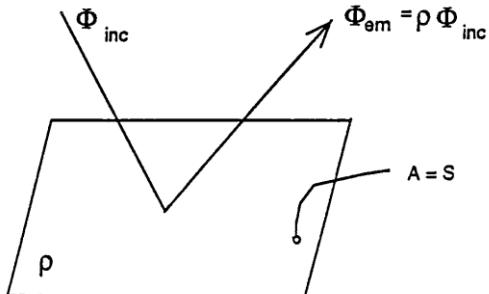


Figura 126: Luminanza per superfici lambertiane

14.1.5. RADIANZA

La radianza è definita dalla relazione:

$$R = \frac{d}{dA} \quad \text{Lux sul bianco} \quad (119)$$

e risulta anche:

$$R = rE \quad (120)$$

con r fattore di riflessione della superficie su cui ricade l'illuminamento E . Questa relazione ci dice che la radiazione visibile emessa da una superficie riflettente è pari al prodotto dell'illuminamento ricevuto per il suo fattore di riflessione. Poiché le radiazioni emesse dai corpi sono, per la legge di Wien, di lunghezza d'onda elevata (in genere oltre i 3 m) allora la (120) ci dice che vediamo solo la loro luce riflessa. Ricordando dall'Irraggiamento che per corpi uniformemente diffondenti vale la relazione:

$$R \quad L \quad (121)$$

per cui la luminanza si può calcolare con la relazione:

$$L = \frac{rE}{(122)}$$

che lega all'illuminamento ricevuto da una superficie. Questa relazione è importante nelle applicazioni perché consente di passare da E ad L , grandezza quest'ultima oggi preferita in Illuminotecnica.

14.2. LA SFERA DI ULRICH

La sfera di Ulbricht è cava e la superficie interna è dipinta con vernice uniformemente diffondente. Una lampada posta al suo interno produce un flusso dato da:

$$\text{circolante} \quad \text{diretto} \quad \text{indiretto} \quad (123)$$

Il flusso diretto è quello prodotto dalla lampada (lampada campione con F_0 noto):

$$\text{diretto} \quad 0 \quad (124)$$

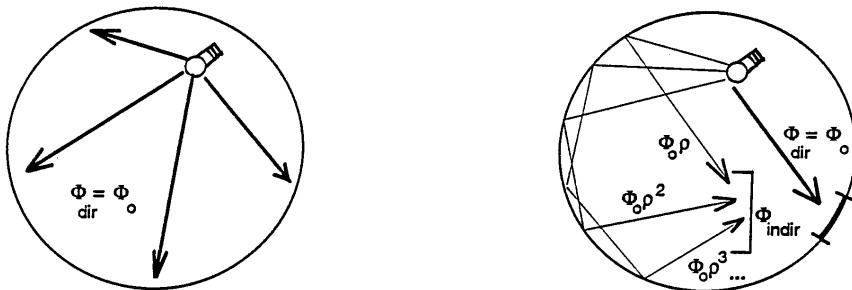


Figura 127: Distribuzione interna del flusso nella sfera di Ulbricht

Pertanto si ha:

$$\text{indiretto} \quad 0 \quad 0 \quad 2 \quad 0 \quad 3 \quad 0 \quad 4 \quad \dots \quad 0 \overline{1}$$

da cui:

$$\text{circolante} \quad \text{diretto} \quad \text{indiretto} \quad 0 \quad 0 \overline{1} \quad 0 \overline{1}$$

da cui:

$$E = \frac{\text{circolante}}{A_{\text{totale}}} = \frac{0}{A_{\text{totale}}} \frac{1}{1} \quad (125)$$

Allora, nota la riflettività r della superficie interna si calcola il flusso:

$$0 \quad EA_{\text{totale}}(1 - r) \quad (126)$$

14.2.1. MISURA DEL FLUSSO LUMINOSO CON LA SFERA DI ULRICH

La misura del Flusso luminoso è effettuata mediante una Sfera di Ulbricht.

Si pratica una finestra sulla superficie della sfera e si pone all'interno una lampada schermata mediante un foglio di carta in modo da eliminare la componente di illuminazione diretta.

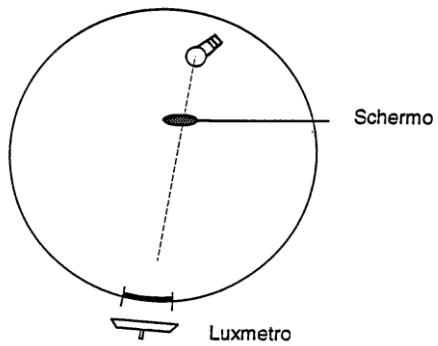


Figura 128: Sfera di Ulbricht

Il flusso incidente in un generico punto della sfera vale:

$$\frac{incidente}{indiretto} = \frac{1}{1}$$

e l'illuminamento che è possibile misurare con un luxometro:

$$E_{misurato} = \frac{indiretto}{4 \pi R^2} = \frac{0}{4 \pi R^2} = \frac{1}{1}$$

da cui si ricava:

$$E_{misurato} = \frac{4 \pi R^2}{0} = \frac{1}{E_{misurato} K} \quad (127)$$

con la costante della sfera K data da:

$$K = \frac{4 \pi R^2}{1} \quad (128)$$

Pertanto si determina F dalla misura di E sulla sfera.

14.3. METODI DI MISURA DELLE GRANDEZZE ILLUMINOTECNICHE

Si presentano brevemente alcuni metodi di misura utilizzati in campo illuminotecnico.

14.3.1. MISURA DEL FLUSSO CON IL LUXOMETRO

Per misurare l'Illuminamento si utilizza una cellula fotovoltaica che genera una corrente in funzione della radiazione incidente.

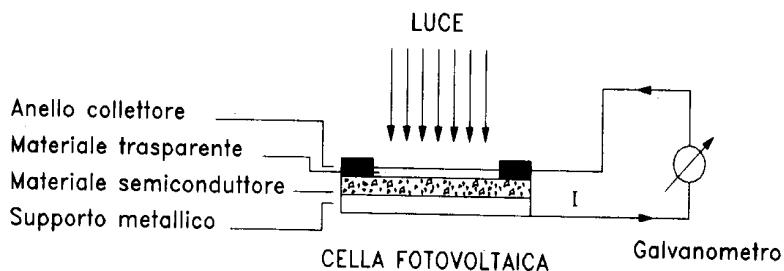


Figura 129: Schema di un luxometro a cellula fotovoltaica

Un filtro sovrapposto alla cellula rende la risposta di questa simile alla curva di visibilità relativa e quindi la misura dell'irraggiamento totale può rendersi proporzionale all'illuminamento.

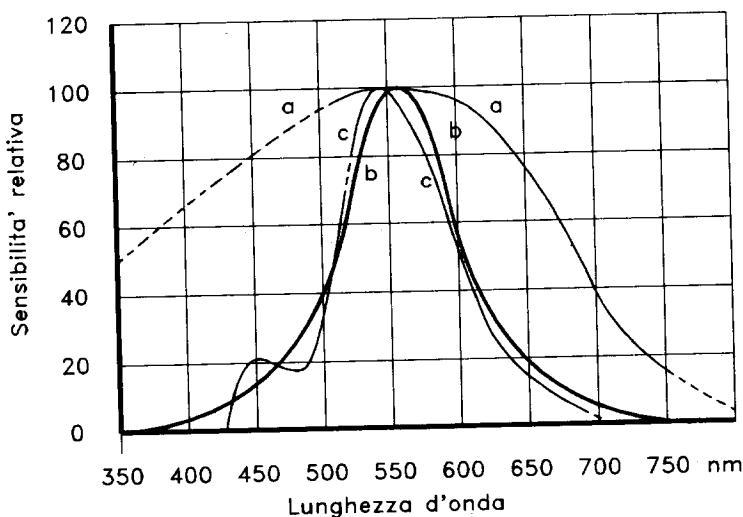


Figura 130: Tipologia di filtri per le celle fotovoltaiche

14.3.2. IL BANCO FOTOMETRICO

Il Banco fotometrico è costruito come in figura sottostante. A sinistra si ha una lampada campione e a destra una lampada da esaminare.

Il carrello mobile porta un dispositivo ottico che presenta l'illuminazione prodotta da entrambi i lati dalle due lampade.

Si sposta il carrello fino a quando gli illuminamenti sono eguali sulle due facciate e quindi vale la relazione (per direzioni normali):

$$E = \frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I_2}{d_2^2}$$

Allora nota I_1 e le distanze d_1 e d_2 si calcola:

$$I_2 = I_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (129)$$

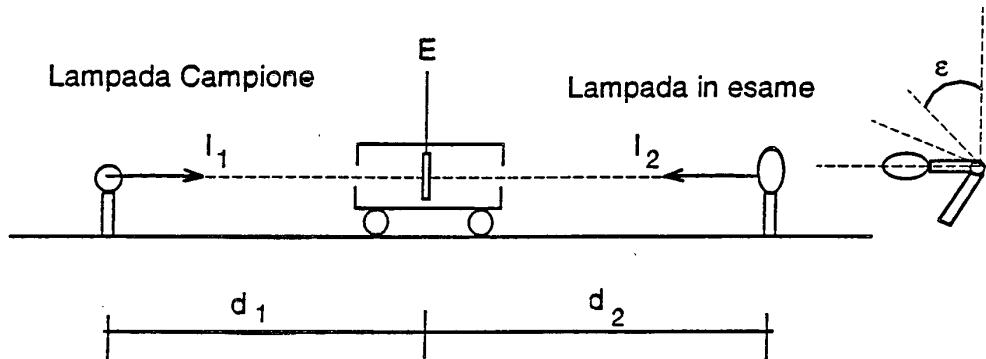


Figura 131: Banco fotometrico

Ripetendo il calcolo per diverse direzioni si ha la costruzione della curva fotometrica di figura.

Ruotando la lampada attorno allo zoccolo di montaggio e ripetendo per varie angolazioni si può avere la costruzione del solido fotometrico.

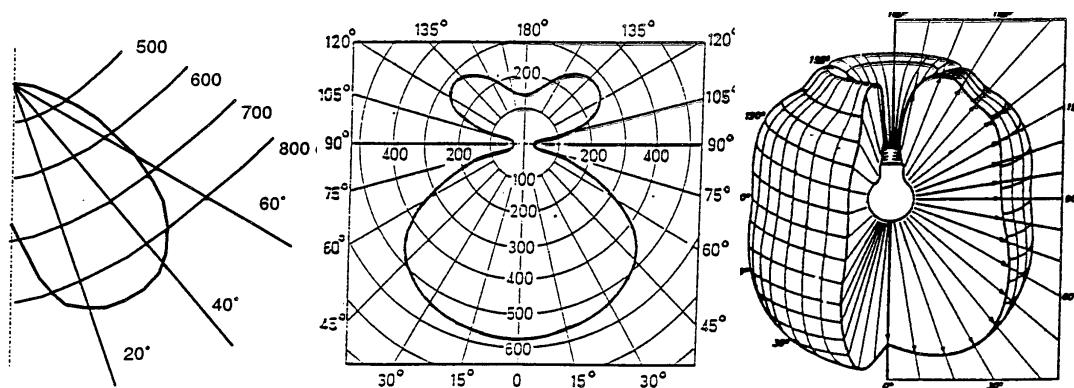


Figura 132: Solido fotometrico e sua sezione in piano

14.3.3. CALCOLO DEL FLUSSO CON IL METODO IEC

L'angolo solido di una zona sferica compresa fra θ ed $\theta + d\theta$ vale:

$$\Omega = \frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{1}{2} \sin \theta \, d\theta \, \frac{1}{2} \cos \theta \, d\Omega = \cos \theta \, d\Omega$$

Per un solido fotometrico avente simmetria di rotazione si può calcolare il flusso luminoso suddividendo la sfera in quattro zone corrispondenti agli angoli (IEC N. 52/1982):

$$\frac{\pi}{2}, \quad \frac{\pi}{2}, \quad \frac{3\pi}{2}, \quad \frac{\pi}{2}$$

Il flusso Φ , ricordando quanto sopra scritto, vale:

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} [\cos \theta_1 \cos \theta_2] \sin \theta \, d\theta$$

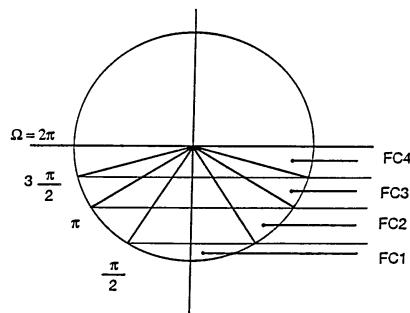


Figura 133: Sezioni per il metodo IEC

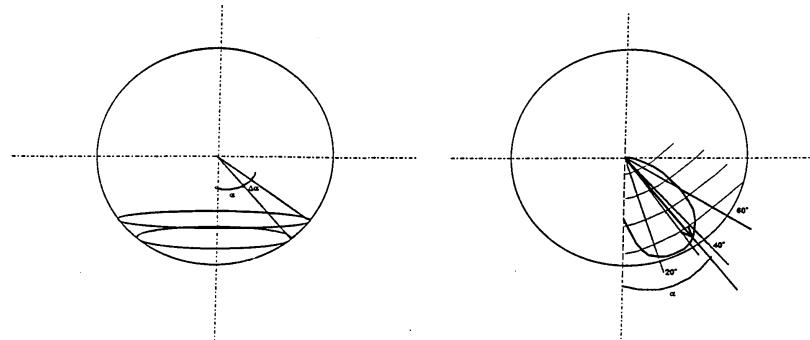


Figura 134: Calcolo del flusso con il metodo IEC

Di solito il flusso emesso nelle quattro regioni IEC viene espresso in termini percentuali rispetto al flusso emesso nel 2π sr ed indicato rispettivamente con FC1, FC2, FC3, FC4.

14.3.4. CALCOLO DELL'ILLUMINAMENTO FRA SUPERFICI

Sia la superficie S₁ emittente ed S₂ ricevente. L'illuminamento in P vale:

$$E_P = L_1 \frac{d}{S_1} \int_{S_1} dS_1 \cos j = L_1 \frac{\int_{S_1} dS_1 \cos j}{S_1} \quad (130)$$

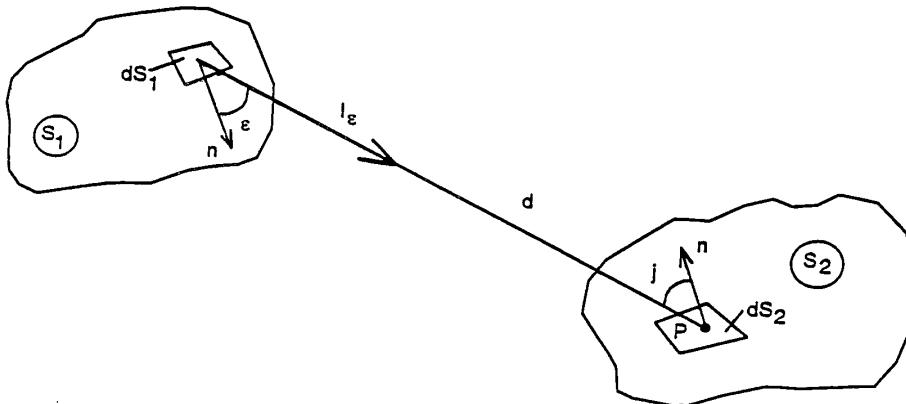


Figura 135: Illuminamento fra due superfici

Il flusso emesso da S₁ che raggiunge S₂ risulta:

$$I_{12} = \int_{S_2} E_p dS_2 = L_1 \frac{\int_{S_1} dS_1 \cos j}{S_1} \int_{S_2} dS_2 \cos j \quad (131)$$

e quindi anche, moltiplicando e dividendo per S₁:

$$I_{12} = S_1 L_1 \frac{1}{S_1} \frac{\int_{S_1} dS_1 \cos j}{S_1} \int_{S_2} dS_2 \cos j \quad (132)$$

Il termine in parentesi è il **fattore di vista** fra S₁ ed S₂:

$$F_{12} = \frac{1}{S_1} \frac{\int_{S_1} dS_1 \cos j}{S_1} \int_{S_2} dS_2 \cos j \quad (133)$$

per cui:

$$I_{12} = S_1 L_1 F_{12} \quad (134)$$

Ricordando che per corpi *lambertiani* la radianza è R/L si ha:

$$E_2 = \frac{I_{12}}{S_2} = R_1 \frac{S_1}{S_2} F_{12} \quad (135)$$

La risoluzione della (133) non è agevole se non per geometrie semplici per le quali si riesce ad effettuare il calcolo degli integrali di superfici.

In Figura 136 si ha un esempio di fattore di forma per due geometrie semplici: piani formanti un diedro retto e piani paralleli. Il fattore di forma è dato dalle curve nei rispettivi abachi al variare dei vari rapporti geometrici.

Nello studio dell'Irraggiamento si sono viste altre geometrie e altri metodi di calcolo (anche semplificati) per il calcolo di F₁₂. Si ricordi che vale la *legge di reciprocità* cioè deve aversi:

$$S_1 F_{12} = S_2 F_{21} \quad (136)$$

e pertanto nei calcoli applicativi basta calcolare solo uno dei fattori di forma.

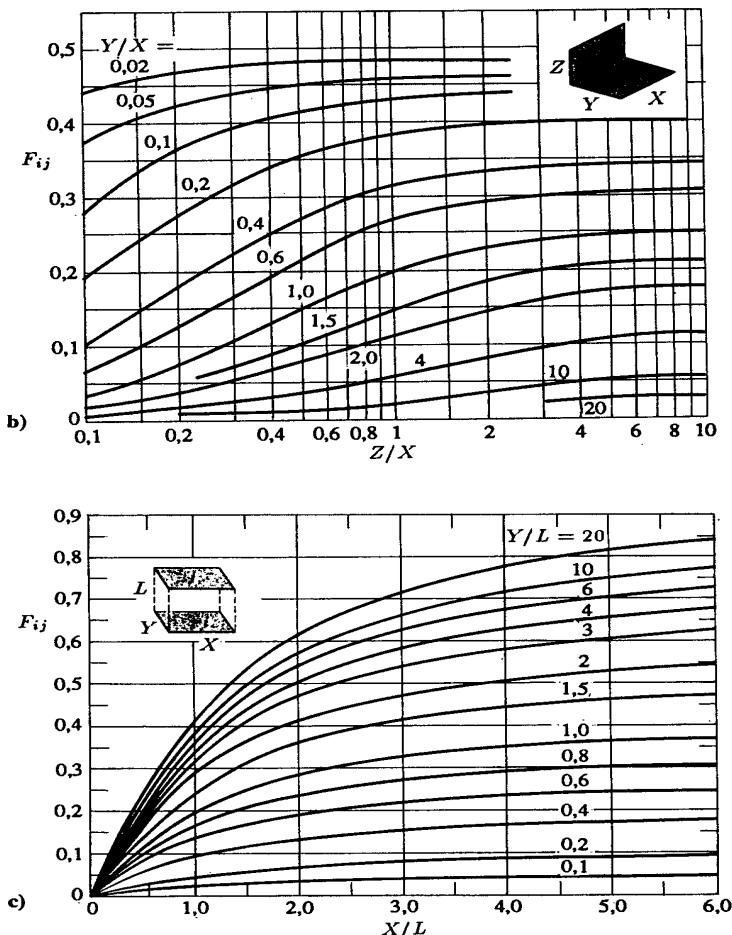


Figura 136: Scambio radiativo fra superfici

14.3.5. ILLUMINAMENTO IN UN PUNTO DA SUPERFICIE ESTESA

Con riferimento alla Figura 137, dalle definizioni di Luminanza ed Illuminamento che qui si ripetono

$$L = \frac{dI}{dS \cos j}, \quad dE_P = \frac{dI \cos j}{d^2}$$

combinando insieme si ha:

$$dE_P = L \cos j \frac{dS \cos}{d^2} = L \cos j d_{0 \rightarrow S} \quad (137)$$

Il termine in parentesi è l'**angolo solido** entro il quale l'oggetto vede la sorgente:

$$d_{0 \rightarrow S} = \frac{dS \cos}{d^2} \quad (138)$$

Allora se $L = \text{costante}$ segue:

$$E_P = L \cos j d_{0 \rightarrow S} \quad (139)$$

che è la relazione per il calcolo dell'Illuminamento in un punto P dovuto ad una sorgente estesa S e di luminanza costante L.

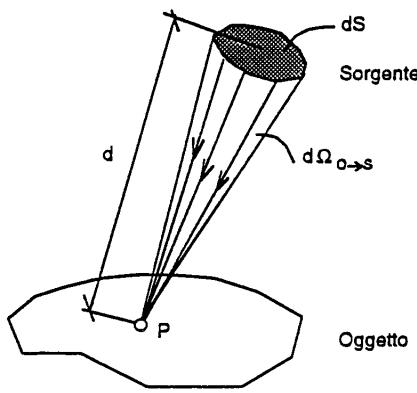


Figura 137: Illuminamento da una superficie in un punto

14.3.6. ILLUMINAMENTO DA UNA SORGENTE LINEARE

Nelle applicazioni si utilizzano spesso sorgenti aventi dimensioni prevalenti linearmente (si pensi ai tubi fluorescenti). In questo caso il calcolo dell'illuminamento in un punto P si può effettuare suddividendo la sorgente in elementi differenziali di lunghezza dl ai quali compete una intensità dl . Ne segue che l'illuminamento infinitesimo vale:

$$dE_P = \frac{dl \cos j}{r^2}$$

ove j è l'angolo fra la normale al punto P e la congiungente dl con P . La luminanza dell'elemento dl è data dalla relazione:

$$L = \frac{dl}{d\Omega \cos j}$$

essendo Ω l'angolo sotto il quale l'elemento dl vede il punto P . Sostituendo nella precedente si ha:

$$dE_P = \frac{L dl \cos j \cos}{r^2}$$

con la luminanza misurata in cd/m . Integrando all'intera lunghezza della sorgente lineare si ha:

$$E = \int dE = \int \frac{L dl \cos j \cos}{r^2} \quad (140)$$

Nel caso di $L = \text{cost}$ si ha:

$$E = L \int \frac{dl \cos j \cos}{r^2} \quad (141)$$

Il calcolo dell'integrale dipende dal tipo di sorgente lineare. Queste possono essere di varie tipologie. Ad esempio un tubo al neon la luminanza può essere espressa nella forma:

$$L = L_s \cos j \cos \theta_s^*$$

Per altre sorgenti, come ad esempio, tubi a vapore di mercurio, a vapori di sodio e fluorescenti, si ha la relazione:

$$L = L_s^* \cos \theta_s^* \text{ Costante}$$

In funzione delle tipologie di sorgenti si effettua, quindi, il calcolo della (141).

15. LA STORIA DELLA TEORIA DELLA LUCE

Nel corso degli ultimi tre secoli due diverse teorie si sono contese il privilegio di spiegare la natura della luce, a seguito di studi condotti da *Isaac Newton* (1642-1727) e da *Cristopher Huygens* (1629-1695).



Figura 138: Ritratti di *Cristopher Huygens*, (da ignoto) e di *Isaac Newton*, (ritratto da C. Jervas)

Secondo Isaac Newton la luce dovera essere formata da una successione di minuscole particelle mentre Cristopher Huygens sosteneva l'esistenza di un sistema vibratorio, concepito sotto forma di sfere elastiche di un sistema vibratorio, in contatto fra di loro, che diffonderra i suoi impulsi nell'etere, un mezzo impercettibile ovunque presente.

Tale controversia, una delle più interessanti che si siano verificate nella storia della Scienza di tutti i tempi, ha origine dalla pubblicazione di *Giovanni Keplero* dal titolo “*Ad vitellionem paralipomena*” avvenuta nel 1604 con la quale viene dato un assetto definitivo alla spiegazione del meccanismo della visione sino a quel tempo ancora relegato a interpretazioni fantasiose e prive di qualsiasi supporto sperimentale, perfezionando quanto asseriva l’arabo *Ibn – Al - Haitham* nel XI secolo²⁰. *Keplero* spiegò che da ogni punto di un corpo luminoso o illuminato partono in tutte le direzioni infiniti raggi rettilinei che, per rifrazione del sistema ottico dell’occhio, formano l’immagine sulla retina.

Dopo *Keplero* si affermò definitivamente il concetto di *lumen*, l’agente fisico esterno, e nel giro di pochi anni si sviluppò un’importante capitolo della scienza chiamata *ottica geometrica* con la quale furono condotte tra l’altro dettagliate ricerche per comprendere la natura del lumen abbandonando quasi definitivamente gli studi sulla *lux* (l’effetto psichico corrispondente al lumen). Si affermarono quindi due correnti di pensiero: una che considerava il lumen come sciame di particelle materiali, cioè una *substantia* e l’altra che lo considerava un movimento, cioè un *accidens*. Ci si pose anche la domanda: che cosa succede ai raggi di luce passando da un mezzo all’altro? Mediante semplici prove sperimentali si osservò che quando la luce entra obliquamente, formando cioè un angolo con la perpendicolare alla superficie, in una sostanza trasparente, essa viene rifratta secondo una direzione che forma, sempre con la perpendicolare, un angolo inferiore a quello d’incidenza.

²⁰ Secondo *Ibn-Al-Haitham*, da ogni corpo si propagano, secondo delle traiettorie che uniscono l’oggetto considerato con l’occhio, dei corpuscoli infinitamente piccoli e percettibili solo se capaci di penetrare entro le orbite oculari. In base a tali postulati, accettati da tutti i filosofi dell’epoca, la luce è un fenomeno psichico, cioè una rappresentazione a cui la psiche perviene quando sulla retina agisce un agente esterno di natura fisica. In funzione di quanto in precedenza descritto furono adottate due parole capaci di spiegare in maniera esauriente tali fenomeni: *lumen* fu chiamato l’agente fisico esterno (composto da raggi rettilinei) e *lux* si chiamò l’effetto psichico corrispondente

Nel 1621 il filosofo olandese *Willebrord Snell* stabilì la relazione esistente fra l'angolo d'incidenza e l'angolo di rifrazione giungendo alle medesime conclusioni di René Descartes detto *Cartesio*²¹ (1596-1650). Cartesio nel suo trattato *Diottrica* si occupò delle leggi di riflessione della luce in uno specchio, considerando la luce stessa costituita da piccole sfere che si comportano come palle da biliardo che urtano la sponda del tavolo e rimbalzano sempre con la stessa angolazione pari a 45°.

Nonostante la deduzione cartesiana di luce fatta da corpuscoli, non si era ancora in grado di dare una risposta esauriente circa il problema dei diversi colori della luce. Nel 1672 Isaac Newton nella sua lettera *Philosophical transactions* espone le proprie idee circa la natura dei colori scaturite da circa dieci anni di esperienza mediante l'utilizzo di prismi ottici.

Egli fece in modo che un raggio di luce incidesse obliquamente su una faccia di un prisma triangolare di vetro: il raggio veniva rifratto una prima volta quando penetrava nel vetro ed una seconda volta nella stessa direzione, quando ne usciva da un'altra faccia del prisma verificando l'effettiva differente inclinazione tra raggio incidente e raggio rifratto.

Sempre con tale esperimento ci si accorse che il raggio luminoso che fuoriusciva dal prisma colpendo una superficie bianca formava una striscia di vari colori, che vanno dal rosso al viola, anziché una luce bianca. Nulla togliendo alla sua grandezza Newton, con la sua teoria corpuscolare, diede una spiegazione errata del fenomeno ammettendo che i corpuscoli della luce avevano forma e caratteristiche diverse a seconda del colore del raggio considerato, i quali venivano attratti dai corpi che attraversavano, secondo leggi simili a quelle della gravitazione universale. Nonostante i molti interrogativi che la teoria corpuscolare lasciava irrisolti²² questa divenne la teoria ufficiale del *lumen* durante tutto il secolo XVIII.

Il più noto oppositore della teoria corpuscolare fu il fisico olandese *Cristian Huygens* (1629-1695). Huygens dichiarava che il fenomeno della diffrazione era causato dalla minore velocità della luce nei mezzi più densi, prospettando con felice intuizione un'ipotesi che soltanto molti anni dopo doveva essere confermata sperimentalmente dal fisico francese *Foucault*. La *teoria ondulatoria*, così venne chiamata la teoria alternativa proposta da *Huygens*, si rifa all'idea di un *lumen* come *accidens* secondo la quale la luce è costituita da piccolissime onde. Il fisico olandese sosteneva che le differenti lunghezze d'onda della luce fanno sì che l'occhio distingua i vari colori. I colori corrispondono quindi a precise lunghezze d'onda²³, capaci di far stimolare la retina e di far percepire il senso del colore, al di là delle quali, in corrispondenza delle radiazioni infrarosse ed ultraviolette, l'occhio non è più in grado di vedere. Nonostante la teoria di *Huygens* appariva del tutto soddisfacente rimanevano anche in questo caso molti interrogativi privi di risposta come ad esempio non si spiegava perché i raggi luminosi non aggirino gli ostacoli, come fanno le onde sonore; ed inoltre non si capiva il motivo per cui la luce poteva propagarsi nel vuoto essendo fatta di onde. Nel 1801 *Thomas Young*, medico e fisico inglese (1773-1829), studiando il *fenomeno della interferenza*²⁴ ebbe modo di calcolare la lunghezza delle onde luminose. Da tale esperimento scaturì che tali lunghezze d'onda erano estremamente piccole, per cui incapaci di aggirare un ostacolo così come avveniva nelle onde sonore.

²¹ Cartesio formulò la legge della rifrazione *legge del seno* che dice: *quando la luce passa da un mezzo A in un mezzo B il seno dell'angolo d'incidenza sta al seno dell'angolo di rifrazione in un rapporto costante*. Questo rapporto rappresenta l'indice di rifrazione relativo ai due mezzi e viene indicata con la lettera *n*.

²² Con tale teoria non era possibile spiegare per quale motivo due fasci di luce possono incrociarsi senza che le particelle costituenti entrino in collisione, ed ancora le differenti caratteristiche di rifrazione della luce di vario colore.

²³ Le lunghezze d'onda sono maggiori per il rosso (780 nm) e diminuiscono man mano che ci si avvicina al violetto (300 nm). La luce bianca comprende luci di tutti i colori o meglio onde di tutte le lunghezze d'onda comprese fra quella del rosso e del violetto.

²⁴ Tale fenomeno consiste nel far collimare un fascio di luce, emesso da una sorgente, con una fessura e successivamente viene fatto passare attraverso altre due fessure parallele. Su uno schermo trasparente posto dopo le due fessure si osserva una serie di frange scure e chiare. Infatti, secondo la teoria ondulatoria un'onda piana (linee parallele) che incontra una fenditura genera un sistema di onde specifiche (linee curve) che si propagano oltre la fenditura. Se le fenditure sono due, le onde si sovrappongono sommandosi o sottraendosi, cresta con cresta o cresta con cavo, ottenendo così le frange chiare e scure.

Il fatto che le lunghezze d'onda abbiano valori così piccoli, le cui dimensioni sono enormemente minori di quelle degli oggetti, spiega il motivo per cui le onde luminose viaggiano in linea retta e proiettano ombre nette. In seguito le lunghezze d'onda della luce vennero espresse in un'unità di misura suggerita da *Anders Jonas Angstrom*, fisico ed astronomo svedese (1814-1872): 1 *Angstrom* (A) corrisponde ad un centomilionesimo di centimetro (10^{-8} cm).

Attualmente si preferisce usare dei prefissi per ogni ordine di grandezza e *nano* è il prefisso usato per indicare la miliardesima parte dell'unità. Un *nanometro* (abbreviazione nm) è pari a 10^{-9} metri ed equivale a 10 A. Grazie agli ricerche condotte da *Huygens*, *Young* e *Angstrom* nel XIX secolo la teoria ondulatoria della luce fece progressi straordinari, debellando definitivamente la teoria corpuscolare di Newton.

La conclusione di questo grande sviluppo dello studio delle onde si ebbe con *James Clerk Maxwell* (1831-1879) con la sua *teoria elettromagnetica della luce*. Egli elaborò un insieme di quattro equazioni che complessivamente descrivevano tutti i fenomeni riguardanti l'elettricità ed il magnetismo.

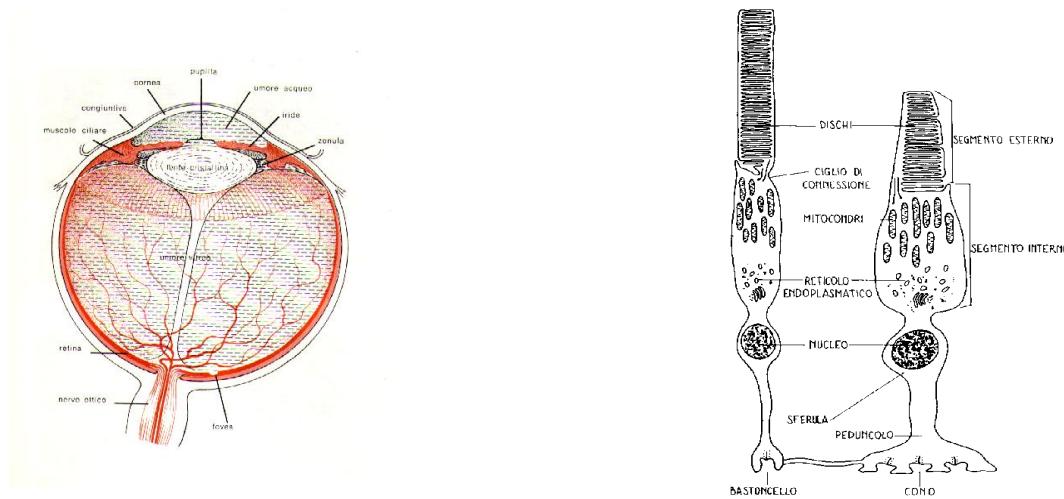
Tali equazioni pubblicate nel 1864 non solo descrivevano le interrelazioni tra i fenomeni elettrici e magnetici, ma mostravano anche che essi non potevano essere mai separati, giungendo alla conclusione che tali radiazioni presentano le proprietà di un'onda. In breve *Maxwell* riuscì a calcolare la velocità con cui un'onda elettromagnetica avrebbe potuto propagarsi, velocità che risultava essere precisa a quella della luce²⁵.

La luce è quindi una radiazione elettromagnetica e, come essa, vi sono altre radiazioni con lunghezze d'onda molto maggiori e molto minori di quelle della luce *visibile* (che vanno dai raggi cosmici alle microonde).

In base a quanto precedentemente descritto le due teorie corpuscolare ed ondulatoria si relazionano per descrivere la luce come oggi la si intende e cioè come un flusso di particelle, i *fotoni*, i cui fenomeni possono essere spiegati dall'elettrodinamica quantistica (*QED: Quantum Electro - Dynamics*). Il Fotone è il quanto elementare di energia della luce; si misura in *Joule* ed è dato dalla relazione

$$E = h\nu$$

ove h è la costante di *Planck* (J/s) e ν la frequenza (Hz).



²⁵ Un astronomo danese *Roemer* (1644-1719) intento ad annotare le eclissi di quattro luminosi satelliti ruotanti in orbita attorno al pianeta Giove si accorse che queste succedevano ad intervalli regolari in rapporto alle variabili distanze i Giove e della Terra. *Roemer* concluse che l'irregolarità delle eclissi era in rapporto alla diversità del tempo impiegato dalla luce per coprire il percorso tra i satelliti di Giove e la Terra e che il tempo aumentava con l'aumentare della distanza perché la luce viaggiava con una certa velocità. In base a questi dati ed a una valutazione approssimativa della distanza del sole, il danese stabilì che la velocità della luce era di 308.000 km/s. Dato questo molto vicino a quello ottenuto con le moderne conoscenze sul diametro dell'orbita terrestre la quale velocità è stata corretta a circa 300.000 km/s, in presenza di vuoto assoluto.

Figura 139: Anatomia dell'occhio umano e dei recettori retinici: coni e bastoncelli

Le radiazioni luminose presentano quindi diverse lunghezze d'onda; quelle a breve lunghezza d'onda sono caratterizzate da un numero di onde maggiori rispetto alle radiazioni luminose di lunghezza d'onda più elevata. La luce naturale, al pari di quella generata con mezzi artificiali, si presenta quindi come formata da differenti radiazioni di diversa lunghezza d'onda.

15.1. FISIOLOGIA DELL'OCCHIO

L'occhio umano, strumento sensoriale estremamente specializzato per la visione, dotato di una perfetta organizzazione anatomica e funzionale, consente per mezzo di una lente (*lente cristallina*) di proiettare l'immagine rimpicciolita e capovolta degli oggetti su dei *fotorecettori* situati al suo interno, capaci di trasformare l'energia luminosa ricevuta in una serie di impulsi elettrici intelligibili per il cervello.

L'occhio è una macchina perfetta dotata di sei muscoli estrinseci, o esterni al globo oculare, che lo trattengono nella cavità orbitaria, lo fanno ruotare nella direzione degli oggetti in movimento e lo dirigono sugli oggetti fermi.

Gli occhi partecipano alla visione in perfetto sinergismo cosicché normalmente si rivolgono su uno stesso oggetto, sul quale convergono al fine di comprenderne distanza e dimensioni; in altre parole gli occhi permettono di vedere in tre dimensioni.

Oltre ai muscoli estrinseci esistono altri muscoli denominati intrinseci, o interni. Uno di essi è l'*iride*, un muscolo anulare che forma la *pupilla* attraverso cui passa la luce proveniente dall'esterno per giungere sulla *lente cristallina*. L'iride con il suo movimento (contrazione muscolare) permette di restringere il foro pupillare, sia per la visione degli oggetti prossimi che per adattare l'occhio ad eccessiva intensità luminosa.

Un altro muscolo intrinseco, denominato *ciliare*, controlla inoltre la messa a fuoco della lente e permette quindi una corretta visione degli oggetti. L'occhio può essere distinto anatomicamente e funzionalmente in una parte diottica o anteriore ed in una posteriore o sensoriale. La parte diottica comprende tutte quelle strutture che hanno la funzione di far sì che i raggi provenienti da qualsiasi oggetto fissato vadano a fuoco esattamente sulla retina che ne rappresenta la parte sensoriale.

Per consentire la visione è indispensabile che i mezzi diottici possiedano determinate caratteristiche quali *potere rifrattivo* ed una perfetta *trasparenza* alla luce. Le strutture rifrattive sono rappresentate da: *cornea, umore acqueo, cristallino e corpo vitreo*.

La cornea che costituisce l'1/6 anteriore della tonaca fibrosa riveste l'occhio detto anche *sclera* e rappresenta la lente principale del sistema diottico oculare avendo un potere di circa 42 diottrie²⁶. Dietro la cornea è situato l'*iride* al cui centro vi è la *pupilla*. L'iride presenta un pigmento colorato che ha la funzione con la sua opacità di limitare l'apertura delle lenti²⁷.

Il diaframma irideo è posto al davanti del cristallino, ed è delimitato da due anelli, uno periferico che lo collega al corpo ciliare e che delimita la base dell'angolo *irido-corneale*, e uno centrale che circoscrive il forame pupillare; il muscolo costrittore della pupilla è innervato dal III° nervo cranico, il muscolo dilatatore dal sistema nervoso simpatico.

L'iride, come in precedenza accennato, ha la proprietà di dilatarsi e di contrarsi, per mezzo del muscolo ciliare, fungendo da diaframma per i raggi luminosi. È errato pensare che le variazioni di grandezza della pupilla, che rappresenta il foro centrale dell'iride, abbiano esclusivamente lo scopo di garantire il funzionamento dell'occhio a differenti intensità di luce.

Infatti il foro pupillare può modificarsi in un rapporto di 16:1, mentre l'occhio riesce a funzionare entro un arco di intensità luminose che stanno in un rapporto di 100.000:1

²⁶ La diotria è una misura ottica definita come il reciproco della distanza focale (espressa in metri) d'un sistema ottico.

²⁷ Gli occhi privi di pigmento (albinismo) non possono funzionare perfettamente in presenza di luce intensa.

La pupilla invece restringendosi limita esclusivamente l'ingresso dei raggi luminosi in corrispondenza della parte centrale della lente, che è la più funzionale dal punto di vista ottico, mentre si apre completamente in quei casi in cui si richiede la massima sensibilità. La pupilla²⁸ si restringe anche nella visione prossima aumentando così la profondità del campo visivo.

La lente dell'occhio umano, il *cristallino*, ha grande importanza nel regolare l'accomodazione alla distanza modificando, in virtù della notevole elasticità posseduta, il raggio di curvatura delle proprie superfici, mediante un notevole movimento muscolare (muscolo ciliare e *zonula*)²⁹.

Per tale motivo il cristallino può essere considerato come una lente positiva di potere variabile (circa 13D) il cui raggio di curvatura si riduce infatti per la visione prossima aumentando così il potere della lente che accentua la convergenza dei raggi luminosi, già operata dalla cornea.

Lo spazio compreso tra *cornea* ed *iride* è detto *camera anteriore* al cui interno circola l'*umore acqueo*, mentre lo spazio compreso tra il *cristallino* e la *retina* è occupato dal *corpo vitreo*. La parte *neurosensoriale* è rappresentata dalla retina, composta da elementi fotosensibili e da neuroni, il cui nome deriva dal fitto intreccio dei suoi vasi sanguigni che ne conferiscono un aspetto simile a quello di una rete.

La retina dell'uomo è una retina inversa cioè strutturata in maniera tale che le estremità dei fotorecettori non siano rivolte verso la sorgente dello stimolo e quindi verso il diottro, bensì all'opposto. A livello retinico si compie la conversione degli stimoli fotonici in impulsi nervosi che, raggiungendo i centri celebrali evocano la sensazione visiva. Tale percezione è dovuta a due tipi di *fotorecettori* (particolari cellule nervose), i *coni* ed i *bastoncelli*, aventi funzioni diversificate e diversa distribuzione topografica. In corrispondenza della periferia retinica si trovano in prevalenza i *bastoncelli*; a livello della *fovea* centrale (detta anche macula) sono presenti esclusivamente i *coni*.

Questi ultimi sono eccitati da radiazioni luminose intense, hanno cioè una soglia di eccitazione elevata e presiedono alla *visione diurna* o *visione fotopica* e lavorando alla piena luce diurna e producono la visione del colore. I bastoncelli sono invece eccitati da radiazioni luminose meno intense e pertanto forniscono la base per la *visione crepuscolare* o *scotopica*. Tale diversità funzionale è dovuta anche al diverso rapporto che i due tipi di recettori hanno con le fibre del nervo ottico: i coni sono in rapporto di 1:1; quindi ogni cono eccitato attiva una singola fibra nervosa; i bastoncelli hanno rapporti plurimi così che su una stessa fibra nervosa possono convergere impulsi provenienti da numerosi bastoncelli. Da quanto detto se ne deduce come la sensazione visiva più dettagliata è quella che ha origine nei coni e pertanto la *fovea* centrale è la sede della visione distinta e diretta.

Le zone periferiche della retina sono viceversa popolate dai bastoncelli ed idonei quindi alla visione notturna. Per concludere l'area retinica che corrisponde alla fuoriuscita dal bulbo delle fibre nervose che costituiscono il nervo ottico prende il nome di *papilla ottica*, una zona priva di fotorecettori e quindi insensibile allo stimolo luminoso.

15.2. PRINCIPI DELLA VISIONE

La visione è garantita dall'eccitazione della retina che deve quindi considerarsi come un rilevatore di energia radiante compresa tra i 380 e i 780 nm, la gamma del visibile.

L'eccitazione dei recettori presenti nella retina è inizialmente un fenomeno *fotochimico* la quale si verifica quando il fotone viene captato da una molecola del pigmento *fotolabile*; successivamente tale stimolo viene trasformato in impulso elettrico trasmesso successivamente al cervello. La reazione fotochimica avviene in corrispondenza dei fotorecettori della retina sono: i *coni* ed i *bastoncelli*, i quali contengono nel loro articolo esterno due diversi tipi di pigmento visivo, la *rodopsina* e la *jodopsina*.

²⁸ La pupilla non è una struttura anatomica ma un foro circoscritto dall'iride, che consente alla luce di giungere prima sulla lente, e successivamente sulla retina per formare l'immagine. La pupilla ci appare di colore nero e non ci è possibile vedere, attraverso di essa, nell'interno dell'occhio di un'altra persona poiché il nostro occhio viene sempre a trovarsi sul cammino della luce destinata ad illuminare la parte della retina che dovremmo vedere.

²⁹ Il cristallino è mantenuto nella sua posizione, ortogonale all'asse ottico, da un sistema di sospensione costituito da numerose e sottili fibre (*fibre zonulari*) disposte a raggiera, che si inseriscono ad un estremo in corrispondenza dell'equatore della lente e dall'altro estremo sui processi ciliari.

Lo stimolo luminoso porta quindi, attraverso fenomeni chimici (*fotoisomerizzazione*), alla scomposizione dei suddetti pigmenti, trasformandoli in *lumirodopsina*, in modo da consentire l'amplificazione e la partenza del segnale verso i centri superiori; subito dopo, sempre per mezzo di meccanismi fotochimici, viene rigenerata la rodopsina, attraverso la riconversione del *trans-retinale* in *cis-retinale*.

Questi fenomeni fotochimici avvengono in 1/25 milionesimo di secondo, determinando una variazione di potenziale sinaptico³⁰ in 1/500 ms, consentendo quindi la trasmissione ininterrotta di segnali da parte della retina, anche se esposta a stimoli intensi e continuativi.

Attraverso le vie ottiche i segnali provenienti dalla retina raggiungono la corteccia visiva occipitale, dove vengono elaborati e trasformati in immagini. I *fotopigmenti* sono così distribuiti nell'occhio: la *rodopsina* è contenuta nei *bastoncelli*, il *clorolabile*, il *cianolabile*, l'*eritrolabile* sono contenuti in tre diverse varietà di coni (una per ciascun colore fondamentale: *rosso*, *verde* e *blu*³¹).

Riassumendo, la visione può essere *scotopica*, dovuta ai *bastoncelli* (condizione di illuminazione notturna), *fotopica*, dovuta ai coni (condizione di illuminazione diurna), ed *mesopica* (condizione di illuminazione intermedia) come appare dal grafico seguente.

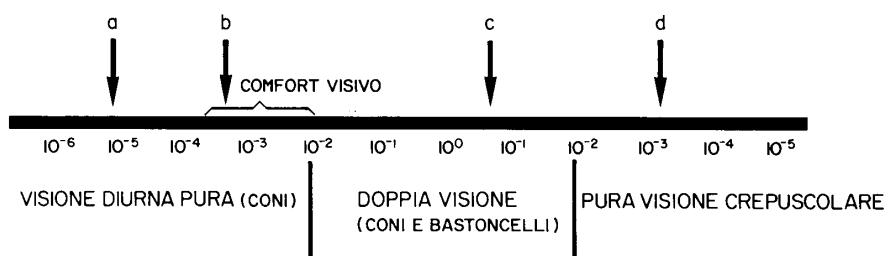


Figura 140: Illuminamento in lux di una superficie per diverse situazioni

Se la visione notturna (caratterizzata da un valore di illuminamento inferiore a 0,1 lux³²) è privilegiata nei confronti di quella diurna, per la capacità di percepire sorgenti luminose estremamente deboli (l'occhio è capace di percepire, in visione scotopica, la fiamma di una candela ad una distanza superiore a 10 km), tale incremento di sensibilità della retina resta decisamente molto labile potendo essere facilmente abolito da un improvviso abbagliamento.

A causa del mancato funzionamento dei *coni* la visione *scotopica* risulta decisamente limitata rispetto a quella fotopica. Con luce crepuscolare infatti l'acuità visiva si riduce a un valore uguale o inferiore a 1/10 e si verifica inoltre la mancanza di percezione dei colori con conseguente spostamento della curva di sensibilità retinica in funzione della lunghezza d'onda, in direzione delle lunghezze d'onda più corte. Per tale motivo all'alba ed al tramonto il colore blu appare più intenso di quello rosso più visibile di giorno³³.

Appare evidente come in visione *fotopica* (dovuta ai *coni*) la sensibilità dell'occhio è massima alla radiazione della zona centrale dello spettro luminoso (in corrispondenza della colorazione giallo-verde, intorno ai 550 nm) e decresce man mano che ci si sposta verso la periferia dello spettro come meglio evidenziato dalla curva del fattore di visibilità relativa.

³⁰ La *sinapsi* è una specie di membrana fra il *neurone* e l'*assone* (cioè il collegamento fra neuroni). La sinapsi controlla la concentrazione ionica di Na^+ e K^- mediante variazione del potere di permeabilità di questi ioni. Quando la permeabilità allo ione sodio diviene massima allora si ha una immissione di cariche positive che producono un innalzamento del segnale da circa -70 mV a -30 mV . La transazione del segnale avviene in circa 0.5 ms.

³¹ Vedremo come questi tre colori (denominati Red, Green, Blue, con la sigla *RGB*) sono anche assunti come fondamentali per la *Colorimetria*.

³² Si ricorda che il *lux* è l'unità di misura dell'illuminamento e cioè è il rapporto fra flusso luminoso (espresso in *lumen*) e la superficie di illuminazione (in m^2).

³³ I *coni* funzionano in condizioni di luminosità elevata, e sono molto sensibili alle lunghezze d'onda giallo e verde; i *bastoncelli* funzionano a bassi livelli di luminosità e sono altamente sensibili alle lunghezze d'onda blu-verde.

In visione *scotopica* (dovuta ai bastoncelli) viceversa la curva di sensibilità dell'occhio è spostata verso le lunghezze d'onda inferiore in corrispondenza della colorazione blu-verde. La condizione di illuminazione intermedia definisce la visione *mesopica* in cui il senso del colore è ancora ridotto e gli oggetti si distinguono per la diversa luminosità. Tale spostamento in termini di lunghezza d'onda viene definito **effetto Purkinje** e la lunghezza d'onda a cui corrisponde la massima visibilità è di circa 510 nm. Una simile risposta dell'occhio sembra essere dovuta al selettivo assorbimento dei mezzi oculari antistanti la retina caratterizzati ognuno da un proprio coefficiente di trasmissione , dipende dalla lunghezza d'onda considerata ed infatti la percentuale di flusso monocromatico che incide sulla retina, in relazione al flusso pupillare , può essere espresso dalla relazione seguente

$$F = \quad [143]$$

Riassumendo si ottiene quanto esposto nella seguente tabella:

<i>Tipi di visione</i>	<i>Livelli di illuminamento (lux)</i>	<i>Luminanza³⁴ (cd/m²)</i>
Fotopica	10÷15	$10^6 \quad 3$
Mesopica	$10 \div 5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Scotopica	$5 \cdot 10^{-3} \quad 5 \cdot 10^{-6}$	$10^5 \quad 10$

Tabella 31: Tipologia della visione

Per stabilire la visibilità sufficiente sul piano di lavoro si fa riferimento al concetto di *livello di visibilità* che comprende in un unico dato l'illuminazione dell'ambiente, il contrasto fra gli oggetti ed il tempo di percezione degli stessi. La valutazione di questo livello è quindi fondamentale per definire la prontezza della sensazione visiva.

Al livello di visibilità zero si fa corrispondere la *soglia della visibilità Es*, che coincide con la percezione visiva di un oggetto dopo un tempo molto lungo. I valori del livello della visibilità successivi al valore di soglia possono essere espressi da una curva detta appunto *Curva della visibilità* rappresentata in Figura 141.

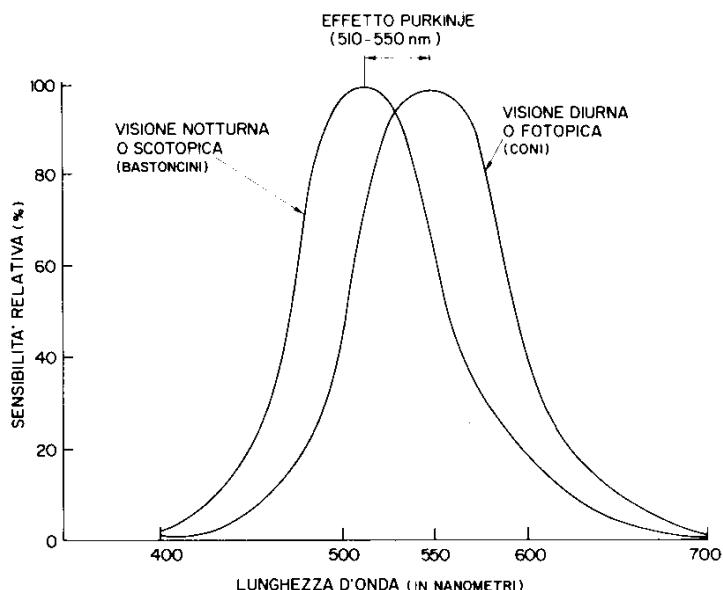


Figura 141: Sensibilità relativa dell'occhio alle varie lunghezze d'onda

³⁴ La *Luminanza* è data dal rapporto fra l'intensità luminosa (espressa in *candela*) e la superficie apparente di emissione e si misura in *Nit*.

Su di essa sono riportati i livelli medi della visibilità di un oggetto sottoposto ad una illuminazione E in funzione dell'illuminamento relativo $E_r = E / E_s$

La soglia può quindi essere definita come la minima quantità di energia che permette la percezione la quale dipende da vari fattori quali:

- la variabilità dei fotoni di stimolazione;
- la soggettività; le diverse condizioni di adattamento;
- il prestimolo e la variazione delle condizioni sperimentali.

Da quanto in precedenza descritto ne consegue la difficoltà pratica di determinare la soglia di visibilità in modo assoluto. Secondo esperimenti condotti nel 1942 da *Hecht, Schlaer e Pinene* venne definito l'occhio come il più sensibile strumento di misura di energia luminosa.

Infatti, secondo questi sperimentatori basta che in condizioni di massima sensibilità (per occhi adattati al buio per un tempo non inferiore ad un'ora), un bastoncello assorba un fotone di 5000 A° di lunghezza d'onda per determinare la sua stimolazione e la conseguente sensazione luminosa.

Per successive stimolazioni è necessario che almeno 10-15 recettori assorbano un fotone ciascuno perché il soggetto percepisca una sensazione visibile. È evidente che per determinare la percezione di soglia è necessaria un'energia incidente nell'occhio sensibilmente superiore. Difatti è stato valutato che, a seguito dell'assorbimento dei diversi mezzi ottici, della riflessione corneale e dell'assorbimento da parte delle fibre nervose e dei vasi sanguigni che antistanno ai recettori, almeno 100 fotoni devono incidere sull'occhio. Questa energia corrisponde a circa 10^{-6} mJ ³⁵. È stato inoltre determinato che per un occhio adattato alla luce diurna è necessaria un'intensità pari ad 1 mJ , cioè un'intensità un milione di volte più grande della precedente.

La visione è l'effetto sensoriale generato dalla luce sull'organo visivo. Essa è frutto di una interpretazione cerebrale (zona *occipitale* del cervello) e pone alcuni problemi di ordine psicofisico.

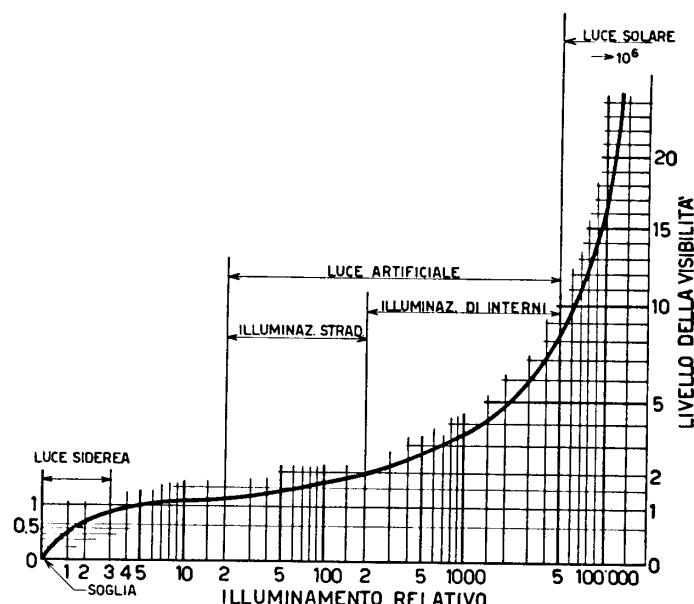


Figura 142: Livello della visibilità al variare dell'illuminamento relativo

I parametri principali che caratterizzano la visione sono i seguenti:

- **Adattamento visivo**
- **Accomodamento e Contrasto**
- **Brillanza**

³⁵ E. Giannazzo, Nozioni di fisica e biofisica della visione, Piccin, Padova, 1989.

- Abbigliamento

- Acuità Visiva

- Senso Morfologico

Alcuni di essi possono essere definiti analiticamente e misurati opportunamente, altri costituiscono parametri accessori e derivano direttamente dall'interpretazione psicofisica della visione.

15.2.1. L'ADATTAMENTO VISIVO

L'occhio è in grado di riconoscere gli oggetti in condizioni di illuminazione che coprono un campo estremamente vario. La Luminanza dello stimolo che costituisce la soglia luminosa assoluta è di circa 10^{-6} Nit (quella del pieno sole è di circa 10^9 Nit). La capacità che ha l'occhio di regolare la propria sensibilità al variare delle condizioni ambientali è detta *adattamento*.

E' quindi un processo mediante il quale le caratteristiche ottiche del sistema visivo sono modificate in relazione alla luminanza del campo visivo o alla distribuzione spettrale dello stimolo luminoso.

L'adattamento è assicurato da tre tipi di meccanismi:

1. *Modificazione del diametro pupillare*³⁶: miosi ed midriasi;
2. *Adattamento retinico*³⁷: la retina reagisce a livello biochimico all'aumento ed alla diminuzione dell'intensità luminosa mediante generazione ed esaurimento (*sbiancamento*) della rodopsina;
3. *Meccanismo nervoso*³⁸; quando l'occhio passa dal buio alla luce i mutamenti biochimici sono sovrapposti dai più veloci adattamenti nervosi, così che l'adattamento alla luce è soprattutto un fenomeno nervoso.

Dopo essere rimasti all'oscurità per un certo tempo i nostri occhi diventano più sensibili ed un oggetto illuminato ci sembrerà più splendente che in altre circostanze. Questo fenomeno è l'espressione del processo di *adattamento all'oscurità* che si manifesta fin dai primi minuti quando si rimane al buio.

Analizzando l'esempio in precedenza esposto è facile intuire come la velocità di adattamento è diversa per i *coni* e per i *bastoncelli*: i primi infatti si adattano completamente entro *sette minuti*, mentre l'adattamento dei secondi si prolunga per un'ora e più, come dimostra la figura seguente, che riporta le rispettive curve d'adattamento dei fotorecettori come se ci fossero due retine indipendenti in ogni occhio.

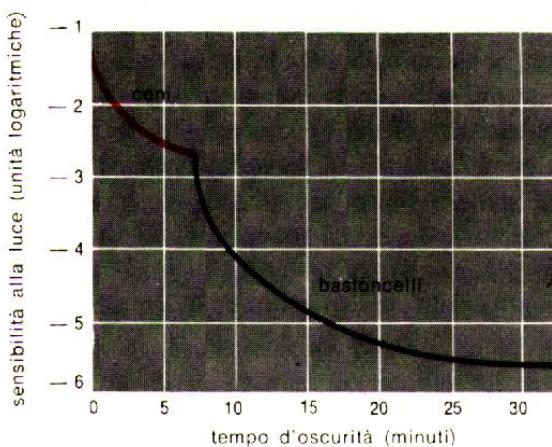


Figura 143: Curva di adattamento visivo dei coni e dei bastoncelli

³⁶ Miosi rappresenta il restringimento della pupilla (condizione di intensa illuminazione), midriasi indica la dilatazione della pupilla in condizione di ridotta luminosità.

³⁷ L'adattamento retinico avviene a livello biochimico mediante una rigenerazione della rodopsina (adattamento al buio) e ad un suo esaurimento alla luce (adattamento alla luce in circa 50 s).

³⁸ Quando si passa da un luogo a bassa intensità luminosa ad un altro caratterizzato da valori di illuminazione elevati i mutamenti biochimici (50 s circa) sono preceduti dai più veloci adattamenti nervosi. Quindi l'adattamento alla luce è soprattutto un fenomeno nervoso.

La spiegazione precisa di tale meccanismo è stata data dal fisiologo inglese *W.A.H. Rushton*, il quale ha dimostrato, mediante opportuni esperimenti sugli occhi delle rane e dell'uomo³⁹, uno stretto rapporto tra le modificazioni fotochimiche della rodopsina e le variazioni di sensibilità dei bastoncelli.

Da tali studi è apparso che la luminosità della visione è legata alla quantità di *fotopigmento* presente nei fotorecettori e sottoposta allo sbiancamento.

Rushton dimostrò la modifica cromatica del fotopigmento durante il processo di adattamento ed ha anche stabilito che il rapporto tra l'intensità energetica dello stimolo luminoso e la quantità di fotopigmento che diventa bianco, è di natura logaritmica.

15.2.2. L'ACCOMODAMENTO

Per accomodazione si intende la modifica del potere diottico del cristallino, regolazione focale dell'occhio, al fine di mettere a fuoco sulla retina l'immagine di un oggetto situato ad una data distanza dall'occhio.

15.2.3. IL CONTRASTO

Si definisce *contrasto* differenza di luminosità tra due oggetti o superfici vicine o ancora la valutazione soggettiva della differenza di spettro di due parti di un campo visivo viste simultaneamente o successivamente. Esiste inoltre una soglia di contrasto definita come la più piccola differenza di luminosità che permette il riconoscimento di un oggetto. Ma il contrasto può anche definirsi come differenza relativa delle luminanze fra due parti di un campo visivo (*Luminance contrast*).

Da quanto in precedenza esposto appare evidente come il contrasto sia strettamente condizionato dal livello di illuminamento del compito visivo. Infatti *uno⁴⁰ dei fattori che condizionano la sensazione luminosa e rappresentato dall'intensità della luce che colpisce le zone circostanti della retina*

Un determinato oggetto risulta più luminoso su uno sfondo scuro, e un particolare colore acquista una tonalità più intensa se circondato dal colore complementare. (questo fatto deve essere messo senza dubbio in rapporto all'esistenza di connessioni crociate tra i recettori).

L'effetto di potenziamento della sensazione luminosa cromatica operato dal contrasto rientra probabilmente nel quadro generale dell'importanza dei contorni per la percezione visiva. Sembra infatti che siano soprattutto i contorni che vengono segnalati con particolare evidenza al cervello, mentre, per le zone che presentano una illuminazione uniforme, le informazioni sono molto più generiche. Il sistema visivo, completando il quadro definito dai contorni, risparmia le energie del suo sistema periferico, sia pure a costo di un maggior lavoro dei centri nervosi.

Sebbene i fenomeni di contrasto e di rinforzo che si manifestano a livello dei contorni siano fondamentalmente determinati dall'attività retinica, si deve ritenere che anche i centri nervosi abbiano una certa influenza, come risulta dalla figura seguente, che ci sottopone un caso evidente di contrasto.

Il cerchio grigio appare infatti più chiaro sullo sfondo nero che sullo sfondo bianco ed ancor più marcato risulta questo effetto quando, lungo il diametro traverso del cerchio, si dispone un filo bianco che si continua sul fondo dividendolo in due metà.

Il contrasto è dunque più evidente se la figura viene interpretata come due metà distinte anziché come una figura unica e questo fenomeno deve essere verosimilmente provocato dall'intervento dei centri nervosi cerebrali.

Un'idea della complessità del sistema che controlla la sensazione luminosa può essere ricavata dal "paradosso di Fechner". Se l'occhio umano viene stimolato da una sorgente di modesta intensità, esso avrà una certa sensazione luminosa e la pupilla si restringerà; aggiungendo un'altra sorgente di intensità ancora più debole, a una certa distanza dalla prima in modo che vada a stimolare una differente regione

³⁹ La tecnica da lui adottata consiste essenzialmente nel proiettare un piccolo fascio di luce sull'occhio e nel misurare successivamente, per mezzo di una fotocellula molto sensibile, la quantità di luce riflessa dall'occhio, potendo dimostrare la modifica cromatica del fotopigmento durante l'adattamento dell'occhio.

⁴⁰ R. L. Gregory: *Occhio e Cervello: la psicologia della vista*, Il Saggiatore, Milano 1966.

della retina, la pupilla non si restringe ulteriormente, come ci si potrebbe aspettare, ma piuttosto si dilata con un'apertura che può essere messa in rapporto ad una intensità di luce intermedia tra quella della prima e quella della seconda sorgente di luce, adattandosi evidentemente, non alla illuminazione totale, ma a quella media, in virtù di un meccanismo retinico di cui s'ignora il funzionamento.

Se si chiude un occhio la sensazione luminosa non varia, cioè praticamente non v'è alcuna differenza sia che uno solo, o tutti e due gli occhi contemporaneamente, ricevano lo stimolo.

Ma le cose vanno diversamente nel caso delle piccole luci di debole intensità viste in un ambiente oscuro: in queste condizioni la sensazione luminosa risultare molto più evidente se si guarda con entrambi gli occhi anziché con un occhio solo. Anche le ragioni di questo fenomeno sono ancora sconosciute. La sensazione luminosa è inoltre condizionata dal colore.

Se sui nostri occhi arrivano contemporaneamente delle luci di colore diverso, ma di uguale intensità, la zona intermedia dello spettro risultare più brillante rispetto a quelle periferiche, come dimostra dalla curva di luminosità dello spettro.

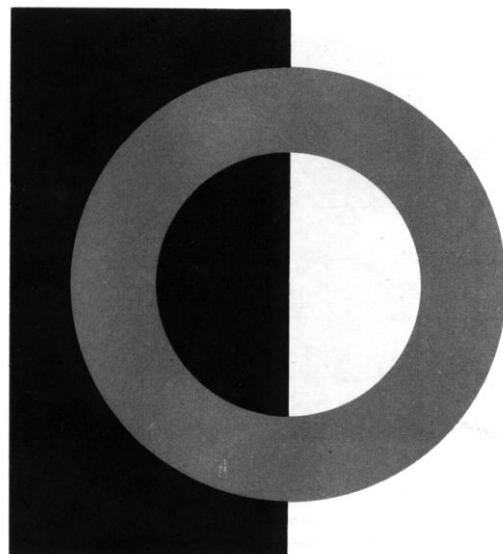


Figura 144: Contrasto luminoso

Questo fatto ha una certa importanza pratica perché un segnale di pericolo, per risultare chiaramente visibile, dovrebbe essere di un colore appartenente alla zona intermedia dello spettro cui l'occhio è particolarmente sensibile.

Mediante le *Griglie di Hermann* è possibile comprendere i fenomeni legati al contrasto nelle quali delle strisce bianche perpendicolari tra loro poste in uno sfondo nero in corrispondenza degli incroci determinano una depressione luminosa per cui si crea la sensazione di una macchia grigia.

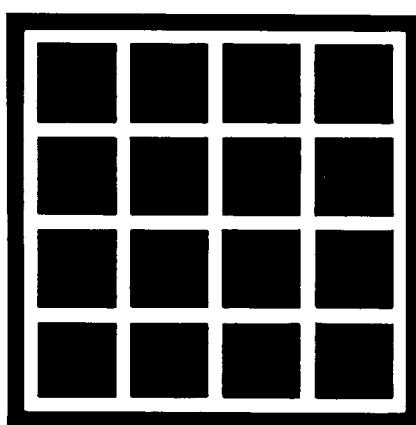


Figura 145: La Griglia di Hermann

La valutazione dell'indice di contrasto è basata sulla differenza relativa delle luminanze fra due parti di un campo visivo e valutare quindi la situazione più confortevole:

in senso soggettivo: valutazione della differenza dell'aspetto di due zone del campo di visivo viste simultaneamente o successivamente;

in senso oggettivo: valore della grandezza definita per stabilire una correlazione con la valutazione soggettiva del contrasto, generalmente espressa mediante formule basate sulla luminanza dominante dello sfondo (L_1), ad esempio una pagina bianca, e dell'oggetto (L_2), ad esempio i caratteri sulla pagina, visti simultaneamente:

$$C = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \quad [144]$$

Quando i valori di luminanza delle zone considerate sono diversi ma di ordine comparabile, si può definire un valore medio espresso dalla seguente relazione:

$$C = \frac{L_2 - L_1}{0,5(L_2 + L_1)} \quad [145]$$

Da quanto in precedenza descritto si evince come grandi riduzioni di luminosità possano causare una forte riduzione nella costanza del contrasto.

Appare infatti evidente come indici di contrasto tendenti a zero, la visione tende a non essere nitida; viceversa elevati valori dello stesso ne migliorano le condizioni di visibilità. L'indice di contrasto viene quindi penalizzato dall'abbagliamento, dai riflessi disturbanti, dalla errata dislocazione della fonte luminosa e dai bassi livelli di illuminamento.

Ritornando alla *Griglia di Hermann*, a livelli di illuminazione molto bassi, i quadratini posti nella parte inferiore della griglia appaiono più chiari. Questo spiega il motivo per cui una superficie bianca appare più grande di una scura.

15.2.4. LA BRILLANZA

Attributo della sensazione visiva secondo il quale un'area appare emettere, trasmettere e riflettere radiazioni visibili e rappresenta il corrispondente soggettivo della luminanza.

Nelle condizioni di tutti i giorni, in cui si verificano bruschi sbalzi di illuminazione, l'adattamento alla luce è sufficiente veloce da assicurare la costanza della percezione: un muro bianco in un giorno d'estate o in uno d'inverno, presenta sempre la stessa luminosità, benché la quantità di illuminazione sia molto differente.

Interviene a questo punto la luminosità di una sorgente o sua brillantezza soggettiva, che è funzione sia della luminanza della sorgente che dello stato di adattamento della retina di chi osserva.

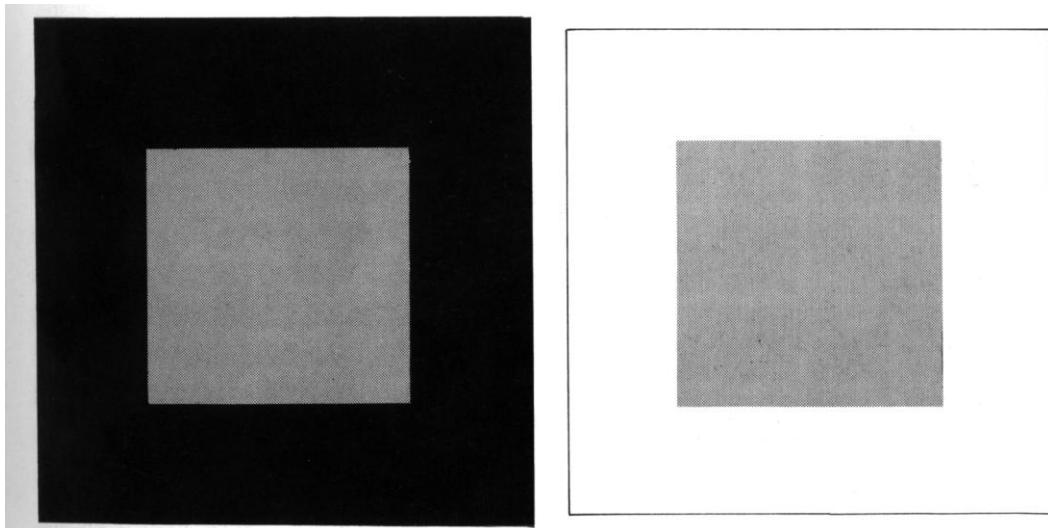


Figura 146: Esempi di brillanza

La luminosità di uno stimolo dipende anche dagli altri oggetti che gli sono vicini e dallo sfondo sul quale sono posti.

In genere un oggetto che riflette una minore percentuale di luce rispetto ad altri ci appare scuro, grigio o addirittura nero, mentre può apparirci bianco se gli altri elementi dello spazio riflettono ancora meno luce di esso.

Attraverso l'induzione di luminosità e di contrasto si possono creare delle *sensazioni di bordo* la quale può essere considerata come l'aspetto psicofisico più importante per il riconoscimento degli oggetti. Tale fenomeno è visibile chiaramente con le *bande di Mach*. Tale esperimento consiste nell'accostare tre bande contigue di cui una è più luminosa dell'altra.

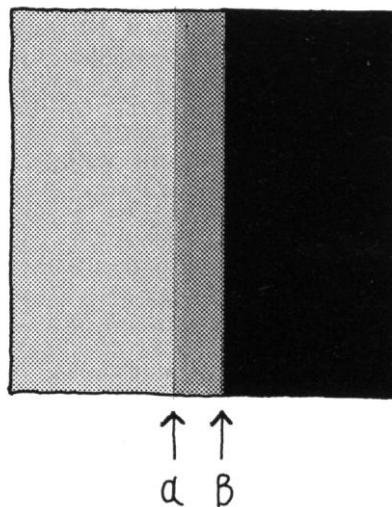


Figura 147: Le Bande di Mach

15.2.5. L'ABBAGLIAMENTO VISIVO

Si definisce abbagliamento la condizione che genera fastidio e riduce la capacità di distinguere gli oggetti, ed ancora quella condizione che provoca ambedue gli effetti, in conseguenza di una distribuzione o di un livello inadeguati della luminanza o di contrasti eccessivi nel campo visivo⁴¹.

Si usa quindi sintetizzare nel termine abbagliamento il complesso dei fenomeni di disconfort aventi come origine una cattiva distribuzione delle luminanze nel campo visivo.

Nella sua forma più leggera si riduce ad attirare l'attenzione dell'osservatore verso la zona di maggiore luminanza; in un grado appena più intenso può produrre una sensazione più o meno forte di disagio che, prolungata nel tempo, provoca un fenomeno di fatica; nelle forme più gravi determina un abbassamento generale anche se temporaneo della visibilità.

Holladay ha proposto un modello per esprimere l'abbagliamento che determina un abbassamento temporaneo e transitorio della visibilità, denominato *disability glare*⁴² o *abbagliamento simultaneo o perturbante*, il quale si manifesta con effetto simile a quello derivante dalla interposizione tra il campo visivo e l'osservatore di un velo luminoso - *velino glare* - dovuto in parte alla diffusione della luce nell'occhio e in parte a situazioni di origine fisiologica a seguito di una interazione fra i canali nervosi⁴³.

Holladay ha inoltre espresso tale abbagliamento con la seguente relazione:

⁴¹ Si definisce *campo visivo* la superficie o estensione di uno spazio fisico che l'occhio vede fisso in una direzione assegnata; il *compito visivo* è invece l'oggetto della visione.

⁴² L'abbagliamento che produce una diminuzione di visibilità è definito *disability glare* o abbagliamento simultaneo o perturbante. Il vocabolario CIE lo definisce: *Abbagliamento che turba la visione senza causare necessariamente una sensazione gradevole*".

⁴³ L'abbagliamento simultaneo è dovuto alla coesistenza di luminanze molto differenti in termini di intensità come ad esempio il faro dell'automobile in piena notte.

$$L \cdot K \frac{E n}{\angle} \quad [146]$$

dove:

L = luminanza di velo, cioè di un campo periferico uniforme che produce la stessa perturbazione dell'abbagliamento in questione ed è espressa in cd/m^2 .

E = l'illuminamento sulla pupilla prodotto dalla sorgente abbagliante, in lux con K ed n costanti.

\angle = angolo formato dalla direzione dello sguardo con il raggio proveniente dalla sorgente abbagliante.

Oltre all'abbagliamento perturbatore esiste un'altra forma di abbagliamento definito *discomfort glare*⁴⁴ o non confortevole espresso da:

$$G = \frac{m L_s^b}{L_f^t} \quad [147]$$

dove:

m = angolo solido sotto cui è vista la sorgente;

L_s = luminanza della sorgente;

b = l'angolo tra la direzione della sorgente e quella dello sguardo, detto indice di posizione;

L_f = luminanza del fondo;

m, b, t : esponenti variabili a seconda delle condizioni sperimentali.

Secondo due studiosi *Petherbridge* e *Hopkinson* sono stati definiti i seguenti valori del fattore di abbagliamento:

G=3000	l'abbagliamento è considerato intollerabile
G=600	l'abbagliamento è considerato fastidioso
G=120	l'abbagliamento è considerato sopportabile
G=24	l'abbagliamento è considerato impercettibile

Tabella 32: Valori dell'indice di abbagliamento

Dopo la soppressione dell'abbagliamento sopravvengono dei fenomeni che vanno dalla comparsa iniziale di un buco nero ad un successivo e graduale recupero delle capacità visive che corrisponde ad una rigenerazione dei pigmenti retinici valutabile intorno ai 15 secondi.

I valori dell'abbagliamento perturbante e confortevole in precedenza esposti non devono essere considerati come una vera e propria misura dell'effetto prodotto, ma ne rappresentano esclusivamente un termine indicativo.

La difficoltà di uso di tali formule ha indotto gli studiosi ad usare regole più semplici ed empiriche come quella di considerare la luminanza della sorgente e la luminanza media del campo visivo in un rapporto compreso tra 1/5 e 1/10. Di recente è stato introdotto *contrast rendering factor CRF*, proposto dalla CIE 29/2, con il quale è possibile valutare in modo esauriente le caratteristiche di comfort visivo di un ambiente e di conseguenza l'assenza di fenomeni di abbagliamento che impediscono o limitano la visibilità del compito visivo.

15.2.6. FATTORE DI RESA DEL CONTRASTO

Il *contrast rendering factor* (*fattore di resa del contrasto*) è un parametro che individua il rapporto fra il contrasto misurato nella situazione progettata ed il contrasto di riferimento che equivale ad una situazione di totale diffusione della luce con livelli di illuminamento uniformi in un ambiente semisferico. Tale parametro si individua con la seguente espressione:

⁴⁴ Il vocabolario internazionale CIE lo definisce: Abbagliamento che produce una sensazione sgradevole senza necessariamente disturbare la visione.

$$\text{CRF} = C/C_r \quad [148]$$

dove:

C = Contrasto realizzato;

C_r = Contrasto di riferimento pari a 0,91.

Appare evidente dalla precedente espressione come il massimo comfort visivo si ottiene con valori del CRF superiori od uguali ad 1.

Parametro correlato al CRF è la riduzione del contrasto di luminanza R parametro facile da rilevare con un misuratore di contrasto e che consente una rapida valutazione del CRF.

La norma UNI 10530 definisce inoltre l'abbagliamento da luce riflessa come:

abbagliamento prodotto dalla riflessione di oggetti luminosi, soprattutto se l'immagine appare nella direzione dell'oggetto osservato o vicino ad essa.

15.2.7. L'ACUITÀ VISIVA

Qualitativamente: capacità di percepire nitidamente oggetti o dettagli di oggetti, molto vicini tra loro;

Quantitativamente: Reciproco del valore (generalmente espresso in minuti di grado) della separazione angolare di due oggetti vicini (punti e linee) che l'occhio può appena vedere separati.

Considerando che l'immagine retinica è costituita da una distribuzione disuniforme e discontinua di illuminamento, dovuto al potere riflessivo delle superfici degli oggetti, si può definire l'acuità visiva come il rapporto tra le caratteristiche fisiche dei corpi e la distribuzione retinica dell'energia riflessa che ne determina l'immagine.

E' da precisare inoltre che la diversa distribuzione dei *coni* e dei *bastoncelli* nella retina e la loro diversa convergenza in cellule monopolari per i primi e bipolari per i secondi, ci permette di affermare che la periferia retinica presenta una bassa capacità di discriminazione, che cresce man mano che dalla periferia ci si sposta verso la fovea centrale dove è presente il massimo addensamento di coni.

Bisogna precisare che le dimensioni dell'immagine retinica non dipendono dalle dimensioni assolute dell'oggetto ma dall'angolo di visuale sotteso dall'oggetto ai punti nodali dell'occhio. Si valuteranno quindi in radianti le dimensioni dell'oggetto e dell'immagine retinica. L'occhio umano deve essere capace di discriminare i dettagli ed in particolare.

la più piccola superficie percepibile o il minimo visibile: da semplici esperimenti è possibile rilevare che passando dall'osservazione di un punto scuro presentato su uno sfondo chiaro ad una retta nera la dimensione angolare si riduce a vantaggio della discriminazione visiva.

il più piccolo intervallo tra due linee o acuità di Vernier: è la misura dell'angolo che separa due linee. Tale valore cresce lievemente passando da linee verticali a linee disposte in orizzontale. Tale differenza è di origine psicovisiva: la verticalità è più agevole da discriminare.

la più piccola distanza visibile tra due punti: essendo la più facile da esaminare, è quella utilizzata nella pratica per indagare l'acuità visiva. Essa è il reciproco della distanza angolare che deve separare alcuni oggetti perché possano essere visti come distinti. Molti fattori, oltre alla dimensione angolare dell'oggetto, ne influenzano il suo riconoscimento. Grande importanza hanno infatti la sua luminosità, la luminosità dello sfondo, il contrasto e la forma.

Sulla base delle superiori premesse bisogna distinguere tre tipi fondamentali di acuità visiva: di *rivelazione*, di *risoluzione* e di *localizzazione*.

Ricordando infatti che la sensazione visiva è legata fondamentalmente al contrasto tra due luminanze, il sistema visivo è in grado di discernere due sensazioni diverse, se esiste una determinata variazione percentuale di illuminamento. Pertanto la rivelazione di piccoli oggetti (punti o linee) è legata alla variazione percentuale che esse determinano in relazione all'illuminamento ambientale.

Risulta evidente che distinguere particolari oggetti è più difficoltoso in un ambiente assai illuminato (spazi fortemente illuminati dalla luce solare) che in una stanza con una lampada accesa. Se si considerano dei piccoli punti luminosi si avrà un'immagine retinica di dimensioni maggiori delle reali

per effetto di quella che viene denominata diffrazione⁴⁵. La capacità che ha l'occhio di distinguere due sorgenti puntiformi o due particolari di un oggetto viene definito invece acuità visiva di *risoluzione*.

Misurazioni dell'acuità visiva di risoluzione danno valori medi di circa $4,6 \cdot 10^{-4}$ rad⁴⁶, valore questo dovuto, secondo le teorie di Helmholtz, alla distribuzione spaziale dei ricettori *foveali*.

Secondo tale teoria due punti determinano una visione separata, se le energie luminose delle loro immagini retiniche interessano due coni distinti non contigui, separati da almeno un fotorecettore non sensibilizzato.

Se si valuta invece la capacità di determinare la posizione relativa di due linee verticali, tra loro separate in senso orizzontale si fa riferimento all'acuità visiva di localizzazione, con la quale si ottengono i valori minimi di circa $2 \cdot 10^{-10}$ rad, per cui si suole parlare *iperacutezza* visiva.

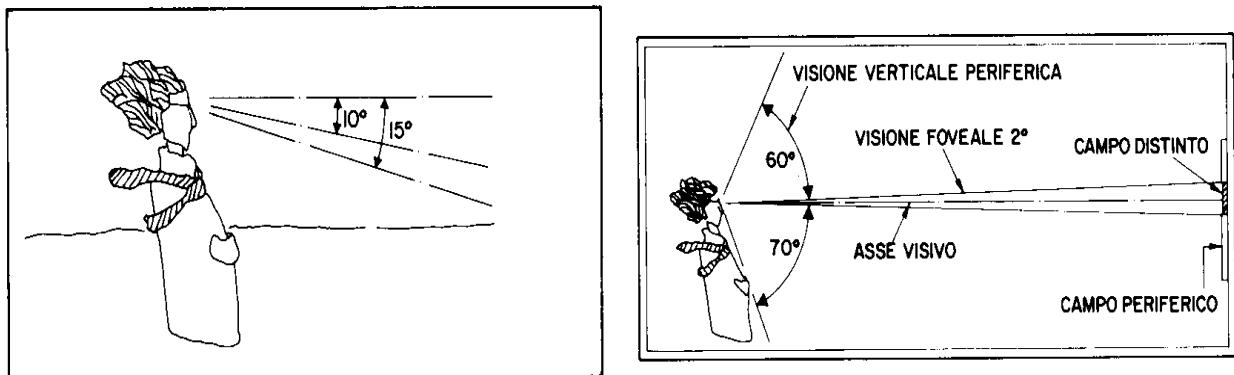


Figura 148: Acuità visiva

L'acuità visiva è fortemente condizionata dall'estensione della visione. Dai precedenti disegni appare infatti evidente come per una persona in piedi l'estensione della visione verticale periferica è di 60° verso l'alto e di 70° verso il basso; in condizione di rilassamento l'asse visivo risulta inclinato verso il basso di 10° (per persone in piedi) o di 15° (per persone sedute).

La visione distinta è limitata dalle dimensioni della *fovea*; mentre la retina copre un angolo visivo di un centinaio di gradi, la fovea sottende un *angolo di soli 2°* .

Pertanto, per percepire i dettagli di un compito visivo esteso le *fovee* di entrambi gli occhi si devono muovere. Se la misura degli oggetti è elevata l'illuminamento può essere ridotto; ad esempio, in una aula scolastica, avvicinarsi di un metro verso la lavagna può corrispondere, in termini di miglioramento visivo, ad un incremento di circa 30 volte il livello di illuminazione.

Ritornando alla percezione degli oggetti un punto più scuro dello sfondo viene infatti percepito solo a partire da un determinato valore di dimensione angolare. Il punto più luminoso dello sfondo invece, è sempre visto indipendentemente dalla sua grandezza spaziale, perché il rapporto da luminanza *oggetto-sfondo* eccede il valore di soglia.

L'acuità visiva tra due punti decade progressivamente quando la loro differenza di luminanza rispetto allo sfondo aumenta, a causa della diffusione della luce che non viene bilanciata sufficientemente dallo sfondo.

⁴⁵ Questo è quello che avviene quando ci si sofferma a guardare la volta celeste stellata.

⁴⁶ In casi eccezionali sono stati riscontrati valori di acuità visiva di risoluzione di circa $2 \cdot 10^{-4}$ rad, che non possono essere spiegate secondo la teoria di Helmholtz, ma tuttavia superiori alla risoluzione energetica delle immagini di diffrazione considerata.

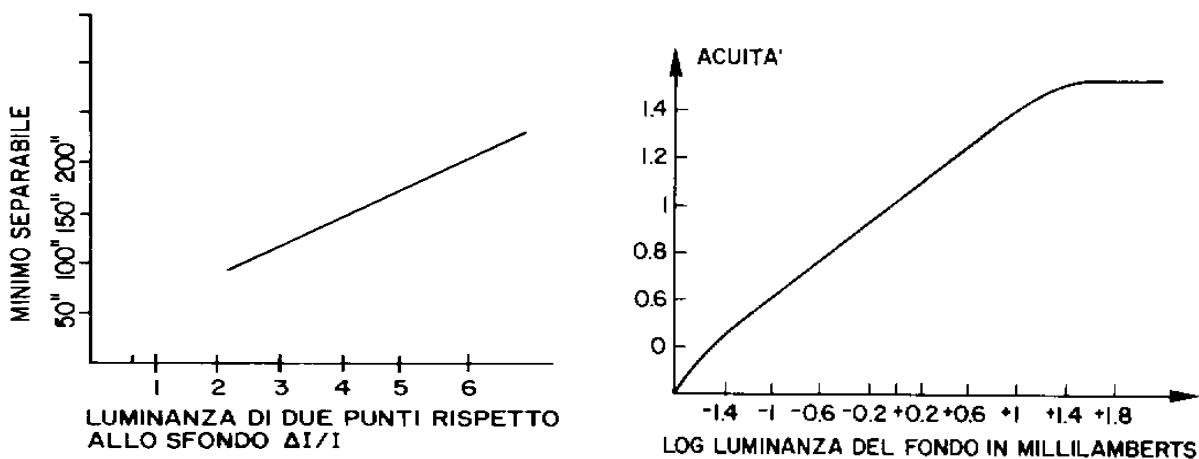


Figura 149: Acuità visiva in funzione della luminanza

Il metodo più semplice per ridurre il deterioramento della acuità visiva per effetto della diffusione della luce è quello di aumentare l'intensità dello sfondo, almeno quando le mire sono più luminose dello sfondo, mentre la migliore acuità visiva si ottiene quando la luminanza dell'ambiente, che rappresenta quella del campo che circonda lo sfondo, risulta uguale a quella del fondo.

Appare evidente come molti fattori, oltre alla dimensione angolare dell'oggetto, ne influenzano il suo riconoscimento quali: la sua luminosità, la luminosità dello sfondo, il contrasto e la forma.

15.2.8. OGGETTI IN MOVIMENTO E TEMPO NECESSARIO PER LA VISIONE

La percezione di un oggetto in movimento richiede uno spostamento dell'immagine dell'oggetto sulla retina. La periferia della retina presenta un'acuità visiva limitata ma e più sensibile al movimento.

Gli oggetti in movimento sono dunque meglio individuati, rispetto a quelli immobili, se osservati alla periferia del campo visivo. Questa sorta di segnale di avvertimento impegnava il globo oculare a ruotare nella direzione dell'oggetto osservato per riportarlo al centro della retina ed esaminarlo con maggior precisione. La precisione nella percezione dell'oggetto in movimento dipende dalle dimensioni, dalla forma, dal contrasto e dal tempo di osservazione. La visibilità di un oggetto in movimento può essere migliorata se lo si segue con lo sguardo per un tempo appropriato. Se la velocità del movimento attraverso il campo visivo è elevata e/o la traiettoria è irregolare, la visibilità peggiora rapidamente.

La velocità o il tempo di percezione non deve riguardare esclusivamente oggetti in movimento ma anche e soprattutto compiti visivi di tipo fisso.

Essendo il compito visivo un'attività percettiva strettamente collegata ad un determinato lavoro da svolgere in un certo tempo, occorre armonizzare la velocità di esecuzione dell'operazione lavorativa alla velocità di percezione dell'individuo. Per ottenere tale risultato occorre una adeguata illuminazione. Infatti la velocità di risposta percettiva, intesa come il tempo che occorre fra l'atto della percezione di un oggetto e la risposta operativa, è di circa 0,18 secondi a 500 lux ed aumenta notevolmente al diminuire dell'illuminazione già da 150 lux.

15.2.9. POSIZIONE DELL'IMMAGINE SULLA RETINA

Con riferimento alle caratteristiche fisiologiche dell'occhio, trattate nei capitoli precedenti, l'acuità visiva diminuisce rapidamente quando l'immagine dell'oggetto osservato non cade nella parte centrale della retina (*forea centralis*). Per compiti che richiedono il riconoscimento di ciascun dettaglio, il sistema visivo funziona con la massima efficacia quando l'oggetto da osservare è situato sulla linea principale di vista e la sua immagine si forma sulla parte centrale della retina.

Il movimento e lo sfarfallamento sono più facilmente rilevabili alla periferia del campo visivo.

L'immagine di un oggetto una volta percepito dall'occhio viene elaborata ed interpretata dal cervello il quale possiede una notevole capacità organizzativa; infatti i vari elementi che costituiscono lo spazio tendono ad essere riuniti in gruppi sulla base di determinati schemi quali:

La legge della vicinanza: Considerando un compito costituito da una serie di punti neri disposti secondo linee orizzontali e verticali le parti più vicine di tale sistema percettivo si organizzano nella formazione di un margine dando luogo a delle unità figurali.

La legge della somiglianza: gli elementi uguali di un compito visivo tendono a raggrupparsi in figure.

La legge di chiusura: le regioni delimitate da margini chiusi tendono ad essere percepite più facilmente di quelle con contorni aperti od incompleti.

15.3. IL SENSO MORFOLOGICO

Particolare importanza riveste il rapporto tra lo sfondo e l'oggetto che può dar luogo a delle ambiguità di interpretazione comunemente.

Le percezioni sono in alcuni casi soggette ad errori capaci di far apparire reale il mondo creato dalla fantasia e ciò accade quando la materia percettiva non appare in alcun modo legata allo stimolo sensoriale.

In questo ultimo caso si manifesta quella che viene comunemente detta *illusione*.

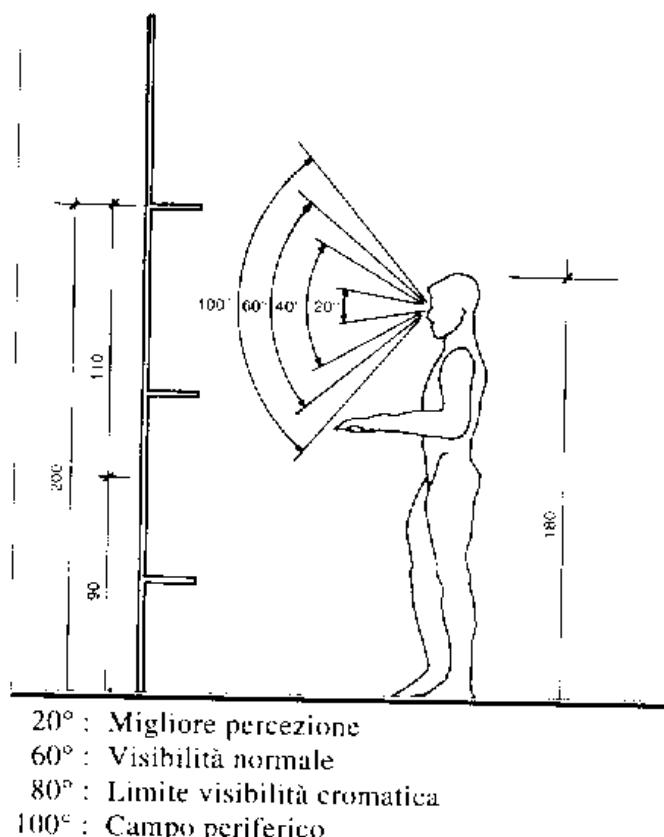


Figura 150: Posizione dell'immagine ed acuità visiva

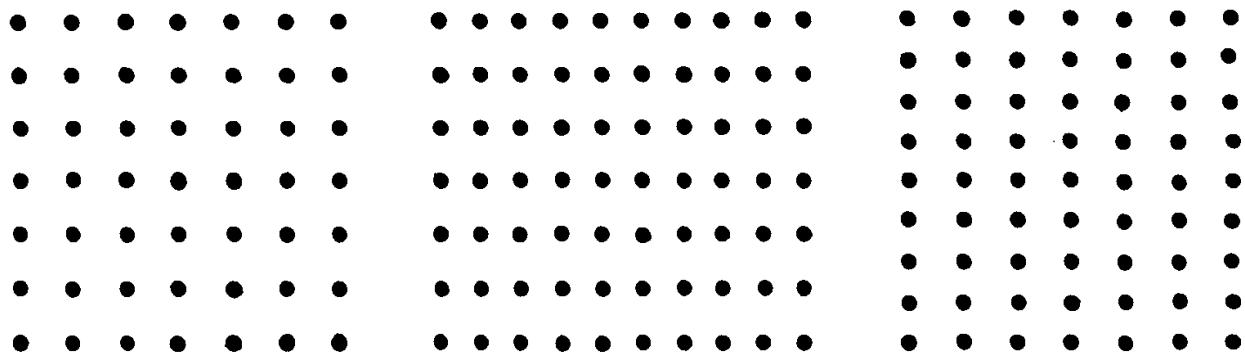


Figura 151: Legge della vicinanza

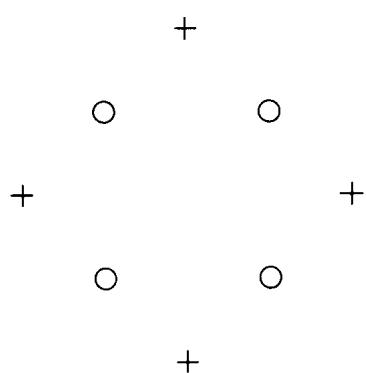


Figura 152: Legge della somiglianza

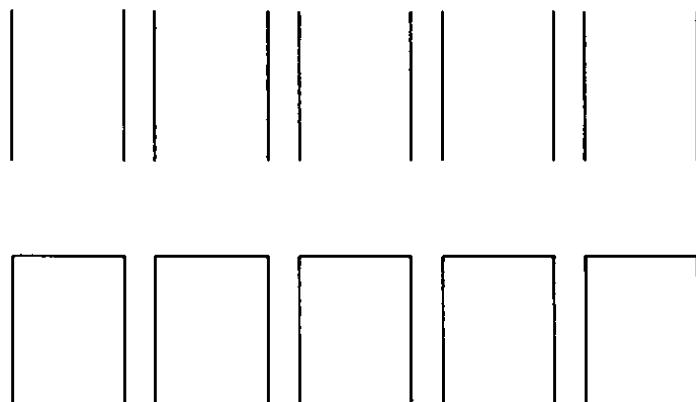


Figura 153: Legge della chiusura

Per concludere bisogna inoltre considerare l'attitudine del cervello ad unificare in una sola unità percettiva le parti che si muovono insieme in una stessa direzione ed ancora la capacità di organizzazione percettiva al fine di ottenere la massima omogeneità del compito visivo.

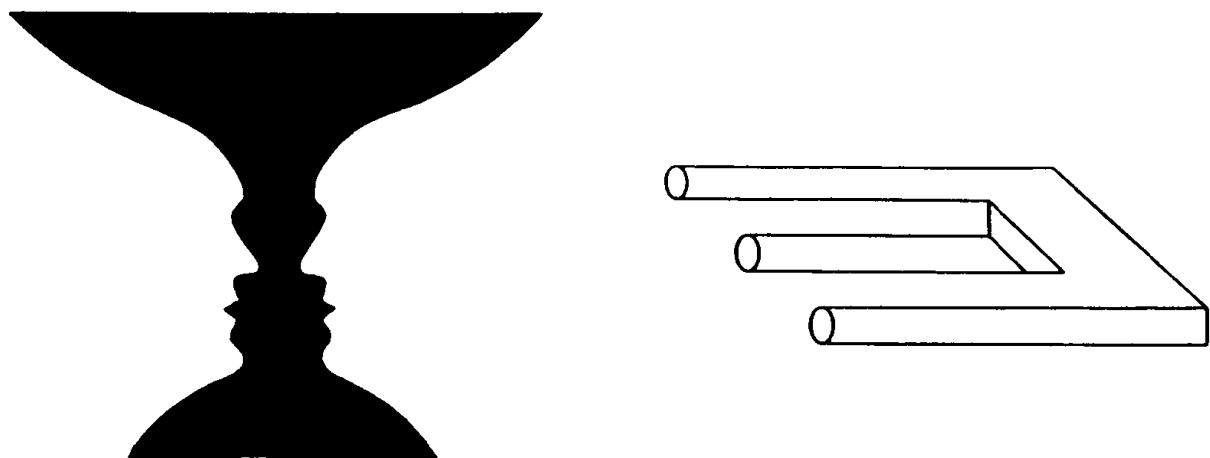


Figura 154: Esempi di illusione ottica

15.4. IL COLORE

Il colore è una qualità degli oggetti ma è anche funzione della luce che li illumina. Ogni corpo ha un fattore di assorbimento, di riflessione e di trasmissione variabile in funzione della lunghezza d'onda.

Ne consegue che se lo si illumina con una luce bianca (che è la somma di tutte le componenti cromatiche visibili) allora il corpo riflette una radiazione che dipende dalle proprie caratteristiche.

Se, ad esempio, il corpo non assorbe la lunghezza d'onda corrispondente al verde ma assorbe tutte le altre allora la luce riflessa è verde e noi attribuiremo il colore verde al corpo.

Se, però, la luce illuminante è solo monocromatica e di colore giallo allora il corpo non può apparire verde perché il verde non è presente nella radiazione originaria; esso appare, in questo caso, nero. Il colore si caratterizza per le seguenti tre qualità:

Tono o Tinta: è dato dalla lunghezza d'onda dominante e quindi individua il colore fondamentale con cui viene visto un oggetto;

Purezza o Saturazione: è la vivacità del colore che quindi si differenzia dalla visione del grigio;

Luminanza o Luminosità: esprime l'intensità luminosa nella direzione della visione. In relazione all'impiego della luce naturale per l'illuminazione degli interni il colore interviene come elemento modificatore e condizionatore del comfort visivo dell'utente.

Infatti lo stimolo originario (o luce incidente) qualora venga condizionato per trasparenza o riflessione da una superficie colorata, causa una reazione *psico-fisiologica*, definita sensazione, dipendente dallo stimolo condizionato (luce secondaria che si ottiene quando parte dell'energia luminosa incidente è assorbita dalla superficie e solo una porzione di essa è trasmessa o riflessa selettivamente).

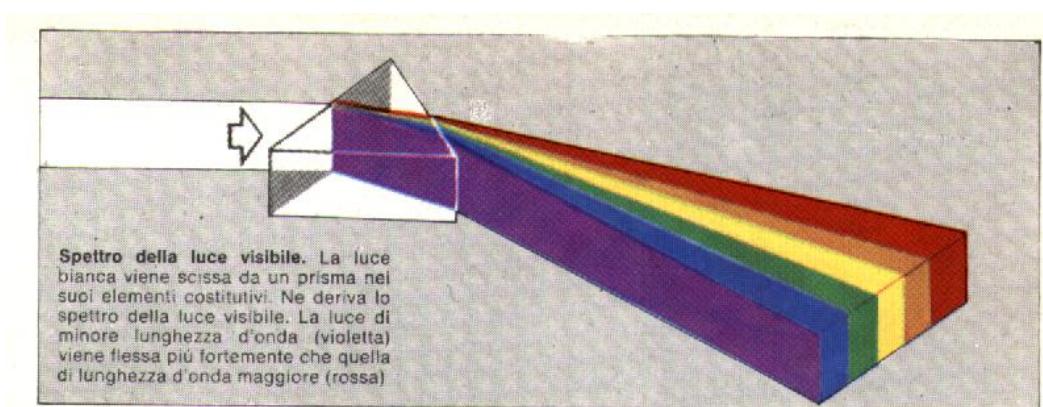


Figura 155: Spettro della luce visibile

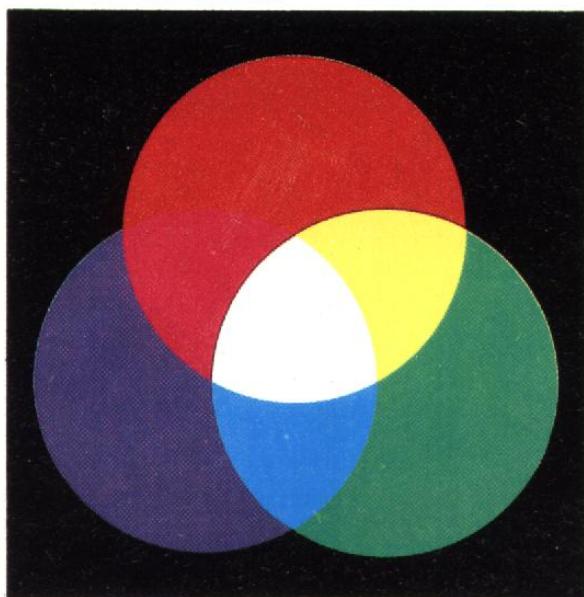
La norma UNI 10530 al punto 4.1.4 così definisce il colore:

Il colore è un attributo della luce che contribuisce all'osservazione ed alla percezione dell'ambiente. Tra gli attributi della luce esso è notoriamente il più utile per identificare rapidamente e agevolmente gli oggetti situati nello spazio di lavoro. La percezione e la discriminazione dei colori variano nelle diverse zone della retina; la capacità di discernere i colori è massima nella zona centrale della retina ed aumenta con l'illuminamento, almeno entro un limitato intervallo di valori. La qualità di "resa di colore" di una sorgente luminosa è determinata dalla composizione spettrale della luce emessa in rapporto alle caratteristiche spettrali della luce del giorno.

La percezione del colore è dovuta alla complessa interazione tra una sorgente luminosa, un oggetto, l'occhio e il cervello. Va fatta quindi una distinzione tra il colore come sensazione e il colore come lunghezza d'onda. La luce infatti non è colorata, ma è capace di generare, a seconda della lunghezza d'onda, le sensazioni della luminosità e del colore quando stimola gli occhi e un sistema nervoso dotati di particolare recettività. Un colore può essere ottenuto dalla mescolanza di tre colori diversi definiti come primari; in questo caso si parla di *sintesi additiva*⁴⁷. Dalla sintesi additiva dei colori primari (*blu + verde + rosso*) si ottiene il colore bianco. Dai tre colori fondamentali si derivano altri tre colori detti secondari o complementari (*ciano, magenta e giallo*): il giallo è complementare al blu; il magenta è complementare del verde; il ciano è complementare del rosso. Tali coppie di colore per *sintesi sottrattiva* producono il nero, per cui un colore può essere ottenuto sottraendo alla luce una parte dei suoi componenti. Essendo il colore una questione di percezione e di interpretazione soggettiva si è cercato di esprimere i colori in maniera univoca e senza fraintendimenti stabilizzando in sede normativa sia la struttura del fascio di radiazioni che la capacità sensitiva dell'occhio.

La CIE (*Commissione Internationale pour l'Eclairage*) a tal proposito ha introdotto un codice numerico internazionale (sistema CIE 1931) di notazione delle caratteristiche fisiche del colore mediante un sistema di coordinate che fa riferimento a tre colori fondamentali: X, Y, Z considerati come primari nella sintesi additiva. Il sistema CIE si basa sulla misurazione dei valori spettrofotometrici di un colore in tutte le lunghezze d'onda. I valori che risultano vanno confrontati con i valori dei tre colori primari (*rosso, verde e blu*); i dati che ne risultano rappresentano la quantità di colori primari necessaria per riprodurre quel determinato colore dello spettro. La somma dei dati relativi al rosso, verde e blu si chiama "*valore-tristimolo*" di un determinato colore e viene definito con le lettere X per il rosso, Y per il verde e Z per il blu.

SINTESI ADDITIVA



SINTESI SOTTRATTIVA

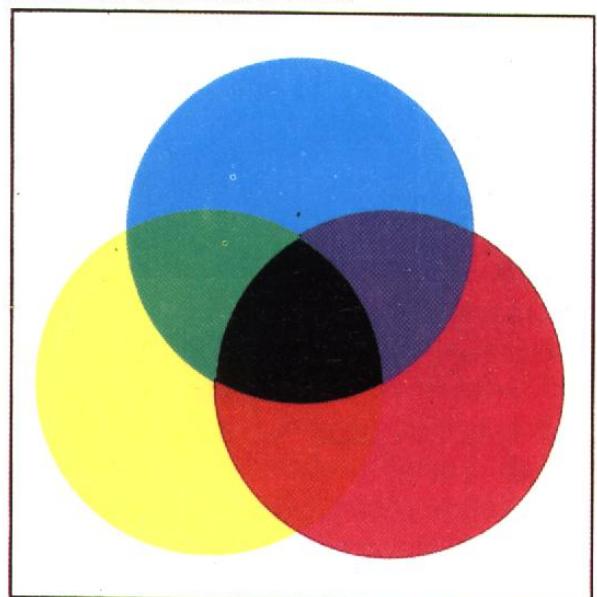


Figura 156: Sintesi additiva e sottrattiva dei colori

⁴⁷ E' questa la prima legge di Grassmann che è alla base della Colorimetria.

I valori *tristimolo* servono per calcolare le coordinate della *cromaticità* di un colore; tali coordinate rappresentano le percentuali relative di ciascun colore primario presente in un certo colore e il loro valore è indicato con lettere minuscole: x valori del rosso, y valori del verde e z valori del blu.

15.4.1. COLORIMETRIA

I tre colori fondamentali *rosso*, *verde* e *blu* non riescono a formare per semplice additività tutti i colori visibili ma occorre, in alcuni casi, andare in tricromia sottrattiva, cioè occorre togliere un colore fondamentale dagli altri due colori. Per evitare questo passaggio la CIE ha ipotizzato una costrizione fittizia dei colori mediante l'applicazione delle due **leggi di Grassmann**:

Se si sommano tre sorgenti di colore diverso si ottiene un nuovo colore che non è distinguibile dai componenti:

$$D = A + B + C$$

Se ciascuna sorgente viene variata di intensità anche il colore risultante varia la sua intensità e colore.

$$nD = nA + nB + nC$$

Il CIE ha stabilito di scegliere tre componenti cromatiche fittizie aventi andamento dato in Figura 157 e in valori frequenziali dati in Tabella 33.

Si osservino subito che le tre componenti sono **fittizie** e cioè non corrispondono a componenti reali, come erano invece il *rosso*, il *verde* e il *blu*. La componente Y è scelta in modo tale da coincidere con la curva di visibilità relativa. Inoltre la somma dei valori corrispondenti alle singole frequenze è pari a 21.37 per tutte e tre le componenti cromatiche.

Considerata la grandezza di stimolo $f(\lambda)$ (di solito L o R), applicando la seconda legge di Grassmann si hanno tre coordinate cromatiche:

$$X = \cos t f \quad \bar{X} \quad d \quad (149)$$

$$Y = \cos t f \quad \bar{y} \quad d \quad (150)$$

$$Z = \cos t f \quad \bar{z} \quad d \quad (151)$$

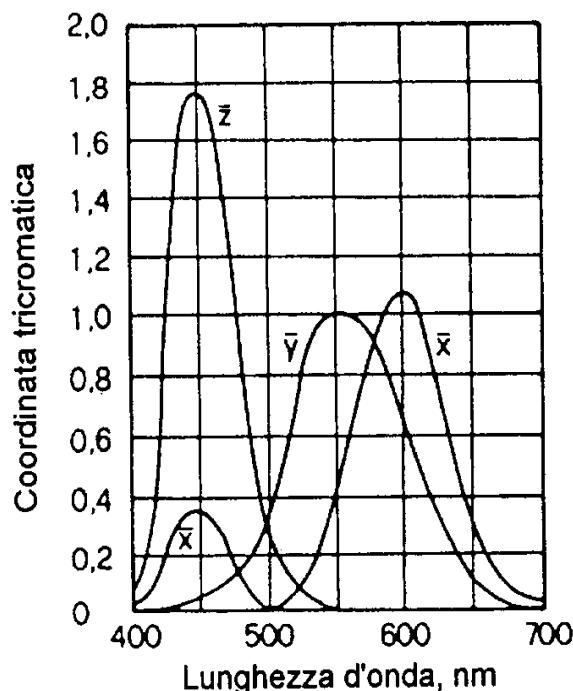


Figura 157: Componenti cromatiche X, Y e Z della CIE

λ	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	λ	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	λ	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
380	0,0014	0,0000	0,0065	525	0,1096	0,7932	0,0573	675	0,0636	0,0232	
385	0,0022	0,0001	0,0105	530	0,1655	0,8620	0,0422	680	0,0468	0,0170	
390	0,0042	0,0001	0,0201	535	0,2257	0,9149	0,0298	685	0,0329	0,0119	
395	0,0076	0,0002	0,0362	540	0,2904	0,9540	0,0203	690	0,0227	0,0082	
400	0,0143	0,0004	0,0679	545	0,3597	0,9802	0,0134	695	0,0158	0,0057	
405	0,0232	0,0006	0,1102	550	0,4334	0,9950	0,0087	700	0,0114	0,0041	
410	0,0435	0,0012	0,2074	555	0,5121	1,0002	0,0057	705	0,0081	0,0029	
415	0,0776	0,0022	0,3713	560	0,5945	0,9950	0,0039	710	0,0058	0,0021	
420	0,1344	0,0040	0,6456	565	0,6784	0,9786	0,0027	715	0,0041	0,0015	
425	0,2148	0,0073	1,0391	570	0,7621	0,9520	0,0021	720	0,0029	0,0010	
430	0,2839	0,0116	1,3858	575	0,8425	0,9154	0,0018	725	0,0020	0,0007	
435	0,3285	0,0168	1,6230	580	0,9163	0,8700	0,0017	730	0,0014	0,0005	
440	0,3483	0,0230	1,7471	585	0,9786	0,8163	0,0014	735	0,0010	0,0004	
445	0,3481	0,0298	1,7826	590	1,0263	0,7570	0,0011	740	0,0007	0,0003	
450	0,3362	0,0380	1,7721	595	1,0567	0,6949	0,0010	745	0,0005	0,0002	
455	0,3187	0,0480	1,7441	600	1,0622	0,6310	0,0008	750	0,0003	0,0001	
460	0,2908	0,0600	1,6692	605	1,0456	0,5668	0,0006	755	0,0002	0,0001	
465	0,2511	0,0739	1,5281	610	1,0026	0,5030	0,0003	760	0,0002	0,0001	
470	0,1954	0,0910	1,2876	615	0,9384	0,4412	0,0002	765	0,0001	0,0000	
475	0,1421	0,1126	1,0419	620	0,8544	0,3810	0,0002	770	0,0001	0,0000	
480	0,0956	0,1390	0,8130	625	0,7514	0,3210	0,0001	775	0,0001	0,0000	
485	0,0580	0,1693	0,6162	630	0,6424	0,2650	0,0000	780	0,0000	0,0000	
490	0,0320	0,2080	0,4652	640	0,4479	0,1750	0,0000				
495	0,0147	0,2586	0,3533	645	0,3608	0,1382	0,0000				
500	0,0049	0,3230	0,2720	650	0,2835	0,1070	0,0000				
505	0,0024	0,4073	0,2123	655	0,2187	0,0816					
510	0,0093	0,5030	0,1582	660	0,1649	0,0610					
515	0,0291	0,6082	0,1117	665	0,1212	0,0446					
520	0,0633	0,7100	0,0782	670	0,0874	0,0320					
								Σ	21,37	21,37	21,37

Tabella 33: Valori frequenziali delle componenti cromatiche

In forma discreta si possono sostituire gli integrali per ottenere le relazioni:

$$X \cos t f \bar{X}$$

$$Y \cos t f \bar{Y}$$

$$Z \cos t f \bar{Z}$$

che in forma normalizzata divengono:

$$x X/X Y Z \quad (152)$$

$$y Y/Y X Y Z \quad (153)$$

$$z Z/Z X Y Z \quad (154)$$

La forma normalizzata consente di riferirsi solamente a due componenti, x e y , ottenendo la terza, z , per complemento ad 1, cioè

$$z = 1 - (x + y) \quad (155)$$

Riportando in assi x e y i valori delle componenti cromatiche ottenute per i vari colori reali si ottiene una curva a campana. All'interno si hanno tutti i colori combinazione di più componenti cromatiche. Il diagramma cromatico CIE presenta una forma di tipo triangolare, devi Figura 158, nella quale le tre luci primarie sono poste ai vertici e si irradiano verso l'interno con intensità luminosa, fatta uguale ad 1. Lungo i lati del triangolo sono posti i colori ottenuti per miscela dei due colori situati alle estremità. I colori posti all'interno sono ottenuti invece per mescolanza. La quantità di rosso, verde e blu, presenti in un qualunque punto P sono espresse dal valore delle tre distanze di P dai corrispettivi lati del triangolo. Considerando inoltre che la somma delle tre coordinate di un punto qualsiasi è sempre uguale all'unità ed è quindi possibile dare i valori di due sole grandezze per dedurne la terza.

Considerando un punto P interno al diagramma CIE⁴⁸ il suo colore può essere ottenuto da una miscela di un colore monocromatico più il bianco di eguale energia (W). Per identificare tale colore basta unire P con W fino ad incontrare la linea dei corpi spettrali.

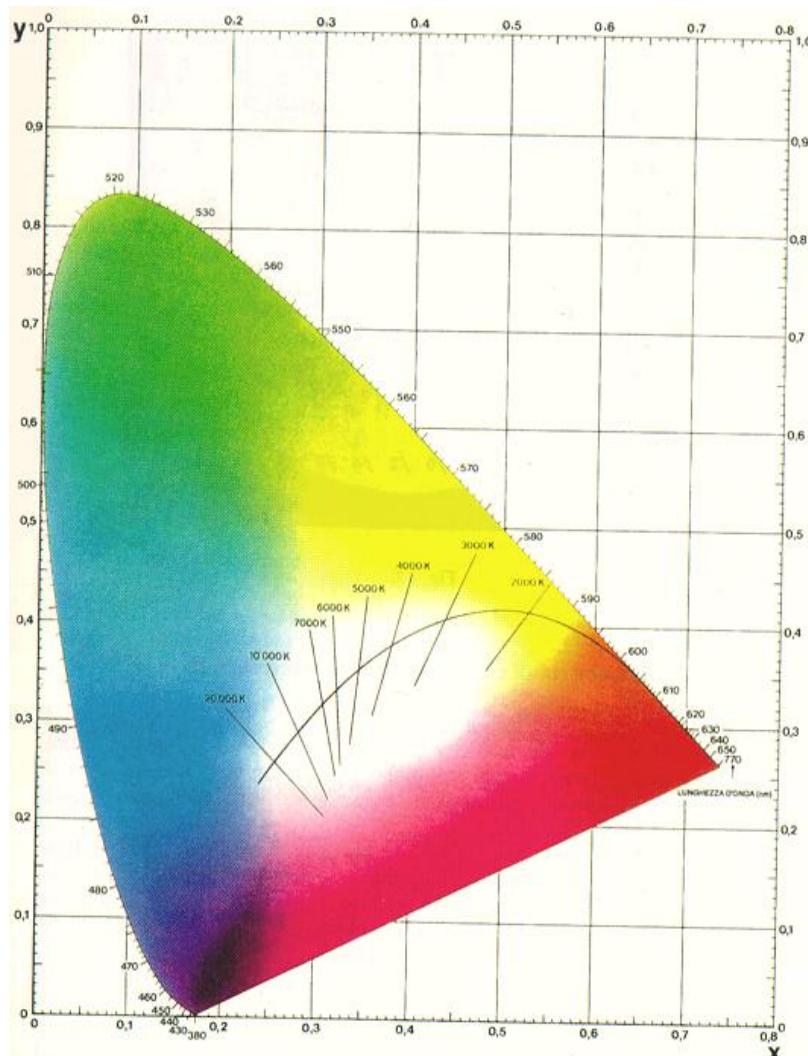


Figura 158: Il triangolo del colore

La lunghezza d'onda relativa a tale colore monocromatico, che miscolato in proporzioni opportune con W può dare luogo al colore P, si chiama *lunghezza d'onda dominante* (rappresentato dal punto D) ed il rapporto tra la luminosità del colore monocromatico incontrato sulla linea dei colori spettrali e la luminosità del colore miscolato P si chiama *fattore di energia*.

Tale fattore risulta sempre inferiore ad uno, salvo il caso in cui P coincide sulla linea dei colori spettrali e viene chiamato *colore puro* (monocromatico). In conclusione il punto P può identificarsi come intersezione della retta parallela all'asse delle ascisse e di ordinata y_p e della congiungente il punto D con W⁴⁹.

⁴⁸Tale diagramma gode di alcune proprietà alcune delle quali verranno di seguito citate.

Il punto W, a cui corrispondono le coordinate $x=y=z=0,333$ rappresenta il “bianco di eguale energia” o punto acromatico di riferimento. I punti della linea a campana rappresentano i colori spettrali o puri, corrispondenti alle lunghezze d'onda a fianco indicate. I punti del segmento che unisce W con un punto qualunque della curva a campana (linea VRG) indicano i colori di eguale tono di colore, e di saturazione via che il punto si avvicina a W. Nei corrispettivi colori non saturi, la lunghezza d'onda del colore saturo si chiama *lunghezza d'onda dominante*. Inoltre i punti che si trovano fuori dall'area limitata dalla curva a campana rappresentano la luce non visibile.

⁴⁹ La lunghezza d'onda dominante ed il fattore di purezza individuano un determinato colore.

L'aspetto cromatico non dipende soltanto dalla composizione spettrale della luce ma anche dalle caratteristiche della superficie osservata, dalla luminanza, dai contrasti di colore e dallo stato di adattamento cromatico⁵⁰. L'occhio è in grado di percepire differenze di colore tra due superfici adiacenti in condizioni di pari livello di luminanza.

L'occhio dell'uomo percepisce una relazione tra la lunghezza d'onda piuttosto che una percezione diretta di una singola lunghezza d'onda, perciò il rapporto tra i colori non varia con i cambiamenti dello spettro di colore della sorgente; l'occhio si adatta quindi ad un nuovo punto neutrale in maniera tale che il colore resta più o meno lo stesso.

Tale fenomeno è chiamato *costanza del colore*. Sorgenti di luce differenti possono influenzare la capacità di discriminazione tra alcuni colori. In particolari attività professionali l'aspetto dell'immagine colorata e la discriminazione tra i colori possono assumere una notevole importanza.

15.4.2. PLANCK'S LOCI

Se la funzione di stimolo è costituita dalla radiazione del corpo nero (Legge di Planck) allora possiamo calcolare le coordinate cromatiche per varie temperature di emissione mediante i seguenti passaggi:

$$X \quad {}^{780\text{nm}}_{380\text{nm}} \mathcal{W}(\) \quad \bar{X}(\) \quad d$$

$$Y \quad {}^{780\text{nm}}_{380\text{nm}} \mathcal{W}(\quad) \bar{Y}(\quad) d$$

$$Z \quad {}^{780\text{nm}}_{380\text{nm}} W(\) \bar{Z}(\) d$$

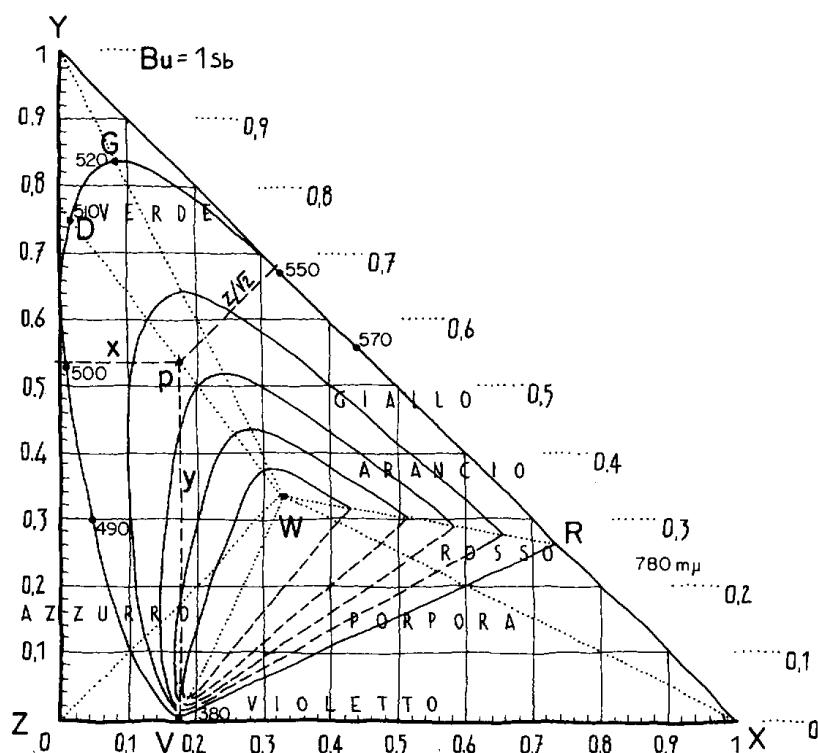


Figura 159: Diagramma cromatico CIE 1931

⁵⁰ Se si pongono davanti ad una sorgente luminosa due filtri di colore complementare questi non faranno passare la luce (sintesi sottrattiva); viceversa se si pongono questi due filtri davanti a due sorgenti luminose orientate verso lo stesso punto, questo punto sarà illuminato da una luce bianca (sintesi additiva). Se le superfici appaiono colorate ciò lo si deve al fatto che sono irradiate da fasci pancromatici, costituiti cioè da tutte le radiazioni dello spettro solare. L'intervento della superficie sulle radiazioni luminose consiste nel variarne la composizione spettrale mediante una riflessione selettiva. Ma anche la composizione spettrale della radiazione luminosa emessa dalla sorgente può alterare il fascio riflesso da una superficie, ed in questo caso si parla di azione selettiva della sorgente luminosa.

ove le funzioni $w(\lambda)$ sono la radiazione del corpo nero, legge di Planck:

$$w(\lambda) = \frac{C_1}{\pi} \frac{\frac{c_2}{\lambda^5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (156)$$

ove le costanti valgono:

$$c_1 = 3.742 \cdot 10^8 \quad , \quad c_2 = 1.439 \cdot 10^4$$

Il risultato dei calcoli porta a tracciare la curva (ben visibile in basso a destra del triangolo del colore in Figura 158) detta *Planck's Loci* che rappresenta il luogo delle coordinate cromatiche corrispondenti a ciascuna di emissione del corpo nero. Per gli emettitori radiativi (ad esempio per il filamento di una lampada) si suole indicare il colore di emissione mediante la temperatura del corpo nero corrispondente: **Temperatura dal Colore (TC)**. Il sole, ad esempio, ha una temperatura dal colore di circa 6000 K, mentre il filamento di una lampadina normale ha una TC di circa 2200 K e quello di una lampada allo iodio ha una TC di circa 2500 K.

Per i corpi non radiativi (ad esempio le lampade a luminescenza) si indica la **Temperatura del Colore Correlata (TCC)** come la temperatura del corpo nero che più si avvicina come tinta al colore desiderato. Nel triangolo del colore si hanno alcune linee guida che aiutano ad individuare la temperatura corrispondente. Per le lampade a luminescenza si parla di TCC variabile da 2800 K a 6500 K. In quest'ultimo caso si ha una luce bluastra. Si osservi che a temperatura ambiente il corpo nero apparirà nero, sarà rosso ad 800 K, giallo a 3000K, bianco caldo a 4000K, bianco freddo a 5000K e azzurro a 8000K.

Le sorgenti luminose che la CIE ha selezionato come sorgenti modello sono quelle definite:

“**A**” pari a 2854K (incandescenza normale),

“**B**” pari a 4870K (sorgente A più un filtro)

“**C**” pari a 6770K (sorgente A più un filtro).

Va precisato che la sorgente “**B**” è un modello che dovrebbe avvicinarsi al calore della luce naturale del mezzogiorno del centro Europa in primavera, mentre il modello “**C**” dovrebbe imitare la luce delle ore 12 con cielo coperto nella stessa situazione geografica e stagionale⁵¹.

L'escursione della temperatura di colore del sole è di 4000K, mentre per il cielo coperto il suo valore è di circa 20000K (da 7000 a 28000K). Tali valori sono di importanza fondamentale nei casi in cui si intende abbinare la luce artificiale a quella naturale⁵².

15.4.3. EFFETTO CROMATICO E INDICE DI RESA CROMATICA

Altro parametro importante della visione del colore è l'*effetto cromatico*. L'effetto cromatico di una superficie dipende sia dal suo colore effettivo che dal tipo di sorgente luminosa.

Si definisce *indice di resa cromatica* (IRC o CRI Colour Rendering Index) la misura di una sorgente luminosa di rendere i colori.

Inizialmente la CIE (1948) raccomandò un metodo per specificare le proprietà di resa del colore delle lampade dividendo lo spettro visibile in otto bande e confrontando la qualità della luce contenuta in ciascuna banda con quella contenuta nella banda corrispondente della sorgente di riferimento.

Con la CIE 1965-74 viene introdotto, per la classificazione delle sorgenti luminose, l'indice di resa generale del colore R_a .

⁵¹ Sopra i 5000K la luce artificiale è paragonata a quella naturale.

⁵² La miscelazione tra la luce naturale e quella artificiale è sempre possibile attuarla purché la curva spettrale delle lampade si armonizzi con quella della luce naturale. Per fare un esempio, se le ombre presenti in un ambiente non avranno colore unico, significherà che le luci (naturale ed artificiale) non si miscelano in modo coerente; per ovviare a tale inconveniente e compensare quindi l'elevata temperatura di colore della luce naturale si dovranno utilizzare lampade non più fredde di 5000K.

In questo metodo l'indice di resa cromatica è dato da un numero che esprime in percentuale il rapporto tra la definizione cromatica di otto colori campioni illuminati da una sorgente qualsiasi e la definizione degli stessi illuminati da una sorgente campione di riferimento CIE.

Tale indice è quindi calcolato come la media aritmetica degli spostamenti di resa colore relativi a ciascuno degli otto colori di prova secondo la seguente formula

$$R_a = \frac{100 - \bar{E}_{a,i}}{4,6} \quad [157]$$

dove $\bar{E}_{a,i}$ rappresenta lo spostamento di resa colore relativo ai colori prova. Con valori compresi tra 90 e 100 si ottiene una elevata resa cromatica.

16. LE GRANDEZZE FOTOMETRICHE DI RIFERIMENTO

La luce è l'energia radiante rilevata dall'osservatore umano attraverso le sensazioni visive che nascono dallo stimolo della retina dell'occhio. Fisicamente è una perturbazione che si propaga nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche.

L'illuminamento in un punto di una superficie, come già detto in precedenza, è il flusso luminoso ricevuto da un elemento infinitamente piccolo di superficie nell'intorno di un punto considerato, diviso per l'area dell'elemento stesso, altrimenti si parla di illuminamento medio o illuminazione media, per cui:

$$E = \frac{d}{dS} \quad [158]$$

espresso in *lux*, (*lumen per metro quadrato*).

Se la sorgente luminosa è puntiforme ed ha *l'intensità luminosa di una candela alla distanza di un metro*, si distribuisce su una superficie sferica di 1 m^2 l'illuminamento massimo di un lux.

$$E = \frac{I}{r^2} \quad [159]$$

dove:

I = intensità luminosa;

r = distanza normale tra la sorgente luminosa e la superficie illuminata.

L'illuminamento è spesso considerato una grandezza di riferimento per l'illuminotecnica e per la progettazione impiantistica. Questa grandezza è facile da misurare, concettualmente semplice e spesso preferita all'intensità e alla luminanza (che è poi la vera grandezza fisiologica di riferimento). Questo ha reso possibile la disponibilità di numerose norme (alcune invero vecchiette) e tabelle con valori di illuminamento caratteristici per dato *compito visivo*.

La normativa vigente (D.Lgs. 19 settembre 1994 n. 626, art. 10), con riferimento all'illuminazione naturale ed artificiale, così recita: *A meno che non sia richiesto diversamente dalle necessità della lavorazione e salvo che non si tratti di locali sotterranei, i locali devono essere convenientemente illuminati a luce naturale diretta... Per quanto riguarda l'intensità (si fa riferimento al livello di illuminamento medio), ove esigenze tecniche non ostino, devono essere assicurati i valori minimi seguenti:*

<i>per ambienti destinati a deposito di materiali grossi</i>	<i>10 lux</i>
<i>per passaggi, corridoi e scale</i>	<i>20 "</i>
<i>per lavori grossolani</i>	<i>40 "</i>
<i>per lavori di media finezza</i>	<i>100 "</i>
<i>per lavori fini</i>	<i>200 "</i>
<i>per lavori finissimi</i>	<i>300 "</i>

Tabella 34: Valori minimi di illuminazione consigliati

Per lavori di media finezza, fini e finissimi i suddetti valori possono essere conseguiti mediante sistemi di illuminazione localizzata sui singoli posti di lavoro; in tal caso si deve provvedere a che il livello medio di illuminazione generale dell'ambiente non sia inferiore ad un quinto di quello esistente nei posti di lavoro. La tabella seguente illustra l'illuminamento medio di esercizio E_n previsti per i vari tipi di locale adibiti ad uso civile ad uso civile⁵³, tonalità di colore, gruppo di resa del colore e classe di controllo dell'abbigliamento raccomandati per le varie applicazioni dalla norma UNI 10380, la quale mostra valori decisamente superiori rispetto a quelli proposti dalla vigente legislazione nazionale ed a parere dello scrivente più idonei per lo svolgimento delle varie attività all'interno dei locali.

⁵³ Per i valori descritti nella tabella seguente si fa riferimento alla norma italiana *illuminazione di interni con luce artificiale*, UNI 10380, maggio 1994.

INTERNI CIVILI

Tipo di locale, compito visivo o attività	Illuminazione di esercizio. Valore medio (lx)	Tonalità di colore	Resa di colore: R _a '	Classe di qualità per la limitazione dell'abbigliamento G
---	---	--------------------	----------------------------------	---

ABITAZIONI E ALBERGHI

zona di conversazione o di passaggio	50-100-150	W	1A	A
zona di lettura	200-300-500	W	1A	A
zona scrittura	300-500-750	W	1A	A
zona dei pasti	100-150-200	W	1A	A
cucina	200-300-500	W	1A	A
bagno, illuminazione generale	50-100-150	W	1A	B
bagno, zona specchio	200-300-500	W	1A	B
camere, illuminazione generale	50-100-150	W		B
camere, zone armadi	200-300-500	W	1A	B
camere letti	200-300-500	W	1A	B
camere, stiratura, cucina e rammendo	500-750-1000	W	1A	A

AMBIENTI COMUNI

aree di passaggio, corridoi	50-100-150	WI	2	D
scale, ascensori	100-150-200	WI	2	D
magazzini e depositi	100-150-200	WI	2	D

AMBIENTI SPORTIVI

bocce	300-500	I	1B	A
palestre	300-500	I	1B	A
piscine	300-500	I	1B	A
tennis, pallavolo	500-750	I	1B	A

AUDITORIUM

teatri e sala da concerto	50-100-150	WI	1B	B
Multiuso	150-200-300	WI	1B	B

BIBLIOTECHE

scaffalature (deposito)	150-200-300	WI	2	C
tavoli da lettura	300-500-750	WI	1B	B
banchi catalogazione e classificazione	200-300-500	WI	1B	B
Legatura	200-300-500	WI	2	B

Tabella 35: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbigliamento

Tipo di locale, compito visivo o attività	Illuminazione di esercizio (lux medio)	Tonalità di colore	Resa di colore Ra'	Classe qualità per limitazione abbigliamento G
---	--	--------------------	--------------------	--

CHIESE

ambiente generale, banchi	50-100-150	WIC	2	B
altare, pulpito	150-200-300	WIC	2	B

NEGOZI E MAGAZZINI

aree di circolazione	150-200-300	I	1B	B
esposizione merci	300-500-750	I	1B	B
vetrine	500-750-1000	WIC	1B	B

OSPEDALI

corsie, illuminazione generale	50-100-150	W	1A	A
corsie, esami	200-300-500	W	1A	A
corsie, lettura	150-200-300	W	1A	A
corsie, circolazione notturna	3-5-10	W	1A	-
locali per esami, illuminazione generale	300-500-750	W	1A	A
locali per esami, ispezioni	750-1000-1500	WI	1A	A
terapie intensive	200-300-500	W	1A	A
chirurgia, generale	illuminazione 500-750-1000	I	1A	A
chirurgia, localizzata	illuminazione 10000-30000-100000	IC	1A	A
sale autopsia, generale	illuminazione 500-750-1000	IC	1A	A
sale autopsia, localizzata	illuminazione 5000-10000-15000	IC	1A	A
laboratori e farmacie, illuminazione generale	300-500-750	IC	1A	A
laboratori farmacie, illuminazione localizzata	500-750-1000	IC	1A	A
locale per consulti, illuminazione generale	300-500-750	WI	1A	A
locale per consulti, illuminazione localizzata	500-750-1000	WI	1A	A

SCUOLE

classe, illuminazione generale	300-500-750	WI	1B	B
classe, lavagna	300-500-750	WI	1B	B
laboratori artistici e scientifici	500-750-1000	WIC	1B	B
aula universitarie, illuminazione generale	300-500-750	WI	1B	B
aula universitarie, lavagna	500-750-1000	WI	1B	B
aula universitarie, banchi per dimostrazioni	500-750-1000	WI	1B	B
laboratori officine e sale per l'istruzione d'arte	300-500-750	WI	1B	B
sale per assemblee	150-200-300	WI	1B	B

Tabella 36: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento

Tipo di locale, compito visivo o attività	Illuminazione di esercizio (lux medio)	Tonalità di colore	Resa di colore Ra'	Classe qualità limitazione abbagliamento G
---	--	--------------------	--------------------	--

UFFICI

uffici generici, dattilografia, sale computer	300-500-750	WI	1B	B
---	-------------	----	----	---

uffici per disegnatori e per 500-750-1000 progettazione	WI	1B	B
sale per riunioni	300-500-750	WI	1B

Tabella 37: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbigliamento

16.1. L'EMITTANZA LUMINOSA O RADIANZA

L'Emittanza luminosa o radianza rappresenta la densità del flusso luminoso emesso per unità di superficie. L'emittanza luminosa (M) è espressa in lumen/m²

$$M = \frac{d}{dS} \quad [160]$$

Come si nota la formula è la stessa dell'illuminamento ma la superficie considerata è quella emittente e non quella ricevente.

16.2. L'ESPOSIZIONE LUMINOSA

L'esposizione luminosa rappresenta i lumen che in un tempo determinato investono una superficie di area unitaria.

$$H = \frac{d}{dS} dt \quad [161]$$

oppure in funzione della quantità di luce l'esposizione luminosa diviene:

$$H = \frac{dQ}{dt} \quad [162]$$

dove Q si definisce quantità di luce ed esprime il prodotto del flusso luminoso per la sua durata:

$$Q = dt \quad [163]$$

16.3. COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO

E' indicato con α ed è il rapporto tra flusso luminoso assorbito da una superficie e flusso luminoso incidente.

16.4. COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE

E' indicato con r ed è il rapporto tra flusso luminoso riflesso da una superficie e flusso luminoso incidente. Per corpi opachi (non trasparenti) vale la relazione:

$$r = 1 - \alpha$$

16.5. VALORI DI R CONSIGLIATI PER LE SUPERFICI INTERNE DI UNA STANZA

Tipo di superficie	Fattore di riflessione
Soffitti	minimo 0.6
Pareti laterali	0.3 - 0.8
Pavimenti	0.2 - 0.4

Tabella 38: Fattori di riflessione consigliati

16.6. LE SORGENTI LUMINOSE

Le sorgenti luminose si possono dividere in:

Monocromatiche, quando l'energia luminosa è emessa con una sola lunghezza d'onda o con poche lunghezze comprese in una stretta banda.

Eterocromatiche, quando l'energia è emessa con poche lunghezze d'onda assai nettamente delimitate in una banda dello spettro.

Pancromatiche, quando l'energia è emessa attraverso varie lunghezze che occupano interamente lo spettro; è questo il caso della luce solare.

16.7. CLASSIFICAZIONE DELLE LAMPADE

Storicamente sono nate per prime le lampade ad incandescenza (Edison) e successivamente quelle a scarica nei gas.

Queste ultime raggruppano una grande famiglia di lampade e sono sempre caratterizzate da un fenomeno di emissione fotonica associato ad riassesto elettronico in atomi (che possono essere di Hg, Na, Ar) che vengono ionizzati per urto con particelle elementari o che, per effetto di urti anelastici, spostano elettroni da un livello ad un altro.

Ci sono due tipi di lampade:

Ad incandescenza, con filamento in tungsteno

Queste possono essere:

- a filamento sotto vuoto;
- a filamento con gas inerti (argon);
- a filamento a ciclo di alogen (iodio, bromo):
 - a tensione di rete;
 - a bassa tensione (6, 12, 24 V);

A scarica in gas

Queste possono essere:

- fluorescenti:
 - tubolari;
 - compatte;
- a vapori di mercurio ad alta pressione;
- a vapori di mercurio ad alta pressione con alogenuri (*metal halide*);
- a vapori di sodio a bassa pressione;
- a vapori di sodio ad alta pressione.

16.8. CARATTERIZZAZIONE DELLE LAMPADE

I principali parametri usati per caratterizzare una lampada sono i seguenti:

- *Flusso luminoso [lm]*: quantità di luce emessa per unità di tempo.
- *Efficienza luminosa [lm/W]*: rapporto tra flusso luminoso emesso e potenza elettrica assorbita.
- *Temperatura di colore [K]*: temperatura di un corpo nero che emette luce dello stesso colore della luce emessa dalla lampada.
- *Resa cromatica*: indice che indica quanto la lampada è capace di riprodurre fedelmente, in relazione alla luce naturale, i colori degli oggetti illuminati.
- *Durata media [h]*: numero di ore di funzionamento dopo il quale il 50% delle lampade di quel tipo ha smesso di funzionare.

In generale, per uno stesso tipo di lampada, alte efficienze energetiche si accompagnano a basse rese cromatiche e viceversa, come avviene in generale nelle lampade fluorescenti ove, a causa dello spettro di emissione a righe e dell'effetto di *luminescenza* si raggiungono efficienze elevate ma rese cromatiche basse.

Lampada	Efficienza luminosa lm/W	Temperatura di colore K	Resa cromatica %	Durata media ore
Incandescenza a filamento	10-17	2500	100	1000
Alogena	20-25	3190	100	1500-2000
Fluorescente bianco freddo	65-100	6500	62-98	5000
Fluorescente bianco caldo	62-96	3000	52-95	5000
Vaporì di mercurio alta pressione	70-83	5710	50-70	8-10000
Vaporì di mercurio con alogenuri	75-80	3720	60-80	5000
Sodio bassa pressione	80-200		< 20	8-10000
Sodio alta pressione	30-120	2500	30-80	6000

Tabella 39: Valori tipici dei parametri caratteristici per vari tipi di lampade

16.8.1. LAMPADE AD INCANDESCENZA

Queste lampade sono le più antiche: un filamento di tungsteno portato alla temperatura di circa 2000 K emette una luce giallo-rossastra.

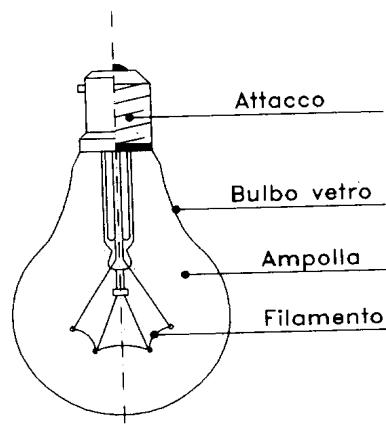


Figura 160: Schema costruttivo di una lampada ad incandescenza

Sono oggi costruite in tre tipologie: GLS, REFLECTOR ed ALOGENE, vedi Figura 161.

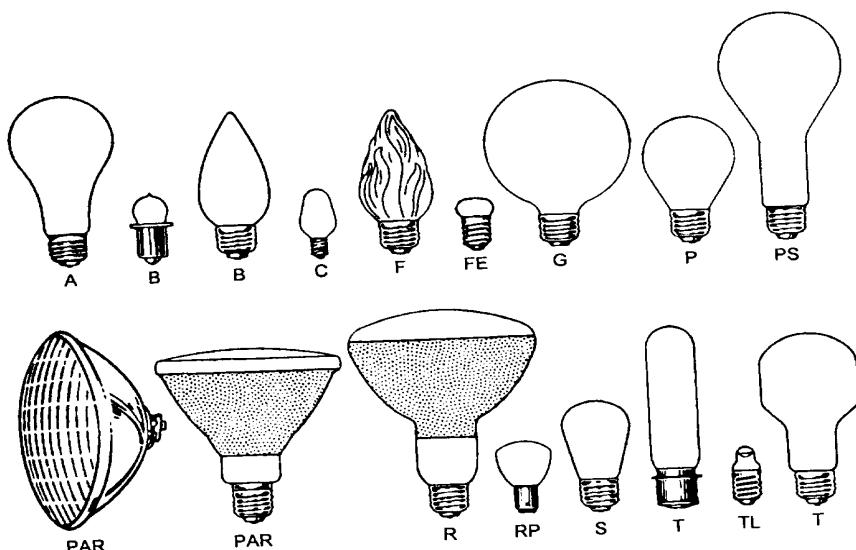


Figura 161: Tipologie di lampade ad incandescenza

Nella seguente tabella si hanno alcune proprietà delle lampade ad incandescenza.

Categoria	Tipo	Potenza assorbita (W)	Tensione di funzionamento (V)	Efficienza specifica (lm/W)	Durata (h)
Incandescenza	GLS	10÷150	220	14	1000
		150÷500	220	18	1000
	REFLECTOR	7÷80	220	14	1000
		80÷300	220	18	2000
	ALOGENE	5÷100	6÷24	18÷26	2000
		15÷150	220÷250	18÷20	
		500÷2000	220÷250	20÷25	2000

Luminanza media per lampade ad incandescenza tipo GLS o REFLECTOR da 200 a 700 cd/cm² e ad alogeni da 500 a 2.000 cd/cm²

Tabella 40: Caratteristiche delle lampade ad incandescenza

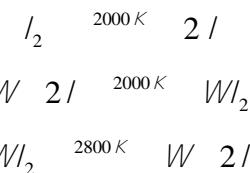
Dalla tabella è possibile calcolare il flusso luminoso nota l'efficienza luminosa e la potenza elettrica assorbita mediante la relazione:

$$W \quad (164)$$

16.8.2. LAMPADE ALOGENE

Nelle lampade ad incandescenza del tipo alogene si pone all'interno delle lampade dello iodio che si associa al tungsteno depositato sul bulbo (più freddo) e, per convezione termica, lo riporta sul filamento (caldo) dove, ad alta temperatura si dissocia.

Il ciclo dello iodio è il seguente:



Il vantaggio che si ottiene è duplice: da un lato lo iodio, mediante il suo ciclo di associazione-dissociazione, ricostituisce il filamento di tungsteno che man mano si assottiglierebbe per sublimazione, dall'altro, proprio per questa nuova possibilità di ripristinare il tungsteno sublimato, è possibile aumentare la temperatura del filamento in modo da innescare la reazione di dissociazione (a 2800 K).

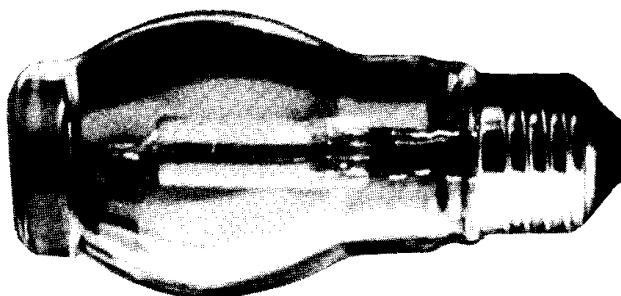


Figura 162: Lampada alogena

Questo secondo effetto porta ad una maggiore temperatura del colore (TC), ad una maggiore radiazione visibile (*lo spettro si sposta verso la zona del visibile*) e quindi l'efficienza luminosa di queste lampade è più elevata rispetto alle lampade normali raggiungendo anche 25 lm/W.

16.8.3. LAMPADE A LUMINESCENZA

In queste lampade si ha una scarica a valanga per effetto degli urti elastici ed anelastici che elettroni ed ioni di segno opposto subiscono nell'accelerazione fra gli elettrodi. L'emissione fotonica è di solito (almeno per lampade a bassa pressione a vapore di mercurio) di bassa lunghezza d'onda, nel campo dell'ultravioletto e quindi non visibile.

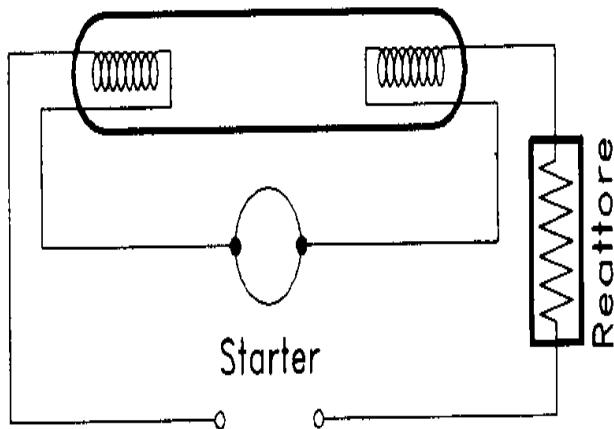


Figura 163: Schema di funzionamento di una lampada a luminescenza

Si utilizzano, pertanto, dei sali di fosforo, detti *fosfori*, che fungono da convertitori di lunghezza d'onda. Essi in pratica assorbono un fotone molto energetico e ne riemettono due o tre di minore energia ma nel visibile. In questo modo si ha l'effetto di *luminescenza* che è alla base di queste lampade.

La curva caratteristica, per un ampio intervallo di tensioni e correnti, è data in Figura 164.

Queste lampade necessitano di un **reattore** di stabilizzazione e di uno **starter** per l'avviamento.

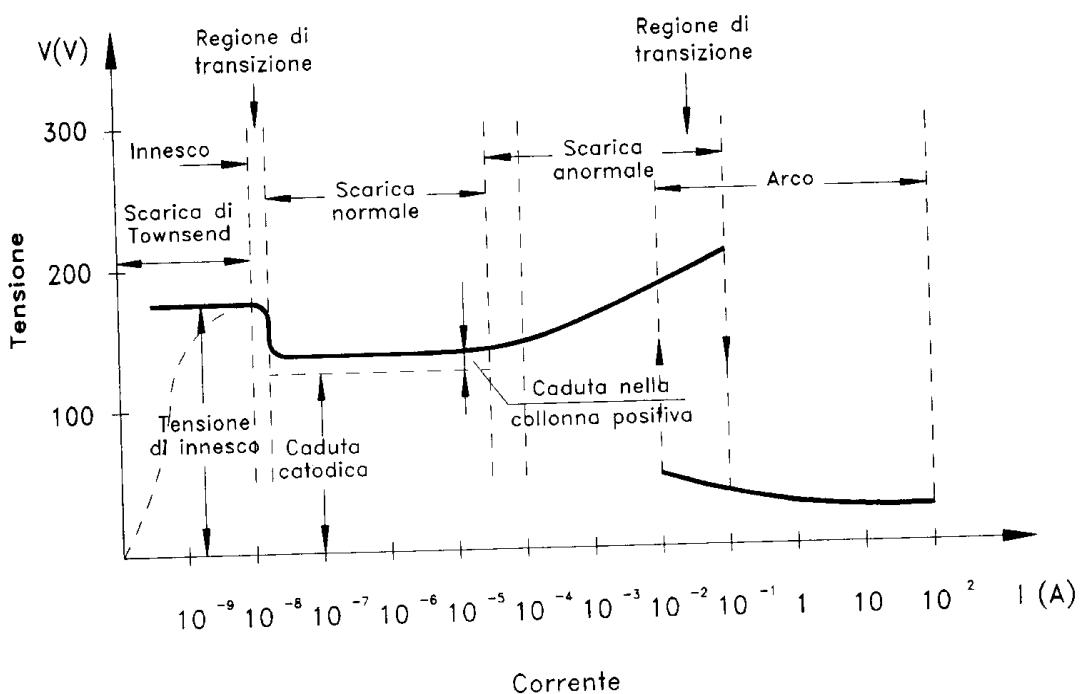


Figura 164: Curva caratteristica di una lampada a luminescenza

Il reattore serve a stabilizzare le lampade nella zona a destra della curva sopra indicata, dove si ha un andamento a pendenza negativa della curva. Si ricorda per una resistenza reale si può sempre definire un rapporto:

$$R = \frac{DV}{I} \quad (165)$$

Ma se la curva ha pendenza negativa allora il valore differenziale della resistenza ohmica è negativo e il componente si comporta come tendenzialmente instabile. Si osservi la Figura 165 che riporta la parte finale della curva caratteristica generale delle lampade a scarica nei gas. In un qualunque punto della curva (formata di due specie di archi con una zona di discontinuità) si può definire la resistenza R in base alla (165).

Essendo la pendenza negativa se ne ricava che ad un aumento della corrente occorrerebbe avere una diminuzione della tensione ai capi. Ciò non risulta possibile perché il generatore, elemento attivo che fornisce potenza, ha un comportamento ohmico e quindi al crescere della corrente fornisce anche una maggiore tensione. E viceversa.

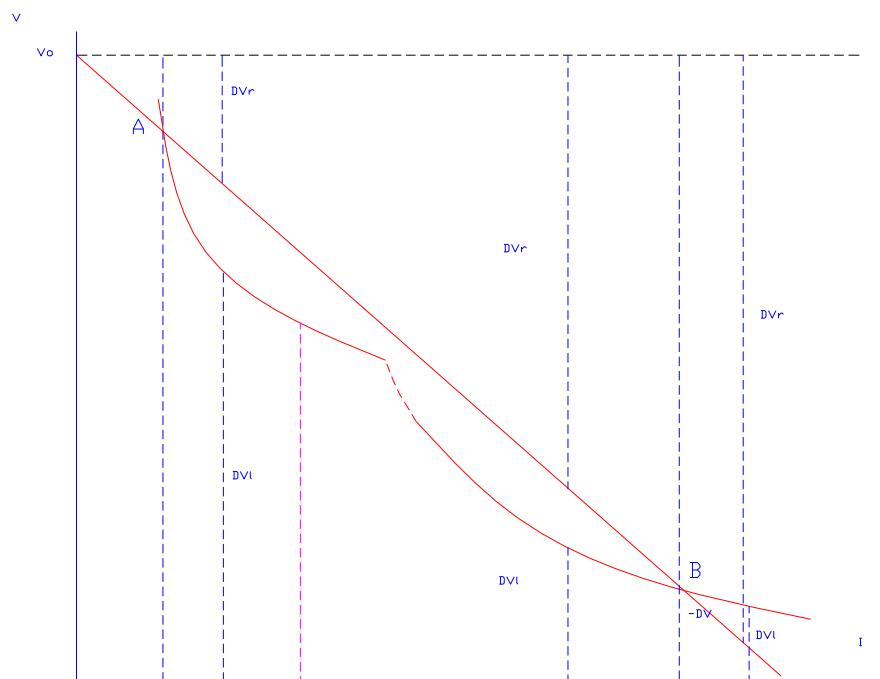


Figura 165: Polarizzazione di una lampada a luminescenza

Per bloccare il funzionamento della lampada si inserisce nel circuito una resistenza, nell'ipotesi di alimentazione in corrente continua, e pertanto per avere una caduta nei componenti passivi (lampada e resistenza) pari alla tensione V_0 applicata si deve polarizzare la lampada o nel punto A o nel punto B (unici punti di equilibrio).

Dei due punti evidenziati solo B è stabile: si vede, infatti, come un incremento di corrente porterebbe ad avere una somma delle cadute di tensioni maggiore della tensione disponibile e pertanto si ha una diminuzione della corrente che riporta indietro il sistema. Analogamente si ragiona per una diminuzione (a sinistra di B) della corrente. La *polarizzazione*, quindi, pur stabilizzando la lampada porta ad avere una caduta di tensione supplementare e quindi anche un consumo di energia supplementare che va tenuto in conto nella progettazione degli impianti.

La polarizzazione in corrente alternata viene effettuata con un elemento reattivo, solitamente induttivo, detto **reattore** che non dissipa potenza attiva. Le lampade a luminescenza hanno buona efficienza luminosa, pari a circa 40 lumen/Watt. Le caratteristiche delle lampade commerciali sono riportate nella seguente Tabella 41. Si osservi che questo tipo di lampade non ha una buona resa cromatica a causa della distribuzione dello spettro luminoso ricco di righe nella zona del blu e assente di una componente continua a bassa lunghezza d'onda (rosso).

In Figura 166 si hanno vari esempi di spettri per lampade a luminescenza. Si osservino le righe spettrali ben evidenti e il colore ad esse corrispondente (riportato in sottofondo). La componente continua è dovuta alla presenza di un filamento ad incandescenza. Le lampade a luce combinata, vedi Figura 167 (a luminescenza e ad incandescenza) sono molto utilizzate per illuminazione commerciale poiché associano elevate efficienze e buone rese cromatiche ($R_a > 85$).

Senza la presenza della componente continua del filamento si avrebbe solo uno spettro a righe con valori di resa cromatica inferiore a 80. Nella tabella sono riportate anche le TCC spesso utilizzate come riferimento cromatico. Si osservi come queste sono di gran lunga più elevate di quelle delle lampade ad incandescenza essendo la luce a luminescenza bluastra.

Costruttori*		Prestazioni dei principali tubi fluorescenti 1° generazione - Ø 38 mm					
		T° K	R _a	20 _W 0,6 m	40 _W 1,2 m	65 _W 1,5 m	
P, M	Comfort 27, comfort luxe	2700	95	700 lm	1750 lm	2800 lm	
P, M	luce solare 32, incandia	3000	85	850	2100	3250	
C	tono caldo	3000	55	1350	3200		
P	croma solare 33	3000	85	1250	3200	5100	
C	optima	3600	75	1100	3000	4900	
C	rosa di Francia	3700	80	850	2100		
M	brillante luxe	3800	85	850	2100	3300	
M	Aviva	3800	90	800	2000	3200	
C	Bianco Z	3900	73	930	2450	3750	
P	Brillante 34	4000	85	850	2100	3300	
P	Croma brillante 84	4000	85	1250	3200	5100	
C, M, P	Bianco industria	4300	65	1150	3200	5100	
M	Harmonia	5000	90	800	2000	3250	
C	Luce diurna	5800	84	1000	2450		
M, P	Luce diurna 55	6500	92	800	2000	3300	
P	Croma diurna 86	6500	82	1150	3050	5000	

Tubi di 2° generazione - Ø 26 mm

P croma solare 83 TLD	}	3000	85	18 _W	36 _W	58,		
C Bianco 83				1400	3350	5300		
M prestiflux BRL	}			1400	3350	5300		
P croma solare 84 TLD				1350	3200	5100		
C Bianco 84	}	4000	85	1400	3350	5300		
M prestiflux Incandia				1350	3200	5100		
C Luce diurna 86		6000	85	1350	3200	5100		

C : CLAUDE P : PHILIPS M : MAZDA

* Nota: Il riferimento è a tipi commercializzati in Europa nel 1988 non tutti presenti sul mercato italiano.

Tabella 41: Caratteristiche delle lampade a luminescenza

16.8.4. LAMPADA A VAPORE DI MERCURIO AD ALTA PRESSIONE

Queste lampade sono del tipo a bulbo ed hanno una pressione elevata, rispetto a quelle a luminescenza, e tale da dar luogo ad uno spettro continuo per via dell'allargamento delle righe per effetto Compton. Sono utilizzate nell'illuminazione stradale e pubblica in genere. Richiedono sempre un circuito di polarizzazione e di reattori ma compensano la maggiore complessità circuitale con buona efficienza e minore manutenzione.

16.8.5. LAMPADE A VAPORI DI SODIO

Si tratta di lampade che utilizzano ioni di sodio al posto di quelli di mercurio. Sono costruite in modo da avere nello stesso corpo lampada una piccola lampada a vapore di mercurio che serve da innesco, cioè a portare ad alta temperatura il sodio in modo che possa vaporizzare e quindi innescare il proprio funzionamento. Queste lampade emettono una luce a righe giallastre, come indicato in Figura 168. Hanno un'efficienza luminosa elevata (oltre 60 Lumen/Watt) e sono utilizzate molto nell'illuminazione stradale ove si richiede un servizio di illuminazione a basso costo e con un buon indice di contrasto. Queste lampade, infatti, consentono di distinguere bene gli oggetti e quindi sono efficaci per l'illuminazione negli svincoli stradali, in galleria e nei luoghi dove la sicurezza è elemento fondamentale di progetto pur con un'alterazione del colore.

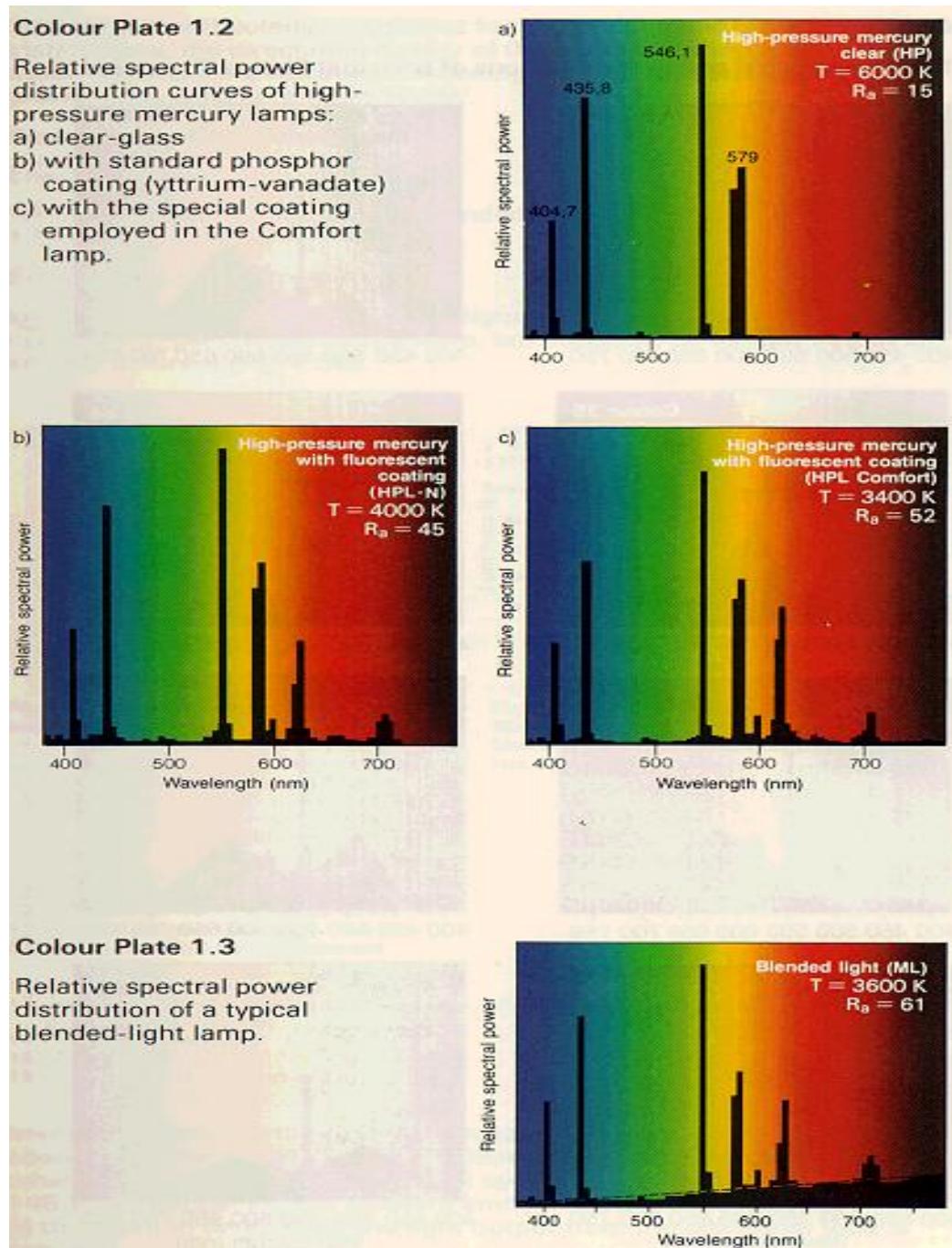


Figura 166: Spettri di lampade a luminescenza

16.8.6. LAMPADE AD ARGON

Con la stessa filosofia della lampade a scarica nei gas si hanno le lampade ad argon che raggiungono efficienze elevatissime (oltre 120 Lumen/Watt) e che pertanto sono utilizzate soprattutto per l'illuminazione di grandi spazi pubblici.

Colour Plate 1.1

Relative spectral power distributions of principal Philips TL colours.

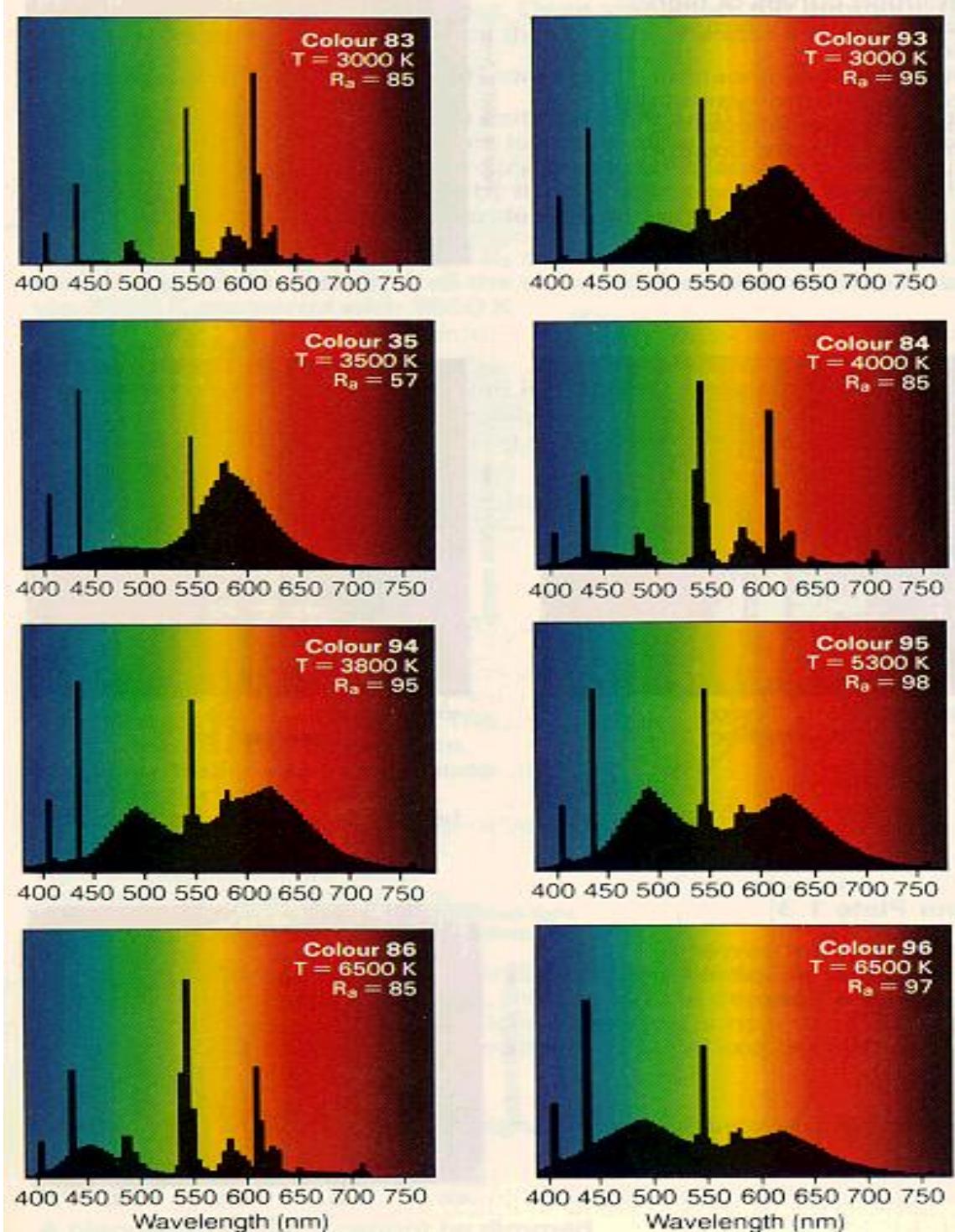


Figura 167: Distruzione spettrale di alcune lampade a luce combinata

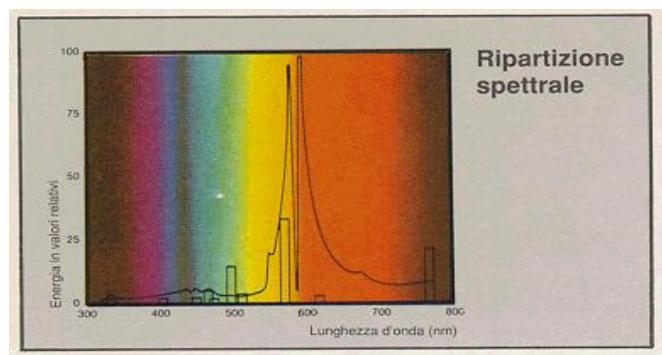


Figura 168: Distribuzione spettrale di lampade al sodio

16.9. APPARECCHI ILLUMINANTI

Le lampade sono raramente utilizzate nude. Esse vengono inserite in opportuni *apparecchi illuminanti* che hanno lo scopo di modificare (anche sensibilmente) le caratteristiche illuminotecniche delle stesse lampade. Ogni lampada è caratterizzata dal **solido fotometrico** (cioè dalla distribuzione spaziale dei vettori intensità luminosa). I corpi illuminanti modificano proprio il solido fotometrico delle lampade in modo da soddisfare le esigenze progettuali per l'impiantistica illuminotecnica.

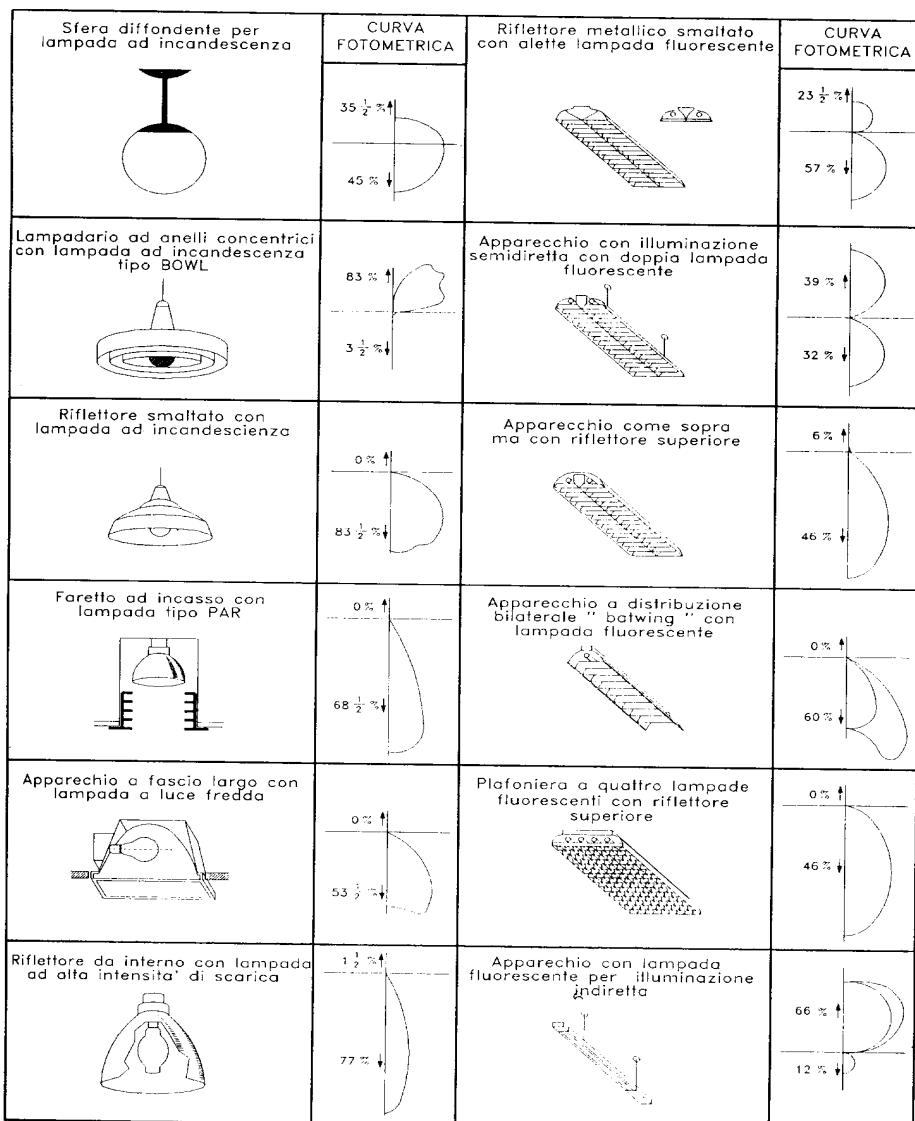


Figura 169: Tipologia dei diffusori

Ad esempio possono direzionare il flusso luminoso solo in una direzione e con una modesta dispersione angolare (*fari, proiettori*), ovvero possono direzionare il flusso luminoso in più direzioni con limiti angolari precisi (ad esempio i corpi illuminanti per illuminazione stradale hanno angoli di emissione limite fissati dalle norme, detti angoli di *cut-off*). I corpi illuminanti possono ospitare più di una lampada e possono anche *filtrare* la radiazione emessa mediante opportuni schermi filtranti. I corpi illuminanti possono avere o non *lenti direzionali* e in alcuni casi (vedi le lampade scialitiche utilizzate negli ospedali) si hanno vetri stratificati a curvatura multipla per ridurre lo spazio occupato. In pratica gli *apparecchi illuminanti* adeguano le lampade alle esigenze dell'illuminazione. Ciò che non può essere modificata è la natura dello spettro luminoso (*continuo* per le lampade ad incandescenza e *a righe* per le lampade a luminescenza) e di questo si deve tenere conto nella progettazione degli impianti di illuminazione.

16.9.1. TIPOLOGIA DEI DIFFUSORI

I diffusori o corpi illuminanti modificano il solido fotometrico delle lampade che ospitano. Di solito essi orientano il flusso:

- prevalentemente verso il basso;**
- prevalentemente verso l'alto;**
- in entrambe le direzioni.**

In corrispondenza del tipo di solido fotometrico si hanno tre tipologie di illuminazione:

- illuminazione diretta;**
- illuminazione indiretta o diffusa;**
- illuminazione semidiretta o semi indiretta.**

Nelle figure a lato si possono vedere le percentuali di flusso orientato nella varie direzioni al variare del corpo illuminante.

17. PROGETTO DI UN IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE

Scopo dell'illuminazione artificiale é di rendere visibile all'osservatore quanto lo circonda in condizioni di luce naturale carente o nulla e di favorire il suo compito visivo facilitando la rapidità e l'accuratezza con cui gli oggetti vengono percepiti. Questo requisito si colloca tuttavia all'interno di un'esigenza più generale definibile come comfort o benessere visivo.

Si tratta infatti non solo di assicurare al soggetto una facile e rapida funzione visiva ma anche di rendere complessivamente gradevole e attraente l'ambiente dal punto di vista della illuminazione, ossia di caratterizzare luministicamente il locale e/o i suoi oggetti e procurare all'osservatore una sensazione di soddisfazione e di consenso.

17.1. L'AMBIENTE INTERNO ILLUMINATO ARTIFICIALMENTE

Il comfort stesso, per quanto categoria molto ampia, che riunisce in sé molti requisiti e finalità, non é l'unico obiettivo della progettazione.

Oltre a questo si impongono ulteriori esigenze quali la flessibilità dell'impianto -perché si possa adattare a esigenze che mutano nel tempo-, la contemporanea fruibilità del locale da parte di soggetti diversi chiamati a compiti visivi diversi, gli effetti che si vogliono creare, l'immagine che si vuole trasmettere, la sicurezza globale, il risparmio energetico, i limiti di spesa etc.

Per soddisfare tutte queste esigenze è necessaria una assennata e ragionevole mediazione, il che rende il lavoro di progettazione illuminotecnica - come del resto quello della progettazione in genere un'arte oltre che una scienza. Il compito visivo, il tipo di utenza, l'uso del locale, il tono dell'ambiente, condizionano il tipo di scelte da fare. Per potersi orientare, conviene classificare in due grandi categorie le tipologie impiantistiche: l'illuminazione primaria e l'illuminazione secondaria.

Con l'**illuminazione primaria** si creano i requisiti illuminotecnici essenziali e le buone condizioni di visibilità mediamente in ogni punto del locale. Essa comprende gli :

impianti di illuminazione generale : destinati a fornire luce su aree molto vaste e con un certo grado di uniformità (per es. grandi magazzini, locali pubblici, ambienti industriali etc.). Tali impianti sono dimensionati per il compito visivo più gravoso tra quelli che si svolgono nel locale, realizzati con apparecchi prevalentemente a luce diretta o diretta più diffusa e disposti in file equidistanziate o in maglie regolari. La distribuzione tendenzialmente uniforme della luminanza tende a conferire un carattere freddo e impersonale all'ambiente servito.

impianti di illuminazione localizzata : usati quando si vuole esaltare l'illuminamento sulle aree in cui si svolge il compito visivo. Ciò si ottiene con apparecchi a luce diretta, puntati sulle aree di lavoro e orientati opportunamente in modo da evitare ombre marcate, riflessioni fastidiose e abbagliamento. Gli impianti di illuminazione localizzata solitamente si accompagnano a impianti di illuminazione generale onde assicurare che fuori dalle zone di lavoro l'illuminamento sia non inferiore al 50% di quello richiesto per il compito visivo. Attraverso il gioco delle luminanze così generato, è possibile creare ambienti luministicamente più vari e atmosfere più vive e dinamiche.

All'**illuminazione secondaria** si ricorre quando dalla luce si vuole ottenere qualcosa di più che condizioni di normale visibilità. Viene usata per creare particolari atmosfere, per generare messaggi, promuovere una certa immagine, esaltare un oggetto o un particolare, creare effetti luministici insoliti e drammatici (teatro, vetrine, musei, etc.) esaltare le forme e/o la natura di oggetti o materiali.

Si distinguono le seguenti forme di illuminazione secondaria:

Illuminazione d'accento. É quella mirata ad esaltare la presenza di un oggetto o gruppi di oggetti e richiamarvi l'attenzione dell'osservatore. La illuminazione d'accento é largamente usata nelle vetrine espositive, nei musei, nelle esposizioni etc. Si ottiene con lampade a luce diretta, con fascio luminoso più o meno concentrato e con ottima resa del colore. Il contrasto di luminanza qui é l'effetto cercato e serve a sottolineare la presenza esclusiva dell'oggetto. Nella illuminazione d'accento rientra anche quella a volte citata come *Illuminazione decorativa o artistica*

Illuminazione d'effetto. Interessa prevalentemente i locali chiusi, e quindi l'ambiente nel suo complesso. Consiste nel "disegnare con la luce", creando effetti luministici su qualche parete, per es. proiettandovi strisce o macchie di luce con funzione decorativa, quasi in alternativa ad altri elementi d'arredo, o inondando di luce qualche superficie di colore o natura particolare, che a sua volta riflette producendo l'effetto coloristico o luministico voluto .

Mood Lighting. Non si tratta di una vera tecnica di illuminazione, ma consiste nel creare con la luce il tono giusto, l'atmosfera adatta alle esigenze del momento. In un edificio residenziale qualche ambiente può per esempio, secondo le circostanze, servire da stanza di rappresentanza o per l'ordinaria vita domestica. In un ristorante, a seconda che sia di giorno o di sera, al fine di creare condizioni di volta in volta adatte a colazioni di lavoro, riunioni conviviali o atmosfere raccolte e intime, si necessita di un livello di illuminamento diverso e di diverso tipo di luce. Il *Mood Lighting* consiste nell'adattare la luce a queste varie circostanze.

Illuminazione architettonica È quella modellata su una struttura o complesso architettonico, al fine di evidenziarne, anche a distanza, le forme e i volumi (più che i colori). L'illuminazione va fatta collocando gli apparecchi fuori dalla vista dell'osservatore e dosando sapientemente il gioco di luci e ombre per esaltare la dimensione spaziale della struttura.

É chiaro che realizzare di volta in volta l'illuminazione più adatta richiede una serie di conoscenze, esperienza, sensibilità, metodologie di analisi, strumenti di calcolo, dati di riferimento che é impossibile trovare tutte insieme in una persona o in un libro. A ciò aggiungi che spesso il problema sconfinà nella pura creazione artistica.

Quello che é possibile fare in questa sede é la presentazione in forma sintetica di alcuni metodi classici per la determinazione del numero di corpi illuminanti, necessari ad assicurare un assegnato livello di illuminamento medio in ambiente, e successivamente alcuni approcci avanzati, tipici del calcolo automatico per la verifica illuminotecnica, in forma più puntuale e rigorosa. Si lascia quindi al progettista il compito della sintesi tra obbiettivi da raggiungere, approcci di calcolo adottati, fattibilità tecnico-economica etc.

C'é al più da ricordare che in tema di progettazione illuminotecnica in questo ultimo quarto di secolo molti progressi sono stati fatti. Sì é acquisito un patrimonio cospicuo di conoscenze e di esperienze, sia in fatto di tecnologie delle lampade che di filosofia d'impianto; sono stati attivati diversi Organismi nazionali e internazionali per la emanazione di raccomandazioni tecniche intese alla corretta concezione e realizzazione degli impianti; é maturata una conoscenza dei requisiti di base del comfort visivo, a beneficio del progettista che ora può assumere tali requisiti alla base del calcolo o utilizzarli per la verifica delle soluzioni indagate.

E infine la disponibilità di calcolatori a basso costo che non solo hanno consentito maggiore rapidità e precisione di calcolo, ma hanno stimolato nuovi metodi di analisi e possibilità di indagine.

17.2. PROCEDURE DI CALCOLO

I metodi globali sono quelli di più antica formulazione, sono di facile e rapido impiego e adatti al calcolo manuale. Essi consentono di determinare l'illuminamento medio sul piano di lavoro in funzione delle caratteristiche geometriche del locale, delle proprietà riflettenti delle pareti e delle caratteristiche ottiche dei corpi illuminanti. I metodi qui presentati sono sostanzialmente due: il *metodo del fattore di utilizzazione* e il *Basic Method CIE*. Il primo metodo si fonda sulla determinazione del fattore di utilizzazione, definito come rapporto tra il flusso che ricade sul piano di lavoro e quello effettivamente emesso dagli apparecchi.

Il metodo verrà presentato in due versioni: quella più approssimata e rapida ed una più rigorosa. La prima, che presso taluni Autori prende anche il nome di *metodo del flusso totale*, fornisce il coefficiente di utilizzazione sulla base di una classificazione dei corpi illuminanti per grandi categorie, definite solo sulla base di generica somiglianza del solido fotometrico. La seconda é quella più rigorosa e articolata , nota come *Metodo BZ*, proposto dalla IES nel 1971, e caratterizzata dal fatto che i corpi illuminanti vengono classificati con un criterio più razionale e controllabile.

Oggi tuttavia gran parte delle Case costruttrici di apparecchiature illuminotecniche forniscono direttamente i coefficienti di utilizzazione dei singoli apparecchi.. In ogni caso con questo metodo é possibile solo ottenere il flusso luminoso complessivamente richiesto per assicurare un assegnato illuminamento sul piano di lavoro o, che é lo stesso, il numero di corpi illuminanti.

Il *Basic Method CIE*, formulato nel 1978, parte invece da una approssimazione più precisa del flusso emesso dall'illuminante e giunge a determinare, per dato numero e tipo di apparecchi, l'illuminamento che compete al piano utile, alle pareti e al soffitto. In alternativa, assegnati questi ultimi, il metodo fornisce il numero di lampade necessarie. Com'è chiaro c'è una successione storica nella formulazione di questi metodi che corrisponde a una progressione nel grado di attendibilità conseguita.

Prima di passare alla enunciazione delle procedure di calcolo nei vari casi, é necessario premettere alcune formulazioni fondamentali .

17.3. METODI DI CALCOLO GLOBALI

Si tratta di metodi che cercano di calcolare il flusso utile mediante considerazioni geometriche globali. Essi si contrappongono ai metodi numerici a *tracciamento di raggi* (*ray tracing*) con i quali si simula il percorso di vari raggi luminosi dalla sorgente al piano di lavoro. Saranno esaminati nel prosieguo.

17.3.1. CALCOLO DEL FLUSSO CIRCOLANTE

Com'è noto, nel caso degli ambienti chiusi, l'illuminamento sul piano di lavoro é dovuto al contributo del flusso luminoso diretto e del flusso riflesso. Per correlare tra loro il flusso luminoso globale, l'illuminamento, e le caratteristiche geometriche e ottiche del locale conviene riferirsi al semplice caso della sfera cava, dotata al suo interno di un corpo illuminante in grado di emettere il flusso globale ϕ (sfera di Ulbricht). Su ogni elemento di superficie della sfera il flusso totale circolante é dato da :

$$circ. \quad dir. \quad ind.$$

Sull'intera superficie interna A_{tot} della sfera il flusso diretto coincide col flusso globale ϕ emesso:

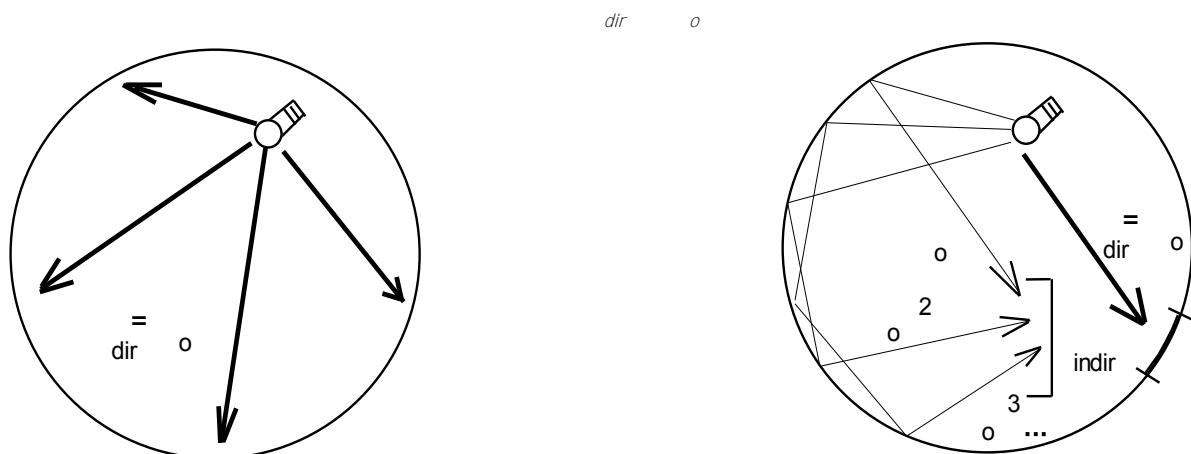


Figura 170: Flusso circolante nella Sfera di Ulbricht

Il flusso indiretto é il risultato di infinite riflessioni pertanto, detta la riflettività, si ha, seguendo quanto già detto in precedenza per la sfera di Ulbricht:

$$\begin{aligned} & ind. \quad \phi \quad \phi^2 \quad \phi^3 \quad \phi^4 \quad \dots \\ & ind. \quad \phi \quad (1 \quad 2 \quad 3 \quad \dots) \end{aligned}$$

Ricordando lo sviluppo in serie geometrica si ha:

$$ind. \quad o \quad \frac{1}{1}$$

per cui:

$$circ. \quad dir. \quad ind. \quad o \quad o \quad \frac{1}{1}$$

$$o \quad \frac{1}{1}$$

Infine:

$$E = \frac{\text{circ.}}{A_{\text{tot}}} \cdot \frac{o}{A_{\text{tot}}} \cdot \frac{1}{1}$$

Se la cavità non è sferica la relazione precedente può ancora essere utilizzata purché sussista il concetto di cammino libero medio del raggio luminoso. Ciò accade se nessuna delle superfici dell'ambiente ha dimensione e riflettività molto diversa da quella delle altre. In questo caso allora è lecito parlare di Illuminamento medio \bar{E} e riflettività media $\bar{\gamma}$ per cui :

$$\bar{E} = \frac{o}{A_{\text{tot}}} \cdot \frac{1}{1} \cdot \bar{\gamma}$$

Da qui la formula per il calcolo del flusso richiesto per aversi l'illuminamento medio in un ambiente di riflettività media $\bar{\gamma}$:

$$o \quad \bar{E} A_{\text{tot}} (1 - \bar{\gamma}) \quad (166)$$

La stessa espressione poteva ottersi dal bilancio dell'energia luminosa in ambiente. Il flusso che l'apparecchio deve fornire deve eguagliare quello assorbito. Allora, detti $\gamma_1, \gamma_2, \dots$ gli assorbimenti delle pareti di superficie A_1, A_2, \dots , si ha :

$$o \quad \gamma_1 (\text{inc})_1 + \gamma_2 (\text{inc})_2 + \gamma_3 (\text{inc})_3 + \dots + \gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2 + \gamma_3 E_3 A_3 + \dots + \gamma_k E_k A_k$$

Se è lecito approssimare l'illuminamento delle varie superfici E_k con un illuminamento medio \bar{E} , allora

$$o \quad \bar{E} \sum_k A_k$$

Introdotto ora l'assorbimento medio

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_k \gamma_k A_k}{\sum_k A_k}$$

e poiché $\bar{\gamma} = 1 - \bar{\gamma}$ risulta :

$$o \quad \bar{E} A_{\text{tot}} = \bar{E} A_{\text{tot}} (1 - \bar{\gamma}) \quad (167)$$

che è la (166).

17.3.2. FATTORE DI MANUTENZIONE

La relazione (166) non è direttamente applicabile nei casi pratici perché non tiene conto di alcuni fattori che penalizzano la emissione luminosa. Questi sono attribuibili a:

- 1) guasto delle lampade ($LSF = \text{Lamp Survival Factor}$);

- 2) attenuazione del flusso luminoso per effetto dell'invecchiamento della lampada ($LLDF = Lamp Lumen Depreciation Factor$)
- 3) dello sporcamento delle superfici emittenti ($LMF = Luminaire Maintenance Factor$)
- 4) dello sporcamento delle superfici riceventi (pareti murarie) ($RSMF = Room Surface Maintenance Factor$).

L'effetto combinato di questi quattro fattori si esprime attraverso il prodotto

$$MF = LLMF \times LSF \times LMF \times RSMF$$

e prende il nome *Fattore di Manutenzione MF (Maintenance Factor)*. I valori raccomandati sono raccolti nelle Tabella 42, Tabella 43 Tabella 44 (da *Philips Lighting Manual, 1993*)

Ore di funzionamento (x1000)		0.1	1	2	4	6	12	18	24
Incandescenti	LLMF	1.00	0.93						
	LSF	1.00	0.50						
Fluorescenti. Trifosfori	LLMF	1.00	0.96	0.94	0.91	0.87	0.84		
	LSF	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.75		
Fluorescenti. Alofosfati.	LLMF	1.00	0.94	0.89	0.83	0.80	0.74		
	LSF	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.75		
Vaporì di mercurio	LLMF	1.00	0.97	0.93	0.87	0.80	0.68	0.58	0.52
	LSF	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.88	0.75	0.50
Alogenì. metallici	LLMF	1.00	0.93	0.87	0.78	0.72	0.63	0.52	
	LSF	1.00	0.97	0.95	0.93	0.91	0.71	0.50	
Sodio alta pressione.	LLMF	1.00	0.98	0.96	0.93	0.91	0.87	0.83	0.80
	LSF	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.89	0.75	0.50

Tabella 42: Valori raccomandati per LLMF e LSF

Tempo trascorso tra due interventi di manutenzione (Anni)	0	0.5			1.0			2.0			3.0		
AMBIENTE (°)		P	N	S	P	N	S	P	N	S	P	N	S
Tipo di Luminaria													
Lampada nuda	1	0.95	0.92	0.88	0.93	0.89	0.83	0.89	0.84	0.78	0.85	0.79	0.73
Riflettore aperto superiore	1	0.95	0.91	0.88	0.90	0.86	0.83	0.84	0.80	0.75	0.79	0.74	0.68
Riflettore chiuso superiormente	1	0.93	0.89	0.83	0.89	0.81	0.72	0.80	0.69	0.59	0.74	0.61	0.52
Lamp. in riflettore chiuso trasparente	1	0.92	0.87	0.83	0.88	0.82	0.77	0.83	0.77	0.71	0.79	0.73	0.65
Lamp. in riflettore antipolvere	1	0.96	0.93	0.91	0.94	0.90	0.86	0.91	0.86	0.81	0.90	0.84	0.79
Flusso indirizzato superiormente	1	0.92	0.89	0.85	0.86	0.81	0.74	0.77	0.66	0.57	0.70	0.55	0.45

(°) P = Pulito ; N = Normale ; S = Sporco

Tabella 43: Valori raccomandati per LMF

Tempo trascorso tra due interventi di manutenzione (Anni)		0.5			1.0			2.0			3.0		
	AMB (°)	P	N	S	P	N	S	P	N	S	P	N	
K (*)	Direzione del Flusso												
	Diretto	0.97	0.96	0.95	0.97	0.94	0.93	0.95	0.93	0.90	0.94	0.92	0.88
	Dir./Indiretta	0.94	0.88	0.84	0.90	0.86	0.82	0.87	0.82	0.78	0.84	0.79	0.74
0.7	Indiretto	0.90	0.84	0.80	0.85	0.78	0.73	0.81	0.73	0.66	0.75	0.68	0.59
	Diretto	0.98	0.97	0.96	0.98	0.96	0.95	0.96	0.95	0.94	0.96	0.95	0.94
	Dir./Indiretta	0.95	0.90	0.86	0.92	0.88	0.85	0.89	0.85	0.81	0.86	0.82	0.78
2.5	Indiretto	0.92	0.87	0.83	0.88	0.82	0.77	0.84	0.77	0.70	0.78	0.72	0.64
	Diretto	0.99	0.97	0.96	0.98	0.96	0.95	0.96	0.95	0.94	0.96	0.95	0.94
	Dir./Indiretta	0.95	0.90	0.86	0.92	0.88	0.85	0.89	0.85	0.81	0.86	0.82	0.78
5.0	Indiretto	0.92	0.87	0.83	0.88	0.82	0.77	0.84	0.77	0.70	0.78	0.72	0.64

(°) P = Pulito ; N = Normale ; S = Sporco

(*) $K = a \cdot b / h_m / (a+b)$ con a, b = dimensioni in pianta del locale ; h_m altezza di montaggio

Tabella 44: Valori raccomandati per RSMF

17.3.3. COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE

Da misure globali dei coefficienti di rinvio eseguite impiegando luce bianca, si possono ricavare i valori raccolti nella Tabella 45 (Parolini - Paribeni, 1977). Tali dati sono utilizzabili per la luce diurna e per le sorgenti a incandescenza, ma possono perdere di attendibilità nel caso di illuminazione con lampade del tipo a scarica.

Intonaco comune bianco (latte di calce o simile)	0.8
Intonaco comune o carta molto chiara (avorio, giallo, grigio)	0.7
Intonaco comune o carta molto chiara (grigio perla, avorio, rosa chiaro)	0.6-0.5
Intonaco comune o carta di colore medio (verdino, azzurro, beige)	0.5-0.3
Intonaco comune o carta di colore scuro (verde oliva, rosso)	0.3-0.1
Pavimenti in tinta chiara	0.6-0.4
Pavimenti in tinta scura	0.2-0.1
Alluminio	0.8-0.9
Vernice bianca	0.5
Smalto bianco	0.6
Plastica chiara	0.55

Tabella 45: Coefficienti di riflessione per vari materiali di rivestimento delle pareti

17.3.4. METODO DEL FATTORE DI UTILIZZAZIONE

Ai fini del calcolo del flusso che la lampada deve emettere affinché sul piano di lavoro si abbia un assegnato illuminamento, è opportuno suddividere lo spazio che circonda il corpo emittente nelle 4 zone di emissione evidenziate in Figura 171. La zona 1 è interessata dal flusso diretto la cui efficacia dipende dall'altezza di montaggio h_m ; le altre zone emettono per riflessione, quindi la porzione di flusso che ne proviene dipende sia dalla riflettività delle pareti che dalle rispettive superfici. Si intuisce pertanto che il flusso luminoso sul piano utile è legato ai seguenti parametri:

Tipo di corpo illuminante (solido fotometrico, armatura etc...);

Geometria del locale (a x b);

Altezza di montaggio rispetto al piano utile h_m;

Riflettività delle pareti.

Il parametro che esprime questo legame é il *Fattore di Utilizzazione* definito come:

$$F_u = \frac{\text{Flusso luminoso incidente sul piano utile}}{\text{Flusso totale installato}}$$

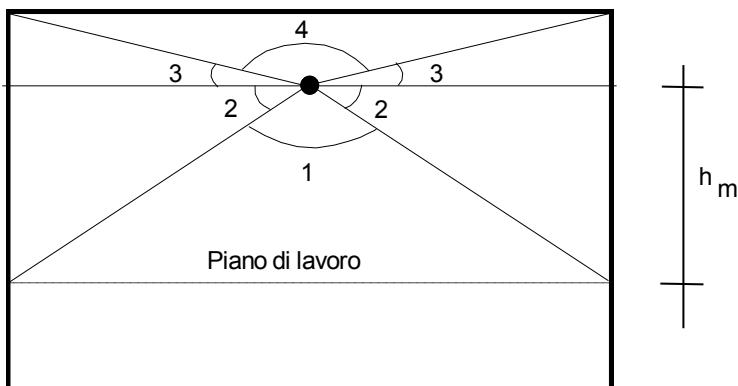


Figura 171: Sezione di riferimento del locale

Esso si deduce da apposite tabelle, come si dirà in seguito, in funzione dei parametri su menzionati. In particolare la geometria del locale e l'altezza di montaggio si possono compendiare nell'*indice del locale K* che va calcolato in base alle relazioni seguenti :

$$K = \frac{a b}{h_m (a + b)} \quad (168)$$

Il flusso richiesto si calcola infine dalla formula :

$$u = \frac{\bar{E} A}{F_u M F} \quad (169)$$

dove :

\bar{E} = Illuminamento medio (lux)

A = Superficie del piano di lavoro (a b)

MF = Fattore di manutenzione

Il numero delle lampade si determina ovviamente dal rapporto: $N = u / lamp$, ($lamp$ = Flusso della singola lampada). La distribuzione delle lampade nel locale deve essere il più possibile uniforme. A tal proposito la CIE raccomanda che tra l'indice K del locale e il numero M di lampade in direzione longitudinale ed N in direzione trasversale, ci siano le corrispondenze espresse dalla Tabella 46.

Tabella 46: Valori di M e di N

Ka	0.6	0.8	1.0	1.25	1.50	2	2.5	3	4	5
M	2	2	3	3	4	4	5	6	8	10
N	1	2	2	3	3	4	4	4	5	6

Infine i valori del coefficiente di utilizzazione F_u in relazione al tipo di corpo illuminante, sono dati in Tabella 47 (da *Sacchi - Cagliaris*, 1990). In essa vengono pure indicati, in intervalli discreti, i fattori di riflessione delle pareti (10%, 30%, 50%) e del soffitto (30%, 50%, 75%) e tra i quali é lecito interpolare; il fattore di manutenzione (b = pulizia frequente, m = mediocre, n = scarsa) per ogni categoria di apparecchio, l'indice del locale (A J), e la relazione tra distanza minima (d) degli apparecchi tra loro e l'altezza ($b = h_m$) di montaggio.

Curva Fotometrica	Indice del locale	Fattore di utilizzazione										Fattore di manutenzione		
		b	m	n										
Illuminazione semidiretta $d = 1,1h$	0,50-0,70	0,28	0,22	0,18	0,26	0,21	0,18	0,20	0,17				Plafoniera nuda o con coppa diffondente	
	0,70-0,90	0,35	0,29	0,25	0,33	0,27	0,24	0,26	0,24					
	0,90-1,12	0,39	0,33	0,30	0,37	0,32	0,28	0,30	0,27					
	1,12-1,38	0,45	0,38	0,33	0,40	0,36	0,32	0,33	0,30					
	1,38-1,75	0,49	0,42	0,37	0,43	0,39	0,34	0,37	0,33					
	1,75-2,25	0,56	0,50	0,44	0,49	0,44	0,40	0,42	0,38					
	2,25-2,75	0,60	0,55	0,50	0,53	0,48	0,44	0,47	0,44					
	2,75-3,50	0,64	0,55	0,54	0,56	0,51	0,47	0,50	0,47					
	3,50-4,50	0,68	0,62	0,55	0,61	0,56	0,53	0,54	0,52					
	4,50-6,00	0,70	0,65	0,62	0,65	0,62	0,60	0,55	0,57					
Illuminazione mista $d = 1,1h$	0,50-0,70	0,26	0,23	0,21	0,23	0,21	0,19	0,19	0,17				Diffusore	
	0,70-0,90	0,32	0,29	0,27	0,28	0,26	0,24	0,23	0,21					
	0,90-1,12	0,37	0,33	0,31	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24					
	1,12-1,38	0,40	0,36	0,34	0,34	0,31	0,30	0,28	0,26					
	1,38-1,75	0,42	0,39	0,36	0,36	0,33	0,32	0,30	0,28					
	1,75-2,25	0,46	0,43	0,40	0,41	0,38	0,35	0,32	0,30					
	2,25-2,75	0,50	0,46	0,43	0,44	0,40	0,39	0,34	0,33					
	2,75-3,50	0,52	0,48	0,45	0,46	0,44	0,41	0,37	0,36					
	3,50-4,50	0,55	0,52	0,49	0,48	0,46	0,45	0,39	0,38					
	4,50-6,00	0,57	0,54	0,51	0,49	0,47	0,46	0,42	0,41					
Illuminazione diretta $d = h$	0,50-0,70	0,35	0,32	0,28	0,37	0,32	0,28	0,31	0,28				Riflettore a fascio largo	
	0,70-0,90	0,46	0,42	0,38	0,46	0,41	0,38	0,41	0,38					
	0,90-1,12	0,50	0,46	0,43	0,50	0,46	0,43	0,46	0,43					
	1,12-1,38	0,54	0,50	0,48	0,53	0,50	0,47	0,49	0,47					
	1,38-1,75	0,58	0,54	0,51	0,56	0,53	0,50	0,52	0,50					
	1,75-2,25	0,62	0,55	0,56	0,60	0,58	0,56	0,55	0,56					
	2,25-2,75	0,67	0,64	0,61	0,65	0,63	0,61	0,62	0,61					
	2,75-3,50	0,69	0,66	0,63	0,67	0,65	0,63	0,64	0,62					
	3,50-4,50	0,72	0,70	0,67	0,70	0,68	0,66	0,67	0,66					
	4,50-6,00	0,74	0,71	0,69	0,72	0,70	0,68	0,65	0,67					
Illuminazione diretta $d = 0,9h$	0,50-0,70	0,35	0,32	0,30	0,35	0,32	0,30	0,32	0,30				Riflettore a fascio medio	
	0,70-0,90	0,43	0,39	0,37	0,42	0,39	0,37	0,39	0,37					
	0,90-1,12	0,48	0,45	0,42	0,47	0,44	0,42	0,43	0,41					
	1,12-1,38	0,53	0,50	0,47	0,52	0,49	0,47	0,48	0,46					
	1,38-1,75	0,57	0,53	0,50	0,55	0,52	0,50	0,52	0,50					
	1,75-2,25	0,61	0,57	0,55	0,55	0,57	0,54	0,56	0,54					
	2,25-2,75	0,64	0,61	0,55	0,62	0,60	0,55	0,55	0,57					
	2,75-3,50	0,66	0,63	0,61	0,63	0,61	0,60	0,61	0,55					
	3,50-4,50	0,68	0,66	0,63	0,66	0,64	0,63	0,63	0,62					
	4,50-6,00	0,69	0,67	0,66	0,67	0,66	0,64	0,65	0,63					

Tabella 47: Fattori di Utilizzazione

17.4. IL COMPORTAMENTO DEI CORPI COLPITI DA RADIAZIONI LUMINOSE

I corpi colpiti da radiazioni luminose, reagiscono mediante la *trasmissione*, la *riflessione* e l'*assorbimento*. Si parla di *trasmissione* quando i corpi (trasparenti) lasciano passare parte della radiazione incidente. Si chiama *fattore di trasmissione* il rapporto tra la luce trasmessa e quella incidente. La *riflessione* avviene in modo speculare o diffuso a seconda della asperità. si chiama coefficiente di riflessione della superficie il rapporto tra il flusso riemesso da una superficie ed il flusso incidente sulla stessa.

$$\text{cr} = \frac{f}{i} \quad [170]$$

quando la superficie riflettente presenta una scabrosità contenuta entro limiti di grandezza paragonabili a quelli delle onde incidenti (10^{-3} - 10^{-4} mm per luce visibile) si verifica la riflessione speculare.

Se le asperità superano i limiti in precedenza descritti, si verificano varie riflessioni e quindi un effetto di diffusione dell'energia luminosa, in ogni direzione, con conseguente splendore uniforme della superficie illuminata. L'*assorbimento* è il fenomeno complementare ai due precedenti nel caso in cui i corpi illuminati non trasmettono né riflettono l'energia incidente, bensì l'assorbono.

17.5. DISTANZA MINIMA TRA GLI APPARECCHI, D

La distanza tra corpi e pareti si pone pari a $d/2$, ove d è la distanza fra lampade.

L'illuminamento necessario sul piano di lavoro può essere fornito in parte (ad es. 30-50%) dagli apparecchi a *soffitto* (*illuminazione generale*) e parte da apparecchi collocati vicino all'utente, fuori del volume d'offesa (*illuminazione locale*), vedi Figura 181.

Tipo di corpo	d
A	1.1 b
B	1.1 b
C	b
D	0.9 b

Tabella 48: Distanza fra apparecchi illuminanti

18. IL BENESSERE VISIVO E LA PROGETTAZIONE ILLUMINOTECNICA

L'analisi e la valutazione del grado di illuminazione, di tipo naturale, che si vuole ottenere in uno specifico ambiente (abitazione, ufficio, industria, scuola, ospedale, etc.), per una perfetta visione, assume primaria importanza in fase progettuale essendo ad essa legata il corretto svolgimento delle attività lavorative.

Infatti, la maggior parte delle informazioni necessarie per lo svolgimento di una attività lavorativa sono di tipo visivo per cui, le modalità di illuminazione del *compito visivo* devono essere attentamente valutate al fine di garantire il comfort visivo dell'operatore.

Per raggiungere tale obiettivo è indispensabile:

- realizzare un ambiente luminoso idoneo a soddisfare le esigenze fisiopsicologiche dell'operatore assicurando sempre, ove possibile, il ricorso all'illuminazione naturale;
- rendere ottimale la percezione delle informazioni visive, per assicurare buone condizioni di lavoro ed una prestazione visiva veloce e precisa.

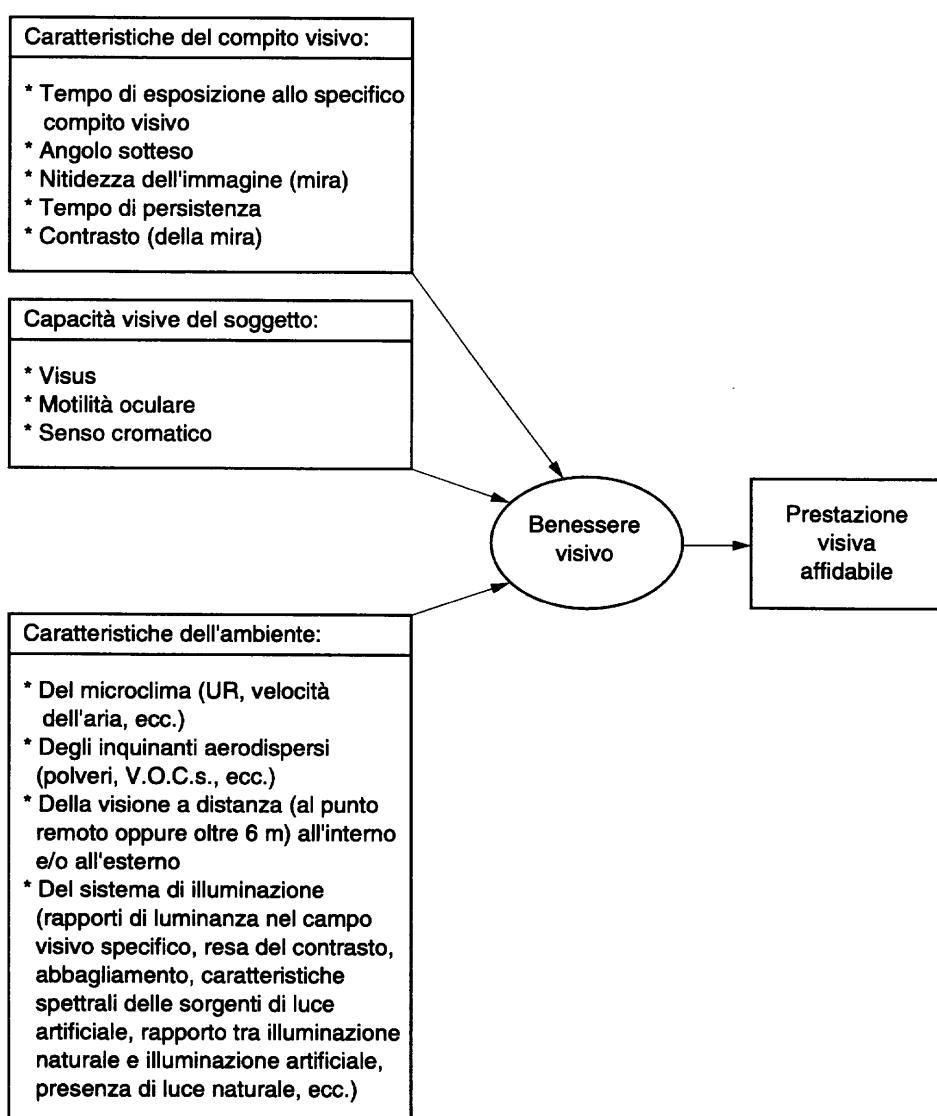


Figura 172: *Compito visivo e prestazione visiva*

La norma italiana UNI 10530 del febbraio 1997 dal titolo *Principi di ergonomia della visione (sistemi di lavoro e illuminazione)* con riferimento ai principali obiettivi dell'ergonomia della visione nell'ambito dei sistemi di lavoro afferma che *l'assenza del benessere visivo dipende in gran parte dalle caratteristiche del compito visivo più che da altri*⁵⁴. Nella Figura 172 sono riportati i parametri che influenzano la prestazione lavorativa in un assegnato ambiente visivo, suddivisi in relazione al compito visivo, alle capacità visive del soggetto e alle caratteristiche dell'ambiente.

Sempre con riferimento alla UNI10530, la condizione generale di benessere visivo può essere conseguita attraverso numerose combinazioni dei fattori che influenzano la prestazione visiva; eventuali carenze relative ad uno o più fattori possono essere parzialmente compensate da un opportuno incremento degli altri.

In base alle superiori premesse la progettazione degli interni non deve mirare esclusivamente al raggiungimento di un illuminamento uniforme del piano di lavoro e quindi dell'ambiente, ma deve garantire una corretta visibilità del compito visivo dipendente dal contrasto percepito dall'operatore, dallo stato di adattamento dell'operatore, dalla presenza di fenomeni di abbagliamento e di riflessione, da eventuali ostruzioni e dalla procedura di svolgimento del compito visivo. La fase progettuale dovrà sempre essere preceduta da uno studio dettagliato dello spazio fisico e delle caratteristiche funzionali ad esso connesse, indispensabili per la definizione, in termini di prestazioni, dell'ambiente luminoso e degli indici significativi per la sua valutazione, ed in particolare dovrà prendere in considerazione quanto segue:

- la corretta dimensione degli ambienti;
- le finiture, colore e caratteristiche di riflessione delle superfici;
- le dimensioni e caratteristiche di trasmissione delle superfici vetrate;
- la dimensione e caratterizzazione di eventuali schermi;
- la definizione delle classi di utenza;
- la definizione delle attività svolte nell'ambiente;
- il profilo di occupazione dell'ambiente.

18.1. I PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA PRESTAZIONE VISIVA

La progettazione illuminotecnica⁵⁵, come in precedenza citato, mira al raggiungimento del comfort visivo dell'operatore o fruitore di un determinato ambiente mediante uno studio in termini di

⁵⁴ Temperatura, ventilazione, etc.

⁵⁵ Citeremo alcune definizioni tratte dalla norma UNI10530 indispensabili per una rapida comprensione degli argomenti di seguito descritti:

intorno del compito visivo: Insieme dello spazio che può essere visto da una posizione precisata quando si muovono la testa e gli occhi.

sistema di lavoro: Combinazione di persone ed attrezzi che interagiscono nel processo di lavoro, per effettuare il compito di lavoro, nello spazio di lavoro, all'interno dell'ambiente di lavoro, sotto le condizioni imposte dal compito di lavoro.

piano di lavoro: Piano sul quale è svolto il compito visivo.

piano di lavoro di riferimento: Piano orizzontale sul quale è calcolato l'illuminamento medio nella fase di progetto. Se non altrimenti indicato, il piano di lavoro di riferimento è assunto ad una altezza di 0,85 m sopra il suolo; per le scrivanie, per esempio, l'altezza secondo le UNI 7368 e UNI 9095 è di 0,72 m.

illuminazione generale: Illuminazione progettata per illuminare una intera area approssimativamente in modo uniforme.

illuminazione localizzata: Illuminazione progettata per un interno al fine di ottenere anche una maggiore illuminazione sopra una o più parti del locale.

illuminazione locale: Illuminazione per uno specifico compito visivo complementare e controllabile separatamente dalla illuminazione generale.

fattore di utilizzazione: Rapporto tra il flusso luminoso che incide sul piano di lavoro e il flusso luminoso totale emesso dalle lampade.

prestazione dello spazio fisico e delle caratteristiche funzionali ad esso connesse. A tal proposito la norma UNI10530 al punto 4 così recita:

La natura del sistema visivo dell'operatore è determinante nella progettazione dell'ambiente visivo, la cui efficacia è misurata in termini di prestazione visiva. Per valutare una prestazione visiva è necessario esaminare le interazioni tra sistema visivo e caratteristiche del compito da svolgere nell'ambiente. La prestazione visiva deve quindi essere analizzata sulla base di tutti i fattori che la influenzano. Il termine "prestazione visiva" è utilizzato per esprimere la capacità di rilevazione e l'attitudine a reagire manifestate da un individuo quando i dettagli del "compito visivo" entrano nel "campo visivo". Tale attitudine può essere valutata in termini di velocità, precisione e accuratezza della percezione. La prestazione visiva dipende:

- dalle caratteristiche proprie del compito visivo da svolgere (dimensioni, forma, posizione, colore e fattore di riflessione del dettaglio osservato e del fondo);
- dalle condizioni d'illuminazione.

E' inoltre influenzata da altri fenomeni quali l'abbigliamento, la mancanza d'uniformità dell'illuminazione, la natura dello sfondo e, più in generale, dal modo in cui è concepito lo spazio di lavoro. I parametri da prendere in considerazione per una corretta percezione visiva sono:

<i>luminanza</i>
<i>contrast</i>
<i>dimensione, forma e caratteristiche della superficie</i>
<i>colore</i>
<i>movimento e tempo necessario per la visione</i>
<i>posizione dell'immagine sulla retina</i>

Tabella 49: Parametri per una corretta percezione visiva

Nei capitoli seguenti definiremo i parametri che influenzano la prestazione visiva ed i rimedi da attuare per attenuarne gli effetti indesiderati.

18.2. L'ILLUMINAMENTO DEL COMPITO VISIVO

Le condizioni di illuminazione dell'ambiente visivo influiscono sulle funzioni visive fisiologiche (prestazione visiva), su quelle psicologiche (benessere) e, di conseguenza, possono contribuire alla prestazione, alla sicurezza, al benessere ed al senso di soddisfazione dell'uomo nel proprio ambiente.

Lo svolgimento di un compito visivo diviene più agevole all'aumentare della luminanza a partire da una soglia definita dalla sensibilità dell'occhio al contrasto⁵⁶. In condizioni normali, un aumento dell'illuminamento induce un miglioramento della prestazione visiva inizialmente molto rapido (da 0 a 100 lux) e che va successivamente riducendosi fino ad annullarsi. La prestazione visiva relativa ad un lavoro di precisione e/o a debole contrasto può essere in parte migliorata mediante elevati livelli di luminanza, mentre l'esecuzione di compiti visivi su superfici di dimensioni rilevanti o a forte contrasto può essere effettuata in modo confortevole anche con livelli di luminanza non elevati.

In generale si rileva che l'occhio è lento ed incerto nella percezione degli oggetti e dei colori particolari in condizione di scarsa illuminazione; crescendo l'illuminazione da 1 fino a 100 lux, l'occhio umano acquista una maggior velocità di percezione.

Aumentando l'illuminazione oltre i 100 lux, si ha sempre un vantaggio per la visione, ma l'incremento è minore. Da notare che verso i 100 lux anche le persone astigmatiche vedono come le persone normali, e ciò è molto importante se si pensa che circa il 50% della popolazione mondiale ha gli occhi astigmatici.

Per fare un esempio se calcoliamo infatti che per svolgere una determinata attività per cui sono richiesti 500 lux, occorrono n ore lavorative, per svolgere lo stesso lavoro a 150 lux le ore di mano d'opera aumenteranno del 15-30%.

⁵⁶ Vedi capitolo 15.2 Principi della VISIONE

Con la riduzione dei livelli di illuminamento, i danni dovuti a scarso rendimento si identificano nell'aumento degli errori, delle pause inconsce, nell'insorgere di malattie anche di tipo psicosomatico e dei casi di incidenti ed infortuni.

Appare evidente come un lavoro prolungato svolto in condizioni di illuminamento non appropriate (debole illuminamento, mancanza di uniformità, abbagliamento fastidioso ecc.). determina un inevitabile affaticamento visivo.

Tale affaticamento interessa il sistema nervoso centrale, in relazione allo sforzo richiesto per interpretare segnali ambigui o non sufficientemente nitidi; ed il sistema muscolare per lo sforzo di mantenere una postura non corretta adottata al fine di ridurre la distanza dal compito visivo, oppure per evitare di essere distratti o di essere disturbati da riflessi fastidiosi.

Riguardo i requisiti illuminotecnici degli ambienti l'illuminazione mediante luce naturale od artificiale deve fornire le condizioni ottimali per lo svolgimento del compito visivo richiesto anche quando si distoglie lo sguardo dal compito o per riposo o per una variazione del compito stesso. Situazioni particolari possono richiedere requisiti specifici.

L'impressione visiva di un interno è influenzata dall'aspetto delle seguenti superfici nel campo visivo:

- a) oggetti visivi principali: per esempio i compiti, i visi delle persone e gli arredi;
- b) grandi superfici all'interno dell'ambiente: pareti, soffitti, pavimenti, finestre (di notte) e superfici di arredi e macchinari;
- c) sorgenti di luce: apparecchi di illuminazione e finestre (di giorno).

In un sistema di lavoro, il campo visivo dell'operatore è diverso a seconda che egli sia concentrato sul compito o che guardi lontano; se ne deduce come l'illuminazione del compito e quella dell'ambiente devono essere distinte al fine di evitare:

distrazione ed adattamento sfavorevole e situazioni di disagio visivo durante lo svolgimento del compito;

di conseguenza l'illuminazione deve:

incrementare la prestazione visiva⁵⁷; e contribuire a migliorarne le condizioni ambientali.

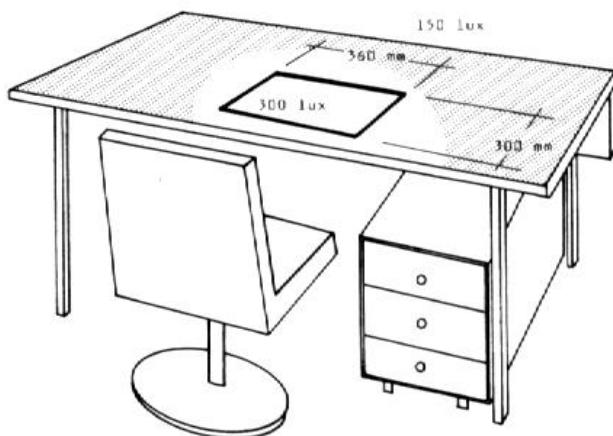


Figura 173: Esempio di corretta illuminazione: lo studio

⁵⁷ Ai fini del compito visivo sono fattori generalmente rilevanti i contrasti di luminanza e i contrasti cromatici; questi ultimi possono essere impiegati per migliorare la prestazione visiva, soprattutto quando i contrasti di luminanza sono contenuti

Importante diviene quindi lo studio ergofthalmico del posto di lavoro per cui è necessario mantenere all'interno del "campo visivo professionale" dell'operatore, la presenza di valori contenuti dei rapporti di luminanza, in particolare nell'area della visione distinta. Occorre poi evitare il continuo ed intenso lavoro di dilatazione-costrizione pupillare e di adattamento retinico, che possono provocare stati di affaticamento e di irritazione oculare.

Bisogna progettare l'ambiente in modo da permettere al fruitore di osservare durante il lavoro anche immagini poste a distanza maggiore di 6 m, in modo da ottenere un rilasciamento, e perciò un riposo, delle strutture che regolano l'accomodazione e la convergenza, intensamente attivate nella visione ravvicinata.

L'illuminazione di un ambiente deve essere appropriata all'attività che dovrà svolgersi al suo interno il quale deve risultare *visivamente piacevole e privo di abbagliamento. Gli obiettivi da perseguire, mediante l'appropriata illuminazione dell'ambiente, includono la necessità di:*

ottenere una adeguata luminosità dello spazio in modo che si possano percepire con chiarezza gli oggetti all'interno
garantire condizioni di sicurezza e di facilità di movimento all'interno dell'ambiente stesso
favorire la concentrazione dell'osservatore sull'area del compito visivo
prevedere aree di luminanza (leggermente) inferiore a quella delle aree relative al compito visivo per consentire un adeguato riposo della vista
determinare un buon modellato soprattutto dei visi ed ammorbidire le ombre dure mediante un appropriato equilibrio tra luce direzionale e diffusa
rendere naturali i colori delle persone e degli arredi dell'interno mediante l'impiego di sorgenti di luce con buone caratteristiche di resa del colore; ed inoltre adeguare le caratteristiche delle sorgenti di luce artificiale al livello di illuminamento
ottenere una piacevole varietà di luminanze e di colori per contribuire al benessere degli occupanti ed alla riduzione dello stress da lavoro (per la definizione di stress da lavoro, vedere ISO 6385); una soluzione è quella di prevedere, nell'ambiente visivo, aree di luminanza diversa, rispetto alla media, poste fuori del campo di osservazione del compito visivo;
favorire in linea di massima la pulizia mediante la scelta di colori chiari

I valori di illuminamento consigliati per differenti compiti ed attività, necessari per ottenere soddisfacenti prestazioni visive ed il raggiungimento delle condizioni di benessere, definiti in relazione alle esigenze visive del compito ed alla capacità visiva dei soggetti sono riportati nella tabella seguente.

Tipo di area, compito o attività	Intervallo di illuminamento (lux)		
Aree esterne di circolazione e lavoro	20	30	50
Aree di circolazione, semplice orientamento o brevi visite temporanee	50	100	150
Locali non usati con continuità per scopi di lavoro	100	150	200
Compiti con semplici requisiti visivi	200	300	500
Compiti con requisiti visivi medi	300	500	750
Compiti con requisiti visivi di precisione	500	750	1000
Compiti con requisiti visivi difficili	750	1000	1500
Compiti con requisiti visivi speciali	1000	1500	2000
Svolgimento di compiti visivi molto precisi			>2000

Tabella 50: Illuminamenti consigliati

Per ogni tipo di compito o attività sono riportati tre valori (per una descrizione più dettagliata dei livelli di illuminamento consigliati si fa riferimento alle tabelle proposte nel capitolo 4.6: L'illuminamento).

I valori più elevati possono essere assunti a riferimento:

- in presenza di modesti valori del fattore di riflessione o di contrasto;
- quando gli errori commessi nell'esecuzione del compito comportano conseguenze rilevanti;
- quando la prestazione visiva è critica;
- nei casi in cui la precisione o una maggiore produttività rivestono grande importanza;
- quando la capacità visiva del soggetto lo renda necessario.

Particolare attenzione bisogna porre, in fase progettazione, sulla qualità riflettenti dei materiali di rivestimento degli ambienti allo scopo di evitare che le luminanze delle singole superfici risultino eccessivamente diverse tra loro.

In generale si identificano tre zone distinte: la prima è quella propria del campo visivo interessato, la seconda indica una zona immediatamente prossima alla prima e la terza è l'intorno generale che può rientrare nel campo visivo.

Per ottenere un comfort visivo, la prima zona non deve superare una luminanza di 200 cd/m^2 (i valori raccomandati sono compresi tra 40 e 120 cd/m^2). L'area adiacente (zona) da 1 a $1/3$ del valore del campo visivo specifico (minimo $1/5$).

L'area generale (zona 3) da $1/5$ a 5 volte il campo visivo specifico (minimo da $1/10$ a 10 volte).

Bisogna inoltre considerare i seguenti apporti di luminanza:

- | |
|---|
| tra compito visivo ed immediati intorni, quali le superfici di un banco o di una scrivania; |
| tra soffitto, pareti e pavimento; |
| tra apparecchi di illuminazione e finestra |

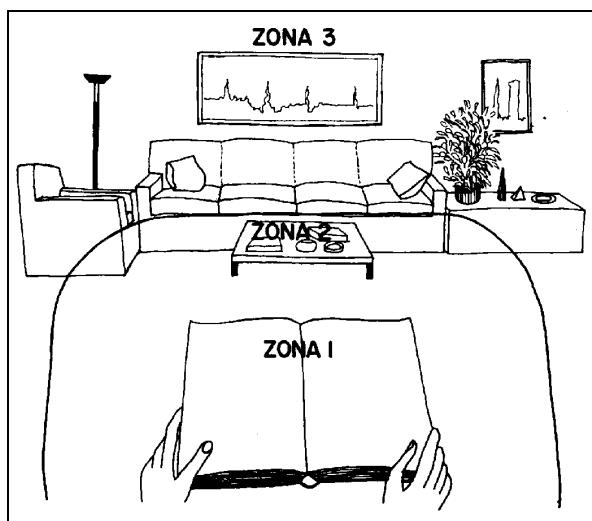


Figura 174: Identificazione delle zone in rapporto alla luminanza

I valori di riflessione raccomandati per le superfici interne degli ambienti sono riportati nella tabella seguente

superficie	potere riflettente
soffitto	60/90%
pareti	35/60%
pavimenti	15/35%
arredi	25/45%
Rivestimenti, tendaggi	45/85%

Tabella 51: Poteri riflettenti delle pareti

18.3. IL CONTRASTO

Ove possibile, il compito e l'illuminazione devono essere progettati al fine di fornire un contrasto ottimale.

La sensibilità al contrasto aumenta, entro certi limiti, con la luminanza; essa è anche influenzata dal gradiente di luminanza o colore al contorno tra due zone adiacenti. Risulta ridotta quando si hanno variazioni molto forti di luminanza e di colore nel campo visivo che circonda l'immagine da osservare. Per esempio, se una sorgente di luce intensa si trova nel campo visivo, la presenza di condizioni di abbagliamento debilitante ad essa connesse può provocare una riduzione apparente del contrasto. Una riduzione del contrasto si può verificare anche quando si distoglie lo sguardo dal compito visivo per dirigerlo verso una zona più illuminata, poiché si verifica una variazione rapida dell'adattamento dell'occhio (adattamento transitorio).

Se a causa di riflessioni dovute a superfici di elevata luminanza⁵⁸ il contrasto può essere ridotto un'appropriata diffusione dell'illuminazione all'interno di un ambiente, per esempio per riflessione sul soffitto e/o sulle pareti, può attenuare la riduzione del contrasto.

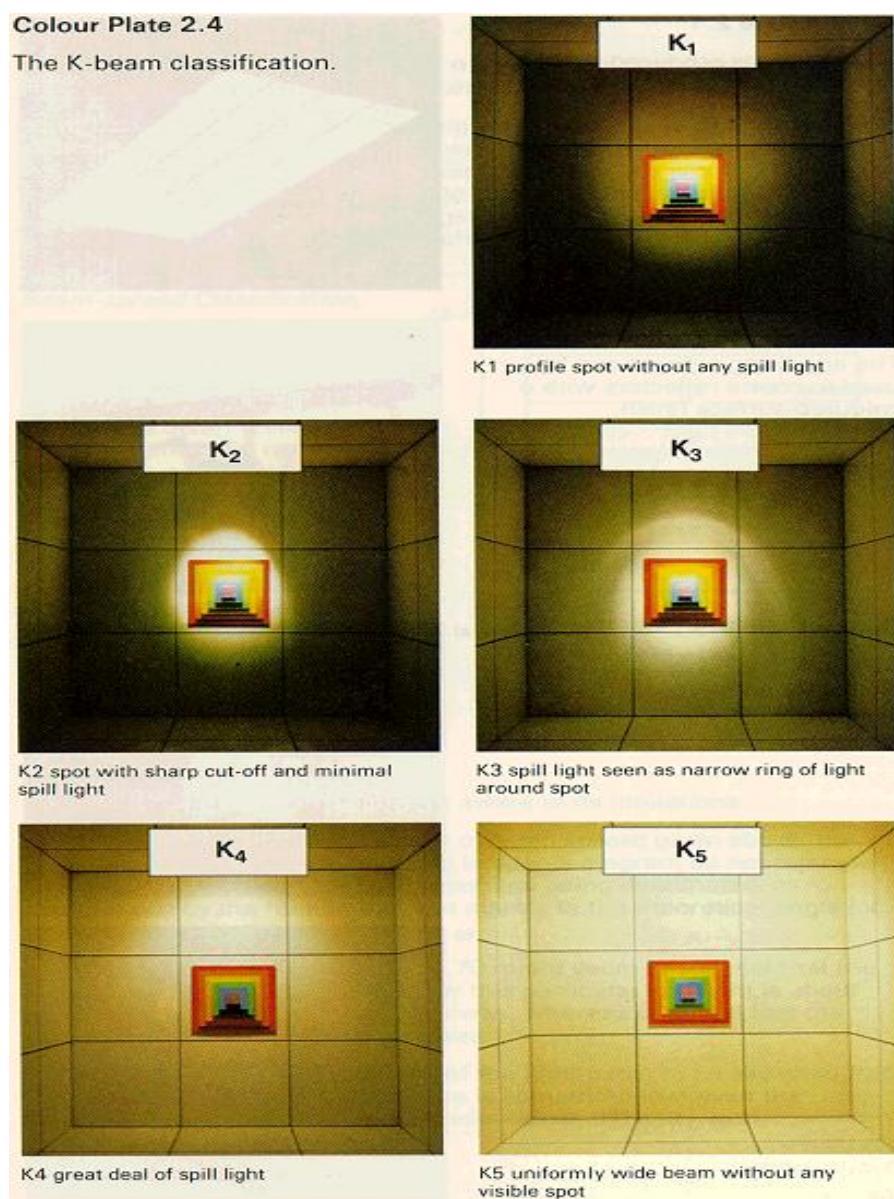


Figura 175: Influenza del contrasto

⁵⁸ Tale condizione produce una sorta di velo che impedisce o disturba la visione (da cui il termine riflessioni di velo).

18.4. L'ABBAGLIAMENTO

Valori elevati del fattore di riflessione delle superfici in presenza di sorgenti ad elevata luminanza ed anche alla presenza di superfici con riflessione di tipo speculare come nel caso di metallo lucidato, possono essere causa di fenomeni di abbagliamento fastidioso e/o debilitante i quali determinano una inevitabile riduzione del comfort visivo con conseguente senso di disagio del fruitore, che tende ad aumentare con il tempo ed a costituire un fattore di affaticamento.

Normalmente la luminanza dello sfondo determina il livello generale dell'adattamento dell'occhio; quando la sorgente luminosa è di grandi dimensioni, come per esempio una finestra, si deve tener conto dell'effetto della luminanza della sorgente sul livello di adattamento.

Particolare attenzione bisogna porre riguardo l'abbagliamento debilitante che interviene abitualmente quando una sorgente di debole luminanza ma di appropriata superficie (o una piccola sorgente di elevata luminanza) è percepibile nell'intorno prossimo del compito visivo.

Un esempio è rappresentato dalla difficoltà che si incontra nella lettura di immagini a bassa luminanza poste di fronte o in prossimità di una finestra.

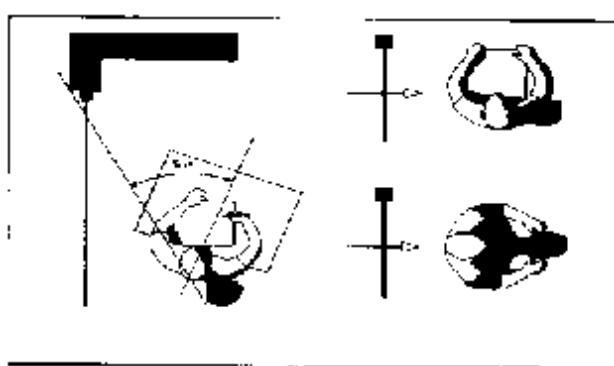


Figura 176: Posizioni per evitare l'abbagliamento

Come è chiaramente visibile dalla precedente immagine una corretta posizione del posto di lavoro rispetto alla superficie vetrata di una finestra, nel caso di illuminazione esclusivamente naturale, può ridurre i problemi inerenti all'abbagliamento ed alle ombre.

18.5. LA PSICOLOGIA DEL COLORE

Il colore è un attributo della luce che contribuisce all'osservazione ed alla percezione dell'ambiente. Tra gli attributi della luce esso è notoriamente il più utile per identificare rapidamente e agevolmente gli oggetti situati nello spazio di lavoro. Nella progettazione illuminotecnica bisogna tener conto degli effetti psicologici del colore; negli ambienti con colori forti e saturi, la luce calda aumenta la forza del colore (il caso della luce naturale), mentre le luci fredde, smorzano i colori caldi e creano senso di spaziosità. In ogni caso sarà sempre utile in fase progettuale utilizzare colori con buona capacità di riflessione, sia per un risparmio energetico che per un addolcimento delle ombre provocate sia dalla luce proveniente dalle finestre che da quella artificiale.

Colore	Fattore di rifl. (%)
bianco	70/85%
Grigio chiaro	45/65%
Grigio	25/40%
grigio scuro	10/20%
nero	5%
giallo	65/75%
bruno giallastro	30/50%
marrone scuro	10/25%
verde chiaro	30/55%

verde scuro	10/25%
rosa	45/60%
rosso chiaro	25/35%
rosso scuro	10/20%
celeste	30/55%
blu	10/25%

Tabella 52: Fattori di riflessione dei colori

Per quanto concerne lo studio cromatico delle superfici è possibile rifarsi ad uno studio condotto da *Maurice Deribere* e dalla *National Chemical & Manufacturing Company*, che si basa sulla scelta dei colori in base all'orientamento, alla posizione delle finestre ed al numero delle finestre stesse del locale preso in considerazione⁵⁹. Il procedimento è il seguente: determinare l'orientamento delle finestre se queste si trovano su di un solo lato del locale. Se il locale ha le finestre su più lati, si determina l'esposizione con un compromesso: per finestre su pareti adiacenti si esegue una media fra le due direzioni (es. con finestre sul lato sud e sul lato ovest, l'esposizione sarà sud-ovest). Se invece le finestre si trovano su lati opposti o su tre lati, si sceglie il sud come esposizione anche se la parete sud non presenta aperture. Tutte le combinazioni possibili possono essere per semplicità rappresentate nel diagramma e nella tabella seguente:

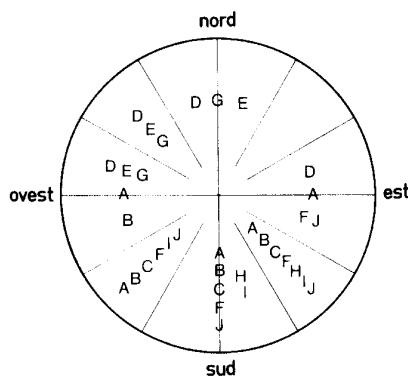


Figura 177: Combinazione dei colori in funzione dell'esposizione delle finestre

SCHEMA DELLE DOMINANTI		
	Soffitto	Pareti
A	bianco	verdemare, avorio
B	bianco	verde salvia chiaro, avorio
C	bianco	grigio, verde salvia, grigio freddo
D	bianco	crema, beige, avorio scuro
E	bianco	grigio caldo, beige caldo
F	bianco	avorio scuro, azzurro
G	bianco	avorio, beige, grigio caldo
H	bianco	grigio rosato, beige rosato, verde salvia, grigio caldo
I	bianco	grigio, verde salvia, avorio
L	bianco	giallo, verde mare chiaro e scuro, avorio

Tabella 53: Schema delle dominanti

⁵⁹ Tale sistema nasce da uno studio condotto per la scelta cromatica delle dominanti cromatiche in aule scolastiche ed è stato progettato tenendo in considerazione il sistema percettivo degli studenti. I buoni risultati ottenuti hanno esteso l'uso di questo tipo di progettazione cromatica, con le dovute modificazioni, a tutto il mondo del lavoro.

18.5.1. LA PSICOLOGIA DEL COLORE NEL LAVORO

Per un corretto svolgimento delle attività lavorative occorre valutare attentamente la *sensazione del colore*; spesso si cerca con lo sguardo un colore o inconsciamente ci si sofferma su una tinta che ci coinvolge con il suo potere evocativo. La sensazione del colore dovrà essere presa in considerazione nella progettazione di tutti gli ambienti ed in particolare per quelli destinati ad attività lavorative di qualunque genere. In particolare negli uffici, è indispensabile che i soffitti non incombono spiacevolmente e non appesantiscano l'atmosfera in modo da produrre senso di schiacciamento o di limitatezza dell'aria respirabile per chi svolge un'attività, come è anche necessario che gli stessi non producano all'inverso una situazione di fuga da uno spazio in cui non si riesce a definire una propria dimensione di lavoro indispensabile per una corretta concentrazione.

Sarà quindi corretto, negli ambienti lavorativi, l'uso di colori chiari che contribuiscono a dare respiro ed equilibranti proporzioni, mentre i particolari dell'arredamento, gli oggetti e gli spazi di raccordo, di transito e i servizi riusciranno più confortevoli se si useranno colori caldi che, nei limiti di un potere riflettente adeguato, avvicinano le superfici e ne rendono più piacevole l'uso quotidiano.

Per l'attività intellettuale che si svolge in tutti i livelli negli uffici si deve privilegiare la possibilità di una serena, distesa, produttiva concentrazione da cui sia bandita ogni possibilità di affaticamento fisico e mentale ed ogni forma di aggressività che potrebbe condurre a lungo andare a pericolose nevrosi.

In base alle superiori premesse l'occhio non lo si deve considerare esclusivamente come un semplice apparecchio di ricezione a servizio del cervello ma i suoi processi fotochimici assumono un ruolo primario nella regolazione biochimica dell'intero organismo e della psiche in particolare.



Figura 178: Influenza del colore delle pareti

Esiste, infatti, una via di comunicazione nervosa, fino ad oggi assai poco considerata e non connessa con la capacità visiva, che va direttamente dall'occhio a quella porzione di cervello chiamata ipotalamo e che controlla l'ipofisi. L'ipofisi e l'ipotalamo esercitano una azione congiunta di controllo quasi completo di tutte le altre ghiandole endocrine (tiroide, gonadi, surrenali).

Dell'aspetto cromatico delle superfici se ne occupa anche la norma UNI 10530 la quale, così recita a riguardo: *In particolari attività professionali l'aspetto dell'immagine colorata e la discriminazione tra i colori possono assumere una notevole importanza.*

Occorre quindi per un corretto svolgimento delle attività lavorative valutare attentamente la *sensazione del colore*; spesso si cerca con lo sguardo un colore o inconsciamente ci si sofferma su una tinta che ci coinvolge con il suo potere evocativo. La sensazione del colore dovrà essere presa in considerazione nella progettazione di tutti gli ambienti ed in particolare per quelli destinati ad attività lavorative di qualunque genere. In particolare negli uffici, è indispensabile che i soffitti non incombono spiacevolmente e non appesantiscano l'atmosfera in modo da produrre senso di schiacciamento o di limitatezza dell'aria respirabile per chi svolge un'attività, come è anche necessario che gli stessi non producano all'inverso una situazione di fuga da uno spazio in cui non si riesce a definire una propria dimensione di lavoro indispensabile per una corretta concentrazione.

Sarà quindi corretto, negli ambienti lavorativi, l'uso di colori chiari che contribuiscono a dare respiro ed equilibranti proporzioni, mentre i particolari dell'arredamento, gli oggetti e gli spazzi di raccordo, di transito e i servizi riusciranno più confortevoli se si useranno colori caldi che, nei limiti di un potere riflettente adeguato, avvicinano le superfici e ne rendono più piacevole l'uso quotidiano.

Per l'attività intellettuale che si svolge in tutti i livelli negli uffici si deve privilegiare la possibilità di una serena, distesa, producente concentrazione da cui sia bandita ogni possibilità di affaticamento fisico e mentale ed ogni forma di aggressività che potrebbe condurre a lungo andare a pericolose nevrosi.

In base alle superiori premesse l'occhio non lo si deve considerare esclusivamente come un semplice apparecchio di ricezione a servizio del cervello ma i suoi processi fotochimici assumono un ruolo primario nella regolazione biochimica dell'intero organismo e della psiche in particolare. Esiste infatti una via di comunicazione nervosa, fino ad oggi assai poco considerata e non connessa con la capacità visiva, che va direttamente dall'occhio a quella porzione di cervello chiamata *ipotalamo* e che controlla l'*ipofisi*. L'ipofisi e l'ipotalamo esercitano una azione congiunta di controllo quasi completo di tutte le altre ghiandole endocrine (tiroide, gonadi, surrenali).



Figura 179: Interrelazione colori/ emotività

Ne consegue che: *L'ipotalamo è in grado di controllare direttamente, oppure indirettamente tramite l'ipofisi, un ampio ventaglio di funzioni dell'organismo di cui oggi si sa che sono condizionate dalla percezione della luce.*

Tra tali funzioni annoveriamo: la crescita e il metabolismo, la regolazione dell'equilibrio idrico e della temperatura, i livelli di glucosio, le funzioni sessuali e riproduttive.

Inoltre controlla anche altre funzioni vitali come l'appetito, l'alternarsi dello stato di veglia e di sonno, certi aspetti comportamentali come la paura, l'ira, le pulsioni sessuali e l'equilibrio tra le due componenti del sistema nervoso autonomo: il simpatico e il parasimpatico.

Gli effetti che la luce ha sull'uomo, sono testimoniati da numerosi documenti molti dei quali antichi (da *Plinio* a *Jonh Ott* sino agli studi di *Fritz Hollwich*) e da recenti esperimenti mediante i quali è stato possibile dimostrare che nella luce solare le radiazioni dominanti variano al variare delle ore della giornata⁶⁰ influendo in maniera differente sull'organismo.

Chi conosce, anche solo minimamente, l'azione dei singoli colori sulla nostra persona, non può fare a meno di notare che le radiazioni solari accompagnano la nostra giornata in modo assai mirabile.

La natura infatti, ci fornisce per esempio, radiazioni indaco che favoriscono l'azione mentale all'aurora; radiazioni che vanno dal giallo al rosso, quindi sempre più stimolanti per la nostra attività fisica, col trascorrere delle ore della giornata; ed infine radiazioni violette, ad azione equilibrante sul nostro tono neuro-muscolare, nella prima parte della notte, cioè nel momento in cui inizia il riposo. A conclusione di questo capitolo dedicato al cromatismo della luce aggiungiamo alcuni cenni sull'effetto dei colori sulla sfera fisica ed emotiva al fine di giungere ad una corretta scelta di un colore per un corretto svolgimento di qualsivoglia attività lavorativa.

Bianco	Essendo la sintesi di tutte le radiazioni dello spettro è però un colore molto stimolante che facilmente può risultare irritante.
Nero	Può essere definito come l'assenza di ogni radiazione riflessa e secondo alcuni studiosi rappresenta la scissione dell'IO e può perciò portare alla depressione totale.
Rosso	E' il colore più caldo dello spettro luminoso scatenando nell'organismo uno stato di tensione.
Arancione	Tale colore determina ottimismo ed entusiasmo ed ha un effetto equilibratore negli stati depressivi con conseguente sensazione di benessere.
Giallo	Tale colore rinforza i nervi ed esercita quindi un'azione benefica sul cervello aumentandone le capacità percettive. Esso evoca inoltre gioia, spensieratezza, allegria, successo.
Verde	E' il colore della vita, dell'equilibrio e può essere definito come armonizzatore, rinfrescante, rigeneratore e calmante ed è indicato in tutti i casi di disturbi attentivi da iperattività o da interferenze emozionali importanti; aiuta quindi a liberarsi dei problemi mentali od emozionali importanti.
Blu	E' un colore ad effetto distendente e rilassante soprattutto sui muscoli, riduce quindi tensioni e spasmi a livello muscolare. Un blu acceso può però provocare stanchezza e depressione.
Viola	E' il colore con la maggior frequenza d'onda quindi è il più carico di energia e risulta eccellente per moderare l'irritabilità, la collera, e tutte le emozioni violente e permette di diminuire l'angoscia e la paura. Deve essere usato in tutti quei casi nei quali sia necessario stimolare una maggiore concentrazione attentiva sia a livello di attenzione selettiva che a livello di attenzione prolungata.
Indaco	Cromaticamente è una combinazione di blu e di viola. E' il colore dell'energia intensa in senso cosmico. L'energia contenuta in questo colore è infatti di capitale importanza per lo sviluppo della vita. L'indaco è un colore rinfrescante e astringente ed un efficace tonico muscolare. Stimola l'acutezza dei cinque sensi e l'intuizione mentre calma l'eccitazione mentale. Si è inoltre scoperto che l'indaco sembra avere, unico tra tutti i colori, un effetto filtrante sulla radiatività.

Tabella 54: Effetti psicologici del colore

⁶⁰ Blu al mattino presto, gialle a mezzogiorno, rosse alla sera. Le radiazioni verdi predominano tra il mattino e mezzogiorno, mentre le radiazioni arancione sono più abbondanti tra mezzogiorno e la sera. Infine è all'aurora che vi è una maggiore quantità di raggi indaco mentre all'inizio della notte si riscontrano le radiazioni violette perché in questo momento esiste nell'atmosfera notturna una mescolanza uguale di raggi blu del mattino e di raggi rossi della sera.

18.6. VOLUME DI OFFESA

Le superfici (ad esempio carta e inchiostro) solo raramente sono perfettamente diffondenti. Spesso sono piuttosto di tipo diffondente-speculare presentano cioè una intensità maggiore in direzione speculare rispetto ai raggi incidenti.

Questo riduce il contrasto, e quindi la prestazione visiva, per un osservatore posto specularmente rispetto alla sorgente (*velo luminoso*). Si introduce allora il concetto di *volume d'offesa*, definito come il volume che comprende tutte le direzioni speculari a quelle di osservazione dell'area di lavoro, o di osservazione.

Per evitare la perdita di prestazione dovuta al velo luminoso, è opportuno che tutte le sorgenti luminose siano collocate al di fuori di questo volume specie in presenza di superfici con elevato comportamento speculare.

Nelle figure seguenti sono mostrate due esempi di corretta disposizione e scelta degli apparecchi illuminanti. L'apparecchio A della Figura 181 presenta una curva fotometrica asimmetrica, in modo da ridurre le perdite di flusso luminoso attraverso la finestra; l'apparecchio B presenta una curva simmetrica (ad "ali di pipistrello") e attenua le ombre causate dal corpo A.

Non ci sono sorgenti di luce nel volume d'offesa.

18.6.1. POSIZIONE DELL'APPARECCHIO ILLUMINANTE

La posizione del corpo luminoso può determinare effetti dannosi o indesiderabili di abbagliamento visivo.

Di ciò si deve tenere conto nel considerare **l'ergonomia** dei posti di lavoro.

L'illuminazione localizzata può dare luogo ad **abbagliamento per contrasto** qualora l'illuminazione del fondo non sia adeguata.

Per il posizionamento dei corpi luminosi si usano le **curve di Sollner**. In Tabella 55 si ha la classificazione della *qualità visiva*.

Classe di qualità	Tipo di compito o attività
A	compiti visivi molto difficoltosi
B	compiti visivi che richiedono prestazioni visive elevate
C	compiti visivi che richiedono prestazioni visive normali
D	compiti visivi che richiedono prestazioni visive modeste
E	per interni dove le persone non sono ubicate in una posizione di lavoro precisa ma si spostano da un posto all'altro esplicando compiti che richiedono prestazioni visive modeste

Tabella 55: Classe di qualità visiva

Con riferimento alla Figura 183, scelto un valore di illuminamento nella riga corrispondente alla qualità visiva desiderata, proseguendo verso il basso nei diagrammi di Figura 184 o di Figura 185, a seconda del tipo di apparecchio illuminante, si ottiene una linea guida che riporta l'*angolo limite di abbagliamento* al variare della luminanza dell'apparecchio illuminante.

I Costruttori di corpi illuminanti forniscono i diagrammi si *Sollner* per la loro produzione.

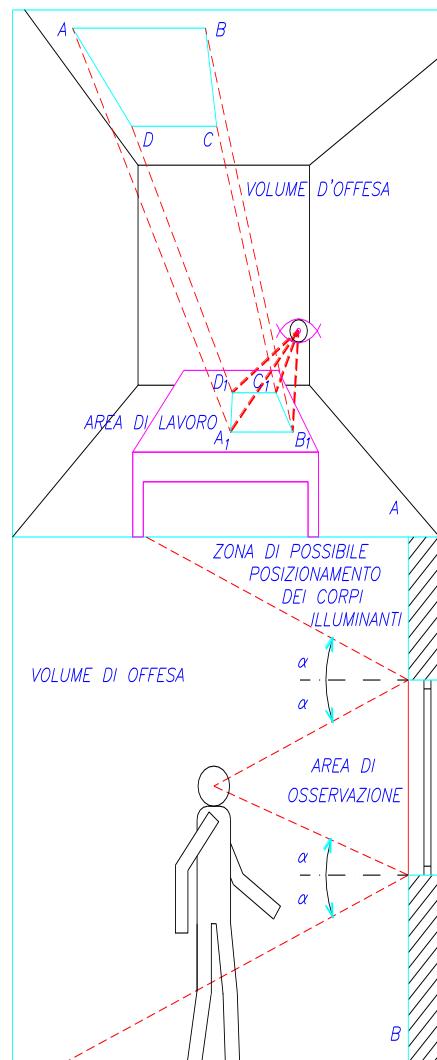


Figura 180: Volume di offesa

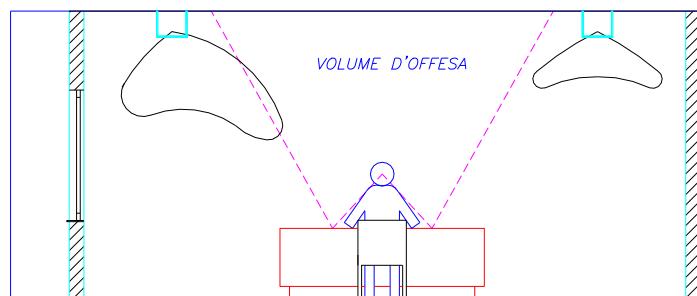
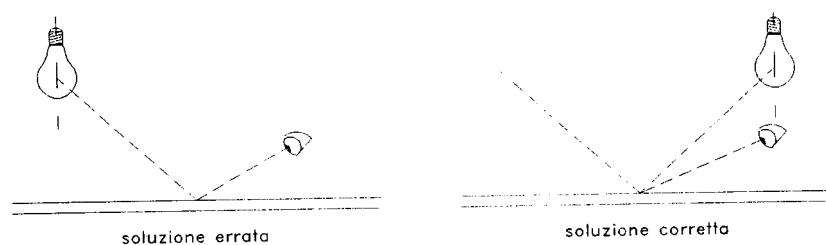
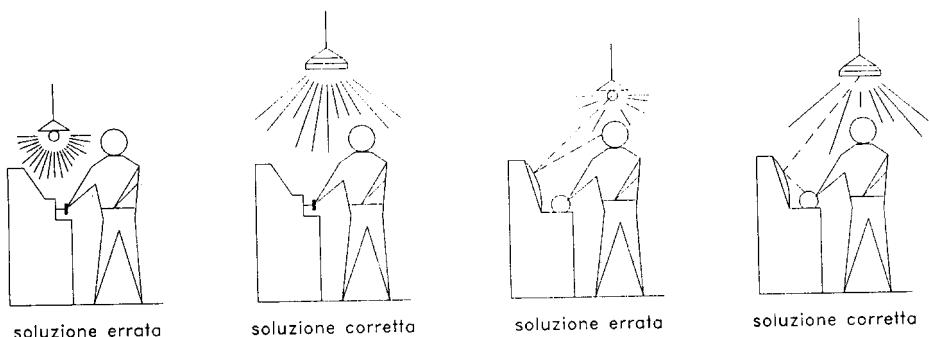


Figura 181: Volume di offesa in un posto di lavoro

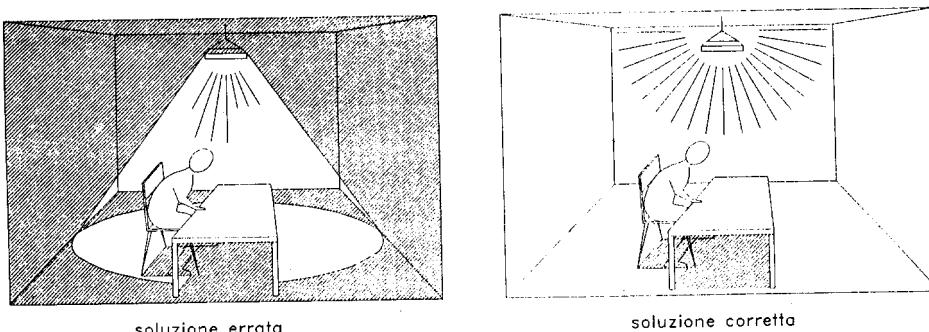


Abbagliamento da luce riflessa



Abbagliamento diretto

Abbagliamento da luce riflessa



Contrasti di luminanza

Figura 182: Corretta posizione dell'apparecchio illuminante

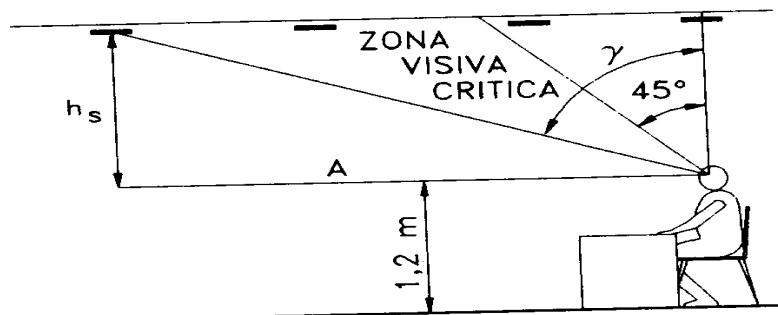


Figura 183: Definizione di angolo di abbagliamento

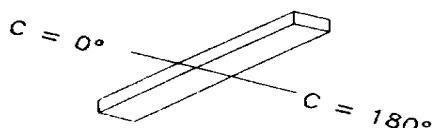
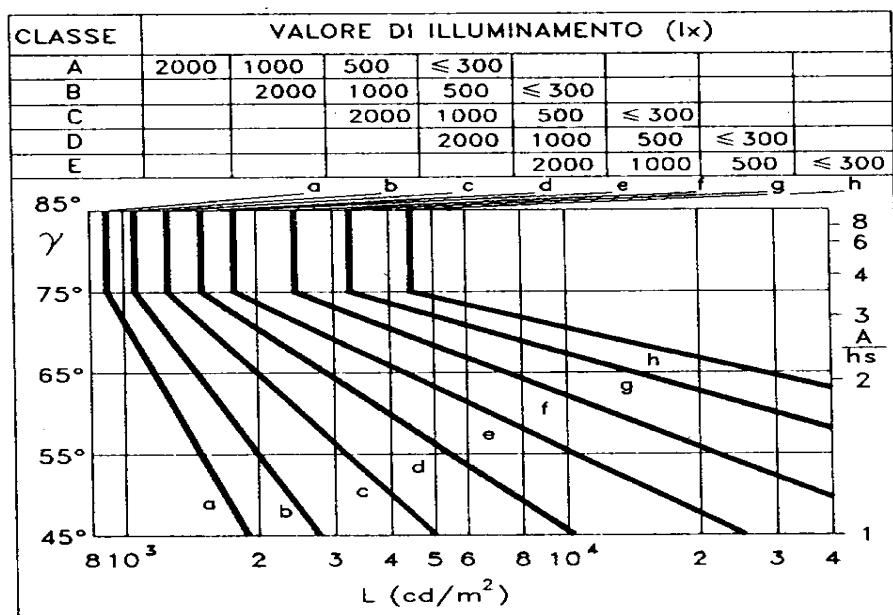


Figura 184: Curve di luminanza A: apparecchi senza bordo luminoso.

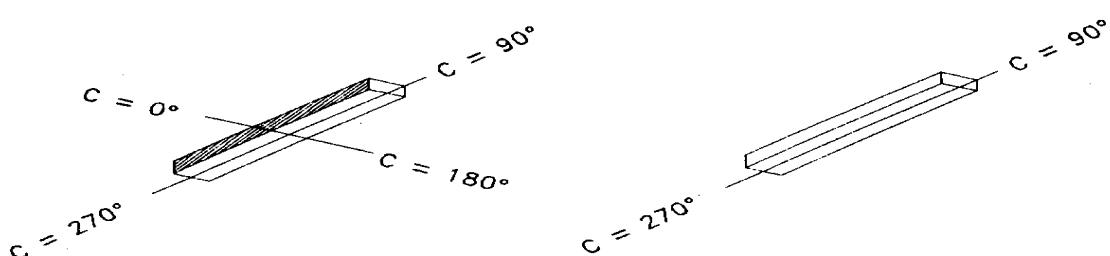
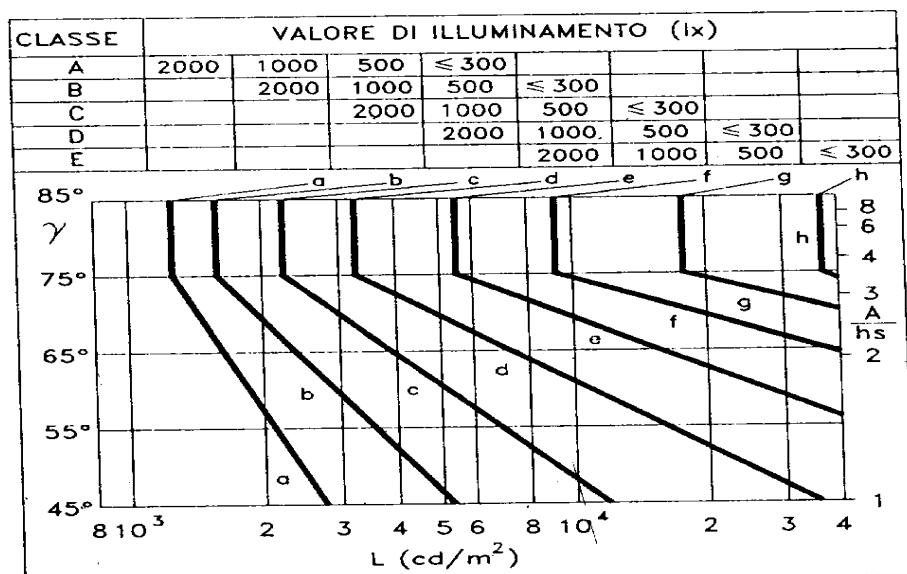


Figura 185: Curve di luminanza B: apparecchi con bordo luminoso

19. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI PER L'ACUSTICA

Testi Fondamentali di riferimento

1. G. CAMMARATA: "Acustica delle Sale", Dispense AA 1996, Catania
2. G. CAMMARATA: "Impianti Tecnici Edili", Vol. 2°, Dispense AA 2006-2007, Facoltà di Architettura di Siracusa
3. E. CIRILLO; " Acustica Applicata", Ed. Mc. Graw Hill, 1997
4. G. MONCADA LO GIUDICE- S. SANTOBONI: "Acustica", Masson 1995
5. G. MONCADA LO GIUDICE- L. DE SANTOLI: "Comfort Termico, Acustico e Illuminotecnico", Ed. ESA, Roma 1999
6. A. GIULIANI – A. COCCHI : "Elementi di Acustica Tecnica", E. Petroni, Bologna
7. D. FACONTI – S. PIARDI: "La qualità ambientale degli edifici", Maggioli Editore, 1998
8. A. SACCHI, G. CAGLIERIS: "Fisica Tecnica - Vol. 2 Climatizzazione", UTET, 1996
9. Y. ANDO - Concert Hall Acoustics - Springer-Verlag, 1985
10. G. VON BÉKÉSY: Sensory Inhibition - Princeton University Press, 1967
11. M. BARRON - Auditorium Acoustics and Architectural Design - E & FN SPON, 1993
12. L. BENAREK - Music, Acoustics and Architecture - J.W. & S, 1962
13. L. BENAREK - Acoustics - McGraw Hill, 1954 e 1983
14. J. BLAUERT - Spatial Hearing - The MIT Press, 1983
15. L. CREMER - Auditorium Acoustics - Applied Science Pub., 1975
16. L. CREMER, H.A. MULLER - Principles and Applications of Room Acoustics - Applied Science Pub. London, 1982
17. D.G. CRIGHTON, A.P. DOWLING, J.E. FLOWCS WILLIAMS, M. HECKL, F.G. LEPPINGTON: Modern Methods in Analytical Acoustics, Lecture Notes, Springer Verlag, 1992
18. B.F. DAY, R.D. FORD, P. LORD - Building Acoustics - Elsevier Pub. London, 1969
19. A. FARINA - La caratteristica acustica delle sale da spettacolo con particolare attenzione alle esigenze di ascolto della musica sinfonica - Tesi di Dottorato in Fisica Tecnica, A.A. 1985-86, Bologna
20. M. FORSYTH - Edifici per la Musica - Zanichelli, 1991
21. M. FORSYTH - Auditoria - Designing for the performing arts - Mitchell, London, 1987
22. S. GRAZIANI - Metodologie avanzate per l'elaborazione di segnali numerici - Tesi di Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica, AA. 1993-94, Catania
23. S. HANDEL - Listening, an introduction to the perception of auditory events - Cambridge Mass. MIT Press, 1989
24. K.W. HIPEL - Fuzzy set methodologies in multicriteria modeling, in Fuzzy information and decision processes - a cura di M.M. Gupta e E. Sanchez, North Holland Company, 1982.
25. IEC Standard #268-16
26. G.C. IZENOUR - Theatres Design - Mc. Graw Hill, 1977
27. V. L. JORDAN - Acoustical Design of Concert Hall and Theatres - Applied Science Publishers, 1980
28. V. L. JORDAN - Auditorium Acoustics - Applied Science Publishers, 1975
29. J.P. JULLIEN - Acoustique des salles - 1982

30. A. KANDEL - Fuzzy mathematical techniques with applications - Addison- Wesley Publishing Company, 1986.
31. H. KUTTRUFF - Room Acoustics - Elsevier Applied Science, 1991
32. P. LORD, D. TEMPLETON - The Architecture of sound - Designing places of assembly - Architectural Press, London, 1986
33. L. MAFFEI: Descrizione del suono in ambienti chiusi mediante la tecnica del tracciamento dei raggi sonori. Una procedura originale e verifiche sperimentali. Tesi di Dottorato in Fisica Tecnica, Aprile 1987.
34. L. MAKRINENKO - Acoustics of auditorium in public buildings - Acoustics Society of America and American Institute of Physics, 1994
35. J. MEYER - Acoustics and the performance of music - Verlag das Musikinstrument, Frankfurt am Main, 1978
36. L. ORREY - A concise history of Opera - Thames and Hudson, London, 1972
37. H.N. PARMAN - Modern Factor Analysis - University of Chicago Press, 1968
38. W.C. SABINE - Collected papers on Acoustics - Dover Pub., 1964, Ristampa
39. E.O. SACHS - Modern Opera Houses and Theatres - Batsford London, 1896
40. G. SAUNDERS - A treatise on Theaters - London, 1790, Ristampa in facsimile da parte della Benjamin Blom, N.Y., 1968
41. R. SOUTHERN - The medieval theatre in the round - Rev. Faber & Faber, London, 1975
42. M.R. SCHROEDER - Number and Theory in Science and Communication - Springer-Verlag, 1990 - Muzzio Editor, 1987
43. J.V. TOBIAS - Foundations of modern auditory theory - Academic Press, N.Y., 1972
44. M. TOHYAMA, H. SUZUKI, Y. ANDO - The nature and technology of acoustic space - Academic Press, 1995
45. H. WILKENS, G. PLENGE - The correlation between subjective and objective data of concert halls - In Auditorium Acoustics, Applied science Pub., London, 1975
46. J. VERMEIL - Opéras d'Europe - Ed. Plume, Paris, 1989

Pubblicazioni

1. G. CAMMARATA, et alii - Procedura automatizzata per l'ottimizzazione della copertura in un auditorio: prima fase - Congresso Nazionale AIA, Torino, 1983
2. G. CAMMARATA, et alii - Procedura automatizzata per l'ottimizzazione della copertura in un auditorio: seconda fase - Congresso Nazionale AIA, Perugia, 1984
3. G. CAMMARATA et alii - Disegno del profilo della copertura in un auditorio tramite una procedura automatizzata - Rivista Italiana di Acustica, Vol. VIII, 3-1984
4. G. CAMMARATA, et alii - Automatic design of ceiling profile for an auditorium - 5° FASE, Salonicco, 1985
5. G. CAMMARATA et alii - Indici di qualità acustica del Teatro Bellini di Catania - Congresso Nazionale AIA, Padova, 1993
6. G. CAMMARATA et alii - Applicazione della fuzzy logic alla valutazione soggettiva di una sala musicale - Nota Interna, Facoltà di Ingegneria di Catania, 2-1994
7. G. CAMMARATA et alii - Fuzzy Logic and subjective preferences to assess acoustics quality - CIARM 95, Ferrara Maggio 1995.
8. G. CAMMARATA et alii - A virtual instruments for the analysis of objective acoustic parameters - CIARM 95, Ferrara Maggio 1995.
9. G. CAMMARATA et alii - Analisi acustica di alcune sale teatrali mediante strumenti virtuali - Congresso AIA 95, Bologna settembre 1995.

10. G. CAMMARATA et alii: Analisi dei parametri acustici oggettivi in alcuni teatri italiani: Influenza del fattore di riflessione diffusa. Congresso AIA 99, Genova Maggio 1999.
11. G. CAMMARATA, Analisi del rumore urbano nelle città di Catania e Messina, Ricerca in corso di completamento per il POP 90/93, Mod. B.16.1.2.a, Anno 1997.
12. G. CAMMARATA et alii, Modelli per il rumore urbano per Catania e Messina, Ricerca in corso di completamento per il POP 90/93, Mod. B.16.2.1, Anno 1997.
13. G. CAMMARATA et alii: "Neural Network Versus Fuzzy Logic" - Techniques for Modeling Urban Noise Pollution", 1996
14. G. CAMMARATA, "Nuove metodologie per la modellistica del rumore urbano". Lipari 1997
15. G. CAMMARATA, "Inquinamento da traffico veicolare nelle città di Catania e Messina - Nuove metodologie per la modellistica del rumore urbano". Catania 1998.
16. G. CAMMARATA et alii, "A Model for Urban Traffic Evaluation", INTER-NOISE95, Newport, CA, USA, 10-12 Luglio, 1995.
17. G. CAMMARATA et alii, "Neural Network for the Analysis of the Air Pollution in Urban Areas" EUFIT95, Aachen, Germany, 28-31 Agosto, 1995.
18. G. CAMMARATA et alii, "New Predictive Models for Traffic Noise in Urban Area», XXIII AIA, Bologna, 12-14 September, 1995.
19. G. CAMMARATA et alii, "Fuzzy Logic For Noise Pollution Evaluation», J. Acoust. Soc. Am. vol. 98, No 5, pp. 2607-2612, Novembre 1995.
20. G. CAMMARATA et alii, "A Neural Network Architecture for Noise Identification". Neural Network, Pergamon Press, vol. 8, No 6, pp 963-973, 1995, Ed. Pergamon.
21. G. CAMMARATA et alii, "Ottimizzazione della Metodologia di Inquinamento Acustico Tramite Reti Neurali", XXIV Congresso AIA, Trento 12-14 Giugno 1996.
22. G. CAMMARATA, A. FICHERA, S. GRAZIANI, L. MARLETTA, "Fuzzy Logic For Noise Pollution Evaluation", J. Acoust. Soc. Am. vol. 98, No 5, pp. 2607-2612, Novembre 1995.
23. G. CAMMARATA, S. CAVALIERI, A. FICHERA, "A Neural Network Architecture for Noise Identification". Neural Network, vol. 8, No 6, pp 963-973, 1995, Ed. Pergamon.
24. G. CAMMARATA et alii, "Ottimizzazione della metodologia di analisi di inquinamento acustico urbano tramite reti neurali", XXIV Convegno Nazionale AIA, Trento, 12 - 14 giugno 1996.
25. G. CAMMARATA, "Inquinamento acustico da traffico veicolare nelle città di Catania e Messina" - Progetto POP Sicilia 90/93 mod. 16.1.2.a, Istituto di Fisica Tecnica - Facoltà di Ingegneria di Catania, 1997
26. G. CAMMARATA, "Nuove metodologie per la modellistica del rumore urbano". Lipari 1997
27. G. CAMMARATA, "Rumorosità urbana da traffico veicolare nelle città di Catania e Messina", Conferenza sul rumore urbano, Catania, Gennaio 1998
28. G. CAMMARATA et alii, "Noise Prediction in Urban Traffic by a Neural Approach", International Workshop on Artificial Neural Networks , IWANN93, 9-11 June 1993, Sitges, Barcelona, Spain.
29. G. CAMMARATA et alii, "Neural Networks versus Regression Techniques for Noise Prediction in Urban Areas", World Congress on Neural Networks, WCNN 93, 11-15 July, Portland, Oregon, USA.
30. G. CAMMARATA et alii, "Self-Organising Map to Filter Acoustic Mapping Survey in Noise Pollution Analysis", IJCNN93, International Joint Conference on Neural Networks, Nagoya, Japan, October 25-29.
31. G. CAMMARATA, et alii, "Neural Network Versus Fuzzy Logic - Techniques for Modeling Urban Noise Pollution", 1996
32. G. CAMMARATA, "Modelli di inquinamento acustico da traffico veicolare nella città di Catania" – POP 90/93 Mod. B.16.2.1. Istituto di Fisica Tecnica - Facoltà di Ingegneria di Catania, 1997
33. G. CAMMARATA et alii: "Analisi dei parametri acustici oggettivi in alcuni teatri italiani (influenza del coefficiente di riflessione diffusa), Congresso Nazionale AIA, 1999

34. G. CAMMARATA et alii: "Banche dati e strumenti informatici per il controllo del rumore nei cantieri edili", Congresso Nazionale AIA 1999
35. ISPRA, POP Sicilia 90/93, Mod. B.16.2.2, Rapporto Tecnico N.9.
36. HEBB D.O., "The organisation of the behaviour, a neuropsychological theory", John Wiley, New York, 1949
37. MINSKY M., "Neural nets and the brain", Doctoral Dissertation, Princeton University, NJ, 1954
38. WIDOWS B., "Generalisation and information storage in networks of Adeline 'neurones', in self-organisation system.
39. WIDROW B. E. HOFF JR, "Adaptive switching circuits", 1960 IRE Western Electric Show and Convention Record, part 4 (Aug. 23): 96-104, 1960
40. MC CULLOCH W. S., W. H. PITTS, "A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity", Bull. Math. Biophys. 5: 115-133, 1943
41. ROSEMBLATT F., "The perceptron: a probabilistic model for information storage and organisation in the brain", Psych. Rev. 65: 386-408, 1958
42. MINSKY M., S. PAPERT, "Perceptrons", Cambridge, Mass.: MIT Press, 1969
43. CYBENKO G., "Approximation by a superposition's of a sigmoidal function, Mathematics of control", Signal and Systems, Vol.2: 303-314, 1989
44. MC CLELLAND T.L., D.E. RUMELHART, "Parallel distributed processing", Cambridge: MIT Press and the PDP Research Group, 1986
45. ANZA PLUS, "User's Guide and Neurosoftware Documents", Release 2.22 June, 1989, Hetch Nielsen Neurocomputer.
46. J.L .MC CLELLAND AND D.E. RUMELHART, "Explorations in Parallel Distributed Processing", The MIT Press, pp.121-159.
47. D. BERTONI, A. FRANCHINI, M. MAGNONI, "Il Rumore Urbano e l'Organizzazione del Territorio", Pitagora Editrice Bologna, Italy, pp.45-69, 1987.
48. M.A. BURGESS, "Urban Traffic noise prediction from measurements in the metropolitan area of Sidney", Appl. Acoustics, 10, 1977,1.
49. R. JOSSE, "Notions d'Acoustique", Ed. Eyrolles, Paris, France.
50. S. CAVALIERI AND A. FICHERA, "Exploiting Neural Network Features to Model and Analyse Noise Pollution", 6th Italian Workshop on Neural Nets, May 12-14th, Vietri sul Mare, Salerno.
51. D. DE SIENO, "Adding a Conscience to Competitive Learning", Proceedings of the second annual IEEE ICNN, International Conference Neural Networks, Vol.1.
52. T. KOHONEN, "Self-organisation and Associative Memory", Springer-Verlag.
53. T. KOHONEN et al., "Statistical Pattern Recognition with Neural Networks: Benchmark Studies", Proceedings of the second annual IEEE ICNN, Vol.1.
54. LOFTI A. ZADEH, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Trans. on Syst. Man and Cyb., Vol. SMC 3, No.1, 1973.
55. R. M. TONG, "A Control Engineering Review of Fuzzy Systems", Automatica, Vol. 13, pp. 559-569.
56. S. SUGENO, 1985 "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-15, No. 1, 1985.
57. A. FICHERA, L. FORTUNA, S. GRAZIANI, M. G. XIBILIA, "Neuro-Fuzzy Strategies for Urban Traffic Noise Monitoring", 1996
58. A. FICHERA, L. FORTUNA, S. GRAZIANI, M.G. XIBILIA, "Modelling urban traffic flow from noise measurement and neural networks", 1996
59. R. JOSSE, "Notion d'Acoustique", Ed. Eyrolles, Paris, 1972

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI PER L'ILLUMINOTECNICA

Testi Fondamentali di riferimento

47. D. FACONTI, S. PIARDI: " La qualità ambientale degli edifici", MAGGIOLI Editore, 1998
48. A. SACCHI, G. CAGLIERIS: "Fisica Tecnica - Acustica e Illuminotecnica", UTET, Torino
49. AA.VV. : Manuale di Progettazione edilizia, HOEPLI, 1995
50. AA.VV. : Il Nuovo Manuale dell'Architetto", Ed. MANCOSU,
51. G. CAMMARATA, A. FICHERA, L. MARLETTA: "C.N.R. - Manuale sulla qualità Fisico-Tecnica dell'ambiente costruito" - Progetto Finalizzato edilizia 1994, vol. II: Simulazione, Capitolo CII
52. G. CAMMARATA: "Il comfort luminoso", Dispense per il Corso di Master in Ergonomia, Catania 1999-2000
53. AGHEMO C. AZZOLINO, Il progetto dell'elemento di involucro esterno opaco, CELID, Torino, 1996;
54. AGHEMO C. AZZOLINO, Illuminazione naturale, metodi ed esempi di calcolo, CELID, Torino, 1995;
55. ARGAN G. C., La storia dell'arte italiana, Sansoni, Firenze, 1975;
56. BAKER N., FANCHIOTTI A., STEEMERS K., Daylighting in Architecture, A European Reference Book, Commission of the Communities Directorate-General XII for Science Research and Development; James & James, 1993;
57. BIANCHI F., L'architettura della luce, Edizioni Kappa, Roma, 1991;
58. BIANCHI F., PULCINI, Manuale di Illuminotecnica, La nuova Italia, 1995;
59. BIASIOTTI, S. BIASIOTTI, Termologia e gestione degli edifici, EPC, 1995;
60. CHIOLINI P., Il contributo dell'illuminazione naturale negli edifici per l'industria, Tamburini Editore, Milano, 1966;
61. CODEGONE C., Problemi di illuminazione, V. Giorgio, 1950;
62. FORCOLINI G., Illuminazione di interni, Hoepli, 1988;
63. HOCHBERG J. E., Psicologia della percezione, A. Martello e Giunti, 1975;
64. GOETHE J. W., La teoria dei colori, Il Saggiatore, Milano, 1979;
65. GREGORY R.L., Occhio e cervello la psicologia del vedere, Casa editrice il Saggiatore, Milano, 1966;
66. LONGO P., La cromoterapia applicata alle disabilità attente: cromoterapia in classe, UPSEL, Torino, 1993;
67. MAIONE M., La visione e suoi meccanismi, Editrice Maccari, Parma, 1985;
68. MANZONI L., La luce , progetto scienza filosofia, Reggiani Editore, Milano, 1991;
69. PAROLINI M. PARIBENI, Tecnica dell'illuminazione, UTET, Torino, 1977;
70. RONCH V., Storia della luce da Euclide a Einstein, Laterza, Bari, 1983;
71. ROSSINI D. SEGRÈ, Tecnologia Edilizia, Hoepli, Milano, 1972;
72. TORRICELLI SALA SECCHI, La luce del giorno, Alinea, 1995;
73. G. LEONE: Tesi di dottorato su: Illuminazione Naturale e sue problematiche", Palermo 1999
74. AA. VV: Manuale di Progettazione Edilizia, Hoepli;
75. AA. VV.: Nuovo Manuale dell'Architetto, MANCOSU Editore
76. *Manuale di Progettazione Edilizia*, Hoepli.

INDICE GENERALE

<u>1.</u>	<u>PROBLEMATICHE DELL'ACUSTICA TECNICA</u>	1
<u>2.</u>	<u>CENNI DI ACUSTICA FISICA</u>	2
2.1.	LA CELERITÀ DEL SUONO	2
2.2.	ONDE PIANE E SFERICHE	3
2.3.	GRANDEZZE FONDAMENTALI PER L'ACUSTICA	4
2.3.1.	LUNGHEZZA D'ONDA E FREQUENZA	4
2.3.2.	POTENZA SONORA	5
2.3.3.	INTENSITÀ SONORA	6
2.4.	TIPO DI ONDE ACUSTICHE	6
2.5.	PROPAGAZIONE DELLE ONDE SONORE	7
2.5.1.	TONI PURI	10
2.5.2.	LE ARMONICHE	10
2.5.3.	SUONI COMPLESSI Oscillogrammi e spettri sonori	10 11
	Trasformazione dello spettro di un segnale	14
2.6.	SPETTRO DI UN SUONO COMPLESSO	15
2.6.1.	TRASFORMATA VELOCE DI FOURIER DI UN SEGNALE DIGITALE (FFT) Introduzione alla Trasformata di Fourier	18
	Digitalizzazione ed FFT	19
	Frames, Filtri e FFT di breve durata	19
2.6.2.	DEFINIZIONI DI BASE	21
	La Trasformata veloce di Fourier, FFT	21
	Zero Padding	21
	Pre - Emphasis	24
	Analisi di un suono puro	24
2.7.	INNALZAMENTO DEI LIVELLI CON L'ALLARGAMENTO DELLA FINESTRA	26
<u>3.</u>	<u>CENNI DI ACUSTICA FISIOLOGICA</u>	28
3.1.	LIVELLI SONORI	28
	Livello di Potenza sonora	28
	Livello di Pressione sonora	28
	Livello di Intensità acustica	29
	Livello di Densità sonora	29
3.2.	L'ORECCHIO UMANO	30
3.2.1.	SOGLIA UDITIVA	36
3.2.2.	PERCEZIONE SOGGETTIVA DEL SUONO	37
3.3.	LIVELLI DI PRESSIONE PONDERATI- LE SCALE FONOMETRICHE	38
3.4.	LIVELLO EQUIVALENTE (LEQ)	40
3.5.	LOCALIZZAZIONE ACUSTICA	41
3.6.	SPECIALIZZAZIONE DELL'UDITO	42
<u>4.</u>	<u>TRASMISSIONE DEL SUONO</u>	45
4.1.	ASSORBIMENTO, RIFLESSIONE, RIVERBERAZIONE, DIFFRAZIONE E RIFRAZIONE	45

4.1.1. ASSORBIMENTO	45
4.1.2. RIFLESSIONE	46
4.1.3. TRASMISSIONE E POTERE FONOISOLANTE	46
4.2. ASSORBIMENTO DEL SUONO ALLE BASSE FREQUENZE	49
4.2.1. IL RISUONATORE DI HELMOLTZ	50
4.2.2. LE MEMBRANE ASSORBENTI	52
4.2.3. DIFFRAZIONE	53
4.2.4. BARRIERE ACUSTICHE	54
4.2.5. LA RIFRAZIONE	54
4.2.6. FATTORE DI DIREZIONALITÀ	55
4.3. RIVERBERAZIONE ACUSTICA	56
4.4. ATTENUAZIONE DEI SUONI NELL'AMBIENTE INTERNO	61
4.4.1. ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI PER RIDURRE LA RUMOROSITÀ AEREA	63
4.5. ATTENUAZIONE DEI SUONI IN AMBIENTI APERTI	66
4.5.1. DIVERGENZA SONORA	66
4.5.2. FATTORI ATMOSFERICI	66
4.5.3. ATTENUAZIONI DOVUTE A FATTORI NATURALI	67
5. IL RUMORE E SUOI EFFETTI SULL'UOMO	68
5.1. PARAMETRI DA CUI DIPENDE IL RUMORE	68
5.2. EFFETTI DEL RUMORE SUL CORPO UMANO	68
5.3. EFFETTI DEL RUMORE SULL'UDITO	69
5.4. EFFETTI DEL RUMORE SUL SONNO	70
5.5. DESCRITTORI ACUSTICI PER IL RUMORE	70
5.6. EFFETTI DELL'ESPOSIZIONE AL RUMORE NEGLI AMBIENTI LAVORATIVI.	71
6. IL D.P.C.M. 1-3-91	74
6.1. ATTIVITÀ ESCLUSE DAL DECRETO	74
6.2. LA ZONIZZAZIONE ACUSTICA	74
6.3. DEFINIZIONI FONDAMENTALI (ALLEGATO A)	75
6.4. IL CRITERIO DIFFERENZIALE	75
6.5. STRUMENTAZIONE E MODALITÀ DI MISURA	76
6.5.1. RICONOSCIMENTO DI COMPONENTI IMPULSIVE NEL RUMORE	76
6.5.2. RICONOSCIMENTO DEI COMPONENTI TONALI NEL RUMORE	77
6.5.3. PRESENZA DI COMPONENTI IMPULSIVE E TONALI NEL RUMORE.	77
6.6. DEFINIZIONI DEI TEMPI DI MISURA NEL DPCM 1-3-91.	78
6.7. COME EFFETTUARE LE MISURE	78
6.8. ADEGUAMENTO AI LIMITI DI RUMOROSITÀ	80
7. IL D. LGS 277/91	81
7.1. OBBLIGHI PER I DATORI DI LAVORO E PER I LAVORATORI	81
7.2. OBBLIGHI DEL MEDICO COMPETENTE	82
7.3. CAP. IV: PREVENZIONE DEI LAVORATORI	82
7.4. VALUTAZIONE DEL RISCHIO	83
7.5. USO DEI MEZZI INDIVIDUALI DI PROTEZIONE	84
7.6. DEROGHE PER SITUAZIONI PARTICOLARI	84
7.7. SCHEDA DI VALUTAZIONE DEL RUMORE	84
7.8. TEMPO DI ESPOSIZIONE E LIVELLO DI ESPOSIZIONE PERSONALE	86
7.8.1. CRITERIO 3-DB	86
7.8.2. CRITERIO 5-DB	86

7.9. STRUMENTI PER MISURARE IL LIVELLO DI ESPOSIZIONE	86
7.10. NORMATIVA NAZIONALE SULLA SICUREZZA DEI LAVORATORI PER IL RUMORE	87
7.11. METODI DI CALCOLO APPROXIMATI DEL RISCHIO UDITIVO.	88
7.12. PROTEZIONE DELL'UDITO: <i>MISURE DI SICUREZZA</i>	90
7.13. CUFFIE DI PROTEZIONE DAL RUMORE ED INSERTI ACUSTICI.	90
7.13.1. DATI UTILI PER LA RUMOROSITÀ IN CANTIERE	91
7.13.2. VALORI DI RIFERIMENTO DELL'ISTITUTO DI FISICA TECNICA DI CATANIA	94
Caterpillar 320 NME Maia	95
Fiat Allis fl6	95
Escavatore CAT 953	96
Pala meccanica MF200B	96
Escavatore Komatsu d31s	96
Escavatore Fai 96edt	97
Escavatore JCB JS 160 NLC	97
Escavatore Yanmar B50	98
Cifa	98
Camion Mercedes 1517	99
Camion Astra H7d 84.42	99
Camion Iveco 380 E37	100
Autobetoniera Minerva 300 PC	100
Autobetoniera Astra BM305F	101
Rullo compressore Ursus Vitrax	101
Macchina piegaferro	102
Lavori di carpenteria	102
Macchina tagliaferro	103
Vibra cls elettrico	103
Rumore ambientale	104
Autobetoniera Iveco	104
Autopompa getta cls	105
7.13.3. DIRETTIVA 2003/10/CE DEL 06/02/03	105
Valori limite di esposizione:	106
<hr/> <u>8. L. 447 DEL 26/10/95: LEGGE QUADRO SUL RUMORE</u>	107
8.1. DISPOSIZIONI IN MATERIA DI INQUINAMENTO ACUSTICO	107
8.2. IMPLICAZIONI SULLA SICUREZZA NEI LUOGHI DI LAVORO	107
<hr/> <u>9. CRITERI DI VALUTAZIONE DEL RUMORE</u>	109
9.1. LE CURVE NOISE CRITERIA (NC)	109
9.2. LE CURVE NOISE RATING (NR)	110
9.3. VALORI DI RIFERIMENTO NC ED NR	110
9.4. NORMA ISO -R 1996 - COMPOSITE NOISE RATING	110
<hr/> <u>10. REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI</u>	113
10.1. REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DEGLI EDIFICI	113
10.1.1. TEMPO DI RIVERBERAZIONE	114
10.1.2. POTERE FONISOLANTE	116
10.1.3. INDICE DI VALUTAZIONE DEL POTERE FONISOLANTE	116
10.1.4. ISOLAMENTO ACUSTICO	118
10.2. VERIFICHE DI LEGGE PER DIVISORI E FACCIADE	119
10.2.1. VERIFICA DEI DIVISORI	119

10.2.2. VERIFICA DELLE FACCIADE	119
10.2.3. VERIFICA DAL RUMORE DA CALPESTIO	119
10.2.4. INDICE DI VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI CALPESTIO	120
10.2.5. VERIFICHE DI LEGGE PER I SOLAI: RIFERIMENTO UNI 8270 & UNI 8270 & UNI 8270	121
10.2.6. RIFERIMENTI ALLA PRECEDENTE LEGISLAZIONE	122
10.2.7. IL RUMORE PRODOTTO DAGLI IMPIANTI TECNOLOGICI	123
1. Servizi a funzionamento discontinuo:	123
2. Servizi a funzionamento continuo:	123
10.3. CONSIDERAZIONI SUI REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI	123
10.4. PREVISIONE DEL POTERE FONOISOLANTE	124
10.4.1. POTERE FONOISOALNTE DELLE PARETI	124
10.4.2. POTERE FONOISOLANTE DEI SERRAMENTI	125
10.4.3. PREVISIONE DELL'ISOLAMENTO IMPATTIVO E DI CALPESTIO	125
Solai Omogenei	125
Pavimento con rivestimento	126
Pavimento galleggiante	126
Soffitti sospesi	127
<u>11. DPCM 14-11-97: LIMITI DI EMISSIONE, DI IMMISSIONE E DI QUALITÀ</u>	128
11.1.1. DETERMINAZIONE DEI VALORI LIMITE DELLE SORGENTI SONORE	128
<u>12. CENNI DI ACUSTICA DELLE SALE</u>	130
12.1. QUALITÀ ACUSTICHE PROPOSTE DA L. BERANEK	131
12.2. LE PROBLEMATICHE DI UNA SALA MUSICALE	132
12.3. LE VARIABILI IN GIOCO	132
12.3.1. ECCEZIONALITA' DI UN EVENTO MUSICALE	132
12.4. IL COMPORTAMENTO IDEALE DI UNA SALA	133
12.5. I DESCRITTORI ACUSTICI OGGETTIVI	133
12.6. DISTRIBUZIONE DEL LIVELLO SONORO	135
12.6.1. LE PROBLEMATICHE DEI DESCRITTORI OGGETTIVI	136
12.7. NUOVO APPROCCIO ALL'ACUSTICA DELLE SALE	136
12.7.1. INFORMAZIONI OTTENIBILI DALLA RISPOSTA IMPULSIVA	139
12.8. I DESCRITTORI ACUSTICI PRINCIPALI	140
12.9. EARLY DECAY TIME (EDT)	140
12.10. CHIAREZZA O(C80) EARLY-TO-LATE SOUND INDEX	141
12.11. INDICE DI DEFINIZIONE (D), INVILUPPO O EFFICIENZA LATERALE, LE	142
<u>13. LE PROBLEMATICHE DELL'ILLUMINOTECNICA</u>	143
13.1. DEFINIZIONI PRINCIPALI	143
13.1.1. L'OCCHIO E LA VISIONE	143
<u>14. ILLUMINOTECNICA: PRINCIPALI UNITÀ DI MISURA</u>	145
14.1. GRANDEZZE SOGGETTIVE E GRANDEZZE OGGETTIVE	145
14.1.1. FLUSSO LUMINOSO	146
14.1.2. INTENSITÀ LUMINOSA	147
14.1.3. LUMINANZA	149
14.1.4. ILLUMINAMENTO	149
14.1.5. RADIANZA	151
14.2. LA SFERA DI ULRICH	152

14.2.1. MISURA DEL FLUSSO LUMINOSO CON LA SFERA DI ULRICH	152
14.3. METODI DI MISURA DELLE GRANDEZZE ILLUMINOTECNICHE	153
14.3.1. MISURA DEL FLUSSO CON IL LUXOMETRO	153
14.3.2. IL BANCO FOTOMETRICO	154
14.3.3. CALCOLO DEL FLUSSO CON IL METODO IEC	155
14.3.4. CALCOLO DELL'ILLUMINAMENTO FRA SUPERFICI	156
14.3.5. ILLUMINAMENTO IN UN PUNTO DA SUPERFICIE ESTESA	157
14.3.6. ILLUMINAMENTO DA UNA SORGENTE LINEARE	158
15. LA STORIA DELLA TEORIA DELLA LUCE	159
15.1. FISIOLOGIA DELL'OCCHIO	162
15.2. PRINCIPI DELLA VISIONE	163
15.2.1. L'ADATTAMENTO VISIVO	167
15.2.2. L'ACCOMODAMENTO	168
15.2.3. IL CONTRASTO	168
15.2.4. LA BRILLANZA	170
15.2.5. L'ABBAGLIMENTO VISIVO	171
15.2.6. FATTORE DI RESA DEL CONTRASTO	172
15.2.7. L'ACUITÀ VISIVA	173
15.2.8. OGGETTI IN MOVIMENTO E TEMPO NECESSARIO PER LA VISIONE	175
15.2.9. POSIZIONE DELL'IMMAGINE SULLA RETINA	175
15.3. IL SENSO MORFOLOGICO	176
15.4. IL COLORE	178
15.4.1. COLORIMETRIA	180
15.4.2. PLANCK'S LOCI	183
15.4.3. EFFETTO CROMATICO E INDICE DI RESA CROMATICA	184
16. LE GRANDEZZE FOTOMETRICHE DI RIFERIMENTO	186
16.1. L'EMITTANZA LUMINOSA O RADIANZA	189
16.2. L'ESPOSIZIONE LUMINOSA	189
16.3. COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO	189
16.4. COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE	189
16.5. VALORI DI RCONSIGLIATI PER LE SUPERFICI INTERNE DI UNA STANZA	189
16.6. LE SORGENTI LUMINOSE	189
16.7. CLASSIFICAZIONE DELLE LAMPADE	190
16.8. CARATTERIZZAZIONE DELLE LAMPADE	190
16.8.1. LAMPADE AD INCANDESCENZA	191
16.8.2. LAMPADE A LOGENE	192
16.8.3. LAMPADE A LUMINESCENZA	193
16.8.4. LAMPADA A VAPORE DI MERCURIO AD ALTA PRESSIONE	195
16.8.5. LAMPADE A VAPORI DI SODIO	196
16.8.6. LAMPADE AD ARGON	197
16.9. APPARECCHI ILLUMINANTI	198
16.9.1. TIPOLOGIA DEI DIFFUSORI	199
17. PROGETTO DI UN IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE	200
17.1. L'AMBIENTE INTERNO ILLUMINATO ARTIFICIALMENTE	200
17.2. PROCEDURE DI CALCOLO	201
17.3. METODI DI CALCOLO GLOBALI	202
17.3.1. CALCOLO DEL FLUSSO CIRCOLANTE	202

17.3.2. FATTORE DI MANUTENZIONE	203
17.3.3. COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE	205
17.3.4. METODO DEL FATTORE DI UTILIZZAZIONE	205
17.4. IL COMPORTAMENTO DEI CORPI COLPITI DA RADIAZIONI LUMINOSE	208
17.5. DISTANZA MINIMA TRA GLI APPARECCHI, D	208
18. IL BENESSERE VISIVO E LA PROGETTAZIONE ILLUMINOTECNICA	209
18.1. I PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA PRESTAZIONE VISIVA	210
18.2. L'ILLUMINAMENTO DEL COMPITO VISIVO	211
18.3. IL CONTRASTO	215
18.4. L'ABBAGLIAMENTO	216
18.5. LA PSICOLOGIA DEL COLORE	216
18.5.1. LA PSICOLOGIA DEL COLORE NEL LAVORO	218
18.6. VOLUME DI OFFESA	221
18.6.1. POSIZIONE DELL'APPARECCHIO ILLUMINANTE	221
19. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI PER L'ACUSTICA	225
Pubblicazioni	226
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI PER L'ILLUMINOTECNICA	229

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Teatro del Palazzo di Cnosso, Creta: La forma è solo funzionale alla visione	2
Figura 2: Tetro di Epidauro: La forma è funzionale all'Acustica del Teatro	3
Figura 3: "Donna che cuce alla luce della lampada" (1828) di Georg Friedrich Kersting	5
Figura 4: Vista della Terra nelle ore notturne e delle zone più illuminate	5
Figura 5: Il corno di Alessandro Magno	1
Figura 6: Esempi di onda sonora piana e sferica	3
Figura 7: Esempio di propagazione di onde acustiche: inizialmente sferiche e poi piane a grandi distanze	3
Figura 8: Legame fra lunghezza d'onda e frequenza nel campo dell'udibile	4
Figura 9 : Rappresentazione spettrale dei suoni.	11
Figura 10: Rappresentazione delle bande acustiche di ottava e terzi di ottava	12
Figura 11: Rappresentazione di un suono puro nel piano ampiezza-tempo e nel piano ampiezza-frequenza.	12
Figura 12: Rappresentazione temporale della somma di tre armoniche	13
Figura 13: Composizione di tre armoniche nel piano ampiezza-tempo	13
Figura 14: Composizione di tre armoniche nel piano ampiezza-frequenza.	14
Figura 15: Azione dei filtri sui segnali	15
Figura 16: Rappresentazione di un segnale nei vari piani.	16
Figura 17- Spettrogramma della parola [AIUOLE].	16
Figura 18- Oscillogramma della parola [Aiuole] pronunciata da un parlato	17
Figura 19: Rappresentazione spettrale di un suono complesso: la vocale [a].	17
Figura 20: Rappresentazione spettrale convenzionale: sonogramma	18
Figura 21: Errore di troncamento dei segnali	22
Figura 22: Rappresentazione della funzione di Hamming per $T_0=40$	22
Figura 23: Spettrogramma di della parola [aiuole]	23
Figura 24: Sezione dello spettrogramma con finestra di pesatura triangolare	23
Figura 25: Stessa sezione precedente ma con finestra di Hamming	23
Figura 26: Stessa sezione trattata con finestra di Blackmann - Harris	24
Figura 27: Suono puro a 452 Hz	24
Figura 28: Spettro FFT del suono puro a 452 Hz	25
Figura 29: Rappresentazione di un suono complesso	25
Figura 30: Analisi FFT del suono complesso	26
Figura 31: Rappresentazione dell'analisi frequenziale a varie larghezze di banda	26
Figura 32: Vista d'Artista di un orecchio umano: orecchio esterno, medio e interno.	30
Figura 33: Struttura dell'orecchio esterno (padiglione auricolare) e dell'orecchio interno (Organo dei Corti)	30
Figura 34: Struttura dell'orecchio interno e della coclea	31
Figura 35: Eccitazione delle terminazioni nervose	32
Figura 36: Funzioni di trasferimento dell'orecchio esterno.	32
Figura 37:Funzione di trasferimento dell'orecchio interno (Von Békésy)	33
Figura 38: Funzioni di trasferimento del canale timpanico	33
Figura 39: Struttura di un neurone.	34
Figura 40: Segnale di attivazione sinaptico.	34
Figura 41: Curve isofoniche per toni puri (audiogramma normale di Fletcher - Munson	35

Figura 42: Confronto fra la funzione di trasferimento dell'orecchio medio e l'audiogramma normale	35
Figura 43: Curva di udibilità reale di un soggetto e confronto con la curva di soglia standard	36
Figura 44: Esempio di audiogramma di un soggetto normale	37
Figura 45: Confronto fra le curve fonometriche e l'Audiogramma normale	38
Figura 46: Diagramma a blocchi di un fonometro e un moderno modello commerciale	39
Figura 47: Spettro a banda di ottava del segnale non filtrato e di quello filtrato	40
Figura 48: Andamento del LPS, Leq, L picco non pesato.	40
Figura 49: Localizzazione della sorgente sonora	41
Figura 50: Tempi di autocorrelazione dei brani di Y. Ando	43
Figura 51: Brani F e G di Y. Ando e loro funzioni di autocorrelazione	44
Figura 52: Bilancio di energia sonora	45
Figura 53: Andamento di alcuni fattori di assorbimento per materiali da costruzione.	46
Figura 54: Riflessione di un'onda sonora	46
Figura 55: valutazione del potere fonoisolante di un divisorio	47
Figura 56: Andamento del potere fonoisonante	47
Figura 57: Frequenze critiche di alcuni materiali	48
Figura 58: Cavità risonante	51
Figura 59: Materiale da costruzione utilizzato come cavità risonante	51
Figura 60: Tipologie di cavità risonanti di utilizzo comune	52
Figura 61: Assorbimento di una membrana	52
Figura 62: Esempio di membrana assorbente realizzata con pannelli in legno	53
Figura 63: Diffrazione del suono da parte di un ostacolo	53
Figura 64: Schema di barriera	54
Figura 65: Andamento dell'attenuazione in funzione del numero di Fresnel	55
Figura 66: Rifrazione di un'onda sonora.	55
Figura 67: Definizione del fattore di direzionalità	55
Figura 68: Propagazione di un'onda sonora all'interno di una stanza	56
Figura 69: Schematizzazione di 200 raggi sonori riflessi in un ambiente chiuso	57
Figura 70: Esempio di un teatro	57
Figura 71: Situazione delle riflessioni dopo 1 s dall'avvio della sorgente	58
Figura 72: Situazione delle riflessioni dopo 2 s dall'avvio della sorgente	58
Figura 73: Ecogramma in una sala chiusa	59
Figura 74: Decadimento sonoro all'interno di una sala	60
Figura 75: Il Teatro Roy Thompson Hall, Toronto	60
Figura 76: Andamento del livello interno in una sala per effetto del livello diretto e riverberato.	62
Figura 77: Esempio di applicazione di cuffia afonica	62
Figura 78 Tipologia di cuffia afonica per macchina operatrice	63
Figura 79: Cuffie afoniche per macchine con flussi di materiali entranti e/o uscenti	64
Figura 80: Esempi di isolatori per la riduzione delle vibrazioni	65
Figura 81: Esempio di pavimento galleggiante	65
Figura 82: Effetti del gradiente di temperatura	67
Figura 83: Short Equivalent Level	71
Figura 84: Andamento del NITTS in funzione del tempo di esposizione al rumore e suo recupero.	71
Figura 85: Perdita dell'udito per lavoratori con anzianità lavorativa compresa fra 1 e 39 anni esposti a 80 dB.A	72
Figura 86: Probabilità di handicap uditivo data dal NIOSH	72

Figura 87: Audiogramma con danno di Brüel	73
Figura 88: Innalzamento della soglia uditiva per una hostess con 20 anni di servizio	73
Figura 89: Soglia uditiva di un soggetto normale	73
Figura 90: Andamento del LPS e del Leq.	76
Figura 91: Rilevamento delle componenti impulsive secondo il DPCM 1-3-91	76
Figura 92: Criterio dell'abbassamento di -5 dB al valore di picco.	77
Figura 93: Rilievo di una componente tonale come indicato dal DPCM 1-3-91	77
Figura 94: Tempo di riferimento, di osservazione e di misura secondo il DPCM 1-3-91	78
Figura 95: Tecnica di misurazione in corrispondenza di un ventre e di un nodo	79
Figura 96: Andamento del LPS, del Leq e del livello massimo di picco non pesato.	83
Figura 97: Dosimetro personale per il rumore	86
Figura 98: Risultati ottenibili mediante un dosimetro personale.	87
Figura 99: Cuffia di protezione dal rumore conforme alle specifiche del D.Lgs 277/91	90
Figura 100: Modalità di misura dei livelli di potenza	94
Figura 101: Curve NC per la valutazione del rumore.	109
Figura 102: Curve di valutazione NR	110
Figura 103: Apparato sperimentale per la misura del tempo di riverberazione T_{60}	115
Figura 104: Esempi di code sonore alle varie frequenze	115
Figura 105: Disposizione sperimentale per la misura del Potere Fonoisolante	116
Figura 106: Curva limite per divisorie e facciate	117
Figura 107: Esempio di determinazione dell'indice di valutazione	117
Figura 108: Disposizione operativa della macchina di calpestio	120
Figura 109: Curva limite per i solai	121
Figura 110: Esempio di determinazione dell'indice di valutazione	122
Figura 111: Tempi di riverberazione ottimali per vari usi della sala	135
Figura 112: Schematizzazione del nuovo approccio all'Acustica delle Sale	137
Figura 113: Risposta impulsiva di una sala	138
Figura 114: Risposta impulsiva logaritmica	138
Figura 115: Schematizzazione della risposta impulsiva: Il reflettogramma	139
Figura 116: Calcolo dei descrittori oggettivi dalla risposta impulsiva: Integrale inverso di Schroeder	140
Figura 117: Curve di visibilità relativa fotopatica e scotopatica	145
Figura 118: Tipi di sorgenti luminose	146
Figura 119: Significato di Flusso Luminoso	147
Figura 120: Relazione fra intensità ed angolo solido	148
Figura 121: Intensità per corpi lambertiani	148
Figura 122: Sorgenti puntiformi	149
Figura 123: Luminanza per corpi lambertiani	150
Figura 124: relazione fra flusso ed Intensità	150
Figura 125: Luminanza per superfici trasparenti	151
Figura 126: Luminanza per superfici lambertiane	151
Figura 127: Distribuzione interna del flusso nella sfera di Ulbricht	152
Figura 128: Sfera di Ulbricht	153
Figura 129: Schema di un luxometro a cellula fotovoltaica	153
Figura 130: Tipologia di filtri per le celle fotovoltaiche	154
Figura 131: Banco fotometrico	154
Figura 132: Solido fotometrico e sua sezione in piano	155

Figura 133: Sezioni per il metodo IEC	155
Figura 134: Calcolo del flusso con il metodo IEC	155
Figura 135: Illuminamento fra due superfici	156
Figura 136: Scambio radiativo fra superfici	157
Figura 137: Illuminamento da una superficie in un punto	158
Figura 138: Ritratti di Christopher Huygens, (da ignoto) e di Isaac Newton, (ritratto da C. Jervas)	159
Figura 139: Anatomia dell'occhio umano e dei recettori retinici: coni e bastoncelli	162
Figura 140: Illuminamento in lux di una superficie per diverse situazioni	164
Figura 141: Sensibilità relativa dell'occhio alle varie lunghezze d'onda	165
Figura 142: Livello della visibilità al variare dell'illuminamento relativo	166
Figura 143: Curva di adattamento visivo dei coni e dei bastoncelli	167
Figura 144: Contrasto luminoso	169
Figura 145: La Griglia di Hermann	169
Figura 146: Esempi di brillanza	170
Figura 147: Le Bande di Mach	171
Figura 148: Acuità visiva	174
Figura 149: Acuità visiva in funzione della luminanza	175
Figura 150: Posizione dell'immagine ed acuità visiva	176
Figura 151: Legge della vicinanza	177
Figura 152: Legge della somiglianza	177
Figura 153: Legge della chiusura	177
Figura 154: Esempi di illusione ottica	178
Figura 155: Spettro della luce visibile	178
Figura 156: Sintesi additiva e sottrattiva dei colori	179
Figura 157: Componenti cromatiche X, Y e Z della CIE	180
Figura 158: Il triangolo del colore	182
Figura 159: Diagramma cromatico CIE 1931	183
Figura 160: Schema costruttivo di una lampada ad incandescenza	191
Figura 161: Tipologie di lampade ad incandescenza	191
Figura 162: Lampada alogena	192
Figura 163: Schema di funzionamento di una lampada a luminescenza	193
Figura 164: Curva caratteristica di una lampada a luminescenza	193
Figura 165: Polarizzazione di una lampada a luminescenza	194
Figura 166: Spettri di lampade a luminescenza	196
Figura 167: Distruzione spettrale di alcune lampade a luce combinata	197
Figura 168: Distribuzione spettrale di lampade al sodio	198
Figura 169: Tipologia dei diffusori	198
Figura 170: Flusso circolante nella Sfera di Ulbricht	202
Figura 171: Sezione di riferimento del locale	206
Figura 172: Compito visivo e prestazione visiva	209
Figura 173: Esempio di corretta illuminazione: lo studio	212
Figura 174: Identificazione delle zone in rapporto alla luminanza	214
Figura 175: Influenza del contrasto	215
Figura 176: Posizioni per evitare l'abbagliamento	216
Figura 177: Combinazione dei colori in funzione dell'esposizione delle finestre	217
Figura 178: Influenza del colore delle pareti	218

Figura 179: Interrelazione colori/emotività	219
Figura 180: Volume di offesa	222
Figura 181: Volume di offesa in un posto di lavoro	222
Figura 182: Corretta posizione dell'apparecchio illuminante	223
Figura 183: Definizione di angolo di abbagliamento	223
Figura 184: Curve di luminanza A: apparecchi senza bordo luminoso.	224
Figura 185: Curve di luminanza B: apparecchi con bordo luminoso	224

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Velocità del suono per alcuni mezzi di trasmissione	3
Tabella 2: Livello di potenza sonora media di varie sorgenti.	5
Tabella 3: Corrispondenza fra numero di punti e righe di frequenza	20
Tabella 4: Corrispondenza fra la larghezza della finestra e l'ampiezza del filtro	21
Tabella 5: Scala di valori delle pressioni sonore e dei livelli di pressione sonora	29
Tabella 6: Attenuazioni dei filtri di pesatura A	39
Tabella 7: Brani musicali analizzati da Y. Ando	43
Tabella 8: Frequenze critiche per alcuni materiali	48
Tabella 9: Potere fonoisolante di alcuni materiali	49
Tabella 10: Potere fonoisolante di alcuni materiali	49
Tabella 11: : Potere fonoisolante di alcuni materiali	50
Tabella 12: Potere fonoisolante di alcuni materiali	50
Tabella 13: Danni provocati dal rumore nei vari apparati	69
Tabella 14: Tabella di Cosa – Vicoli sulla lesività del rumore	70
Tabella 15: Adempimenti per l'applicazione del D.Lgs 277/91	86
Tabella 16: Valori medi di protezione standard per cuffie ed inserti	91
Tabella 17: Valori degli spettri e della rumorosità globale per alcune macchine operatrici	94
Tabella 18: Valori di riferimento NC ed NR	111
Tabella 19: Applicazione del metodo ISO R 1996	112
Tabella 20: Nomenclatura del DPCM 5.12.97	114
Tabella 21: Classificazione degli edifici secondo DPCM 5.12.97	114
Tabella 22: Valori limite degli indici acustici caratteristici secondo DPCM 5.12.97	114
Tabella 23: : Correzione dei livelli in funzione del rumore di fondo	119
Tabella 24: :Comparazione dei limiti di legge per il rumore prodotto dagli impianti tecnologici	124
Tabella 25: Attenuazione di alcuni rivestimenti per solai	126
Tabella 26: Tabella A del DPCM 14/11/97	128
Tabella 27: Tabelle B, C, D del DPCM 14/11/97	129
Tabella 28: Valori di assorbimento di alcuni materiali	135
Tabella 29: Definizione dei descrittori acustici oggettivi utilizzati nelle comparazioni	140
Tabella 30: Alcuni valori di C80 di sale musicali reali	141
Tabella 31: Tipologia della visione	165
Tabella 32: Valori dell'indice di abbagliamento	172
Tabella 33: Valori frequenziali delle componenti cromatiche	181
Tabella 34: Valori minimi di illuminazione consigliati	186
Tabella 35: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento	187
Tabella 36: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento	188
Tabella 37: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento	189
Tabella 38: Fattori di riflessione consigliati	189
Tabella 39: Valori tipici dei parametri caratteristici per vari tipi di lampade	191
Tabella 40: Caratteristiche delle lampade ad incandescenza	192
Tabella 41: Caratteristiche delle lampade a luminescenza	195

Tabella 42: Valori raccomandati per LLMF e LSF	204
Tabella 43: Valori raccomandati per LMF	204
Tabella 44: Valori raccomandati per RSMF	205
Tabella 45: Coefficienti di riflessione per vari materiali di rivestimento delle pareti	205
Tabella 46: Valori di M e di N	206
Tabella 47: Fattori di Utilizzazione	207
Tabella 48: Distanza fra apparecchi illuminanti	208
Tabella 49: Parametri per una corretta percezione visiva	211
Tabella 50: Illuminamenti consigliati	213
Tabella 51: Poteri riflettenti delle pareti	214
Tabella 52: Fattori di riflessione dei colori	217
Tabella 53: Schema delle dominanti	217
Tabella 54: Effetti psicologici del colore	220
Tabella 55: Classe di qualità visiva	221