



## INDICE

1	TERMINI FISICI DEL PROBLEMA.....	2
1.1	NOZIONI GENERALI E GLOSSARIO DEI TERMINI.....	2
1.2	GRANDEZZE E MISURE DI RUMORE.....	3
1.3	RUMORE DA TRAFFICO.....	5
1.4	PARTICOLARI PROBLEMI DI MISURA DEL RUMORE DA TRAFFICO.....	7
2	ANALISI DEL RUMORE VEICOLARE.....	9
2.1	INTRODUZIONE.....	9
2.2	VEICOLI ED EMISSIONI SONORE.....	9
2.2.1	<u>TIPOLOGIE</u> .....	9
2.2.2	<u>RUMORE E CONDUZIONE DEI VEICOLI</u> .....	11
2.3	CAUSE DEL RUMORE.....	12
2.3.1	<u>GENESI DEL RUMORE DI ROTOLAMENTO</u> .....	12

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	1 di 14



## 1 TERMINI FISICI DEL PROBLEMA

### 1.1 NOZIONI GENERALI E GLOSSARIO DEI TERMINI

Il rumore come il suono è l'effetto di vibrazioni emesse da una sorgente sonora e da questa trasmessa ad un mezzo solido liquido o gassoso che ne permette la propagazione sotto forma di variazioni di pressione chiamate onde sonore. La sorgente emana una potenza la quale si trasforma in un secondo momento in pressione sonora.

Possiamo dire che la potenza sonora è la causa e la pressione sonora è l'effetto; quello che sentiamo è la pressione sonora ma questa è causata dalla potenza sonora emessa dalla sorgente.

Una pressione sonora troppo elevata può causare danni all'udito ed è pertanto questa la grandezza da misurare; ciò è relativamente semplice in quanto la variazione di pressione sul timpano dell'orecchio che viene da noi percepita come suono, è la stessa che viene rilevata dal diaframma di un microfono. La pressione sonora dipende dalla distanza dalla sorgente e dall'ambiente acustico o campo sonoro. La propagazione del suono e del rumore nello spazio avviene in tutte le direzioni sotto forma di onde sferiche.

Per definizione suoni e rumori sono l'effetto sul timpano di vibrazioni dell'aria; l'uomo percepisce vibrazioni comprese tra i 20 Hz ed i 16.000 Hz mentre i suoni propriamente detti sono composti da una (suoni puri) o più (suoni complessi) oscillazioni sinusoidali, i rumori sono caratterizzati da vibrazioni non periodiche, del tutto irregolari.

La sensazione di intensità è invece data dalla pressione sonora esercitata dall'onda sonora sul timpano. Per ogni frequenza esiste una soglia di udibilità o intensità percepibile definita come soglia di udibilità; il limite superiore dovuto ad una sensazione sempre più fastidiosa fino a diventare dolore viene proprio definita come soglia del dolore.

Il **RUMORE** viene usualmente definito come un suono non voluto, è una forma di energia rilasciata che si dissipa gradualmente propagandosi in un mezzo diverso dal vuoto attraverso delle onde sonore.

**SUONO**: da un punto di vista fisico ogni qualvolta un oggetto si muove o vibra, una piccola parte dell'energia in gioco viene perduta e trasportata nell'ambiente circostante sotto forma di una vibrazione o pressione meccanica: il suono o onda sonora.

**POTENZA SONORA**: la potenza sonora è l'energia che una sorgente emette sotto forma di onda sonora.

**INTENSITÀ SONORA**: l'intensità sonora rappresenta il flusso dell'energia sonora per unità di tempo ed unità di superficie. Il flusso è una quantità vettoriale, cioè espressa secondo un modulo, una direzione e un verso, che descrive la quantità e la direzione di un flusso netto di energia acustica in una data posizione.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	2 di 14



**SORGENTI PUNTIFORMI:** le sorgenti sonore vengono considerate puntiformi quando le loro dimensioni sono piccole in relazione alla loro distanza dal ricevitore. Molte sorgenti comuni di rumore prese singolarmente possono essere trattate in questo modo: impianti industriali, aerei e veicoli stradali.

**PROPAGAZIONE DEL SUONO:** il suono si propaga nell'atmosfera secondo tre modalità principali: riflessione, assorbimento e diffrazione con frequenze e ampiezze diverse in funzione del tipo di onda sonora, che vengono influenzate in maniera significativa da diversi fattori, tra cui i più importanti 6 sono: il vento, la temperatura, l'umidità, le precipitazioni e l'assorbimento ad opera di elementi naturali.

**CAMPI SONORI:** il campo sonoro è la zona nella quale il suono si propaga. Il campo sonoro viene classificato in base all'ambiente in cui le onde sonore si propagano. Il Campo Libero definisce la propagazione del suono in uno spazio libero ideale senza alcuna riflessione; la propagazione in campo libero è caratterizzata da una caduta di 6dB del livello di pressione sonora ogni volta che la distanza dalla sorgente si raddoppia. Il Campo Diffuso è caratterizzato da una serie di riflessioni ripetute e si sposta in tutte le direzioni con egual pressione e probabilità. Tutti i problemi di controllo del rumore sono prima di tutto un problema di localizzazione e di identificazione della sorgente.

**SORGENTI DI RUMORE:** le attività umane producono, in maniera più o meno consistente e fastidiosa, del rumore. Le principali fonti sono costituite dalle attività industriali e dal traffico, che si differenziano principalmente per essere sorgenti fisse, le prime, e mobili, le seconde.

## 1.2 GRANDEZZE E MISURE DI RUMORE

La pressione determinata dalla propagazione delle onde sonore su un'unità di superficie viene misurata attraverso una grandezza logaritmica chiamata decibel (dB), che varia da un valore minimo pari a 0, soglia minima di riferimento, ad uno massimo pari a 120, soglia approssimativa di dolore. Un aumento del livello di rumore di 3 dB è appena percepibile dal soggetto che lo sente, mentre diviene significativo quando raggiunge i 5 dB.

Il deciBel non è un'unità di misura, ma un'unità di relazione logaritmica. Più precisamente, il livello della pressione sonora, espresso in deciBel (dB), è uguale a 10 volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra il valore della pressione misurato e il valore di riferimento. Il valore di riferimento, pari a 20 mPa, corrisponde al valore della pressione sonora minimo, percepibile da un individuo normoudente alla frequenza di 1000 Hz, ovvero 0 dB. Non è sufficiente considerare il livello della pressione sonora, in quanto il nostro apparato uditivo presenta una diversa sensibilità ai suoni caratterizzati da una diversa composizione in frequenza; ossia ha una sensibilità maggiore alle alte frequenze e una minore alle basse frequenze. Nella tecnica fonometrica si usa perciò un filtro che simula tale risposta. Tale filtro viene indicato come curva di ponderazione "A".

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	3 di 14



La curva di ponderazione “A” è stata ottenuta a seguito di alcune indagini condotte su differenti gruppi di popolazione, distinti per età e sesso, che hanno portato all’individuazione delle “proprietà medie” dell’orecchio; in particolare, la curva “A” approssima l’inverso della isofonica a 40 phon. Il phon è l’unità di misura del rumore viene effettuata con appositi strumenti detti fonometri. Fino ad alcuni anni fa questi strumenti erano in grado di rilevare soltanto il valore istantaneo del livello sonoro e pertanto fornivano misure variabili da istante ad istante con notevoli problemi di lettura e quindi di interpretazione. I rumori infatti non sono sempre continui (o stazionari) ma possono essere variabili o anche impulsivi.

La tabella di seguito riporta i valori di pressione sonora dalla soglia di udibilità fino alla soglia del dolore è espressa in dB (decibel) ponderati in curva A. La differenza tra dB e dB(A) consiste nella migliore espressione soggettiva dell’uomo alla sollecitazione acustica.

0÷5	dB(A)	Soglia di udibilità
30÷40	dB(A)	Biblioteca
50÷60	dB(A)	Ufficio
70÷80	dB(A)	Conversazione
100÷110	dB(A)	Tromba auto
115÷120	dB(A)	Martello pneumatico
>130	dB(A)	Soglia del dolore

Per simulare la velocità di risposta del nostro udito viene usato un processo di media temporale indicato come costante di tempo “Fast”. Misure eseguite con la curva di ponderazione “A” e costante di tempo “Fast” (LAF) consentono di riprodurre con buona approssimazione l’esperienza sonora dei ricettori (coloro che sperimentano i suoni o i rumori). Per poter ricavare l’energia sonora complessivamente assorbita e quindi poter determinare il potenziale nocivo o disturbante di un ambiente sonoro, occorre considerare nella misura sia il livello sonoro che la durata della esposizione.

Viene perciò usato l’algoritmo del livello continuo equivalente di rumore ponderato secondo la curva “A” (LAeq,T). Le misure eseguite con l’uso del dB(A) “Fast” consentono di riconoscere, con buona approssimazione, dall’evoluzione temporale della misura, la natura della sorgente. Tale affermazione trova il massimo della accuratezza nella dimostrazione di sorgenti mobili ad alto contenuto di energia sonora. Quest’ultimo aspetto risulta particolarmente importante, soprattutto quando è necessario depurare dal LAeq,T il contributo di singole sorgenti sonore non pertinenti con il fenomeno analizzato; ad esempio, nel caso specifico del rumore da Traffico Urbano, è possibile eliminare il contributo di sorvoli aerei, sirene, lavori stradali, manutenzione impianti pubblici ed altro.

Per una sorgente a carattere temporale stazionario/continuo il risultato della misura in LAF darà lo stesso risultato della misura in LAeq,T, diversamente per una sorgente a carattere stazionario/fluttuante o stazionario/periodico il risultato della misura in LAF presenterà una serie di valori diversi, rendendo difficile il confronto fra sorgenti diverse; motivo per cui per ottenere un unico valore si ricorre alla misura in LAeq,T.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	4 di 14



Affinché il valore di LAeq,T sia utilizzabile per confronti fra vari tipi di sorgenti o, su una stessa sorgente, serva per dimostrare la variazione di sonorità (es. dopo intervento di bonifica), diventa importante la scelta del tempo di misura (T).

Il tempo di misura deve comprendere tutte le variazioni possibili dei livelli sonori. Se la sorgente ha carattere stazionario/aleatorio (traffico autoveicolare urbano) il tempo di misura dovrebbe essere, perlomeno, uguale al ciclo urbano sulle 24 ore.

### 1.3 RUMORE DA TRAFFICO

Il traffico rappresenta la fonte di rumore che, nella sua totalità, comporta l'esposizione del maggior numero di persone.

Da un punto di vista generale il rumore da traffico si articola in quattro componenti ben distinte:

#### A) IL TRAFFICO VEICOLARE:

##### ▪ Automobili.

Le automobili producono un rumore le cui caratteristiche, in livello e frequenza, si distinguono da quelle degli altri veicoli. Le fonti primarie sono rappresentate dal funzionamento del motore nel suo complesso e dal rotolamento dei pneumatici sulla superficie della strada. La rumorosità del motore dipende dal regime della rotazione, non dalla velocità del veicolo. Di conseguenza nei tratti urbani caratterizzati dalla presenza di semafori e incroci variamente regolati, il rumore dei veicoli presenta un andamento tipo “dente di sega” con gli incrementi in corrispondenza all'aumentare del numero di giri nel passaggio dalle marce inferiori a quelle superiori. Il rumore emesso dai pneumatici, al contrario, dipende dalla velocità del veicolo. E' dovuto sia alle vibrazioni della carcassa del pneumatico che al continuo intrappolamento e rilascio dell'aria nelle cavità formate dal disegno del battistrada.

Alle basse velocità, il sistema di propulsione nel suo complesso è responsabile principale delle emissioni acustiche, particolarmente in presenza di accelerazioni rapide. A velocità elevate l'interazione tra pneumatico e fondo stradale prevale.

##### ▪ Mezzi pesanti.

Dal punto di vista qualitativo, anche nel caso dei mezzi pesanti, le sorgenti sono rappresentate dal sistema di propulsione e dai pneumatici.

Il rumore emesso da motore non dipende dalla velocità del veicolo ma, ad una data velocità, dal regime di rotazione, mentre è strettamente legato alla velocità il rumore emesso dai pneumatici.

In aggiunta a questi fattori si deve considerare anche la capacità di carico, come elemento condizionante, e lo stato di manutenzione.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	5 di 14



▪ Motocicli.

La sorgente principale di rumore emesso dai motocicli va individuata nel complesso del motore e dello scarico, mentre non è significativo il rumore dei pneumatici.

I livelli di rumore dipendono sensibilmente da come il mezzo viene guidato.

Le emissioni più elevate avvengono nel corso di accelerazioni repentine a partire da basse velocità.

B) IL TRAFFICO FERROVIARIO:

Nel caso dei convogli ferroviari il rumore prodotto dal motore è scarsamente rilevante, specialmente nel caso di motori elettrici. Assume una notevole importanza il rumore derivante dall'accoppiamento ruota-binario, mentre il rumore aerodinamico fa sentire la sua influenza solo nel caso dei nuovi treni ad alta velocità. Il rumore è massimo al passaggio di ciascuna motrice e assume un andamento oscillante attorno ad un valore medio inferiore durante il passaggio dei vagoni trascinati. Nei tratti rettilinei assumono importanza le diverse caratteristiche superficiali delle ruote e delle rotaie: se ruote e rotaie sono ben levigate e prive di discontinuità emettono un rumore stazionario a banda larga; in presenza di rugosità delle superfici, o del suo aumentare a causa del deterioramento del materiale, si manifesta un incremento sempre maggiore del livello di rumore a causa delle sollecitazioni periodiche che le ruote subiscono nel corso del rotolamento. Se i binari sono discontinui e non perfettamente allineati, al passaggio di ogni ruota sulla discontinuità viene emesso del rumore da impatto. Quando il treno percorre un tratto curvo, con raggio di curvatura relativamente piccolo, non superiore ai 100 metri, si sovrappone il rumore dovuto allo scivolamento delle ruote interne.

C) IL TRAFFICO AEREO:

Il rumore percepito al suolo, durante il sorvolo di un aeroplano, tende a crescere, superando il rumore di fondo, fino a raggiungere un valore massimo, approssimativamente nel momento in cui il velivolo si trova sulla verticale del punto di osservazione, e diminuire gradatamente fino ad essere mascherato dal rumore ambientale. Nel caso di aerei commerciali, le fonti primarie di rumore sono il sistema di propulsione ed il rumore aerodinamico.

I motori a propulsione permettono il movimento accelerando masse d'aria, che vengono dapprima compresse per mezzo di un compressore, assiale o centrifugo, riscaldate nel passaggio in una camera di combustione e infine accelerate dall'espansione attraverso l'ugello d'uscita. Nell'insieme sono individuabili il rumore prodotto dal compressore ed il rumore aerodinamico del sistema di presa d'aria nel suo complesso, quello prodotto dalle vibrazioni della struttura che racchiude il motore e quello prodotto dall'espulsione del gas. Quest'ultimo, generato dal rimescolarsi violento del gas espulso ad alta velocità con l'aria circostante, rappresenta, qualitativamente, il contributo di gran lunga prevalente sul rumore complessivamente emesso. Il flusso d'aria lungo la fusoliera provoca il rumore aerodinamico la cui importanza è inferiore a quella del rumore prodotto dal sistema propulsivo per il fenomeno percepito al suolo, mentre rappresenta

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	6 di 14



PIANO DI RISANAMENTO ACUSTICO

la componente principale del rumore percepito all'interno dell'aeromobile. Il rumore prodotto dagli aerei ha una forte influenza nelle zone vicine agli scali aeroportuali; infatti i sorvoli a quota non bassa non modificano sensibilmente il livello di rumore medio giornaliero ma si limitano ad innalzare i picchi.

D) IL TRAFFICO NAUTICO:

Il traffico nautico ha un peso limitato esclusivamente alla zona portuale e può pertanto essere trascurato in una valutazione dell'inquinamento acustico.

#### 1.4 PARTICOLARI PROBLEMI DI MISURA DEL RUMORE DA TRAFFICO

Le misure di monitoraggio del rumore da traffico hanno lo scopo di fornire dei valori di riferimento per controllare nel tempo la bontà del complesso delle azioni di bonifica rivolte a questo tipo di sorgente. Per comprendere l'entità delle variazioni di LAeq,T da traffico che realisticamente ci possiamo aspettare dobbiamo considerare i seguenti fattori, che sembrano confermarsi dalle esperienze attualmente disponibili:

1. eventuali variazioni importanti dei flussi di traffico (es. giornata lavorativa e festiva) portano delle variazioni di LAeq<sub>07-22</sub> (livello sonoro equivalente misurato dalle ore 07.00 alle ore 22.00) dell'ordine dei 2,0 ÷ 3,0 dB(A);
2. il progressivo abbassamento del limite massimo di rumorosità ammesso per gli autoveicoli dalle norme di omologazione CEE produrrà un abbattimento del rumore prodotto dal parco veicoli effettivamente circolante di 2,0 dB(A)/decennio;
3. l'unico provvedimento capace di produrre variazioni di LAeq diurno, dell'ordine dei 3,0 e fino a 9,0 dB(A) consiste, in alcuni casi, nella eliminazione dei mezzi pesanti e dei mezzi pubblici obsoleti.

Di fronte a variazioni di questo ordine di grandezza, ovvero piccolo, nell'impostare la tecnica di monitoraggio bisogna porre attenzione alla scelta dei tempi di misura.

Ad esempio un approccio di misura basato su di un tempo limitato (15-60 minuti) che fornisca un giorno 70 dB(A) e il giorno successivo, a condizioni di traffico complessivamente invariate, 65 dB(A) non può essere considerato un metodo affidabile in quanto, come abbiamo già premesso, l'affidabilità del risultato dipende, in prima analisi, dal tempo di misura.

E' necessario allora ottenere delle misure che godano di indipendenza statistica, ovvero che forniscano risultati proiettabili nel tempo, ovvero ripetibili a condizioni generali invariate.

Dobbiamo inoltre considerare l'entità dell'errore di precisione, variazione dei risultati delle misure dovuta alla instabilità intrinseca dello strumento di misura stesso. Per un misuratore di livello sonoro classe 1 (I.E.C. 651 e 804) tale errore di precisione è pari a  $\pm 0,3$  dB, mentre misure statisticamente dipendenti, in caso di una scelta inopportuna del tempo di misura, dimostreranno variazioni maggiori di  $\pm 0,3$  dB.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	7 di 14



Va poi considerato che, come da riferimenti della letteratura del settore, la dipendenza statistica delle misure aumenta al diminuire dei livelli sonori. Questa instabilità dei risultati delle misure è dovuta al transito occasionale di sorgenti ad alto contenuto di energia sonora (del tipo moto di grossa cilindrata, sirene di ambulanze, polizia, carabinieri e pompieri).

Per migliorare la qualità statistica dei risultati sarà necessario riconoscere ed eliminare questi eventi dal risultato della misura in sede di post-elaborazione.

Anche nei casi in cui fosse necessario valutare l'inquinamento da rumore prodotto da sorgenti sonore fisse situate in prossimità di vie di traffico, è importante garantire l'indipendenza statistica della misura. La valutazione dell'inquinamento da rumore prodotto da sorgenti sonore fisse richiede, infatti, la definizione dell'incremento di LAeq prodotto dalla sorgente disturbante, ovvero la differenza fra il rumore ambientale (prodotto da tutte le sorgenti di rumore esistenti in un dato luogo e da quello prodotto dalle specifiche sorgenti disturbanti) e il rumore residuo (quello senza le specifiche sorgenti disturbanti). E' evidente che i livelli di rumorosità da traffico veicolare giocano un ruolo importante nello stabilire l'effettivo contributo delle sorgenti specifiche di disturbo, essendo la componente traffico presente sia nel rumore ambientale che in quello residuo; pertanto eventuali sue variazioni, anche nell'ordine di qualche dB(A), possono per errore essere attribuite alla sorgente sonora.

Queste considerazioni pongono un problema non semplice, sia perché nel corso degli accertamenti non è possibile condurre misure di lunga durata (qualche giorno), sia perché misure di lunga durata non sono in grado di garantire la presenza costante del tecnico preposto alla verifica. La soluzione a questo problema dovrebbe risiedere nell'eliminazione degli eventi da traffico veicolare particolarmente intensi, sia nel rumore ambientale sia in quello residuo, stabilendone di volta in volta il metodo più idoneo (es. analisi statistica, depurazione manuale dei singoli transiti di veicoli, ecc.).

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	8 di 14





## 2 ANALISI DEL RUMORE VEICOLARE

### 2.1 INTRODUZIONE

Il rumore generato da ogni singolo veicolo dipende essenzialmente da:

- tipo e classe del veicolo (automobile, autocarro, bus, motociclo...)
- misure di controllo del rumore adottate nel progetto del veicolo
- manutenzione del veicolo (stato dei pneumatici, dello scarico...)
- modalità di circolazione (velocità, accelerazione o decelerazione, marcia)
- condizioni del manto stradale
- condizioni di propagazione.

Sostanzialmente sono due i metodi adottati per misurare i peak levels (livelli di picco del rumore) generati dal passaggio dei veicoli.

Il primo è un metodo nel quale la misura dei peak levels viene effettuata in condizioni di traffico reale, all'interno quindi di un largo gruppo di veicoli in movimento, con il fonometro posto al bordo della strada (roadside measurements).

Mentre il secondo è lo standard acceleration test, che utilizza un'area ipotizzabile come campo libero, nella quale, secondo precise disposizioni, sono effettuate le misure.

### 2.2 VEICOLI E EMISSIONI SONORE

#### 2.2.1 TIPOLOGIE

Effettuando rilevamenti del rumore prodotto da traffico veicolare usando il metodo del roadside measurements si può desumere la distribuzione cumulativa del livello di rumore generata da varie categorie di veicoli. Si può notare come i veicoli più silenziosi sono le autovetture, ed in particolare quelle con propulsori a benzina, mentre i veicoli maggiormente rumorosi sono gli autocarri con potenza maggiore di 200 CV.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	9 di 14



Secondo l'autore P.M. Nelson (Nelson P.M. "Transportation Reference Book" Butterworths) sono attendibili i seguenti valori:

Categoria di Veicoli	L <sub>50</sub> (dB)	L <sub>5</sub> (dB)
Ciclomotori	73	82
Piccoli Motocicli	82	88
Motocicli	78	87
Auto a Benzina	70,5	77
Auto Diesel	72	78
Autobus	80	86
Autocarri < 143 Cv	79,5	85,5
Autocarri > 143 Cv	82,5	88,5
Autocarri > 200 Cv	85	90,5

ove L<sub>5</sub> e L<sub>50</sub> (condizioni di traffico urbano e distanza di riferimento 7,5m) rappresentano il livello di rumore superato dal 5 e dal 50 % dei vari veicoli considerati.

Oltre al livello di pressione sonora è ugualmente importante la considerazione degli spettri d'emissione, ovvero delle frequenze (Hz) connesse al passaggio dei veicoli.

In condizioni di flusso libero, pur rimanendo i veicoli pesanti più rumorosi, si assiste ad un avvicinamento e ad una sovrapposizione (1000 Hz) delle due curve per valori alti delle frequenze.

Per frequenze basse invece i veicoli pesanti hanno una curva più spostata in alto rispetto a quelle dei veicoli leggeri.

Questa semplice considerazione mette in evidenza come, all'aumentare della percentuale dei veicoli pesanti, cambi abbastanza radicalmente la natura delle emissioni, diventando esse caratterizzate da frequenze più basse.

Uno dei limiti della maggior parte delle moderne pavimentazioni drenanti/fonoassorbenti è quello di essere in grado di catturare solo le emissioni nello spettro medio/alto. Appare chiaro come esse debbano per forza risultare parzialmente inefficaci in presenza di un traffico caratterizzato da un notevole numero di veicoli pesanti.

E' bene comunque precisare che le automobili, pur essendo le più silenziose, risultano ugualmente le fonti principali di inquinamento acustico, essendo presenti in numero maggiore rispetto ai bus piuttosto che ai motocicli.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	10 di 14



## 2.2.2 RUMORE E CONDUZIONE DEI VEICOLI

Oltre alla tipologia del veicolo, la quantità di rumore emessa dipende inoltre dalla velocità e dalla marcia (accelerazione/decelerazione) che esso mantiene durante la circolazione.

E' chiaro che quando il veicolo opera a marce basse il rumore è prodotto in prevalenza dal gruppo motore-trasmissione (power train noise), mentre per marce più alte, esso diventa governato dall'effetto del rotolamento del pneumatico sull'asfalto (rolling noise, nel quale spesso è compreso anche l'effetto dell'aerodinamica).

Questa è la fondamentale differenza che si riscontra passando dall'analisi di un traffico autostradale ad un traffico urbano.

Gli intervalli di velocità all'interno dei quali si muovono gli autoveicoli ci informano a priori su quali fonti di rumore saranno determinanti ai fini dell'inquinamento acustico.

E' interessante la relazione che intercorre tra il livello di rumore e l'entità dell'accelerazione-decelerazione, per diversi valori della velocità iniziale.

Com'è intuibile, soprattutto alle basse velocità, frequenti accelerazioni o decelerazioni contribuiscono ad aumentare il livello di rumore.

E' evidente quindi come in ambito urbano, a causa delle velocità ridotte e delle ripetute accelerazioni, il livello di rumore sia abbastanza indipendente dall'iterazione pneumatico-pavimentazione e dipenda invece, quasi esclusivamente, dalla rumorosità del motore e dallo stato di manutenzione del manto (buche, sconnessioni, ecc.). Si è in grado di valutare, qualitativamente, la distribuzione percentuale del contributo delle diverse fonti di rumore di un veicolo in buone condizioni (op. citata).

Sorgenti di Rumore	Veicoli Passeggeri		Veicoli merci	
	Zona Urbana	Zona Extra Urb.	Zona Urbana	Zona Extra Urb.
Prese d'aria	15-35	-	15-60	-
Gruppo di scarico	15-30	20-70	-	-
Gruppo motore	20-30		-	40-80
Gruppo trasmissione	5-30		30-80	-
Condizionamento	-	-	10-50	-
Rotolamento	5-10	30-80	5	20-60

E' chiaro poi che un altro particolare aspetto dell'inquinamento acustico è quello della rumorosità interna al veicolo; a quest'aspetto è evidente che si avvicinano con maggior riguardo le case automobilistiche in fase di progettazione, al fine di rendere l'autoveicolo il più confortevole e meno rumoroso possibile per i passeggeri.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	11 di 14



### 2.3 CAUSE DEL RUMORE

Per i veicoli leggeri, alle alte velocità, il rolling noise, anche se di poco, supera il power train noise, mentre alle basse velocità è decisamente prevalente il rumore del gruppo motore-trasmissione.

In presenza di veicoli pesanti si nota come alle basse velocità il rumore di rotolamento rappresenti un valore molto piccolo in confronto al suo antagonista; mentre alle alte velocità, contrariamente a quanto capitava ai veicoli leggeri, il power train noise resta comunque la fonte di disturbo preponderante.

Velocità (Km/h)	Classe	Rolling Noise	Power Train Noise	Totale
20	Pesanti	61	78	78
20	Leggeri	58	64	65
80	Pesanti	79	85	86
80	Leggeri	76	74	78

#### 2.3.1 GENESI DEL RUMORE DI ROTOLAMENTO

Il rumore di rotolamento percepito dipende dalla regolarità e dalla tessitura della pavimentazione, dall'ambiente, dal veicolo e dal pneumatico, secondo alcuni precisi meccanismi. Inizialmente si assiste ad un'azione di generazione per effetto del contatto pneumatico/manto stradale ed in seguito, dopo fenomeni di attenuazione e/o amplificazione si ha la vera e propria propagazione con conseguente produzione di rumore.

Si distingue un valore S1 di livello sonoro generato ed un secondo livello S2 propagato. Tipicamente i due valori sono diversi e spesso il rumore propagato S2 è maggiore del livello S1 a causa di effetti di amplificazione.

Uno dei fenomeni di amplificazione più interessanti e più rilevanti è l'effetto Horn (o effetto Corno), il quale rappresenta l'insieme delle riflessioni che le onde sonore subiscono contro le pareti del diedro formato dalle superfici della strada e del pneumatico prima e dopo l'area di contatto.

L'effetto Horn è efficacemente combattuto mediante l'impiego di pavimentazioni porose.

La generazione, propriamente detta, del rumore da rotolamento è invece strettamente connessa alla presenza di irregolarità che interagiscono con il pneumatico causando principalmente Vibrazioni radiali, Risonanze dell'aria e fenomeni di Adesione.

E' importante, per trattare l'argomento, avere presente i concetti della regolarità e tessitura (distinguibile in micro, macro e mega tessitura per la precisione) delle pavimentazioni stradali.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	12 di 14



Le Vibrazioni radiali sono prodotte da:

- impatto delle solcature dei pneumatici sulla superficie stradale;
- impatto della tessitura della pavimentazione sulle solcature dei pneumatici.

Pare che questo fenomeno sia quello maggiormente responsabile dell'emissione di rumore alle basse frequenze (in particolare frequenze comprese tra 50 e 800 Hz).

Le Vibrazioni radiali sono quindi strettamente influenzate dalla megatessitura della pavimentazione e possiamo affermare che sono responsabili del 60-80 % dell'energia acustica emessa complessivamente. Le stesse vibrazioni, trasmesse attraverso il gruppo delle sospensioni, sono responsabili di fenomeni di risonanza sia all'interno dell'abitacolo (diminuzione di comfort per i passeggeri), sia all'esterno tra il manto stradale e la sottoscocca del veicolo.

In conclusione una superficie molto piana e priva di irregolarità (o con irregolarità contenute entro le dimensioni del mm) ridurrebbe fortemente questo fenomeno di generazione acustica, pur producendo però svantaggi nei confronti dell'Air Pumping.

Le Risonanze dell'aria sono causate da:

- successione dei cicli pressione-depressione dell'aria (Air Pumping);
- risonanza di Helmholtz;
- risonanza dell'aria nelle solcature dei pneumatici.

Le Risonanze dell'aria sono responsabili del 10-30 % delle emissioni globali, e producono principalmente suoni alle alte frequenze (attorno ai 1250-2000 Hz).

L'Air Pumping (pompaggio dell'aria) è ritenuto il più colpevole tra i tre fattori elencati ed è un fenomeno legato alla formazione di tasche d'aria, in pressione o in depressione, tra la superficie del manto stradale e la superficie del pneumatico. Può essere diviso in fasi distinte:

- l'aria viene compressa e costretta ad insinuarsi tra i piccoli interstizi che si creano tra la pavimentazioni;
- e il pneumatico durante il moto;
- l'aria viene espulsa violentemente a causa delle forti pressioni in gioco;
- quando il battistrada si stacca dal suolo l'aria viene risucchiata rapidamente per effetto della depressione dei vuoti.

Abbiamo detto in precedenza che una superficie liscia tende ad aumentare l'Air Pumping, poiché per superfici lisce tende ad aumentare la componente di emissione alle alte frequenze.

Questo perché intuitivamente si riducono gli spazi entro cui l'aria può essere sospinta; tale riduzione (in dimensione e numero) degli interstizi a disposizione potrebbe produrre pressioni maggiori dell'aria ed espulsione più violenta della stessa, con conseguenti innalzamenti del rumore.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	13 di 14



L'effetto Helmutz e la risonanza dell'aria nelle solcature dei pneumatici sono due fenomeni conseguenti al pompaggio dell'aria e sono legati ai 16 percorsi dell'aria e ai processi che essa subisce all'interfaccia pneumatico/manto.

È importante sottolineare che molte volte i fenomeni di risonanza, in determinate situazioni e per particolari coincidenze, contribuiscono all'abbattimento del livello sonoro.

I fenomeni di Adesione sono causati da:

- successione dei cicli adesione-distacco dell'impronta del pneumatico (stick and slip);
- rilassamento del pneumatico nel contatto con la pavimentazione. In pratica essi s'identificano come i processi di contatto-rilascio che avvengono tra il manto stradale ed il battistrada.

In particolare riguardano proprio l'interazione che avviene, in ogni istante, tra il generico elementino di gomma del pneumatico e la generica particella di pietra di cui è composta la pavimentazione. Questi meccanismi generano, fra l'altro, una serie di vibrazioni tangenziali del pneumatico che producono rumore prevalentemente nello spettro delle alte frequenze.

L'entità di tale rumore decresce al crescere della regolarità della superficie stradale.

È abbastanza logico aspettarsi di trovare una relazione abbastanza marcata tra le caratteristiche del pneumatico e l'entità o il tipo di rumore, infatti, possiamo dire:

- pneumatici con ridotti spessori e diametri più grandi sono più silenziosi;
- i pneumatici a carcassa radiale sono meno rumorosi;
- la scelta del tipo di gomma può favorire l'eliminazione di particolari spettri di emissione, soprattutto alle alte frequenze;
- solchi trasversali aumentano la rumorosità.

Sinteticamente possiamo concludere che:

- alle basse frequenze (LF) il rumore è proporzionale alla tessitura; rendendo la superficie del manto più liscia si ottiene quindi una riduzione delle LF (si riducono i fenomeni di vibrazione);
- l'esatto contrario accade per le alte frequenze (HF), dove un aumento dell'irregolarità porta ad una riduzione delle HF (si riduce l'Air Pumping);
- una pavimentazione perfettamente liscia e contemporaneamente porosa (cioè con vie di fuga per l'aria altrimenti coinvolta nei fenomeni di pompaggio) sarebbe un buon assorbitore sia per HF sia per LF.

Comm. n.	09210	Cliente	Comune di Lodi		Tipo lavoro	Piano di risanamento acustico	
Emesso da	ing. Paolo Zaneboni		Validato da	ing. Edoardo Galatola	Referente aziendale	ing. Matteo Zanchi	
<i>Stato di revisione del documento</i>							
Rev.	00	Data agg.	21 giugno 2010	Tipo documento	Report Finale	N. pag.	14 di 14