



**UNIVERSITA' DI PISA**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE  
DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO**

**DIPARTIMENTO DI ENERGETICA "L.Poggi"**

Tesi di Laurea Triennale

***Indagine sull'inquinamento acustico in via del  
Cavatore nella città di Carrara***

RELATORI

***Prof. Carlo Bartoli***

***Prof. Sergio Faggiani***

CANDIDATA

***Barbara Violi***

ANNO ACCADEMICO 2006-2007

# INDICE

<b>Introduzione.....</b>	<b>(4)</b>
--------------------------	------------

## **1 IL SUONO**

<b>1.1 Definizione e caratteristiche.....</b>	<b>(8)</b>
1.1.1 Grandezze fisiche.....	(9)
1.1.2 Suoni puri e suoni complessi.....	(10)
1.1.3 Pressione sonora.....	(12)
1.1.4 Potenza sonora, intensità.....	(13)
1.1.5 Livelli in decibel.....	(13)
<b>1.2 Udito e sensazioni di fastidio connesse al rumore.....</b>	<b>(15)</b>
1.2.1 Livello sonoro in dB(A) .....	(18)
1.2.2 Il livello equivalente continuo.....	(20)
1.2.3 Il fonometro.....	(21)
1.2.4 Effetti del rumore.....	(23)

## **2 IL RUMORE DA TRAFFICO AUTOVEICOLARE URBANO (TAU)**

<b>2.1 Il rumore dei veicoli a motore.....</b>	<b>(25)</b>
<b>2.2 Tecnica di rilevamento del rumore negli ambienti urbani... </b>	<b>(26)</b>
2.2.1 Campionamento spaziale.....	(26)
2.2.2 Campionamento temporale.....	(27)
2.2.3 Metodologia di rilevamento del rumore stradale.....	(28)
<b>2.3 Normativa vigente.....</b>	<b>(30)</b>
2.3.1. D.P.C.M.1/3/1991 Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno.....	(31)
2.3.2 Legge quadro sull'inquinamento acustico n°447/1995.....	(32)
2.3.3 D.P.C.M.14/11/1997 Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore.....	(34)

2.3.4 Decreto 16/3/1998 Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico.....	(39)
2.3.5 Decreto del Presidente della Repubblica del 19/03/2004.....	(43)
2.3.6 Legge Regionale n°89 del 98 e successive modifiche.....	(46)
2.3.7 Direttiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio...	(48)

### **3 INDAGINE NELLA CITTA' DI CARRARA**

<b>3.1 Definizione delle impostazioni per l'acquisizione dei dati.....</b>	<b>(50)</b>
<b>3.2 Monitoraggio sulle 24 ore.....</b>	<b>(52)</b>
<b>3.3 Analisi statistica.....</b>	<b>(67)</b>
3.3.1 Generalità.....	(67)
3.3.2 Applicazione ai cinque giorni monitorati.....	(69)
<b>3.4 Caratterizzazione delle sorgenti sonore.....</b>	<b>(74)</b>
3.4.1 Analisi spettrale.....	(87)
3.4.2 Contributo delle sorgenti sonore al rumore ambientale.....	(89)

<b>Conclusioni .....</b>	<b>(96)</b>
--------------------------	-------------

<b>Bibliografia.....</b>	<b>(100)</b>
--------------------------	--------------

## INTRODUZIONE

Il rumore è per definizione una manifestazione sonora “indesiderata, di intensità eccessiva, fastidiosa e casuale”, ed è, oggi, individuato dai sondaggi come una delle principali cause del peggioramento della qualità della vita. [8]

Secondo quanto riportato nel Libro Verde della Commissione Europea, pubblicato il 4 novembre del 1996, il 20% della popolazione dell’Unione, circa 80 milioni di persone, è esposto a livelli di rumori diurni continuati che superano il livello di 65 dB(A), considerato come limite di tollerabilità per gli individui, e che altri 170 milioni di persone sono esposte a livelli di rumore compresi fra 55 e 65 dB(A), considerata fascia di attenzione nella quale si possono manifestare seri disturbi.

Dai dati che compaiono nella proposta di direttiva Europea sul rumore ambientale (2000) si rileva che circa il 25 % della popolazione dell’Unione Europea subisce un peggioramento della qualità della vita a causa dell’annoyance, sensazione di fastidio generico che consiste nel sentirsi disturbato e impedito nello svolgimento delle proprie attività e nel riposo, mentre una percentuale compresa fra il 5 e il 15 % soffre di gravi disturbi del sonno. A questo quadro generale si aggiunge la tendenza del rumore ad espandersi sia nello spazio (aree rurali e suburbane) che nel tempo (periodo notturno), fatto ancor più preoccupante se si considera il previsto aumento dei veicoli e delle percorrenze effettuate da ciascuno di essi. [5]

In un primo tempo alla lotta contro il rumore non è stata assegnata l’importanza conferita ad altre problematiche ambientali quali ad esempio l’inquinamento atmosferico, l’inquinamento delle acque, la gestione dei rifiuti ecc.; ciò è dovuto principalmente al fatto che le conseguenze per la popolazione sono meno evidenti, meno eclatanti, rispetto a quelle delle altre forme di inquinamento.[7] In realtà è l’OMS, l’agenzia delle Nazioni Unite dedicata alla sanità, a individuare nell’ambiente una delle risorse più importanti per migliorare le condizioni di vita ed accrescere il benessere della popolazione, in quanto, secondo una definizione dell’ OMS stessa del 1946, il concetto di “salute” è da intendersi come “uno stato di completo benessere fisico, mentale e sociale e non semplicemente l’assenza di malattie o infermità”.

Pertanto un ambiente acustico sfavorevole incide sulla salute dell'uomo provocando molti effetti nocivi tra cui i più comuni sono i disturbi del sonno a cui conseguono stati d'ansia e depressione.

A conferma di tali disturbi si riporta un dato molto significativo derivante da una ricerca merceologica dell'Istituto di Medicina del Lavoro della USL 1 di Trieste : le farmacie che operano in quartieri dove il livello sonoro notturno è compreso fra i 55 e i 75 decibel vendono una quantità di sonniferi e tranquillanti doppia o addirittura tripla rispetto alla media. [5]

La legislazione italiana sull'inquinamento acustico subisce una profonda evoluzione con la legge quadro n. 447 del 1995, la quale stabilisce l'obbligo per le Amministrazioni Comunali di procedere alla classificazione del territorio in 6 zone: da aree particolarmente protette (classe 1) ad aree esclusivamente industriali (classe 6), e successivamente con il DPCM del 14/11/1997 vengono assegnati a ciascuna di queste classi limiti diversificati diurni e notturni in modo da tutelare aree più sensibili vicino ad ospedali, scuole o parchi.

Questo processo di zonizzazione acustica ha un ruolo importantissimo nella politica di riduzione dell'inquinamento da rumore in quanto, oltre a tutelare zone particolarmente sensibili, consente di prevenire l'insorgere di nuovi problemi limitando l'utilizzo di zone già soggette a livelli acustici elevati e promuovendo l'accorpamento delle attività fonte di rumore in modo da preservare le aree più tranquille.

Il passo immediatamente successivo alla zonizzazione del territorio è rappresentato dai piani di risanamento acustico, i quali derivano dal mancato rispetto dei limiti di zona e comprendono provvedimenti di varia natura come:

- la riduzione della trasmissione del rumore (mediante l'insonorizzazione degli edifici, l'installazione di barriere, ecc.)
- la riduzione delle emissioni alla sorgente (rivestimenti stradali antirumore, divieti di circolazione per i veicoli rumorosi nelle ore notturne e nei fine settimana, limitazione delle velocità e del volume di traffico, ecc.) [7]

Purtroppo il rumore non provoca solo disturbi del sonno, ma vari studi sull'argomento dimostrano che esposizioni prolungate ad esso possono causare tachicardia, variazione della pressione arteriosa e della capacità respiratoria, gastriti, nausea ecc., c'è poi il fenomeno del mascheramento che rende difficile la comunicazione e l'annoyance, quella deleteria sensazione di fastidio, definita come "un sentimento di scontentezza riferito al rumore che l'individuo sa o crede possa agire su di lui in modo negativo".

Sta di fatto che, qualunque sia la natura degli effetti, fisica o psicologica, il frastuono che accompagna quotidianamente una larga parte della popolazione mina profondamente la qualità della vita. [5]

Il problema dell'inquinamento acustico a Carrara, evidenziato anche dal seguente articolo, pubblicato il 14 Marzo 2006 da "Il Tirreno", è al centro dell'attenzione cittadina ormai da molti anni.

VI Martedì 14 Marzo 2006 Carrara IL TIRRENO

*Gli abitanti della Carriona meditano di chiedere i danni per stress da mancato riposo*

**UNA CITTÀ INVIVIBILE**

*Nel mirino il provvedimento del Comune di far lavare la strada proprio quando passano i tir*

**«I camion ci tolgono anche il sonno»**  
*Protesta alla Lugnola: ci buttano giù dal letto alle 4 del mattino*

**CARRARA.** «I camion del marmo ci tolgono anche il sonno. Sulla via Carriona non si riesce più a dormire: andremo dal medico a farci fare le perizie e poi chiederemo i danni al Comune. Perdere ore di sonno ha effetti gravissimi sull'organismo, dall'ansia fino alla depressione». Protestano gli abitanti della Lugnola: oltre che con il traffico pesante, adesso devono fare i conti con la pulizia della strada fissata di prima mattina, dalle 4 alle 7. «Così a svegliarci - dicono - non sono più i camion, alle 6, ma l'autobotte per il lavaggio della strada due ore prima».

«Si parla sempre delle polveri ma ci si dimentica degli altri danni che il traffico pesante, e in questo caso i correttori messi a punto dal Comune, rappresentano per chi in questa parte della città ci deve vivere e poi andare a lavorare, magari fare turni, o studiare. Perché dobbiamo essere buttati giù dal letto alle quattro del mattino?».

Lo dice Roberto Largio, originario di Savona e da un anno trapiantato a Carrara, proprio sulla via Carriona.

«Stamani - incalza un'altra residente della Lugnola - abbiamo avuto l'amara soppesa di vedere all'inizio della strada un nuovo cartello in cui la pulizia della strada è stata fissata dalle 4 alle 7 del mattino. La scorsa settimana era stato un provvedimento temporaneo, adesso sembra invece sia diventato un appuntamento fisso. Questo per noi significa perdere definitivamente il sonno: alle 4, infatti, il rumore dell'autobotte ci tira giù dal letto e dormire ancora è impossibile».

Ma non solo: per gli abitanti della Lugnola non ci sarebbero neppure effetti positivi per la strada. «Che senso ha

penso - dicono - alla Lugnola gli insonni sono in aumento: non abbiamo diritto anche noi a riposare? Affrontare una giornata di lavoro con poche ore di riposo sulle spalle è davvero difficile e pesante».

E così i residenti della Carriona stanno meditando di prendere provvedimenti: non più e non solo per il problema delle polveri del marmo e le

pm 10, ma anche per lo stress causato dall'insonnia. «Sobbalzare nel letto alle prime ore del mattino non è davvero un'esperienza piacevole, rischiamo tutti di dovere fare i conti con gli stati d'ansia e la depressione - sostengono - Prima che i disturbi diventino più gravi, vogliamo essere tutelati».

Alessandra Vivoli

Un camion alla Lugnola e un mezzo dell'Amia in azione

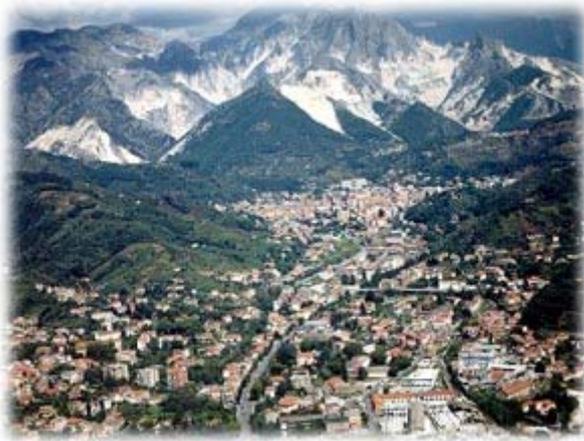
**Amia: straordinari per le polveri**  
*Le Rsu chiedono un incontro in Comune sui carichi di lavoro*

**CARRARA.** Strade dei camion pulite: ma a che prezzo? Lo chiedono, in una secca nota stampata le Rsu dell'Amia sollevando un problema ben preciso. Togliere fango e polveri è un super lavoro: l'azienda è costretta a fare gli straordinari o - come il sindacato dice che sta succedendo adesso - a trascurare altre zone della città. Con grande disappunto di chi vive nelle zone fuori dal traffico pesante.

*Per il sindacato si corre il rischio di trascurare il resto della città, per lavare ogni giorno le vie del marmo*




Dati riferiti al 2005 parlano di 4 milioni di tonnellate di scaglie di marmo e di un milione di tonnellate di blocchi di marmo da trasportare dalle cave ai frantoi e alle segherie, per il cui trasporto vengono usati grossi camion con una portata media di 25



tonnellate e con circa 200.000 viaggi/anno.

Questo notevole traffico attraversa le strette vie del centro di Carrara, utilizzando, per lo più, lo stesso percorso che nei secoli è stato utilizzato con diverse metodologie di trasporto, dai carri trainati dai buoi ai primi mezzi

meccanici. Ciò è ovviamente motivo di grandissimo disagio per la popolazione che vi risiede, sia per il rumore e le vibrazioni, sia per il non meno importante problema delle polveri sottili rilasciate da ogni camion. [10]

Il seguente lavoro è, pertanto, volto a studiare la situazione acustica in via del Cavatore, unica strada di accesso dei camion verso i bacini marmiferi.

In una prima fase si è proceduto ai monitoraggi in continuo del livello sonoro, in modo da determinare il livello continuo equivalente diurno e notturno da confrontare con i limiti previsti dalla zonizzazione acustica redatta dal comune di Carrara.

A tale monitoraggio è seguita una analisi statistica volta a determinare il “clima acustico”, ossia l’entità delle variazioni del rumore nel tempo.

Infine si è proceduto alla caratterizzazione delle sorgenti sonore, per la quale sono state considerate quali categorie di veicoli auto, camion, ciclomotori, corriere, furgoni e motocarri, in modo da determinare il contributo di ciascuna di esse al rumore ambientale.

In seguito ai dati raccolti da ciascuna indagine e alle successive elaborazioni sono state riportate le conclusioni e anche alcuni possibili esempi di risanamento acustico.

# 1 IL SUONO

## 1.1 Definizione e caratteristiche

Il suono è l'effetto di vibrazioni emesse da una sorgente sonora e da questa trasmesse ad un mezzo solido, liquido o gassoso che ne permette la propagazione sotto forma di variazioni di pressione chiamate onde sonore.

Pertanto il suono non è altro che un'onda elastica per la cui esistenza sono necessari una sorgente (corpo vibrante) e un mezzo elastico di propagazione (aria, acqua, ecc.).

Affinché tali onde elastiche vengano rilevate dall'orecchio umano sotto forma di suoni è necessario che la loro frequenza sia compresa tra 20 e 20000 Hz circa e la loro ampiezza sia superiore ad una certa entità dipendente dalla frequenza. Ciò significa che, pur esistendo onde sonore che si propagano a frequenze più basse (infrasuoni) o più alte (ultrasuoni), noi non possiamo percepirle.

Quindi un corpo vibrante in un mezzo elastico, come l'aria, con frequenze comprese fra i limiti suddetti costituisce una sorgente sonora, dando luogo ad una perturbazione, ossia ad un susseguirsi di pressioni e depressioni e quindi ad una oscillazione di ogni particella in vibrazione attorno ad una sua posizione media fissa.

Con l'avanzare delle onde il mezzo elastico nel suo insieme non subisce spostamenti permanenti, mentre le singole particelle si muovono alternativamente intorno alla loro posizione di equilibrio trasferendo energia a quelle adiacenti e queste la trasmettono a loro volta a quelle vicine, generando un'onda che si propaga con una certa velocità, che dipende dalla proprietà del mezzo. [1]

### 1.1.1 Grandezze fisiche

Come tutte le onde, anche quelle sonore sono caratterizzate da:

*Periodo (T)* è il tempo impiegato dalla particella per tornare nello stesso punto dopo aver cominciato lo spostamento ed indica la durata complessiva dell'oscillazione. Si misura in secondi (s).

*Frequenza (f)* : dal numero di periodi fatti in un secondo si ottiene la frequenza, misurata in hertz (Hz) che indica il numero di vibrazioni complete che avvengono in un secondo.

Il periodo T è quindi l'inverso della frequenza rappresentando la durata di un ciclo completo di oscillazione; si ha cioè :

$$f = 1/T$$

Da essa dipende l'altezza del suono: maggiore è la frequenza più alto è il suono percepito; più precisamente, i suoni gravi hanno una frequenza dell'ordine delle decine di hertz, mentre i suoni più acuti hanno una frequenza dell'ordine delle migliaia di hertz.

*Ampiezza (A)*: l'ampiezza dell'onda rappresenta lo spostamento massimo delle molecole d'aria rispetto alla posizione di equilibrio al passaggio della perturbazione acustica.

Al crescere dell'ampiezza aumenta la forza con la quale viene colpito il timpano dell'orecchio e quindi l'*intensità* con cui il suono è percepito, vale a dire il rapporto fra la potenza trasportata dall'onda e la superficie su cui essa incide.

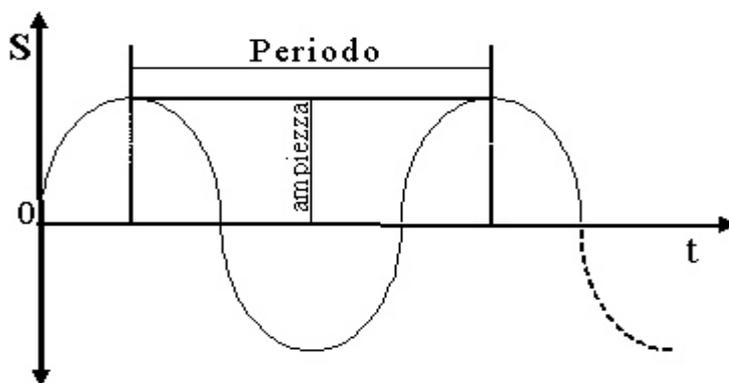


Fig. 1.1.1 Onda sonora

*Lunghezza d'onda ( $\lambda$ )* : è la distanza percorsa dall'onda in un periodo, o anche la distanza fra una compressione (o una rarefazione) e la successiva; si misura in metri (m).

Essendo la lunghezza d'onda la distanza di trasmissione del fenomeno nel tempo T di un periodo, se  $c$  è la *velocità di propagazione* delle onde sonore in m/s, si ha :

$$\lambda = cT = c/f$$

*Velocità di propagazione ( $c$ )* : è la velocità con cui il suono si propaga nel mezzo attraversato e dipende dalla densità ( $d$ ) e dal modulo di elasticità  $E$  dello stesso, secondo la relazione:

$$c = K (E/d)^{1/2}$$

dove  $K$  è una costante dipendente dalle unità di misura scelte. [1]

***Tab.1.1.1 Velocità di propagazione del suono in vari mezzi***

<i>mezzo</i>	<i>Velocità m/s</i>
aria	344
acqua	1370
muratura	3000
cemento	3400
legno	3400
alluminio	5000
Acciaio	5200

### ***1.1.2 Suoni puri e suoni complessi***

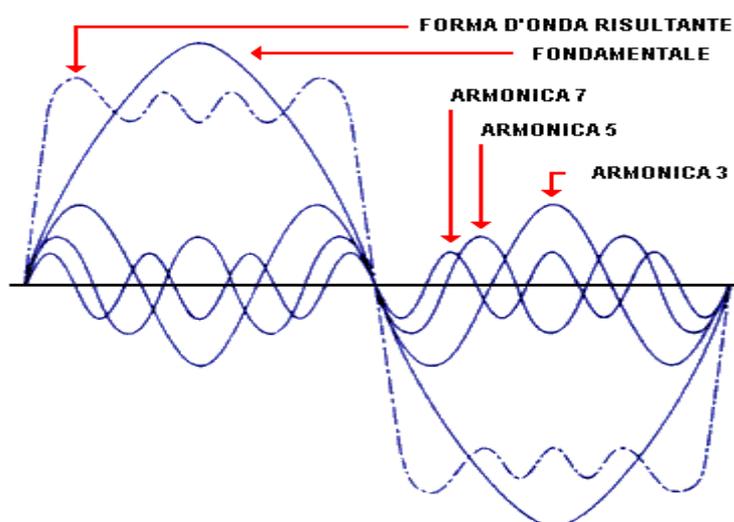
Se, per effetto della perturbazione, la pressione varia nel tempo con legge esattamente sinusoidale il suono si dice puro ed è rappresentabile dalla funzione seno:

$$A \sin ( 2\pi f)t$$

dove  $A$  è l'ampiezza di vibrazione dell'onda,  $f$  la sua frequenza in hertz e  $t$  il tempo in secondi.

Se, invece, la pressione varia nel tempo con legge semplicemente periodica, ma non sinusoidale, il suono si dice complesso.

Ben poche sorgenti sonore danno un suono puro, i suoni più facilmente riscontrabili in pratica sono suoni complessi, cioè con forme d'onda non rappresentabili con una semplice sinusoide; un suono complesso, però, può considerarsi come la sovrapposizione di più suoni perfettamente sinusoidali, di cui, quello con frequenza più bassa (coincidente con la frequenza del moto armonico risultante ) è chiamato fondamentale o primo armonico, mentre i rimanenti, le cui frequenze sono multiple intere della fondamentale, e quindi sono correlati armonicamente con essa, vengono chiamati armonici superiori. Il risultante suono complesso è un suono armonico o periodico ripetendosi nella stessa maniera a intervalli regolari e prevedibili.



**Fig. 1.1.2 Suono complesso**

Se invece l'onda è molto irregolare, nel senso che presenta un andamento vibratorio in cui manca un preciso carattere di periodicità, il suono, aperiodico, è percepito come una specie di disturbo e viene generalmente chiamato rumore. [2]

### ***1.1.3 Pressione sonora***

In un punto del campo sonoro, al passare del tempo, la pressione varia con la stessa legge che rappresenta l'oscillazione della sorgente; quindi nel caso di sorgente pulsante con legge sinusoidale anche la pressione varierà con legge sinusoidale secondo la funzione:

$$\Delta p(t) = \Delta p_{\max} \sin(2\pi ft)$$

dove  $\Delta p$  è la variazione istantanea di pressione,  $\Delta p_{\max}$  è l'ampiezza cioè il valore massimo della variazione di pressione rispetto a quella atmosferica,  $t$  il tempo e  $f$  la frequenza.

Quindi per un punto vicino alla sorgente sonora prima del passaggio delle onde sonore la pressione è uguale alla pressione atmosferica  $P$ , dopo il passaggio delle onde sonore la pressione addizionale  $p$  sarà data da :

$$p = P + \Delta p_{\max} \sin(2\pi ft)$$

Il fenomeno acustico consiste quindi in una perturbazione della pressione atmosferica di carattere oscillatorio che si propaga in un mezzo elastico.

Le variazioni di pressione sono sia positive, corrispondenti alla fase di compressione, che negative, corrispondenti alla fase di rarefazione. Il loro valore medio è nullo, pertanto se si vuole un valore che ne esprima la loro entità complessiva occorre introdurre il valore medio efficace delle variazioni di pressione la cui definizione matematica è:

$$p_{\text{eff}} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p^2(t) dt \right]^{1/2}$$

dove  $\Delta p(t)$  è la variazione istantanea di pressione al tempo  $t$  e  $T$  è il periodo; nel caso di un suono puro si ha :

$$p_{\text{eff}} = \Delta p_{\text{max}} / \sqrt{2}$$

Il valore efficace delle variazioni di pressione assume il nome di pressione sonora e viene indicato con  $p$  trascurando l'indice eff. [1]

#### ***1.1.4 Potenza sonora, intensità***

La trasmissione di pressione implica anche la trasmissione di una forza, e poiché il punto di applicazione di tale forza si sposta, si ha una trasmissione di lavoro e quindi di energia; pertanto una sorgente sonora irradierà una certa potenza  $W$  che si propaga nel mezzo con l'avanzare delle onde sonore.

Se  $W$  è la potenza trasportata da un'onda, la quantità di energia che nell'unità di tempo attraversa l'unità di superficie disposta normalmente alla direzione di propagazione si definisce intensità  $I$  ed è data da:

$$I = W / S$$

Per un'onda piana o per un'onda sferica che, però, ad una certa distanza dalla sorgente può essere considerata piana, si dimostra che l'intensità è proporzionale al quadrato della pressione sonora. [1]

#### ***1.1.5 Livelli in decibel***

La gamma delle grandezze sonore, quali potenza, pressione sonora, intensità, è così ampia che risulta più conveniente riportare le medesime a certi valori assunti come livelli zero, o di riferimento, ed esprimere tale rapporto in scala logaritmica poiché una scala logaritmica consente di comprimere i valori numerici che rappresentano tali grandezze.

Quindi il livello espresso in decibel è definito come dieci volte il logaritmo decimale del rapporto tra una data quantità e una quantità di riferimento della stessa specie.

La potenza sonora  $W$ , espressa in watt, è conveniente pertanto esprimerla in scala logaritmica ricorrendo al *livello di potenza sonora*  $L_w$ :

$$L_w = 10 \log_{10}(W/W_0) \text{ dB}$$

dove  $W$  è la potenza sonora in esame e  $W_0$  è la potenza sonora di riferimento assunta pari a  $10^{-12}$  watt.

Poiché la potenza è proporzionale al quadrato della pressione sonora, si può definire il *livello di pressione sonora*  $L_p$ , come:

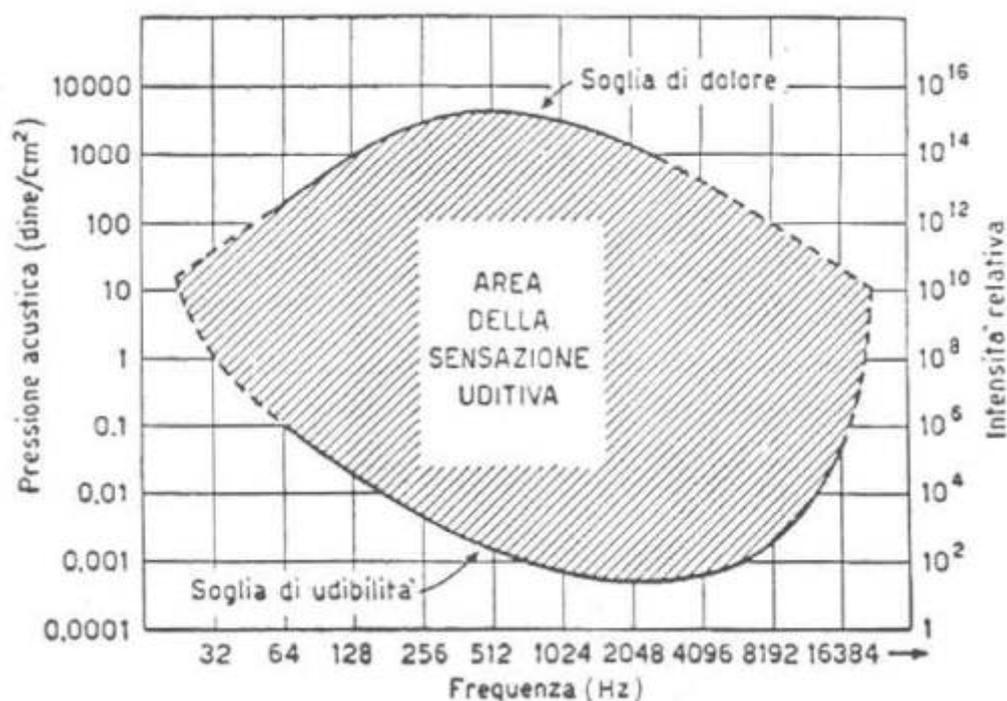
$$L_p = 10 \log_{10}(p/p_0)^2 = 20 \log_{10}(p/p_0) \text{ dB}$$

dove  $p$  è la pressione sonora in esame e  $p_0$  è la pressione di riferimento pari a  $20 \mu\text{Pa}$  ( $2 \cdot 10^{-5}$  Pa), valore che si avvicina alla pressione sonora minima percepibile dall'orecchio umano nella gamma di frequenze in cui l'orecchio è più sensibile. [1]

## 1.2 Udito e sensazioni di fastidio connesse al rumore

La gamma delle pressioni e delle frequenze entro le quali l'orecchio riceve utili informazioni è molto ampia.

Il seguente grafico mette in relazione queste due grandezze e delimita l'area della sensazione uditiva che racchiude tutti i suoni percepibili dall'orecchio umano: essa è limitata inferiormente da una curva chiamata soglia inferiore di audibilità, mentre con l'aumentare della pressione si ha la soglia superiore, detta anche soglia del dolore poiché per pressioni superiori si avverte una vera e propria sensazione di dolore.

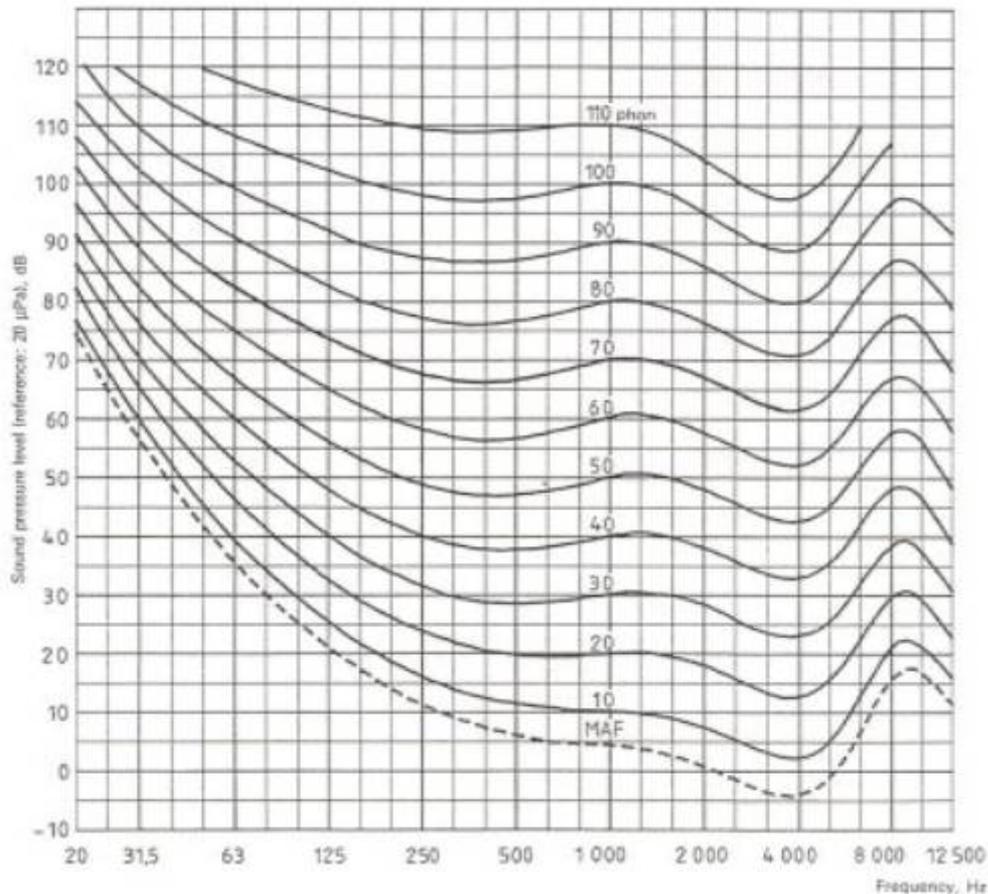


**Fig.1.2.1 Area di udibilità normale**

A 1000 Hz il più debole suono percepibile dall'orecchio umano è  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa, mentre la pressione per la quale si raggiunge la soglia del dolore è 20 Pa. Dal grafico si rileva inoltre che il campo di frequenze per le quali l'orecchio è sensibile varia tra i 20 e i 20000 Hz.

Le grandezze fisiche fino ad ora illustrate descrivono compiutamente i vari fenomeni fisici, ma nulla ci dicono circa l'intensità soggettiva o sonia, attributo per il quale chi ascolta è in grado di ordinare i suoni in una scala che va dal debole al forte.

L'intensità soggettiva è stata studiata sperimentalmente solo per il più semplice tipo di suoni, i suoni puri; il risultato di tale studio è il seguente diagramma detto "audiogramma normale medio per toni puri" secondo Fletcher e Munson:



**Fig. 1.2.2 Audiogramma normale medio**

Su tale diagramma sono riportate delle curve, dette isofoniche, luogo dei punti che rappresentano suoni puri i quali, pur differendo fra loro per la frequenza, danno origine alla medesima sensazione di intensità soggettiva.

Tali valutazioni soggettive si sono ottenute facendo ascoltare a un gran numero di individui, aventi udito normale e privo di difetti, dei suoni puri con frequenza diversa da 1000 Hz e confrontandoli con un suono di 1000 Hz del quale viene fatto variare il livello di pressione fino a che non è giudicato uguale al suono in esame. [1]

Quindi suoni di frequenza diversa, i cui corrispondenti livelli di pressione sonora si trovano sulla stessa isofonica, producono la stessa sensazione sonora.

Su ogni curva è indicato il numero di phon che le compete, essendo il phon l'unità di misura della sensazione sonora, definito come il livello di pressione sonora del suono puro a 1 kHz che produce nel soggetto la stessa sensazione del suono in esame .

La curva tratteggiata rappresenta il livello minimo di pressione per cui un suono è udibile, in particolare si nota che intorno a 2000 Hz il valore del livello di pressione sonora è zero, a cui corrisponde la pressione sonora di  $2 \cdot 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup>.

Dall'andamento delle isofoniche si può notare che a bassi livelli la sensazione sonora è strettamente legata alla frequenza, infatti se consideriamo un suono ad una frequenza di 30 Hz, esso dovrebbe subire un incremento di circa 50 dB del livello di pressione sonora per produrre la stessa sensazione sonora di un suono a 1000 Hz. Se, invece, il livello di pressione sonora a 1000 Hz supera gli 80 dB, per produrre la stessa sensazione sonora a 30 Hz il livello dovrà subire un incremento di soli 15 dB. Si può concludere perciò che non c'è linearità tra il giudizio soggettivo e l'ampiezza di un suono, ossia al raddoppio dell'intensità di un suono, che corrisponde ad un aumento di 3 dB nel livello di pressione sonora, non corrisponde il raddoppio della sensazione. Attraverso prove soggettive sull'andamento della variazione della sensazione sonora è stato trovato che è necessario avere un aumento di circa 10 dB della pressione sonora di un suono per avere il raddoppio della sensazione corrispondente.

Possiamo quindi affermare che manca una relazione diretta tra valori numerici e caratteristiche soggettive della sensazione uditiva, infatti rapporti o differenze tra suoni di diversa intensità misurati in phon non hanno una diretta corrispondenza con analoghe variazioni della sensazione uditiva. Per stabilire una scala numerica che leghi suoni di diversa intensità oggettiva alle relative intensità soggettive sono state condotte diverse ricerche che hanno portato all'individuazione di una scala la cui unità di misura è il son .

Tra la scala in sone e quella in phon esiste la seguente relazione:

$$S(\text{in sone}) = 2^{[0,1 S(\text{in phon}) - 4]} \quad (1.2.1)$$

dove S è la sensazione sonora.

Definiamo quindi il son come la sensazione prodotta da un suono puro di frequenza 1 kHz e livello di pressione sonora 40 dB. [3]

L'audiogramma normale medio, e quindi le isofoniche, servono a valutare le misure che vengono effettuate con sistemi che hanno una risposta uguale a tutte le frequenze.

### ***1.2.1 Livello sonoro in dB(A)***

L'orecchio umano non è sensibile in ugual misura a tutte le frequenze, poiché, come abbiamo visto, il livello di pressione sonora di due diversi rumori può essere lo stesso, ma uno può essere giudicato più alto dell'altro se la potenza sonora del primo è concentrata in una zona di frequenze in cui l'orecchio è più sensibile; quindi per raggiungere una buona approssimazione della risposta umana occorre compensare strumentalmente questo fatto.

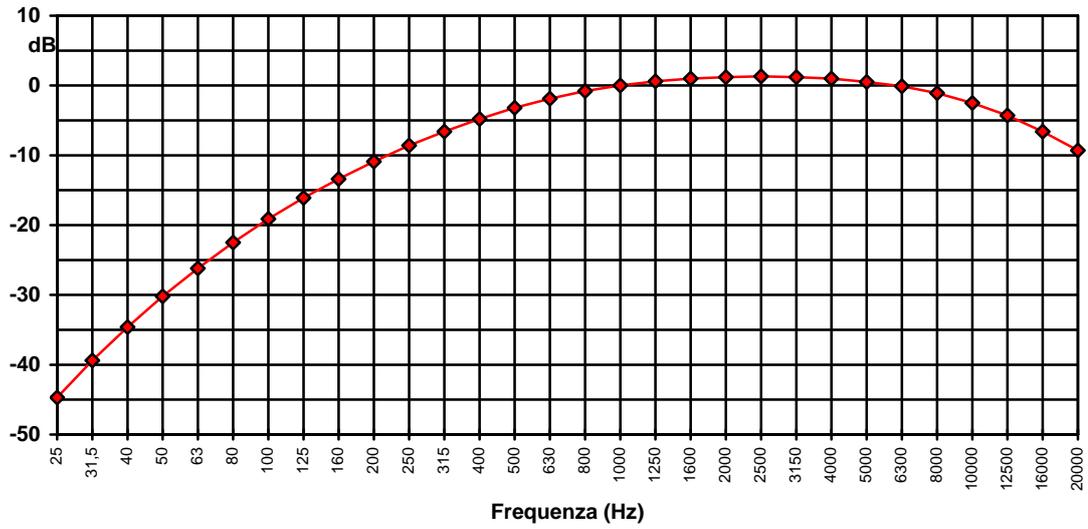
Questa operazione, detta di ponderazione, è eseguita tramite il diagramma di Fletcher e Munson, andando cioè a vedere a quale curva isofonica appartiene una determinata coppia frequenza-livello. Per facilitare l'operazione è sufficiente avere a disposizione un grafico di Fletcher e Munson ribaltato che ci permette di stabilire quale valore dobbiamo sommare ai livelli sonori ottenuti alle varie frequenze per ottenere l'effettiva sensazione umana.

Attraverso tale procedimento, per ottenere delle risposte che interpretino meglio l'intensità soggettiva degli individui al rumore, nei misuratori di livello sono incorporate le "curve di peso in frequenza", le quali alterano la sensibilità dello strumento rendendolo meno sensibile a frequenze per le quali l'orecchio è meno sensibile.

Le curve isofoniche sono simili fra loro, ma come abbiamo visto variano all'aumentare del livello, per cui avremmo bisogno di più curve da utilizzare nei vari casi. A tale scopo esistono la curva A, per livelli sotto i 60 dB, la curva B, tra 60 e 80 dB, la curva C oltre 80 e la curva D per rumori molto forti, come quelli degli aerei, e i rispettivi livelli sonori vengono detti livelli ponderati A, ponderati B, ponderati C.

Ciò nonostante per i nostri scopi è utile avere a disposizione la sola curva di ponderazione A, di cui sono riportati di seguito i valori tabellati, infatti la curva B e la curva D non sono prese in considerazione dalla legge, mentre la C riguarda solo i valori molto forti. [1]

### Curva di ponderazione A



**Tabella 1.2.1: Ponderazione A**

Frequenza	Correzione
25	-44,7
31,5	-39,4
40	-34,6
50	-30,2
63	-26,2
80	-22,5
100	-19,1
125	-16,1
200	-10,9
250	-8,6
315	-6,6
400	-4,8
500	-3,2
630	-1,9
800	-0,8
1000	0
1250	0,6
1600	1
2000	1,2
2500	1,3
3150	1,2
4000	1
5000	0,5
6300	-0,1
8000	-1,1
10000	-2,5
12500	-4,3
16000	-6,6
20000	-9,3

Notare che per definizione il fattore di correzione a 1000 Hz è 0.

### ***1.2.2 Il livello equivalente continuo***

Il rumore ambientale, espresso attraverso il livello sonoro in dB(A), è una grandezza fluttuante nel tempo, dando spesso valori anche molto diversi fra loro. Nasce perciò la necessità di condensare tale grandezza in un unico indice numerico, rappresentativo della qualità e della quantità dello stesso, il quale tenga conto del modo di variare nel tempo del livello sonoro in dB(A), ma nello stesso tempo consenta di classificarlo in modo significativo ai fini della valutazione dei suoi effetti indesiderati.

Per soddisfare i requisiti richiesti è stato introdotto il “Livello Sonoro Equivalente Continuo”, definito come *il livello sonoro di un ipotetico rumore costante che, se sostituito al rumore reale, variabile nel tempo, comporta la stessa quantità di energia sonora.*

La sua espressione, adottando la ponderazione A, è:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2}{p_0^2} dt \right] \text{ dB(A)}$$

dove  $p_A$  è la pressione acustica del rumore fluttuante all'istante  $t$  in curva di ponderazione A,  $p_0$  è la pressione sonora di riferimento pari a 20  $\mu\text{Pa}$  e  $T$  è il tempo totale di osservazione.

Dalla necessità di analizzare più aspetti del rumore discendono ulteriori indici descrittivi. Il più noto è il Sound Exposure Level (Livello di esposizione sonora), SEL che rappresenta il livello che assumerebbe il fenomeno, di durata  $T_e$ , qualora tutta la sua energia fosse concentrata in un secondo ( $t_0$ ). [1]

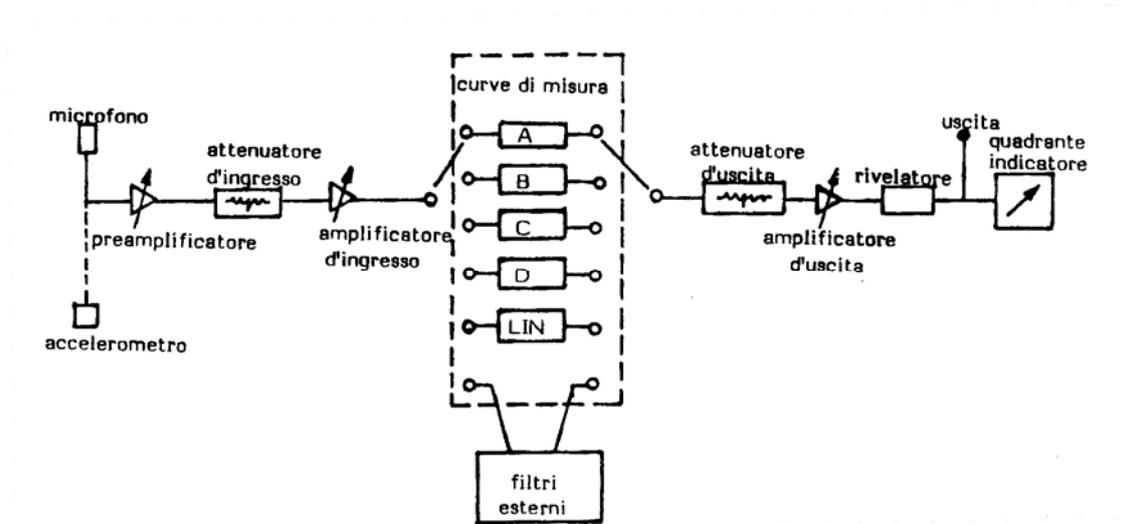
La relazione tra  $L_{Aeq}$  e SEL è:

$$\text{SEL} = L_{Aeq} + 10 \log \left( \frac{T_e}{t_0} \right)$$

L'indice SEL trova applicazione quando si vogliono confrontare fenomeni diversi, per intensità e durata, in quanto attraverso tale indice vengono ricondotti tutti alla durata di un secondo.

### 1.2.3 Il fonometro

Il fonometro è uno strumento che serve per misurare il livello di pressione sonora in dB; in esso il segnale sonoro viene convertito in un segnale elettrico equivalente mediante un microfono.



**Fig.1.2.3 Schema fonometro**

Il segnale che esce dal microfono è dotato di una ampiezza ridotta e quindi deve essere amplificato mediante un preamplificatore sistemato subito dopo il microfono stesso .

A questo punto il segnale può passare attraverso il circuito di ponderazione, il quale è costituito da quattro curve caratteristiche A,B,C,D, le quali hanno il compito di conferire all'apparecchio una curva di risposta che riproduca il corrispondente comportamento dell'udito. [6]

La curva di ponderazione A è quella che meglio approssima la sensazione sonora percepita dal nostro orecchio e corrisponde alla isofonica di 40 phon dell'audiogramma normale di Fletcher e Munson .Le curve B e C, che corrispondono rispettivamente alla isofonica di 70 phon e alla isofonica di 100 phon , vengono usate molto raramente, in quanto non rispecchiano quasi per nulla quello che il nostro orecchio percepisce. La curva di ponderazione D viene invece utilizzata per le misurazioni acustiche negli aeroporti. [2]

Esiste in realtà ancora una curva di ponderazione che è la curva lineare (lin), la quale però non effettua alcuna ponderazione sul segnale e quindi lo lascia passare indenne senza alcuna modificazione.

Il segnale può anche essere fatto passare attraverso un banco di filtri a bande di ottava o a bande di un terzo di ottava. Tali filtri ci permettono di dividere la banda di frequenze che va da 20 Hz a 20 kHz in ottave o in terzi di ottave; quindi la loro funzione è quella di divisione del segnale, ossia di lasciar passare solamente i suoni con una determinata gamma di frequenze; in questo modo è possibile eseguire la scomposizione del suono nelle sue componenti in frequenza. [6]

Una banda di frequenza di un'ottava è compresa tra due frequenze delle quali la frequenza più alta è il doppio della frequenza più bassa e cioè un filtro di ottava con una frequenza centrale di 1 KHz lascia passare una gamma di frequenze comprese tra 707 Hz e 1414 Hz; mentre un banda di frequenza di un terzo di ottava è compresa tra due frequenze delle quali la più alta è 1,26 volte maggiore di quella più bassa.

Questo processo viene definito analisi in frequenza ed il grafico su cui vengono posti i valori risultanti viene chiamato spettrogramma.

A questo punto il segnale viene di nuovo amplificato per poi passare in un rettificatore RMS che da il suo valore RMS (valore efficace).

Infine il segnale viene visualizzato sul display del misuratore, nel quale si potrà leggere il valore globale del livello di pressione sonora in dB o il valore del livello sonoro in dB(A) se è inserito il circuito di pesatura A.

I misuratori di livello sono, inoltre, dotati di tre diverse costanti di tempo:

Lenta (“slow”) = 1050 ms

Veloce (“fast”) = 125 ms

Impulso (“impulse”) = 35 ms

Usando la costante fast la risposta dello strumento è molto veloce e consente di misurare livelli del suono che non oscillano troppo velocemente, mentre la risposta slow, avendo la costante di tempo di un secondo, dà una risposta più lenta permettendo così di misurare segnali anche abbastanza rapidi nelle loro variazioni, ossia è la costante di tempo che meglio si presta a seguire l'andamento del livello sonoro nel corso del tempo e a rilevarne il valore medio.

Nel caso di segnali sonori composti da impulsi isolati le costanti fast e slow non sono sufficientemente brevi da consentire una variazione significativa della lancetta, in tal caso conviene usare la costante impulse. [1]

I dati misurati vengono memorizzati in una memoria contenuta nel fonometro e possono essere scaricati, attraverso un cavo, in un computer sul quale poi si potranno elaborare i dati. [6]

### ***1.2.4 Effetti del rumore***

Le conseguenze dell'esposizione al rumore sono difficili da quantificare in quanto variano notevolmente da un individuo all'altro, tuttavia vari studi dell'OMS (World Health Organization) sul rumore indicano quali effetti più comuni i disturbi del sonno, danni fisiologici uditivi e extra-uditivi (prevalentemente di tipo cardiovascolare), difficoltà di comunicazione e malessere diffuso. [5]

L'esposizione al rumore non causa di norma danni uditivi, essi sono determinati infatti dall'esposizione ad elevati livelli di rumore ( maggiori di 80 dBA) per parecchie ore al giorno per un periodo di esposizione lungo (almeno 10 anni). [7]

Per quanto riguarda i disturbi del sonno essi cominciano con livelli di rumore stazionario continuo pari a 30 dBA. Da vari studi sull'argomento si può asserire che per garantire un giusto riposo il livello massimo di pressione sonora non deve superare i 45 dBA, limite oltre il quale si possono manifestare sintomi quali malumore, stanchezza, mal di testa e ansia. Tra i 45 e i 50 dB si hanno piccoli disturbi dell'architettura del sonno, mentre tra i 50 e i 60 dB il tempo di addormentamento si prolunga di 30 minuti o più; tra i 60 e i 70 dB si arriva ad alterazioni profonde della qualità e della durata del sonno con possibili e frequenti risvegli e, infine, oltre i 70 dB si ha la riduzione o scomparsa delle fasi IV (sonno profondo) e Rem (sogno) del sonno. Ovviamente il grado di alterazione del sonno è influenzato non solo dall'intensità del suono ma anche da altri fattori quali l'età dell'individuo (gli anziani sono più sensibili dei giovani) e la sua situazione psicofisica, quindi la sua emotività, ansietà ecc.

Una diretta conferma del disturbo causato dal rumore nelle ore notturne deriva da una ricerca merceologica condotta dall'Istituto di Medicina del Lavoro della USL 1 di Trieste, la quale ha scoperto che le farmacie che operano in quartieri dove il livello sonoro notturno è compreso tra i 55 e i 75dB vendono una quantità di sonniferi e tranquillanti doppia o addirittura tripla rispetto alle altre zone. [5]

I danni extra-uditivi sono per lo più di tipo psicofisiologico e si manifestano sotto forma di stress fisiologico e reazioni cardiovascolari come variazione della pressione sanguigna, del ritmo cardiaco, della vaso costrizione, del ritmo e dell'ampiezza della respirazione, dei movimenti e delle secrezioni gastriche.

La difficoltà di comunicazione è una delle conseguenze più immediate indotte dal rumore e si verifica sia nella conversazione diretta tra due persone, sia in quella telefonica e sia nell'ascolto della radio o della televisione. Quando l'ascolto di un suono utile risulta disturbato, o addirittura impedito, dalla contemporanea presenza di un altro suono che con esso interferisce si ha il fenomeno del mascheramento uditivo. Tale fenomeno si riscontra all'interno degli edifici ove il livello continuo di rumorosità esterna raggiunge i 65- 70 dBA.

In linea di principio negli ambienti abitativi il rumore non dovrebbe eccedere sopra i 40-45 dBA , valore spesso superato anche a finestre chiuse.

Il malessere diffuso è un disturbo di carattere generale meno specifico ma pur sempre grave dell'inquinamento acustico. Esso non è solo conseguenza di un sonno disturbato o dell'impossibilità di comunicare normalmente, ma dipende da sensazioni meno definite quali il sentirsi disturbato e impedito nello svolgimento delle proprie attività. Trattandosi di sensazioni ed essendo queste estremamente soggettive il rilevamento di tale effetto è ottenibile utilizzando tecniche come i questionari. [7]

## **2 IL RUMORE DA TRAFFICO AUTOVEICOLARE URBANO (TAU)**

### **2.1 Il rumore dei veicoli a motore**

Il rumore in ambito urbano è un rumore a componenti multiple, dovuto alla presenza di numerose sorgenti ambientali quali:

- traffico veicolare;
- traffico ferroviario;
- traffico aereo;
- attività industriali e artigianali;
- discoteche e locali musicali;
- altro (esercizi commerciali, impianti di condizionamento ecc.)

Il traffico veicolare è la principale forma di disagio per il cittadino, in quanto coinvolge maggiormente la popolazione.

La rumorosità prodotta dai veicoli è originata da diverse componenti:

- motore e sistema di scappamento (rumore meccanico);
- interazione pneumatico e fondo stradale (rumore di rotolamento);
- intersezione con l'aria (rumore aerodinamico).

La quota dovuta al sistema di propulsione (motore, scappamento, aspirazione, ventola e organi ausiliari allocati nel vano motore) dipende dalla velocità del moto in ogni singola marcia.

Il rumore di rotolamento, prodotto dal contatto pneumatico-fondo stradale, si sviluppa per vibrazione e per risonanza dell'aria. Le vibrazioni sono dovute agli urti del pneumatico contro le asperità del piano stradale: un pneumatico scolpito e una superficie stradale rugosa, incrementano il rumore generato. Il rumore per risonanza dell'aria è dovuto alla compressione del cuscino d'aria sotto la ruota ed alla sua espansione dopo il passaggio; una strada liscia e un pneumatico liscio esaltano questo tipo di rumore. [7]

Tale rumore cresce rapidamente con l'aumento della velocità e nei veicoli leggeri il rumore di rotolamento diventa la principale sorgente di inquinamento acustico per velocità superiori a 60 Km/h.

Diversamente per quanto riguarda i mezzi pesanti, la componente motore predomina sempre, a qualunque velocità, sulla componente pneumatici.

## **2.2 Tecnica di rilevamento del rumore negli ambienti urbani**

Le finalità della nostra indagine sul rumore in area urbana sono:

- confrontare i livelli sonori con i livelli previsti in regolamenti o disposizioni sul rumore;
- stimare l'esposizione delle persone al rumore;
- identificare le sorgenti esterne di rumore e determinare l'estensione della loro influenza.

Per avere una completa ed accurata rappresentazione della rumorosità esistente si dovrebbe compiere un rilievo dei parametri acustici scelti per caratterizzare la rumorosità ambientale per un ampio periodo di tempo e per un numero consistente di postazioni.

Ne deriva che, se da un lato è richiesto di eseguire una caratterizzazione acustica accurata e completa, dall'altro è necessario contenere le risorse di apparecchiature, personale e tempo da destinare a tale rilevamento.

A tale scopo sono state sviluppate due principali tecniche di rilievo: il campionamento spaziale e il campionamento temporale.

### ***2.2.1 Campionamento spaziale***

La tecnica del campionamento spaziale si divide a sua volta in quattro categorie diverse:

- campionamento casuale, caratterizzato da una scelta casuale dei siti per il rilievo; in realtà, per stabilire le postazioni di rilievo si procede sovrapponendo alla mappa dell'area da monitorare una griglia e conseguentemente si

individuano tali postazioni in corrispondenza dei nodi o al centro delle maglie della griglia stessa. La dimensione delle maglie può variare, in genere si dovrebbe avere una maglia più stretta in corrispondenza della sorgente per evitare che due punti adiacenti abbiano livelli sonori che si differenzino per più di 5 dB.

Dai dati così ottenuti si riesce ad individuare la percentuale di territorio in cui il livello sonoro limite viene superato, tuttavia questo tipo di campionamento restituisce una mappatura acustica poco dettagliata soprattutto a causa delle dimensioni troppo estese delle maglie, scelte in base a ragioni economiche e di tempo; inoltre tale campionamento non è efficiente quando la distribuzione dei livelli sonori è troppo sbilanciata, fatto riscontrabile di frequente nelle grandi città dove, nelle aree più rumorose, è opportuno un numero di rilevamenti maggiore;

- campionamento stratificato, consiste nel classificare, prima di procedere ai rilievi, l'area in esame secondo categorie predefinite in base al livello di rumore che si prevede risulterà dai rilievi. Per operare tale stratificazione si procede in base alla destinazione d'uso del territorio, alle zone urbanistiche (centro, periferia, ecc.) e alla tipologia della strada. In seguito alla classificazione si sceglieranno i siti di rilievo in base al livello di inquinamento acustico previsto, aumentandone il numero nelle zone più a rischio;
- campionamento orientato al ricettore, ha lo scopo di monitorare l'esposizione sonora di specifiche categorie di ricettori;
- campionamento orientato verso la sorgente, ha lo scopo di determinare la distribuzione spaziale di quest'ultima, di conseguenza gli strumenti saranno posizionati nei pressi della sorgente stessa. [4]

### ***2.2.2 Campionamento temporale***

Il campionamento temporale è una tecnica di monitoraggio basata sulla stima del livello continuo equivalente, riferito a periodi medio-lunghi, attraverso dati raccolti in periodi di tempo molto più brevi. La scelta degli intervalli di misurazione deve essere significativa della situazione media del periodo cui il  $L_{Aeq}$  è riferito.

Questa modalità di campionamento ha il vantaggio di ridurre notevolmente le risorse e il tempo impiegati per i rilievi e, di conseguenza, comporta la possibilità di aumentare i siti di rilievo ottenendo così un'indagine spaziale molto più dettagliata.

Per contro è possibile che, a causa della estrema variabilità del rumore nel tempo, i dati rilevati differiscano sensibilmente da quelli ottenuti con il campionamento continuo su lungo periodo; è necessario, pertanto, una attenta scelta dei tempi di osservazione e di misurazione.

Le incertezze sulla validità del risultato ottenuto diminuiscono aumentando il numero di campioni rilevati e soprattutto proiettando tali misurazioni nel tempo, ossia ripetendole in tempi diversi a condizioni generali invariate. Quest'ultimo tipo di misurazioni, dette statisticamente indipendenti, è reso necessario dalla estrema variabilità degli eventi sonori come, ad esempio, il transito occasionale di moto di grossa cilindrata, sirene di ambulanze, ecc.. In questi casi, per migliorare l'indipendenza statistica è necessario riconoscere tali eventi ed eliminarli in fase di post-elaborazione dei dati. [4]

### ***2.2.3 Metodologia di rilevamento del rumore stradale***

Il riferimento nazionale per questo tipo di campionamento è il decreto ministeriale Ambiente del 16/03/1998, tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico; in esso si distinguono i seguenti periodi di tempo:

- *tempo a lungo termine*  $T_L$ , è il periodo all'interno del quale si vogliono valutare i valori di attenzione, la sua durata dipende dagli obiettivi dell'indagine, può essere un anno, alcuni mesi o riguardare specifici periodi come l'estate o l'inverno;
- *tempo di riferimento*  $T_R$ , individuato all'interno di  $T_L$ , rappresenta il periodo all'interno di una stessa giornata nel quale vengono fatti i rilevamenti. Secondo la legislazione italiana la giornata viene divisa in due  $T_R$ : quello diurno dalle 6 alle 22, e quello notturno dalle 22 alle 6;

Indicato con  $r$  il numero dei tempi  $T_{R_i}$  diurni e notturni individuati all'interno di

$T_L$  si ha:

$$T_L = \sum TR_i$$

- *tempo di osservazione*  $T_O$ , è il periodo all'interno di un  $TR$ , che può avere una durata diversa, nel quale si verificano le condizioni di rumorosità che vogliamo andare a valutare; Tempi di osservazione e di riferimento sono legati dalla :

$$TR = \sum T_{O_j}$$

- *tempo di misurazione*  $T_M$ , individuato all'interno di ciascun tempo di misurazione  $T_{O_j}$ , ha durata pari o inferiore del tempo di osservazione ed è scelto in modo tale che la misurazione sia rappresentativa del fenomeno.

Per l'insieme dei tempi di misurazione vale la relazione :

$$T_{O_j} \geq \sum T_{M_k}$$

Ad ogni  $K$ -esimo tempo di misurazione  $T_{M_k}$  di durata  $t_k$  è associato il corrispondente livello equivalente.

Ai fini della verifica della conformità ai valori limite assoluti di immissione nella fascia di pertinenza dell'infrastruttura stradale il suddetto decreto prevede che il monitoraggio in continuo del rumore da traffico stradale sia effettuato per un periodo di almeno una settimana; in tale periodo deve essere rilevato il livello sonoro equivalente per ciascuna ora nell'arco delle 24 ore e i valori dei livelli giornalieri, diurni e notturni per ogni giorno monitorato.

Da dati così ottenuti si determineranno i valori medi settimanali dei livelli equivalenti diurni e notturni i quali possono essere, infine, confrontati con i limiti assoluti di immissione previsti dalla normativa nella fascia di pertinenza dell'infrastruttura stradale monitorata.

Il decreto prescrive, inoltre, che il microfono, dotato di cuffia antivento, sia posizionato alla distanza di un metro dalla facciata più esposta dell'edificio scelto come sito del rilievo e ad una quota da terra di circa 4 metri.

I monitoraggi devono essere eseguiti in assenza di precipitazioni atmosferiche e la velocità del vento non deve superare i 5 m/s, inoltre, la superficie stradale deve essere asciutta e priva di irregolarità accidentali. E' prescritto, inoltre, che eventi sonori atipici, occasionali e non attribuibili al traffico veicolare siano evidenziati ed esclusi dalla misurazione. [8]

## 2.3 Normativa vigente

Il passo successivo all'adeguata misurazione del rumore ambientale è la verifica che i valori ottenuti non superino i valori limite prescritti dalla normativa in modo tale da garantire che non si verifichino effetti dannosi per la salute dei cittadini e per assicurarne il benessere inteso come completo soddisfacimento dell'uomo nei confronti dell'ambiente che lo circonda.

A tale scopo esistono due criteri di valutazione del rumore ambientale:

- criterio assoluto;
- criterio differenziale.

Il criterio assoluto consiste nel confrontare i livelli di rumorosità ambientale rilevati con i livelli limite fissati dalla normativa per le zone monitorate.

Quindi questo criterio prevede che sia effettuata, in via preliminare, una classificazione del territorio in zone omogenee, in base alla destinazione d'uso, e che ad ogni zona siano assegnati i valori limite del livello sonoro equivalente diurno e notturno, in scala ponderata A, che non devono essere superati.

A questo punto, confrontati tali valori con i dati rilevati sul territorio, si può vedere quali sono le zone acusticamente inquinate e procedere quindi alla stesura di piani di risanamento acustico.

Il criterio differenziale viene applicato quando i limiti massimi di rumorosità non vengono superati e consiste nel verificare che la differenza tra il livello equivalente del rumore ambientale e il livello equivalente del rumore di fondo residuo sia compresa tra 3 e 5 dB(A), a seconda del periodo della giornata.

Tale criterio trova applicazione nell'ambito degli spazi abitativi, all'interno o all'esterno di edifici destinati alla permanenza di persone e comunità. [8]

### **2.3.1 D.P.C.M.1/3/1991. Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno.**

Il presente decreto stabilisce, per la prima volta a livello nazionale, dei valori limite relativi all'inquinamento acustico ambientale e inoltre introduce l'obbligo da parte dei comuni di attuare la classificazione acustica del territorio nonché, dove necessario, il piano di risanamento acustico.

In particolare opera una suddivisione del territorio in sei zone, tenendo conto della destinazione urbanistica e della rumorosità intrinseca e stabilisce i limiti tollerabili diurni e notturni per ognuna di esse; inoltre introduce dei limiti, validi su tutto il territorio nazionale, per le zone non classificate pari a 70 dB(A) di giorno e 60 dB(A) di notte per il criterio assoluto, e stabilisce anche le seguenti differenze da non superare tra il livello equivalente del rumore ambientale e quello del rumore residuo (criterio differenziale): 5 dB(A) durante il periodo diurno e 3 dB(A) durante il periodo notturno.

L'indice descrittore è il livello continuo equivalente ponderato A da acquisirsi con il microfono del fonometro, munito di protezione antivento, a 1,5 m di altezza, orientato verso la sorgente specifica e posizionato lontano da qualsiasi sorgente riflettente.

La tabella 1 di seguito riportata descrive le sei zone mentre la 2 riporta i valori limite di  $L_{Aeq}$  relativi alle varie classi. [8]

<b>TAB. 1 Classi di destinazione d'uso del territorio</b>
I aree particolarmente protette
II aree prevalentemente residenziali
III aree di tipo misto
IV aree di intensa attività umana
V aree prevalentemente industriali
VI aree esclusivamente industriali

**TAB. 2 Valori dei limiti massimi del  $L_{Aeq}$  relativi alle varie classi**

<b>Classi di destinazione d'uso</b>	<b>Tempo di riferimento: diurno</b>	<b>Tempo di riferimento: notturno</b>
<b>I – Aree particolarmente protette</b>	50	40
<b>II – Aree prevalentemente residenziali</b>	55	45
<b>III – Aree di tipo misto</b>	60	50
<b>IV – Aree di intensa attività umana</b>	65	55
<b>V – Aree prevalentemente industriali</b>	70	60
<b>I – Aree esclusivamente industriali</b>	70	70

### ***2.3.2 Legge quadro sull'inquinamento acustico n°447/1995.***

Tale legge stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo dal rumore.

Inoltre essa ha costituito il fondamento giuridico all'emanazione dei successivi regolamenti governativi e decreti ministeriali, definendo tutta la materia dell'inquinamento acustico.

In materia di rumore nell'ambiente esterno riporta innanzitutto le seguenti definizioni:

- inquinamento acustico: l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo e alle attività umane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi;
- ambiente abitativo: ogni ambiente interno a un edificio destinato alla permanenza di persone o di comunità ed utilizzato per le diverse attività umane;

- sorgenti sonore fisse: gli impianti tecnici degli edifici e le altre installazioni unite agli immobili anche in via transitoria il cui uso produca emissioni sonore, le infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali, marittime, industriali, artigianali, commerciali e agricole, i parcheggi, le aree adibite a stabilimenti di movimentazione merci, i depositi dei mezzi di trasporto di persone e merci, le aree adibite ad attività sportive e ricreative;
- sorgenti sonore mobili: tutte le sorgenti sonore non comprese nelle precedenti;
- valori limite di emissione: il valore massimo di rumore che può essere emesso da una sorgente sonora, misurato in prossimità della sorgente stessa;
- valore limite di immissione: il valore massimo di rumore che può essere immesso da una o più sorgenti sonore nell'ambiente abitativo misurato in prossimità dei ricettori;
- valori di attenzione: il valore di immissione che segnala la presenza di un potenziale rischio per la salute umana o per l'ambiente;
- valori di qualità: i valori di rumore da conseguire nel breve, nel medio e nel lungo periodo con le tecnologie e le metodiche di risanamento disponibili, per realizzare gli obiettivi di tutela previsti dalla presente legge;

I valori limite di immissione sono distinti in:

1. valori limite assoluti, determinati con riferimento al livello equivalente di rumore ambientale;
2. valori limite differenziali, determinati con riferimento alla differenza tra il livello equivalente di rumore ambientale e il rumore residuo.

La legge quadro individua, inoltre, le competenze dello Stato, delle regioni, delle province e le funzioni e i compiti dei comuni.

Allo Stato competono principalmente le funzioni di coordinamento dell'attività e definizione della normativa tecnica generale per il collaudo, l'omologazione, la certificazione e la verifica periodica dei prodotti ai fini del contenimento e abbattimento del rumore, il coordinamento dell'attività di ricerca e di sperimentazione tecnico scientifica e l'adozione di piani pluriennali per il contenimento delle emissioni sonore prodotte per lo svolgimento di servizi pubblici essenziali quali linee ferroviarie,

metropolitane, autostrade e strade statali, entro i limiti stabiliti per ogni specifico sistema di trasporto, ferme restando le competenze di regioni, province e comuni.

Le Regioni promulgano apposite leggi che definiscono, tra le altre cose, i criteri per la suddivisione in zone del territorio comunale ( zonizzazione acustica). Alle regioni spetta inoltre la definizione di criteri da seguire per la redazione della documentazione di impatto acustico, delle modalità di controllo da parte dei comuni e l'organizzazione della rete di controlli.

La legge quadro riserva ai comuni un ruolo centrale con competenze di carattere programmatico e decisionale.

Oltre alla classificazione acustica del territorio, spettano ai comuni la verifica del rispetto della normativa per la tutela dall'inquinamento acustico all'atto del rilascio delle concessioni edilizie, l'adeguamento dei regolamenti locali con norme per il contenimento dell'inquinamento acustico e, soprattutto, l'adozione dei piani di risanamento acustico nei casi in cui le verifiche dei livelli di rumore effettivamente esistenti sul territorio comunale evidenzino il mancato rispetto dei limiti fissati.

Inoltre i comuni con popolazione superiore ai 50.000 abitanti sono tenuti a presentare una relazione biennale sullo stato acustico del comune. [8]

### ***2.3.3 Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 14.11.1997 Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore***

Tale Decreto è più articolato rispetto al vecchio DPCM 1.3.1991, infatti stabilisce, oltre ai limiti di zona (limiti di immissione), anche i limiti di emissione, di attenzione e di qualità, già precedentemente definiti. Definisce, inoltre, le classi di destinazione d'uso del territorio sulla base delle quali i comuni devono effettuare la classificazione. In particolare l'art. 2 sostiene che i valori limite di emissione sono riferiti sia alle sorgenti fisse che a quelle mobili e che i valori limite sono quelli indicati nella tabella B allegata al presente decreto e si applicano a tutte le aree del territorio ad esse circostanti, secondo la rispettiva classificazione in zone.

L'art. 3 individua come valori limiti assoluti di immissione quelli riferiti al rumore immesso nell'ambiente esterno dall'insieme di tutte le sorgenti e indicati nella tabella C . Al comma 2 si sottolinea che per le infrastrutture stradali, ferroviarie, marittime, aeroportuali i limiti di cui alla tabella C allegata al presente decreto non si applicano all'interno delle rispettive fasce di pertinenza, individuate dai relativi decreti attuativi . All'esterno di tali fasce, dette sorgenti concorrono al raggiungimento dei limiti assoluti di immissione.

All'interno delle fasce di pertinenza, le singole sorgenti sonore diverse da quelle appena indicate (infrastrutture) , devono rispettare i limiti di emissione di cui alla tabella B allegata e devono rispettare, nel loro insieme, i limiti indicati nella tabella C secondo la classificazione che a quella fascia viene assegnata .

L'art.4 stabilisce che i limiti differenziali di immissione restano, in analogia alle precedenti normative, 5 dB per il periodo diurno e 3 dB per il periodo notturno, all'interno degli ambienti abitativi, ma non si applicano nelle aree classificate nella classe VI della tabella A allegata al presente decreto.

Inoltre tali disposizioni non si applicano se il rumore misurato a finestre aperte sia inferiore a 50 dB(A) durante il periodo diurno e 40 dB(A) durante il periodo notturno o quando il livello del rumore ambientale misurato a finestre chiuse sia inferiore a 35 dB(A) durante il periodo diurno e 25 dB(A) durante il periodo notturno, in quanto in queste circostanze ogni effetto del rumore è da ritenersi trascurabile.

Infine, le disposizioni del presente articolo non si applicano alla rumorosità prodotta dalle infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali e marittime. A riguardo l'art.5 stabilisce che i valori limite assoluti di immissione e di emissione relativi alle singole infrastrutture dei trasporti, all'interno delle rispettive fasce di pertinenza, nonché la relativa estensione, vengano fissati con i rispettivi decreti attuativi, sentita la Conferenza permanente per i rapporti fra lo Stato, le Regioni e le province autonome.

All'art.6 vengono trattati i valori di attenzione, espressi come livelli continui equivalenti di pressione sonora ponderata A riferiti al tempo a lungo termine ( $T_L$ ), i quali se riferiti ad un'ora sono i valori della tabella C allegata aumentati di 10 dB per il periodo diurno e di 5 dB per il periodo notturno , se relativi ai tempi di riferimento, sono i valori individuati dalla tabella C.

Il tempo a lungo termine ( $T_L$ ) rappresenta il tempo all'interno del quale si vuole avere la caratterizzazione del territorio dal punto di vista della rumorosità ambientale. La lunghezza di questo intervallo di tempo è correlata alle variazioni dei fattori che influenzano tale rumorosità nel lungo termine. Il valore  $T_L$ , multiplo intero del periodo di riferimento, è un periodo di tempo prestabilito riguardante i periodi che consentono la valutazione di realtà specifiche locali.

Inoltre lo stesso articolo stabilisce che affinché sia necessario adottare un piano di risanamento è sufficiente che sia superato uno dei due valori, quello relativo ad un'ora o quello relativo ai tempi di riferimento. Tali valori di attenzione però non si applicano alle fasce territoriali di pertinenza delle infrastrutture stradali, ferroviarie, marittime ed aeroportuali.

Oltre ai limiti di cui si è parlato sino ad adesso vengono riportati anche i valori di qualità all'interno della tabella D allegata al presente decreto.

#### **Tabella A- Classificazione del territorio comunale (art. 1 )**

**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 ecc.

**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 ed 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 e 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 intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali e 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. [8]

**Tabella B – Valori limite di emissione -  $L_{Aeq}$  in dB(A) (art.2)**

<b>Classi di destinazione d'uso</b>	<b>Tempo di riferimento: diurno (6.00-22.00)</b>	<b>Tempo di riferimento: notturno (22.00-6.00)</b>
<b>I – Aree particolarmente protette</b>	45	35
<b>II – Aree prevalentemente residenziali</b>	50	40
<b>III – Aree di tipo misto</b>	55	45
<b>IV – Aree di intensa attività umana</b>	60	50
<b>V – Aree prevalentemente industriali</b>	65	55
<b>VI – Aree esclusivamente industriali</b>	65	65

**Tabella C – Valori limite assoluti di immissione -  $L_{Aeq}$  in dB(A) (art.3)**

<b>Classi di destinazione d'uso</b>	<b>Tempo di riferimento: diurno (6.00-22.00)</b>	<b>Tempo di riferimento: notturno (22.00-6.00)</b>
<b>I – Aree particolarmente protette</b>	50	40
<b>II – Aree prevalentemente residenziali</b>	55	45
<b>III – Aree di tipo misto</b>	60	50
<b>IV – Aree di intensa attività umana</b>	65	55
<b>V – Aree prevalentemente industriali</b>	70	60
<b>I – Aree esclusivamente industriali</b>	70	70

**Tabella D – Valori di qualità -  $L_{Aeq}$  in dB(A) (art.7)**

<b>Classi di destinazione d'uso</b>	<b>Tempo di riferimento: diurno (6.00-22.00)</b>	<b>Tempo di riferimento: notturno (22.00-6.00)</b>
<b>I – Aree particolarmente protette</b>	47	37
<b>II – Aree prevalentemente residenziali</b>	52	42
<b>III – Aree di tipo misto</b>	57	47
<b>IV – Aree di intensa attività umana</b>	62	52
<b>V – Aree prevalentemente industriali</b>	67	57
<b>I – Aree esclusivamente industriali</b>	70	70

### ***2.3.4 Decreto ministeriale del 16.3.1998 Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico.***

Il presente decreto stabilisce le tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento da rumore, in attuazione della legge Quadro.

Il sistema di misura deve essere scelto in modo da soddisfare le specifiche di cui alla classe 1 delle norme EN 60651/1994 e EN 60804/1994. Le misure di livello equivalente dovranno essere effettuate direttamente con un fonometro conforme alla classe 1 delle norme suddette. La catena di registrazione deve avere una risposta in frequenza conforme a quella richiesta per la classe 1 della EN 60651/1994 ed una dinamica adeguata al fenomeno in esame.

Filtri e microfoni utilizzati devono essere conformi rispettivamente alle norme EN 61260/1995 e EN 61094-1/1994, EN 61094-2/1994, EN 61094-3/1994, EN 61094-4/1994. I calibratori devono essere conformi alle norme CEI 29-4. Gli strumenti e i sistemi di misura devono essere provvisti di certificato di taratura e controllati almeno ogni due anni per la verifica della conformità alle specifiche tecniche.

#### ***Definizioni:***

*Sorgente specifica:* sorgente sonora selettivamente identificabile che costituisce la causa del potenziale inquinamento acustico;

*Tempo a lungo termine (TL):* rappresenta un insieme sufficientemente ampio di TR all'interno del quale si valutano i valori di attenzione, la sua durata può essere un anno, alcuni mesi o riguardare specifici periodi come l'estate e/o l'inverno;

*Tempo di riferimento (TR):* rappresenta il periodo della giornata all'interno del quale si eseguono le misure. La legislazione italiana distingue due tempi di riferimento: quello diurno compreso tra le h 6,00 e le h 22,00 e quello notturno compreso tra le h 22,00 e le h 6,00.

*Tempo di osservazione (To):* è un periodo di tempo compreso in TR nel quale si verificano le condizioni di rumorosità che si intendono valutare.

*Tempo di misura (TM):* all'interno di ciascun tempo di osservazione, si individuano uno o più tempi di misura di durata pari o minore del tempo di osservazione, in funzione delle caratteristiche di variabilità del rumore ed in modo tale che la misura sia rappresentativa del fenomeno.

*Livelli dei valori efficaci di pressione sonora ponderata “A”*:  $L_{AI}$ ,  $L_{AS}$ ,  $L_{AF}$ . Esprimono i valori efficaci in media logaritmica mobile della pressione sonora ponderata “A” secondo le costanti di tempo “slow”, “fast”, “impulse”.

*Livelli dei valori massimi di pressione sonora* :  $L_{ASmax}$   $L_{AFmax}$   $L_{AImax}$ . Esprimono i valori massimi della pressione sonora ponderata in curva “A” e le costanti di tempo “slow”, “fast”, “impulse”.

*Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata “A”*:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2}{p_0^2} dt \right] \text{ dB(A)}$$

dove  $p_A$  è la pressione acustica del rumore fluttuante all’istante  $t$  in curva di ponderazione A,  $p_0$  è la pressione sonora di riferimento pari a 20  $\mu\text{Pa}$  e  $T$  è il tempo totale di osservazione.

### ***Norme tecniche per l’esecuzione delle misure***

#### 1.Generalità:

Prima dell’inizio delle misure è indispensabile acquisire tutte quelle informazioni che possono condizionare la scelta del metodo, dei tempi e delle posizioni di misura.

I rilievi di rumorosità devono pertanto tenere conto delle variazioni sia dell’emissione sonora delle sorgenti che della loro propagazione. Devono essere rilevati tutti i dati che conducono ad una descrizione delle sorgenti che influiscono sul rumore ambientale nelle zone interessate dall’indagine. Se individuabili, occorre indicare le maggiori sorgenti, la variabilità della loro emissione sonora, la presenza di componenti tonali e/o impulsive e/o di bassa frequenza.

2.La misura dei livelli continui equivalenti di pressione sonora ponderata “A” nel periodo di riferimento ( $L_{Aeq,TR}$ )

$$T_R = \sum_{i=1}^N (T_0)_i$$

Può essere eseguita:

a) per integrazione continua.

Il valore di  $L_{Aeq,TR}$  viene ottenuto misurando il rumore ambientale durante l’intero periodo di riferimento, con l’esclusione eventuale degli intervalli in cui si verificano condizioni anomale non rappresentative dell’area in esame;

b) con tecnica di campionamento.

Il  $L_{Aeq,TR}$  viene calcolato come media dei valori del livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" relativo agli interventi del tempo di osservazione  $(T_0)_i$ . Il valore di  $L_{Aeq,TR}$  è dato dalla relazione:

$$L_{Aeq,TR} = 10 \log \left[ \frac{1}{T_R} \sum_{i=1}^n (T_0)_i 10^{0,1 L_{Aeq,(T_0)_i}} \right] \quad \text{dB(A)}$$

3. La metodologia di misura rileva valori di  $(L_{Aeq,Tr})$  rappresentativi del rumore ambientale nel periodo di riferimento, della zona in esame, della tipologia della sorgente e della propagazione dell'emissione sonora. La misura deve essere arrotondata a 0,5 dB.

4. Il microfono da campo libero deve essere orientato verso la sorgente di rumore; nel caso in cui la sorgente non sia localizzabile o siano presenti più sorgenti deve essere usato un microfono per incidenza casuale. Il microfono deve essere montato su apposito sostegno e collegato al fonometro con cavo di lunghezza tale da consentire agli operatori di porsi alla distanza non inferiore a 3 m dal microfono stesso.

5. Misure in esterno: per quanto riguarda la modalità di misura del rumore all'esterno, nel caso di edifici con facciata a filo della sede stradale il microfono deve essere collocato ad 1 m dalla facciata; nel caso di edifici con distacco dalla sede stradale o con spazi liberi il microfono deve essere posizionato all'interno dello spazio fruibile da persone o comunità e a non meno di 1 m dalla facciata dell'edificio. L'altezza sia in aree edificate che in altri siti deve essere scelta in accordo con la reale o ipotizzata posizione del ricettore.

6. Le misurazioni devono essere eseguite in assenza di precipitazioni atmosferiche, la velocità del vento deve essere non superiore a 5 m/s. Il microfono deve essere comunque munito di cuffia antivento.

### ***Metodologia di misura del rumore stradale***

La metodologia di misura del rumore stradale, essendo il traffico un fenomeno avente carattere di casualità, prevede il monitoraggio per un tempo di misura non inferiore ad una settimana. In tale periodo deve essere rilevato il livello continuo equivalente

ponderato A per ogni ora delle 24 ore, dai singoli dati di livello continuo orario equivalente ponderato “A” si calcolano:

1. i livelli equivalenti diurni e notturni per ogni giorno della settimana,
2. i valori medi settimanali diurni e notturni.

Il microfono deve essere posto ad 1 m dalle facciate di edifici esposti ai livelli di rumore più elevati e la quota da terra del punto di misura deve essere pari a 4 m. In assenza di edifici il microfono deve essere posto in corrispondenza della posizione occupata dai ricettori sensibili.

I valori di cui al punto 2 devono essere confrontati con i livelli massimi di immissione stabiliti con il regolamento di esecuzione previsto dall'art.11 della legge 26 Ottobre 1997 n. 447.

### ***Presentazione dei risultati***

I risultati dei rilevamenti devono essere trascritti in un rapporto che contenga almeno i seguenti dati:

- a) data, luogo, ora del rilevamento e descrizione delle condizioni meteorologiche, velocità e direzione del vento;
- b) tempo di riferimento, di osservazione e di misura;
- c) catena di misura completa, precisando la strumentazione impiegata e relativo grado di precisione; e del certificato di verifica della taratura;
- d) i livelli di rumore rilevati;
- e) classe di destinazione d'uso alla quale appartiene il luogo di misura;
- f) le conclusioni;
- g) modello, tipo, dinamica e risposta in frequenza nel caso di utilizzo di un sistema di registrazione o riproduzione;
- h) elenco nominativo degli osservatori che hanno presenziato alla misurazione;
- i) identificativo e firma leggibile del tecnico competente che ha eseguito le misure. [8]

### ***2.3.5 Decreto del Presidente della Repubblica del 19/03/2004***

Il presente decreto disciplina l'inquinamento acustico da traffico autoveicolare, stabilisce le zone di "attenzione acustica" dove applicare i limiti e fissa i decibel permessi in tutte le infrastrutture stradali, sia quelle di nuova costruzione che quelle già esistenti.

In particolare viene chiarito ciò che nell'art. 3 comma 2 del D.P.C.M. 14.11.97 era lasciato in sospeso in attesa di provvedimenti attuativi specifici. Tale articolo stabilisce che per le infrastrutture stradali, ferroviarie, marittime e aeroportuali, all'interno delle rispettive fasce di pertinenza non si applicano i limiti di cui alla tabella C allegata al decreto del '97.

Le diverse categorie di infrastrutture stradali sono definite nell'allegato 1 al presente decreto, in accordo con il decreto legislativo n. 285 del 1992 e successive modifiche, il quale le suddivide in:

- A. autostrade;
- B. strade extraurbane principali;
- C. strade extraurbane secondarie;
- D. strade urbane di scorrimento;
- E. strade urbane di quartiere;
- F. strade locali.

Le disposizioni di cui al presente decreto si applicano alle strade già esistenti ed alle strade di nuova realizzazione. I valori limite di immissione stabiliti dal presente decreto sono verificati, in corrispondenza dei punti di maggiore esposizione, in conformità a quanto disposto dal decreto del Ministro dell'ambiente del 16 marzo 1998, e devono essere riferiti al solo rumore prodotto dalle infrastrutture stradali.

Per le infrastrutture stradali di tipo A, B, C, D, E ed F le rispettive fasce territoriali di pertinenza acustica sono definite nelle tabelle 1 e 2 di seguito riportate. Nel caso di fasce divise in due parti si dovrà considerare una prima parte più vicina all'infrastruttura denominata fascia A ed una seconda più distante denominata fascia B.

Nel caso di realizzazione di una nuova infrastruttura, in affiancamento ad una esistente, la fascia di pertinenza acustica viene misurata partendo dal confine di quella preesistente. Per le opere di nuova realizzazione debbono essere individuati i corridoi progettuali per garantire la migliore tutela dei ricettori presenti all'interno della fascia di studio e nel caso di ricettori sensibili, come per esempio in prossimità di scuole, ospedali ecc., i corridoi devono essere il doppio della fascia di pertinenza acustica, mentre in tutti gli altri casi uguali ad essa. Per le opere esistenti i valori limite devono essere rispettati tramite piani di risanamento da attuare all'interno dell'intera fascia di pertinenza acustica. Se il conseguimento dei limiti non è possibile, dobbiamo intervenire con opere di mitigazione alla sorgente, lungo la via di propagazione del rumore, direttamente sul ricettore.

Dalle tabelle dell'allegato 1 , di seguito riportate , si possono leggere i valori delle fasce di pertinenza acustica per ognuna delle classi e il valore dei limiti di immissione:  
[8]

#### ALLEGATO 1

**Tabella 1 Limiti massimi di immissione per strade di nuova realizzazione**

Tipo di strada	Sottotipi a fini acustici (secondo DM 05.11.01)	Ampiezza fascia di pertinenza acustica [m]	Scuole , ospedali , case di cura e di riposo		Altri ricettori	
			Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)	Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)
A-autostrada		250	50	40	65	55
B-extraurbana principale		250	50	40	65	55
C-extraurbana secondaria	C1	250	50	40	65	55
	C2	150	50	40	65	55
D-urbana di scorrimento		100	50	40	65	55
E-urbana di quartiere		30	Definiti dai comuni nel rispetto dei valori riportati in tab C allegata al D.P.C.M. 14.11.97 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane , come prevista dall'art.6 , comma 1 , lettera a) , della legge n° 447 del 1995			
F-locale		30				

**Tabella 2 Limiti massimi di immissione per strade esistenti e assimilabili**

Tipo di strada	Sottotipi a fini acustici (secondo norme CNR 1980)	Ampiezza fascia di pertinenza acustica [m]	Scuole , ospedali , case di cura e di riposo		Altri ricettori	
			Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)	Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)
A- autostrada		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
B- extraurbana principale		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
C- extraurbana secondaria	Ca (carreggiate separate e tipo IV CNR 1980)		50	40	70	60
					65	55
	Cb (tutte le altre strade extraurbane secondarie)		50	40	70	60
					65	55
D-urbana di scorrimento	Da (carreggiate separate e interquartiere)	100	50	40	70	60
	Db (Tutte le altre strade urbane di scorrimento)	100	50	40	65	55
E-urbana di quartiere		30	Definiti dai comuni nel rispetto dei valori riportati in tab C allegata al D.P.C.M. 14.11.97 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane , come prevista dall'art.6 , comma 1 , lettera a) , della legge n° 447 del 1995			
F-locale		30				

Come si può notare, per quanto riguarda le strade di categoria E e F si rimanda ai Comuni la definizione di tali limiti nel rispetto dei valori indicati dal D.P.C.M. 14.11.97.

### ***2.3.6 Legge Regionale n°89 del 98 e successive modifiche***

La Legge regionale n°89 del 98 in attuazione dell'articolo 4 della legge 26 ottobre 1995, n. 447 e del decreto legislativo 31 marzo 1998, n. 112 e le successive modifiche apportate dalla Legge Regionale n° 67 del 29.11.04 detta norme finalizzate alla tutela dell'ambiente e della salute pubblica dall'inquinamento acustico prodotto dalle attività antropiche, disciplinandone l'esercizio al fine di contenere la rumorosità entro i limiti stabiliti .

L'art. 2 stabilisce le competenze riservate alle regioni . Il consiglio regionale deve definire i criteri della pianificazione comunale e provinciale, a tal fine la Giunta regionale propone al Consiglio regionale, entro sessanta giorni dall'entrata in vigore della presente legge:

- a) i criteri tecnici ai quali i comuni sono tenuti ad attenersi nella redazione dei piani di classificazione acustica
- b) i criteri, le condizioni ed i limiti per l'individuazione, nell'ambito dei piani comunali , delle aree destinate a spettacolo a carattere temporaneo ,ovvero mobile, ovvero all'aperto;
- c) le modalità di rilascio delle autorizzazioni comunali per lo svolgimento di attività temporanee e di manifestazioni in luogo pubblico o aperto al pubblico, qualora esso comporti l'impiego di macchinari o di impianti rumorosi, con particolare riferimento ai valori limite delle sorgenti sonore dettati dal D.P.C.M. 14.11.97.
- d) le condizioni ed i criteri in base ai quali i comuni di rilevante interesse paesaggistico ambientale o turistico possono individuare valori inferiori a quelli determinati dal D.P.C.M. 14.11.97.
- e) i criteri generali per la predisposizione dei piani comunali di risanamento acustico
- f) i criteri per l'identificazione delle priorità temporali negli interventi di bonifica acustica del territorio;
- g) specifiche istruzioni tecniche per il coordinamento dei piani comunali di classificazione acustica con gli strumenti della pianificazione e programmazione territoriale.

L'art. 3 indica che è compito delle province adeguare il piano territoriale di coordinamento (PTC) , indicando e coordinando gli obiettivi da perseguire nell'ambito del territorio provinciale ai fini della tutela ambientale e della prevenzione dell'inquinamento acustico. Inoltre esse, oltre alle funzioni di vigilanza e di controllo, devono anche provvedere, avvalendosi dell'ARPAT, alla promozione di campagne di misurazione del rumore mediante l'analisi dei dati appositamente acquisiti , al fine di individuare la tipologia e l'entità dei rumori presenti sul territorio, e al monitoraggio complessivo dell'inquinamento acustico nel territorio provinciale.

In base all'art. 4, i comuni, entro il termine perentorio del 1 marzo 2005, devono approvare il piano di classificazione acustica secondo il quale il territorio comunale viene suddiviso in zone acusticamente omogenee, tenendo conto delle preesistenti destinazioni d'uso così come individuate dagli strumenti urbanistici in vigore. A ciascuna zona vengono assegnati i relativi valori di qualità e di attenzione , salva la facoltà, per i comuni di rilevante interesse paesaggistico , ambientale o turistico, di individuare valori inferiori.

L'art.6 vieta di prevedere, nel piano comunale di classificazione acustica, il contatto diretto di aree, anche appartenenti a comuni confinanti, nel caso in cui i valori di qualità si discostino in misura superiore a 5 dB(A) di livello sonoro continuo equivalente.

Qualora non risulti possibile, in zone già urbanizzate, rispettare tale divieto, a causa di preesistenti destinazioni d'uso, il comune deve adottare un piano di risanamento acustico.

Inoltre i comuni sono tenuti ad approvare un apposito piano di risanamento acustico anche nel caso si verifichi il superamento dei valori di attenzione.

Secondo gli articoli 14 e 15 i comuni esercitano le funzioni di controllo, avvalendosi per le rispettive competenze dell'ARPAT e delle aziende USL. L'ARPAT nell'ambito delle attività di rilevamento e controllo in materia di tutela dell'ambiente esterno dall'inquinamento acustico, deve provvedere a trasmettere tutti i dati alle amministrazioni interessate ed alla aziende USL competenti per il territorio, ad inviare annualmente alla Giunta regionale una relazione contenente il resoconto delle attività svolte ed il quadro conoscitivo del clima acustico rilevato e a segnalare

tempestivamente, oltre che al comune, anche alle province ed alla Giunta regionale, la presenza di condizioni che determinano l'obbligo di predisposizione del piano comunale di risanamento acustico. [8]

### ***2.3.7 Direttiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio***

La direttiva 2002/49/CE del parlamento europeo costituisce la base per sviluppare e completare l'attuale serie di misure comunitarie per le varie tipologie di sorgenti.,

Il Decreto Legislativo n.194 del 19 agosto 2005 di recepimento di tale Direttiva comunitaria, entrato in vigore l' 8 ottobre 2005, prevede, tra le altre cose, la predisposizione di una mappatura acustica per le zone maggiormente esposte ovvero gli agglomerati urbani con popolazione superiore a 100.000 abitanti e le zone contigue alle principali infrastrutture di trasporto.

Sulla base di tale mappatura verranno quindi redatti specifici piani d'azione volti a gestire i problemi di inquinamento acustico.

I descrittori acustici comuni utilizzati nella mappatura acustica sono  $L_{den}$  (Day-Evening-Night Level) per determinare il fastidio globale e  $L_{night}$  per determinare i disturbi del sonno.

Il livello giorno-sera-notte  $L_{den}$  in decibel (dB), è definito dalla seguente formula:

$$L_{den} = 10 \log (12 * 10^{L_{day}/10} + 4 * 10^{(L_{evening} + 5)/10} + 8 * 10^{(L_{night} + 10)/10}) / 24$$

dove

$L_{day}$  è il livello sonoro medio a lungo termine ponderato « A » determinato sull'insieme dei periodi diurni di un anno,

$L_{evening}$  è il livello sonoro medio a lungo termine ponderato « A » determinato sull'insieme dei periodi serali di un anno

$L_{night}$  è il livello sonoro medio a lungo termine ponderato « A » determinato sull'insieme dei periodi notturni di un anno

dove

- le fasce orarie standard sono 07.00-19.00, 19.00-23.00 e 23.00-07.00 ora locale
- l'anno è l'anno di osservazione per l'emissione acustica e un anno medio sotto il profilo metereologico.

Il punto di misura per la determinazione di  $L_{den}$ , nel caso del calcolo ai fini della mappatura acustica strategica in termini di esposizione al rumore all'interno e in prossimità degli edifici, è ad una altezza dal suolo di 3,8-4,2 m e sulla facciata più esposta. [8]

## 3 INDAGINE NELLA CITTA' DI CARRARA

### 3.1 Definizione delle impostazioni per l'acquisizione dei dati

Lo strumento utilizzato per le nostre misurazioni è il fonometro analizzatore *Larson Davis LD824*:



il quale è dotato di numerose modalità di funzionamento; quella adottata nei rilievi effettuati è il MODO SSA (Simple Sound Analyzer), il quale consente di eseguire simultaneamente le misure di livello sonoro e l'analisi spettrale in banda di ottava o in banda di un terzo d'ottava. In particolare tale modalità misura simultaneamente tutti i parametri fonometrici (livello di pressione sonora  $L_p$ ,  $L_{eq}$ , SEL,  $L_{max}$ ,  $L_{min}$ , livello di picco  $L_{peak}$ ) con tutte le costanti di tempo (Slow, Fast, Impulse) e con le ponderazioni in frequenza A,C,Lin.

Inoltre viene calcolato lo spettro in frequenza (istantaneo, minimo, massimo e di livello equivalente) con una ponderazione in frequenza (A,C,Lin) e con una costante di tempo (Slow, Fast) definibili dall'utente.

Usando la costante di tempo Fast la risposta dello strumento è molto veloce e consente quindi di misurare livelli del suono che non oscillano troppo velocemente, perciò essa è stata scelta per l'acquisizione dei singoli passaggi dei veicoli ai fini della caratterizzazione delle sorgenti sonore. La costante di tempo Slow, invece, è stata adottata per i monitoraggi sulle 24 ore, poiché, dando una risposta più lenta (1 sec) si presta meglio a seguire l'andamento del livello sonoro nel corso del tempo e a rilevarne il valore medio.

Per quanto riguarda la scelta della ponderazione è stata scelta la curva di pesatura A, essendo quella in media meglio correlata con la risposta soggettiva umana ed essendo adottata in molte norme e leggi nazionali ed internazionali.



Prima di iniziare ogni misura si è proceduto alla regolazione della sensibilità interna del fonometro attraverso un calibratore acustico, il quale è un dispositivo che produce un livello di pressione sonora di riferimento al diaframma del microfono una volta che è inserito nel calibratore stesso. La calibratura è stata effettuata a 114 dB.

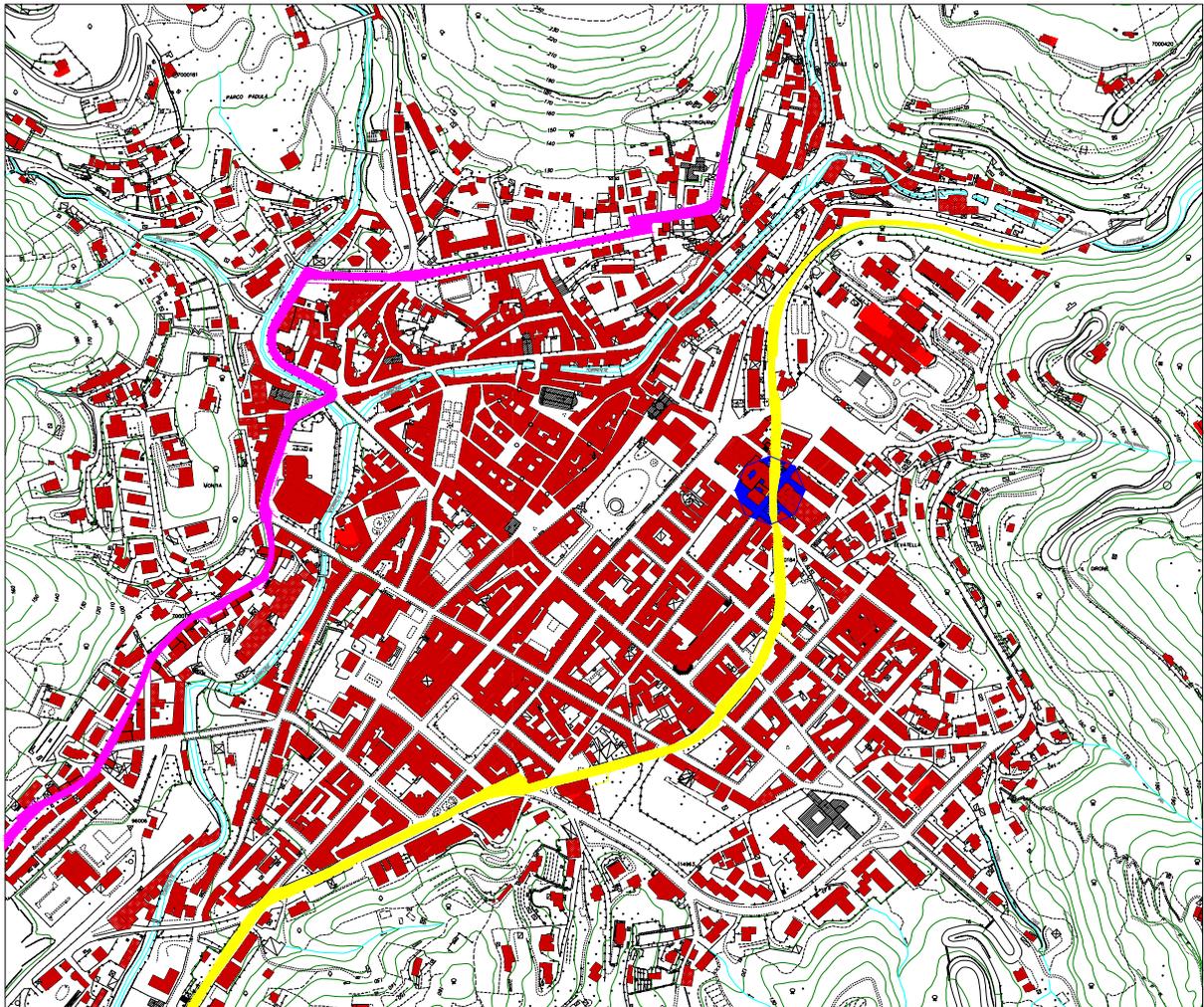
In ogni rilevazione al microfono è stata applicata una protezione, di materiale plastico poroso, per ridurre l'effetto dell'aria sullo stesso che, altrimenti avrebbe potuto danneggiare la precisione della misura.

I dati dei rilevamenti sono stati presentati con l'indicazione circa la data, il luogo, l'ora di rilevamento, la descrizione delle condizioni meteorologiche, le modalità di acquisizione (impostazioni del fonometro e durata del monitoraggio) e, infine, tabelle, grafici e spettri organizzati in modo tale da supportare ed esplicitare il lavoro svolto a seconda della finalità delle indagini e delle elaborazioni. [11]

### 3.2 Monitoraggio sulle 24 ore

I monitoraggi sulle 24 ore sono stati condotti su via Del Cavatore, nella città di Carrara, accesso obbligato del traffico pesante per raggiungere i bacini marmiferi.

Fig. 3.2 Aero-foto Carrara



#### LEGENDA

-  Percorso dei camion in ingresso nella città (via Don Minzoni, via Del Cavatore )
-  Percorso dei camion in uscita dalla città (via Carriona, via Apuana, viale Potrignano)
-  Zona di monitoraggio

Nella fig. 3.2 sono riportate le strade di accesso e di uscita dei camion dalla città e la zona in cui sono stati effettuati i monitoraggi in continuo.

Le misure sono state condotte nei giorni di martedì, mercoledì, giovedì, sabato e domenica della prima settimana di Maggio. I giorni indicano ovviamente l'inizio dei rilievi, avviati nella mattinata e conclusi il giorno seguente allo scadere delle 24 ore. Tali giorni sono stati presi rappresentativi di una settimana tipo di cui si è voluto campionare tre giorni feriali e due festivi.

Dalle misure acquisite si sono ricavati i livelli continui equivalenti diurni e notturni ( $L_{Aeqd}$ ,  $L_{Aeqn}$ ) e i livelli continui equivalenti orari ( $L_{Aeqh}$ ) per ogni giorno monitorato.

Secondo quanto prevede il decreto 16/3/1998 *Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico*, il fonometro è stato posizionato su un balcone al primo piano di un edificio situato in tale via di accesso dei mezzi pesanti verso le cave, e, come prescritto dal suddetto decreto, ad un metro dalla facciata dell'edificio stesso e a circa 4 metri dal suolo.

Le misurazioni sono state condotte in assenza di precipitazioni atmosferiche e con vento molto debole.

Lo strumento è stato impostato con costante di tempo slow e ponderazione A. già definiti nel paragrafo 3.1.

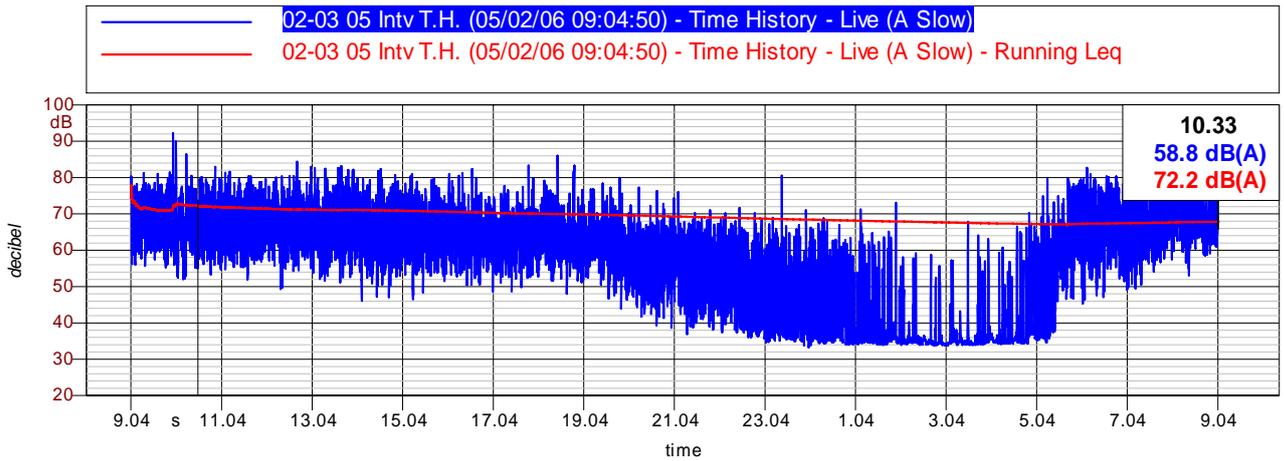


**Foto 1- Postazione di misura per i monitoraggi in continuo**

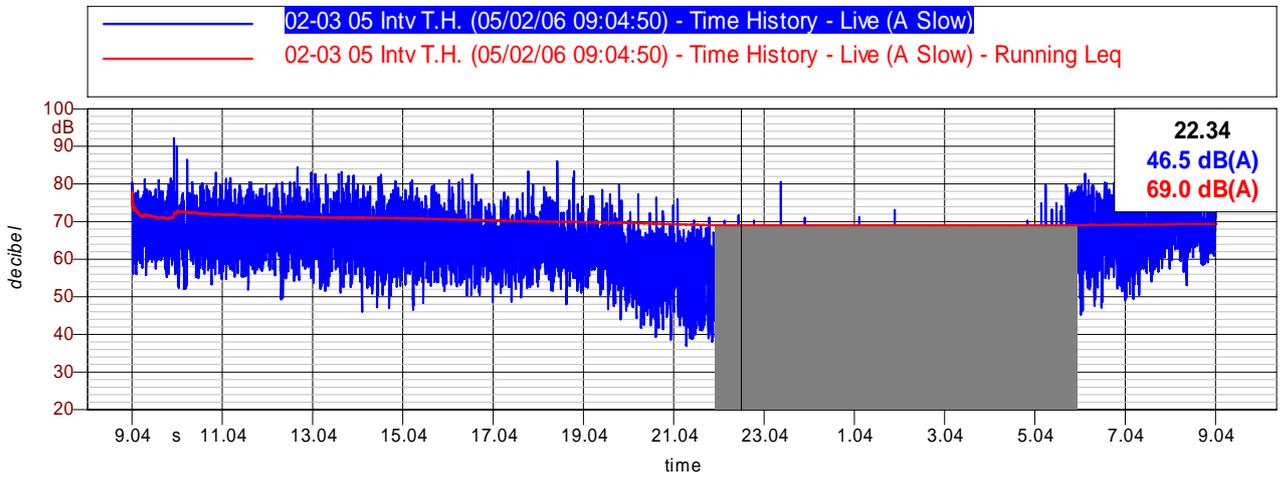
Il grafico di seguito riportato rappresenta l'andamento sonoro nel tempo dell'osservazione di martedì 2 maggio 2006 dove in blu è rappresentato il livello sonoro fluttuante nel tempo mentre la linea in rosso è indice del livello continuo equivalente ottenuto come media sull'intero periodo di registrazione.

Nei grafici a e b, sempre relativi alla stessa misura, attraverso la maschera, apportata in fase di elaborazione dei dati, si è potuto evidenziare i vari periodi del giorno in modo da individuare il  $L_{Aeq}$  diurno e notturno, come previsto dalla legislazione italiana.

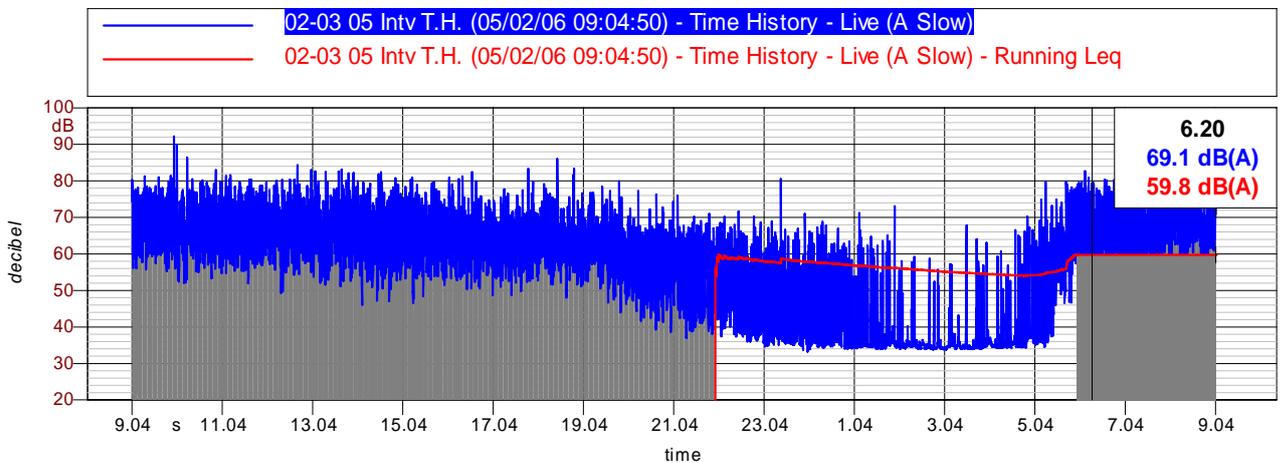
Nelle pagine seguenti sono riportati i grafici suddetti per ognuno dei cinque giorni monitorati.



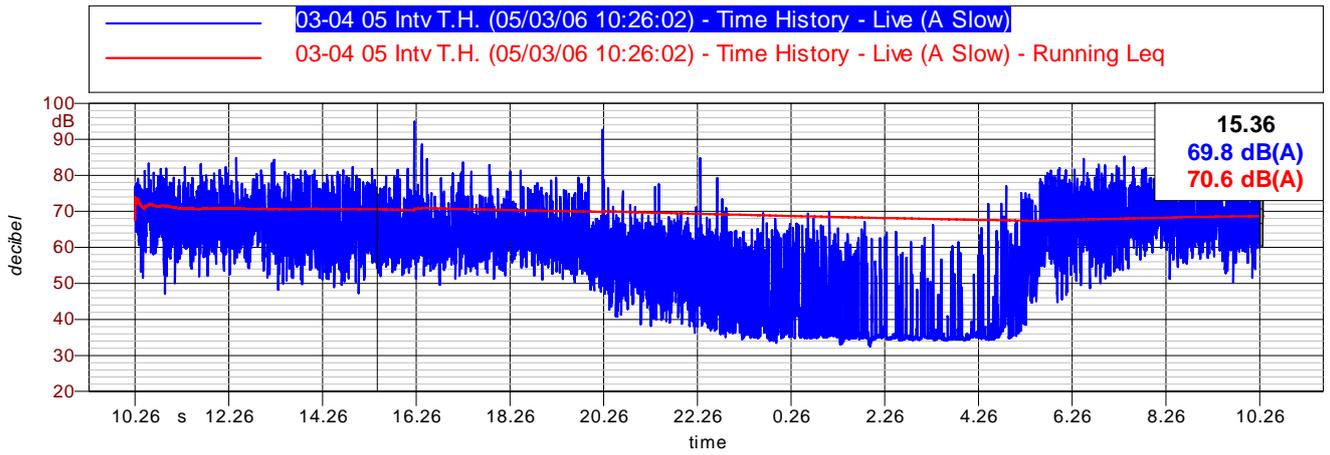
**Grafico 3.2.1 Monitoraggio di martedì**



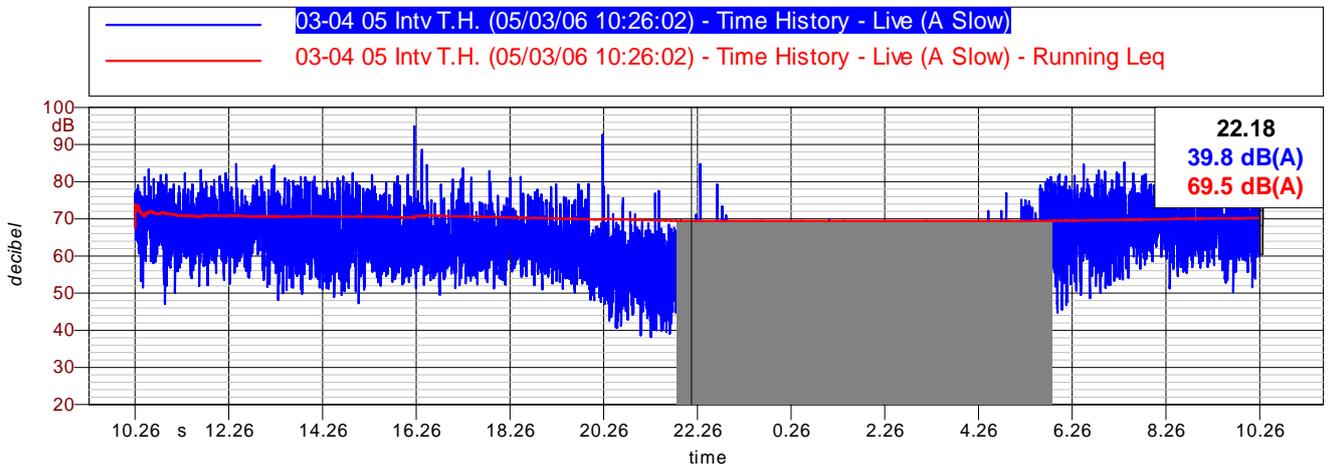
**Grafico 3.2.1a Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  diurno**



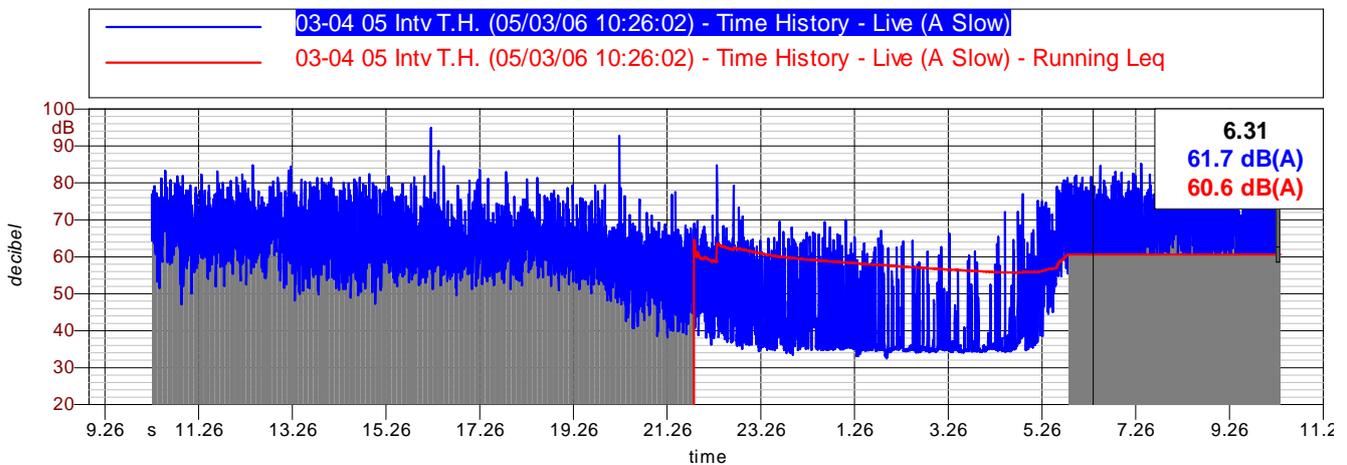
**Grafico 3.2.1b Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  notturno**



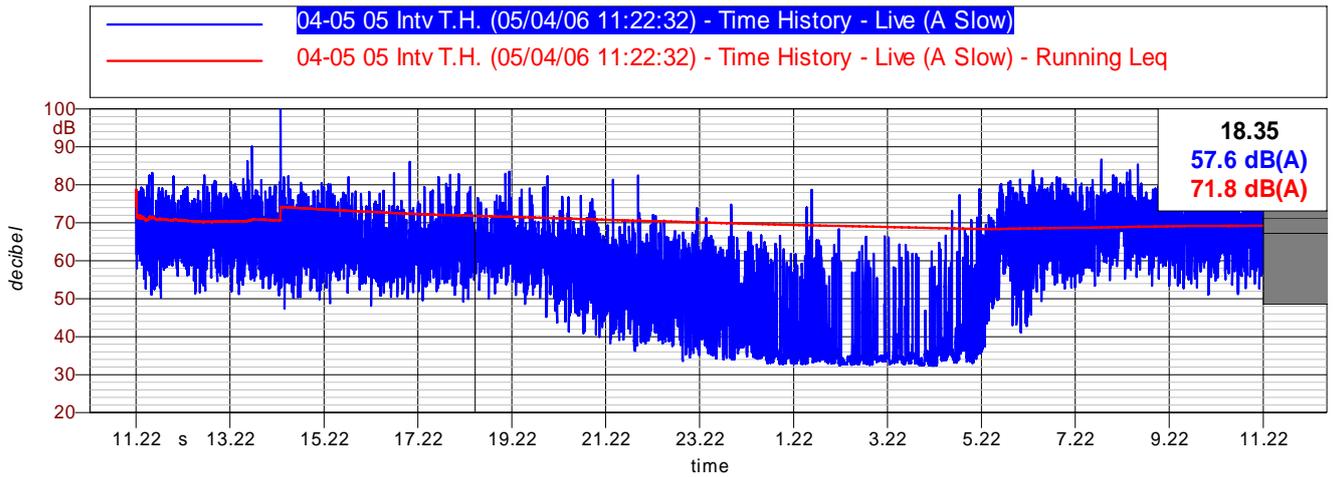
**Grafico 3.2.2 Monitoraggio di mercoledì**



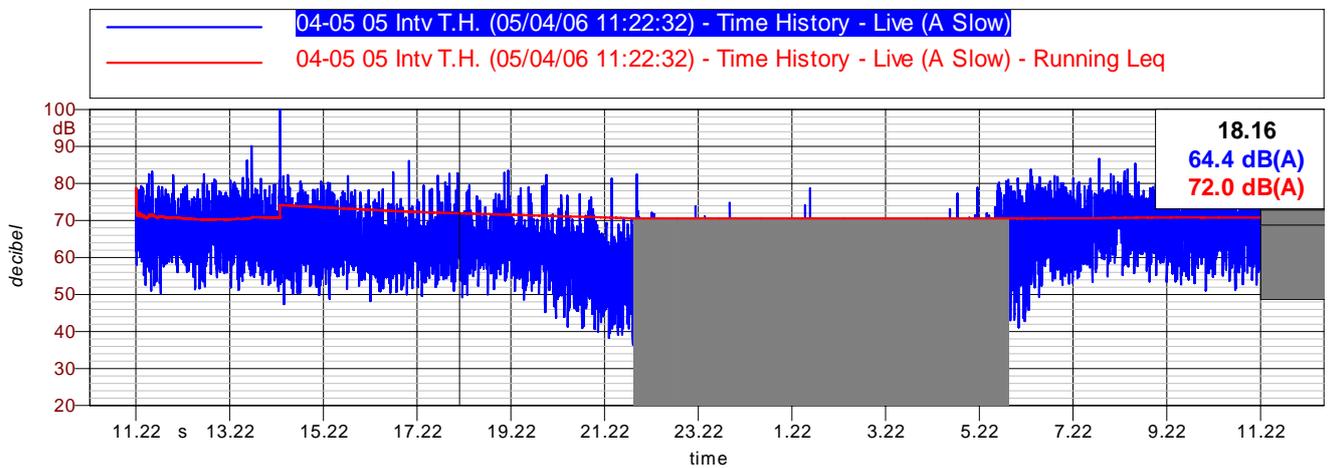
**Grafico 3.2.2a Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  diurno**



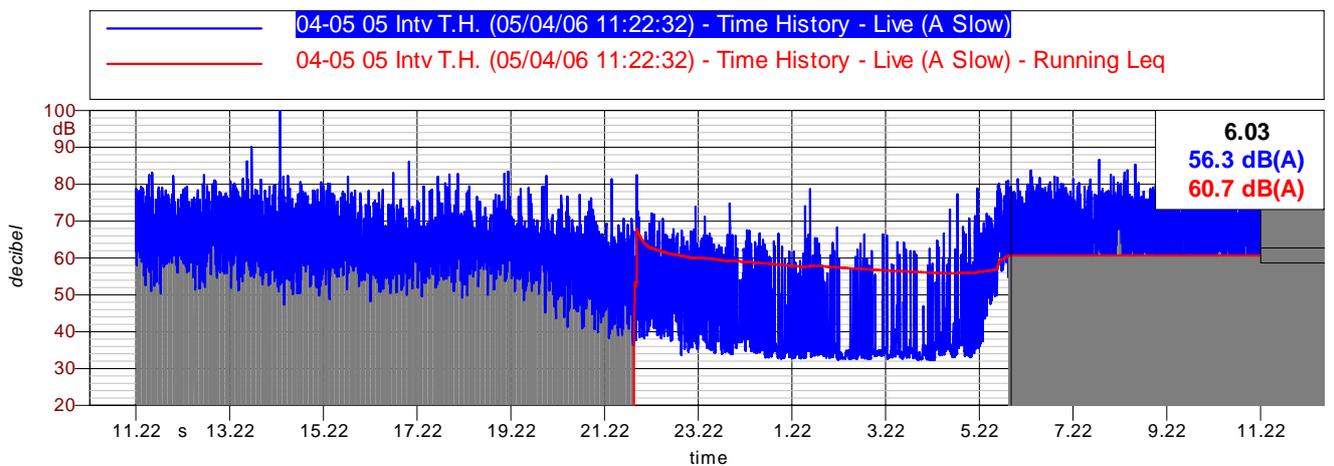
**Grafico 3.2.2b Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  notturno**



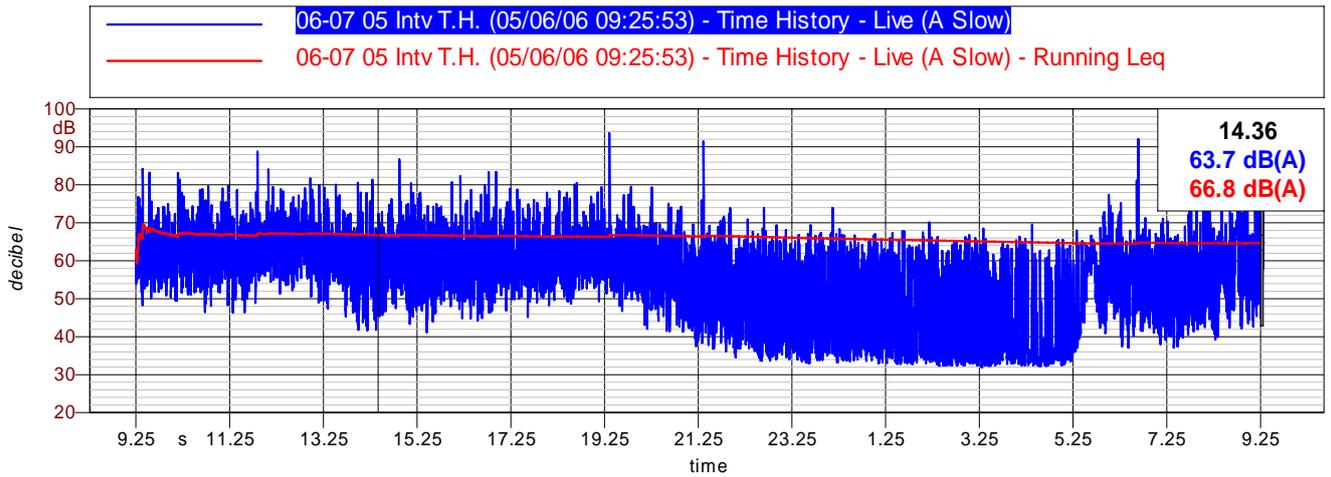
**Grafico 3.2.3 Monitoraggio di giovedì**



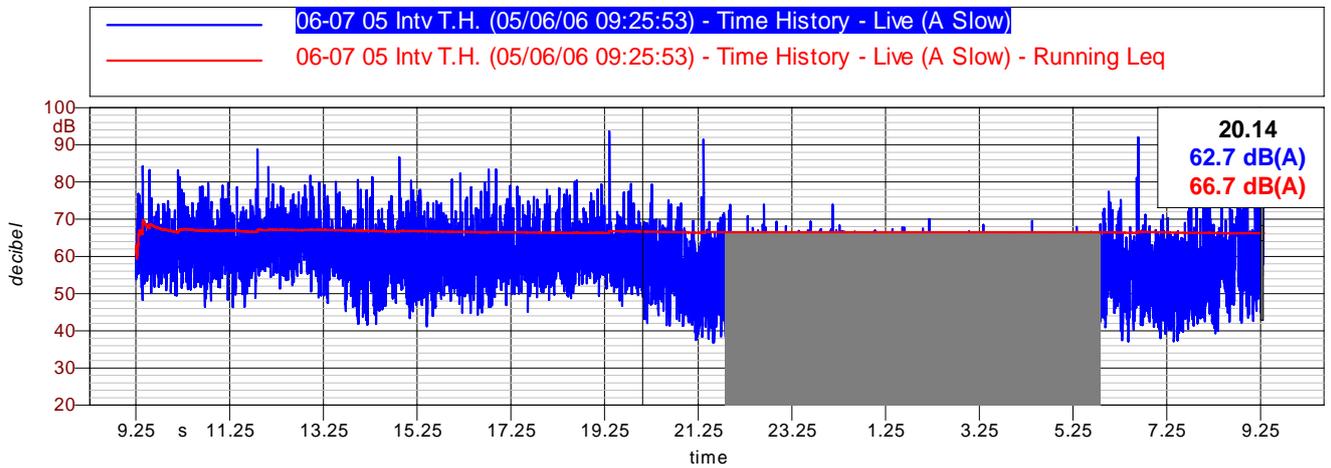
**Grafico 3.2.3a Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  diurno**



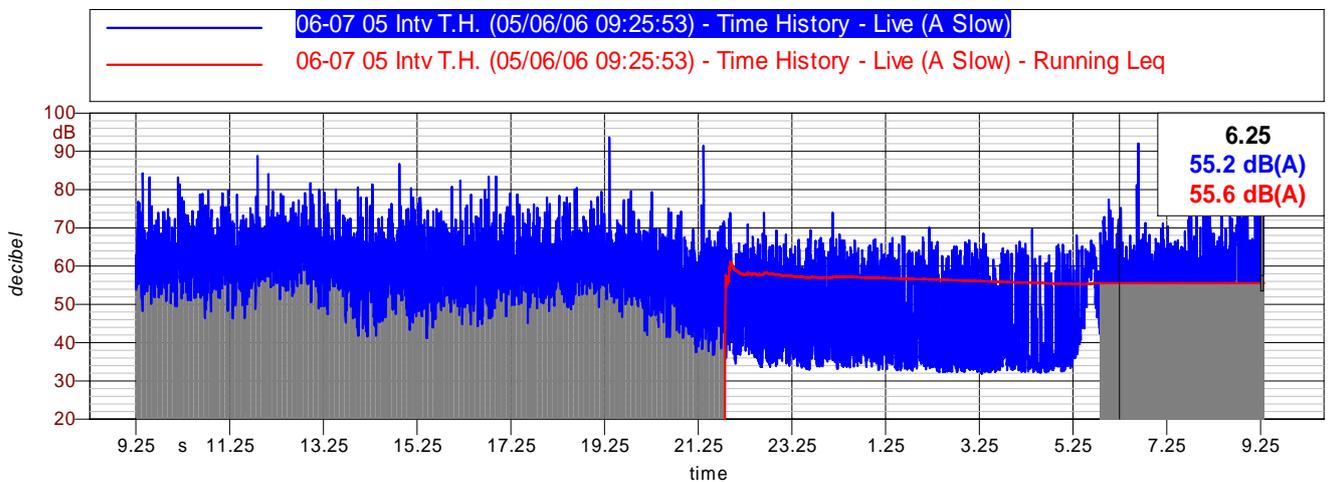
**Grafico 3.2.3b Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  notturno**



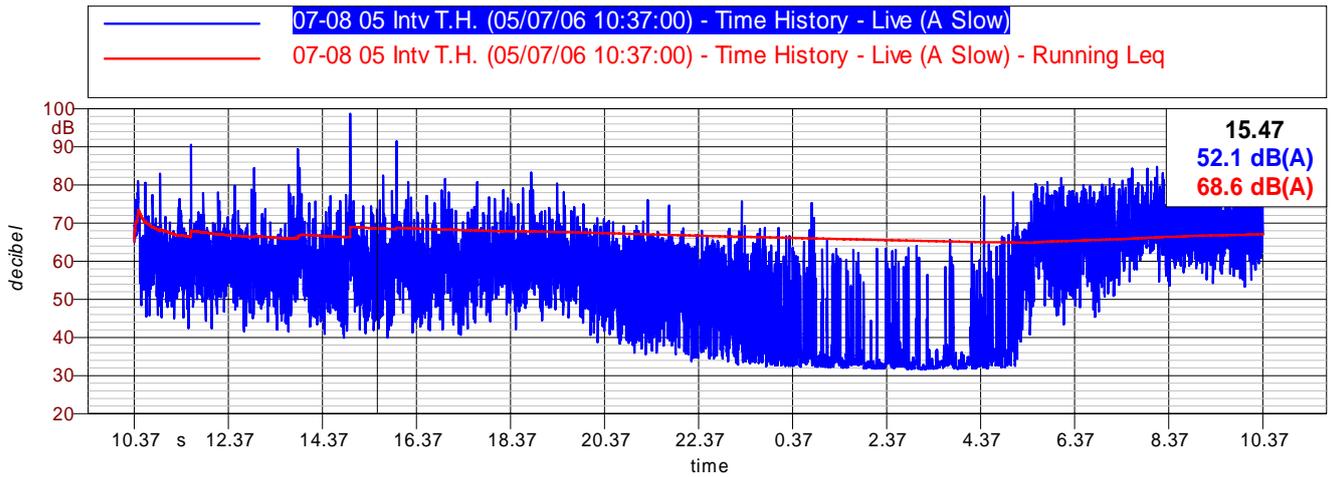
**Grafico 3.2.4 Monitoraggio di sabato**



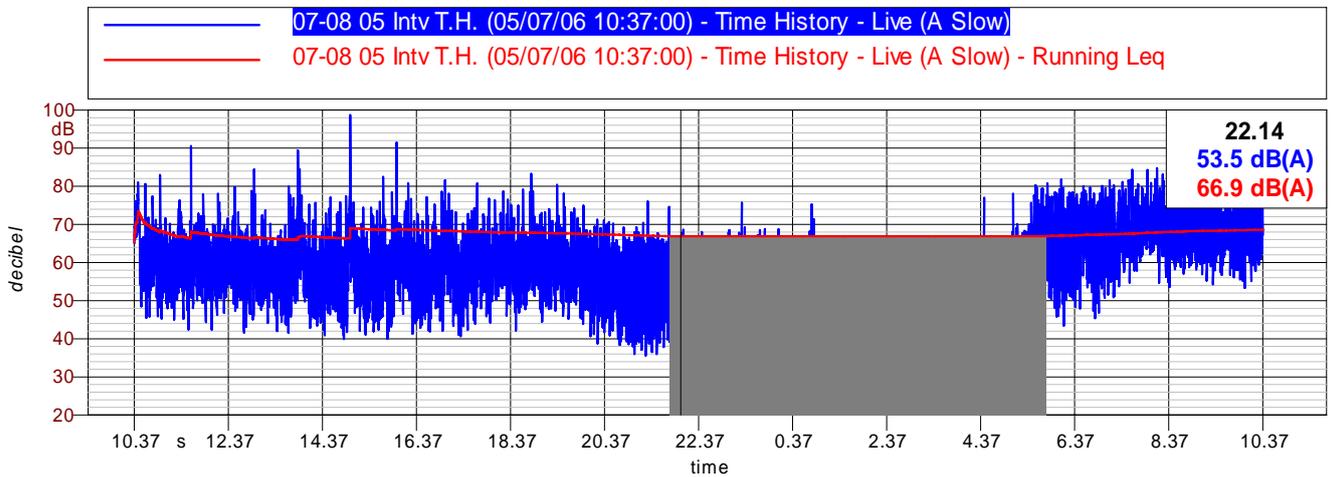
**Grafico 3.2.4a Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  diurno**



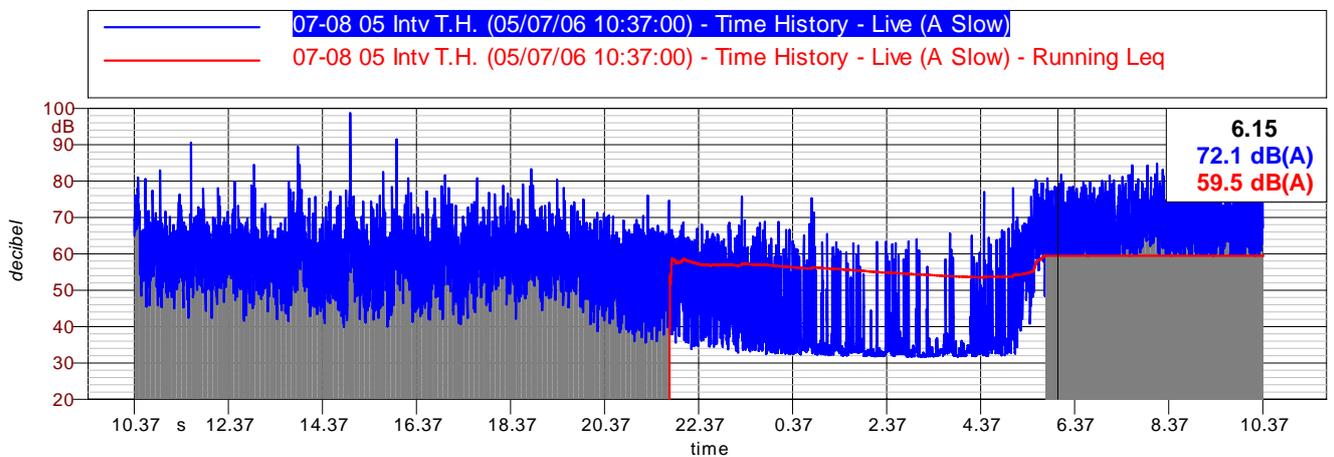
**Grafico 3.2.4b Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  notturno**



**Grafico 3.2.5 Monitoraggio di domenica**



**Grafico 3.2.5a Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  diurno**



**Grafico 3.2.5b Maschera per la determinazione del  $L_{Aeq}$  notturno**

Nelle seguenti tabelle sono riassunti, per i vari giorni monitorati, tutti gli indici calcolati, e precisamente nella tab.3.2.1 vengono riportati i valori del livello continuo equivalente giornaliero per ciascun giorno di misura e i relativi valori del SEL. Nella tab.3.2.2 sono, invece, riportati i  $L_{Aeq}$  diurni e notturni calcolati suddividendo le 24 ore nei due periodi 6-22 e 22-6 previsti dalla normativa italiana.

La tab.3.2.3 seguendo la proposta di direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio Europeo del 26 Luglio 2000 riporta, per ciascun giorno di misura, il livello continuo equivalente relativo ai tre periodi del giorno:

giorno (dalle ore 7:00 alle ore 19:00), sera (dalle 19:00 alle 23:00) e notte (dalle 23:00 alle 7:00).

Infine in tab. 3.2.4 vengono riportati i livelli continui equivalenti orari, ottenuti attraverso il programma di supporto del fonometro, per ciascuno dei cinque giorni monitorati, mentre nel grafico di seguito tali valori sono diagrammati per apprezzarne il loro andamento nel tempo.

**Tabella 3.2.1 –  $L_{Aeq}$  giornaliero e SEL relativi al monitoraggio continuo**

Misura	$L_{Aeq}$ giornaliero dB(A)	SEL dB(A)
martedì	67.8	117.2
mercoledì	68.7	118.0
giovedì	69.2	118.6
sabato	64.7	114.0
domenica	67.1	116.5

**Tabella 3.2.2 –  $L_{Aeq}$  continuo, secondo la legislazione italiana**

Misura	$L_{Aeq}$ diurno (6-22)	$L_{Aeq}$ notturno (22-6)
martedì	69.4	59.8
mercoledì	70.2	60.6
giovedì	70.8	60.7
sabato	66.3	55.6
domenica	68.9	59.5

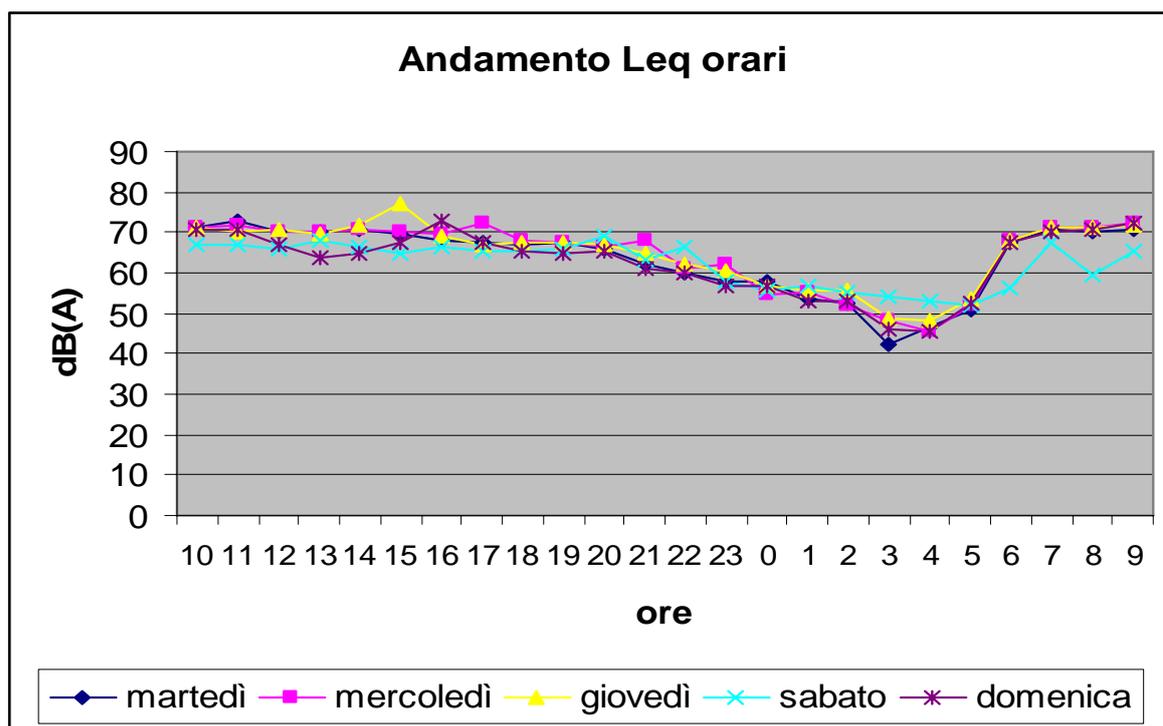
**Tabella 3.2.3 –  $L_{Aeq}$  continuo, secondo la proposta di direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio Europeo, 26 luglio 2000**

Misura	$L_{Aeq}$ giorno (7-19)	$L_{Aeq}$ sera (19-23)	$L_{Aeq}$ notte (23-7)
martedì	70.0	62.6	63.6
mercoledì	70.7	65.3	64.3
giovedì	71.5	64.3	64.2
sabato	65.9	65.9	60.0
domenica	69.2	62.0	63.3

**Tabella 3.2.4 – L<sub>Aeq</sub> continuo orario**

Ore	martedì	mercoledì	giovedì	sabato	domenica
9-10	71.2	71.2	71.5	66.7	70.8
10-11	72.6	71.6	70.2	67.0	70.7
11-12	70.4	70.2	70.8	65.8	67.1
12-13	70.1	70.4	69.7	68.1	64.0
13-14	70.9	70.8	71.7	66.5	64.7
14-15	69.8	70.2	77.4	64.9	67.6
15-16	68.3	69.8	69.1	66.5	72.8
16-17	67.6	72.3	67.2	65.6	67.4
17-18	66.9	67.8	67.7	65.5	65.1
18-19	67.7	67.3	67.6	65.7	64.8
19-20	66.0	66.3	67.0	69.3	65.4
20-21	61.9	68.0	64.7	63.2	61.3
21-22	60.1	61.0	62.3	66.3	60.0
22-23	58.1	62.1	60.6	57.9	57.0
23-24	57.8	54.6	57.0	55.9	56.8
24-01	53.5	55.2	55.6	57.0	53.2
01-02	52.3	51.8	55.5	55.3	52.9
02-03	42.2	48.1	48.6	54.2	46.2
03-04	46.4	45.3	48.4	52.9	45.5
04-05	50.8	51.8	53.7	52.2	52.3
05-06	67.6	68.2	68.2	56.1	67.3
06-07	70.5	71.4	71.0	67.6	70.2
07-08	70.3	71.5	71.1	59.3	70.9
08-09	70.8	72.5	71.8	65.3	72.2

**Grafico 3.2.6 Andamento dei  $L_{Aeq}$  continui orari**



Dall'osservazione del grafico si può notare come l'andamento del livello sonoro equivalente continuo dei giorni festivi si mantenga al di sotto di quello dei giorni feriali nella fascia oraria dalle diciotto alle cinque a.m., in concomitanza del transito dei camion, mentre tali valori si livellano dalle 18 alle 24; inoltre, i livelli  $L_{Aeq}$  continui orari del sabato superano quelli dei giorni festivi nelle ore della notte tra le 24 e le cinque.

Questo dimostra quanto sia determinante il passaggio del traffico pesante nella zona monitorata.

I valori della tab.3.2.3 rappresentano i descrittori acustici definiti dalla Direttiva 2002/49/CE, ossia sono i livelli sonori medi a lungo termine ponderati « A » determinati sull'insieme dei periodi diurni, serali, notturni di un intero anno. Essi servono per la determinazione di un unico descrittore acustico, il livello giorno-sera-notte  $L_{den}$  già precedentemente definito.

A livello nazionale, invece, la legge quadro n.447 del 26/10/1995 stabilisce che i comuni provvedano alla suddivisione del territorio secondo la classificazione stabilita dal D.P.C.M. 14/11/97.

Secondo tale normativa, la zonizzazione acustica del comune di Carrara colloca via del Cavatore in classe II, la quale stabilisce come valori massimi di immissione 55 dB(A) per il giorno e 45 dB(A) per la notte. [9]

Quest'ultimi sono i valori da confrontare con quelli ricavati dai 5 giorni di rilevamenti, rappresentati in tab.3.2.2. Per operare tale confronto è necessario, però, riportare le cinque coppie di valori, una per ognuna delle rilevazioni, ad una sola coppia, quella del giorno medio.

Per fare questo sono stati determinati i livelli medi orari per ciascuna ora del giorno attraverso una media in termini di energia estesa ai cinque giorni.

La formula utilizzata è stata :

$$L_{Aeqh} = 10 \text{ Log}_{10} \left( \sum t 10^{dB(A)/10} / T \right)$$

Dove t vale 3600 secondi, dB(A) è il livello sonoro orario di ciascuna ora per ciascun giorno, T l'intero periodo di integrazione pari a 18000 secondi.

**Tabella 3.2.5 estratto del calcolo dei livelli orari per ogni ora del giorno medio**

	ore 9-10	t 10 <sup>dB/10</sup>	ore10-11	t 10 <sup>dB/10</sup>
<b>martedì</b>	71.2	47457242588.03	72.6	65509230909.96
<b>mercoledì</b>	71.2	47457242588.03	71.6	52035831746.85
<b>giovedì</b>	71.5	50851351606.42	70.2	37696627729.83
<b>sabato</b>	66.7	16838465086.34	67.0	18042740410.58
<b>domenica</b>	70.8	43281519646.23	70.7	42296311977.82
	<b>10log(Σ/T)=</b>	70.6	<b>10log(Σ/T)=</b>	70.8

Dai risultati ottenuti, riportati nella tab.3.2.6, si ricavano attraverso la stessa formula, correggendo opportunamente i valori dei fattori, il L<sub>Aeq</sub> giornaliero, L<sub>Aeq</sub> diurno e il L<sub>Aeq</sub> notturno del giorno medio.

**Tabella 3.2.6 Valori orari relativi al giorno medio**

Intervallo orario	L <sub>Aeqh</sub> dB(A)
9-10	70.6
10-11	70.8
11-12	69.3
12-13	69.0
13-14	69.7
14-15	72.2
15-16	69.8
16-17	68.7
17-18	66.7
18-19	66.8
19-20	67.0
20-21	64.6
21-22	62.7
22-23	59.6
23-0	56.6
0-1	55.1
1-2	53.8
2-3	49.6
3-4	48.8
4-5	52.3
5-6	66.9
6-7	70.3
7-8	70.2
8-9	71.1

Il  $L_{Aeq}$  diurno sarà dato dalla formula:

$$L_{Aeqd} = 10 \text{ Log}_{10} \left( \sum t 10^{dB(A)/10} / T \right)$$

dove  $t$  vale sempre 3600 secondi,  $dB(A)$  rappresenterà i valori dei  $L_{Aeqh}$  del giorno medio dalle ore 6:00 alle 22:00 e  $T$ , che rappresenta l'intero periodo di integrazione, è pari a  $3600 \cdot 16 = 57600$ .

Il  $L_{Aeq}$  notturno,  $L_{Aeqn}$ , sarà dato dalla stessa formula in cui  $dB(A)$  rappresenterà i valori dei  $L_{Aeqh}$  del giorno medio dalle ore 22:00 alle ore 6:00 e  $T$  sarà pari a  $3600 \cdot 8 = 28800$ .

Infine il  $L_{Aeq}$  giornaliero si otterrà ponendo nei  $dB(A)$  i valori dei  $L_{Aeqh}$  di tutte le 24 ore del giorno medio e  $T$  varrà dunque  $3600 \cdot 24 = 86400$ .

**Tabella 3.2.7–  $L_{Aeq}$  giornaliero,  $L_{Aeq}$  diurno,  $L_{Aeq}$  notturno del giorno medio**

$L_{Aeq}$ continuo dB(A)	$L_{Aeq}$ diurno dB(A)	$L_{Aeq}$ notturno dB(A)
67.8	69.3	59.6

Questi valori possono ora essere confrontati con i limiti massimi di immissione previsti dalla zonizzazione redatta dal comune di Carrara, per la quale via del Cavatore è collocata in classe II e pertanto i limiti massimi a cui dovrebbe tendere sono 55 dB(A) per il giorno e 45 dB(A) per la notte. Come si può rilevare dalla tab. 3.2.7 i valori rilevati sia del  $L_{Aeq}$  diurno che del  $L_{Aeq}$  notturno superano di quasi 15 dB(A) i valori limite di immissione e di conseguenza saranno anche maggiori dei valori di qualità che per la classe II dovrebbero essere ricondotti a 52 dB(A) per il giorno e 42 dB(A) per la notte.

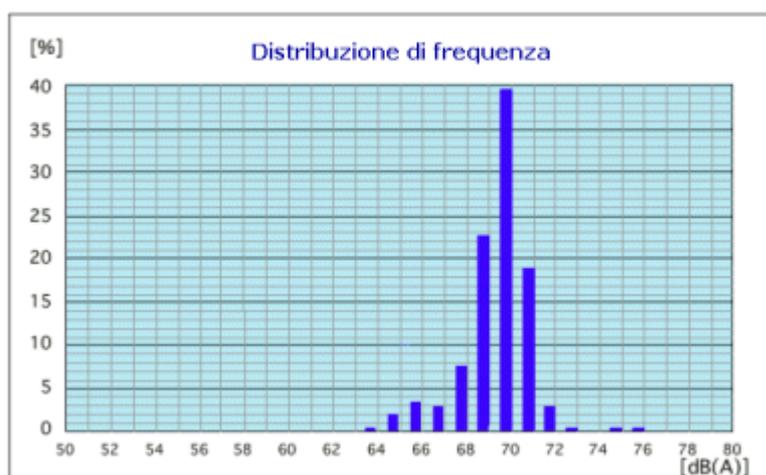
### 3.3 Analisi statistica

#### 3.3.1 Generalità

L'analisi statistica si applica quando si ha a che fare con un rumore variabile nel tempo; in tal caso il solo valore del livello equivalente non è in grado di dirti se il rumore è variato o è stato circa costante durante il periodo di analisi. [12]

Vi è un primo tipo di analisi statistica il quale consiste nel dividere l'intero campo  $\Delta L$  dei valori assunti dal livello sonoro nel tempo di osservazione in un numero  $n$  di fasce di uguale ampiezza  $\Delta L/n$  (ad esempio 5 dB) e determinare così le percentuali di tempo di osservazione nelle quali il livello risulta compreso in ciascuna fascia.

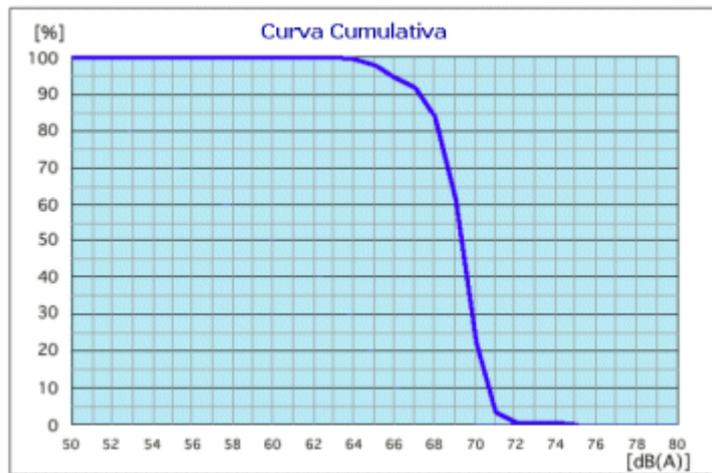
Con i dati così ottenuti si può costruire l'istogramma della distribuzione di probabilità che rappresenta in ascissa il livello sonoro ed in ordinata la percentuale del tempo di misura in cui è stato presente quel determinato livello sonoro.



**Grafico 3.3.1.1 Distribuzione di frequenza**

Il secondo tipo di analisi determina, invece, la percentuale del tempo totale di osservazione nella quale viene superato un valore assegnato del livello sonoro.

L'analisi statistica cumulativa si ottiene facendo l'integrale della curva della distribuzione statistica:



**Grafico 3.3.1.2 Curva cumulativa**

In pratica questa curva rappresenta la percentuale di tempo in cui si è superato un certo livello sonoro. [2]

In questa analisi vengono introdotti un nuovo tipo di livelli sonori: i livelli percentili. Essi sono definiti come i livelli che vengono superati per una frazione assegnata del tempo, ossia un certo  $L_N$  è quel livello che viene superato per l'N% del tempo di osservazione.

I valori percentili classici sono:

$L_1$ ,  $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{90}$ ,  $L_{95}$ ,  $L_{99}$

In particolare, il livello  $L_1$ , che viene superato solo l'1% del tempo, è impiegato come indice dei livelli di picco del segnale, mentre  $L_{95}$  viene utilizzato per caratterizzare la rumorosità di fondo ambientale; la differenza  $L_{10} - L_{90}$ , denominata clima acustico, viene assunta come rappresentativa della entità delle fluttuazioni di un dato rumore, ossia se si ottiene, ad esempio,  $L_{10} = 60$  e  $L_{90} = 61$  questo significa che il clima acustico è poco variabile, mentre se  $L_{10} = 30$  e  $L_{90} = 90$  significa che il clima acustico è estremamente variabile.

L'analisi statistica ha senso solo se si considerano i valori esponenziali RMS con costante di tempo FAST, cioè la costante di tempo RC è uguale a 0,125 secondi, questo perché tale valore corrisponde circa al tempo di risposta dell'udito umano.

L'analisi statistica è importante in quanto ciò che disturba maggiormente l'udito umano è il rumore fortemente variabile. Il nostro sistema uditivo, infatti, è in grado di abituarsi al rumore, perciò se il rumore è stabile, anche se forte, esso lo compensa e vi

può resistere. Invece un rumore fortemente variabile è estremamente dannoso in quanto non da tempo al nostro sistema uditivo di adattarsi alle sue variazioni. [12]

### 3.3.2 Applicazione ai cinque giorni monitorati

Dai dati dei cinque giorni di rilevazioni continue il fonometro integratore ha fornito i seguenti livelli statistici: L<sub>1</sub>, L<sub>5</sub>, L<sub>10</sub>, L<sub>50</sub>, L<sub>90</sub>, L<sub>95</sub>, L<sub>99</sub>.

Nella tabella seguente sono riportati tali valori per ciascun giorno di monitoraggio:

**Tabella 3.3.2.1 Livelli statistici**

martedì		mercoledì		giovedì		sabato		domenica	
L <sub>1</sub>	79.0	L <sub>1</sub>	79.7	L <sub>1</sub>	79.3	L <sub>1</sub>	75.4	L <sub>1</sub>	78.0
L <sub>5</sub>	74.6	L <sub>5</sub>	75.1	L <sub>5</sub>	75.0	L <sub>5</sub>	68.7	L <sub>5</sub>	72.6
L <sub>10</sub>	71.1	L <sub>10</sub>	71.8	L <sub>10</sub>	71.6	L <sub>10</sub>	66.2	L <sub>10</sub>	69.1
L <sub>50</sub>	60.9	L <sub>50</sub>	61.4	L <sub>50</sub>	61.4	L <sub>50</sub>	56.6	L <sub>50</sub>	57.1
L <sub>90</sub>	35.0	L <sub>90</sub>	35.3	L <sub>90</sub>	34.7	L <sub>90</sub>	36.5	L <sub>90</sub>	33.1
L <sub>95</sub>	34.5	L <sub>95</sub>	34.8	L <sub>95</sub>	33.6	L <sub>95</sub>	34.1	L <sub>95</sub>	32.3
L <sub>99</sub>	34.1	L <sub>99</sub>	34.4	L <sub>99</sub>	32.8	L <sub>99</sub>	32.8	L <sub>99</sub>	31.9

Il livello L<sub>1</sub>, rappresentativo dei picchi di livello del segnale, ha il suo valore massimo nella rilevazione di mercoledì, giorno feriale, mentre L<sub>95</sub>, rappresentativo del rumore di fondo si assesta attorno ai valori di 32-34 dB.

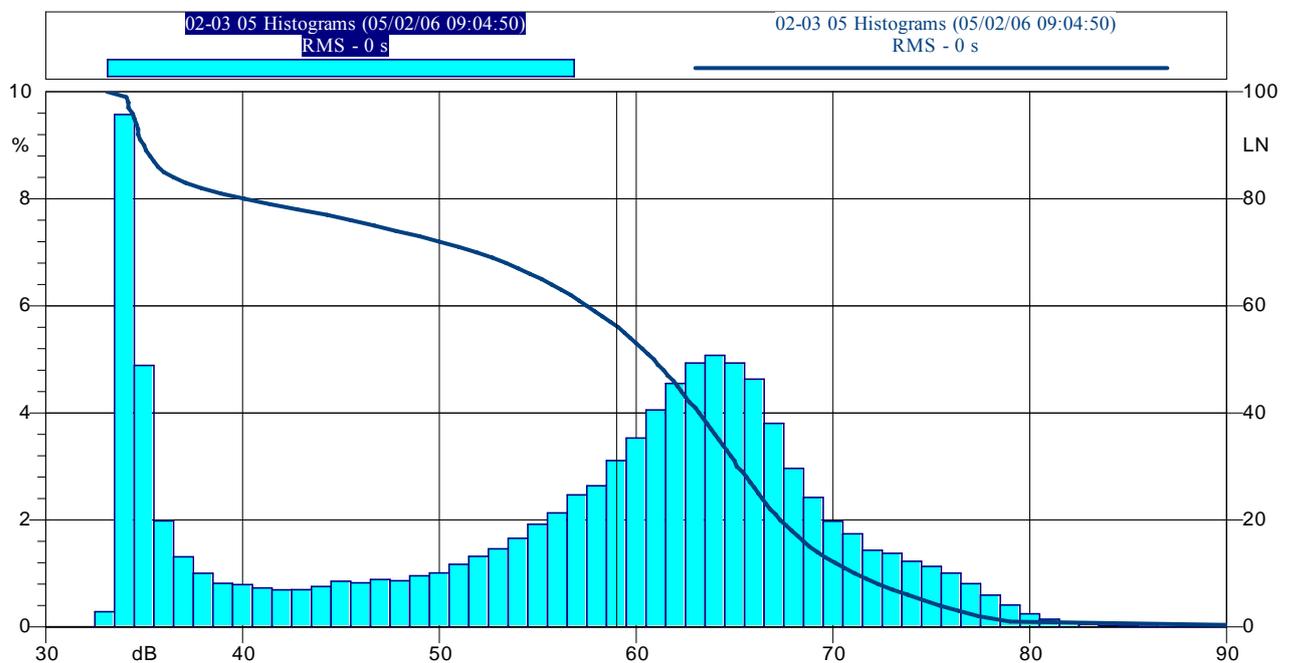
Inoltre il clima acustico, indice delle fluttuazioni di un dato rumore e rappresentato dalla differenza L<sub>10</sub>- L<sub>90</sub>, nel caso in esame da valori piuttosto elevati, risulta infatti:

**Tabella 3.3.2.2 Indice delle fluttuazioni del fenomeno sonoro**

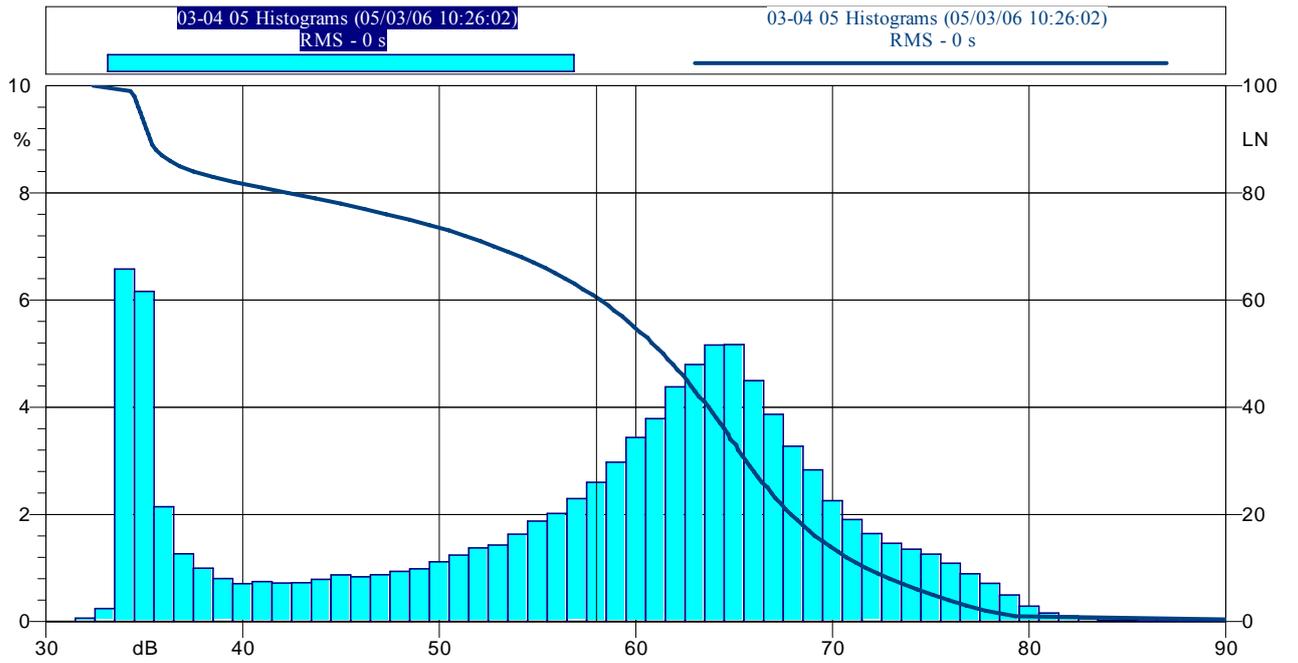
martedì		mercoledì		giovedì		sabato		domenica	
L <sub>10</sub> - L <sub>90</sub>	36.1	L <sub>10</sub> - L <sub>90</sub>	36.5	L <sub>10</sub> - L <sub>90</sub>	36.9	L <sub>10</sub> - L <sub>90</sub>	29.7	L <sub>10</sub> - L <sub>90</sub>	36.0

dove il valore più basso si ha nella giornata di sabato, mentre quello più elevato nel monitoraggio di giovedì, a conferma che i giorni feriali risultano più rumorosi dei giorni festivi.

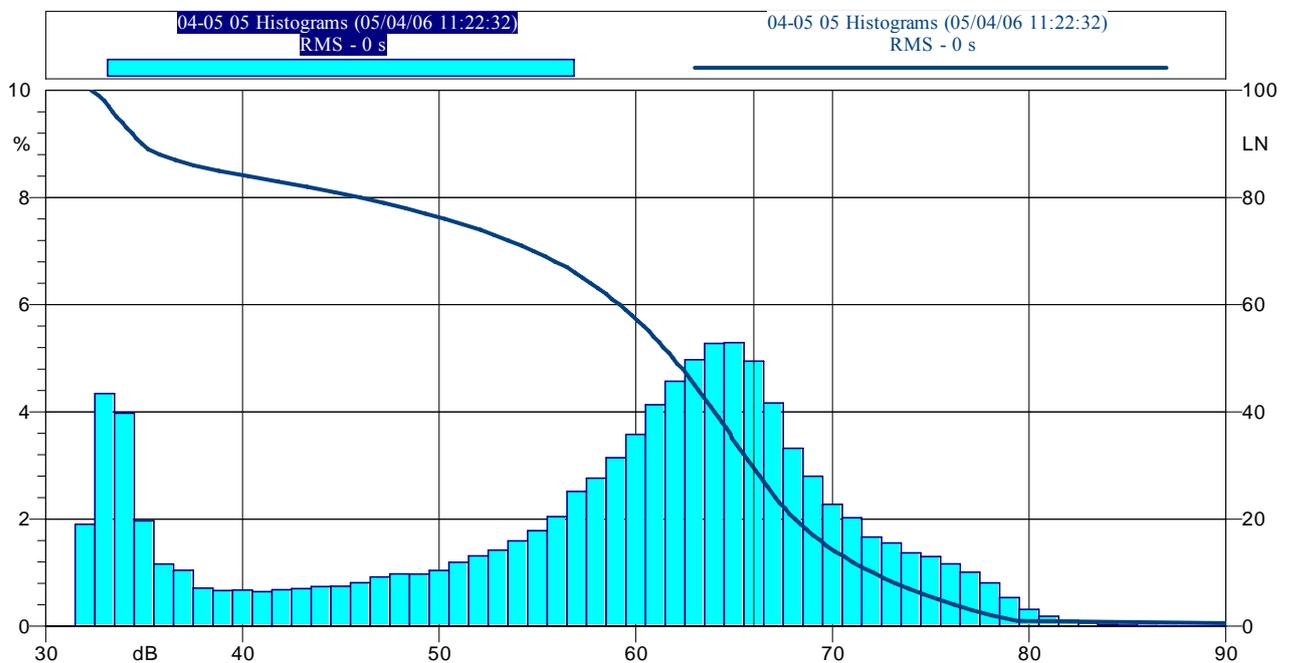
Di seguito vengono riportati i grafici rappresentativi dell'istogramma della distribuzione di probabilità e la funzione di distribuzione cumulativa relativa a ciascun monitoraggio:



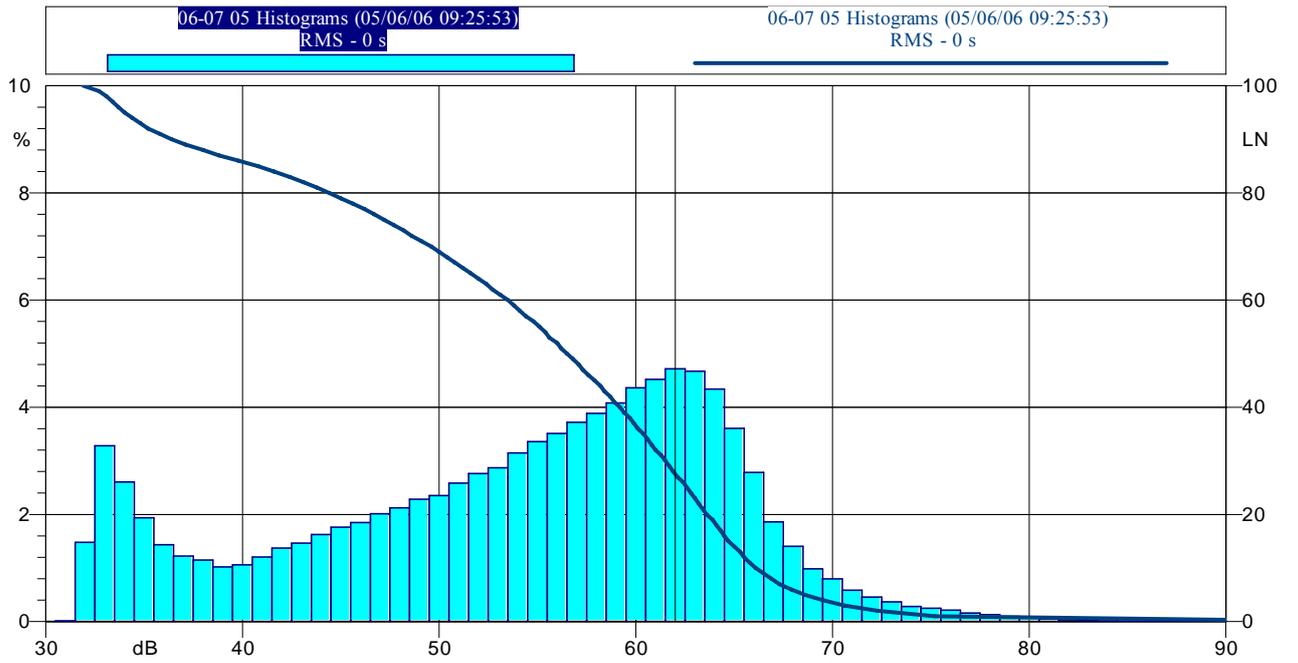
**Grafico 3.3.2.1**



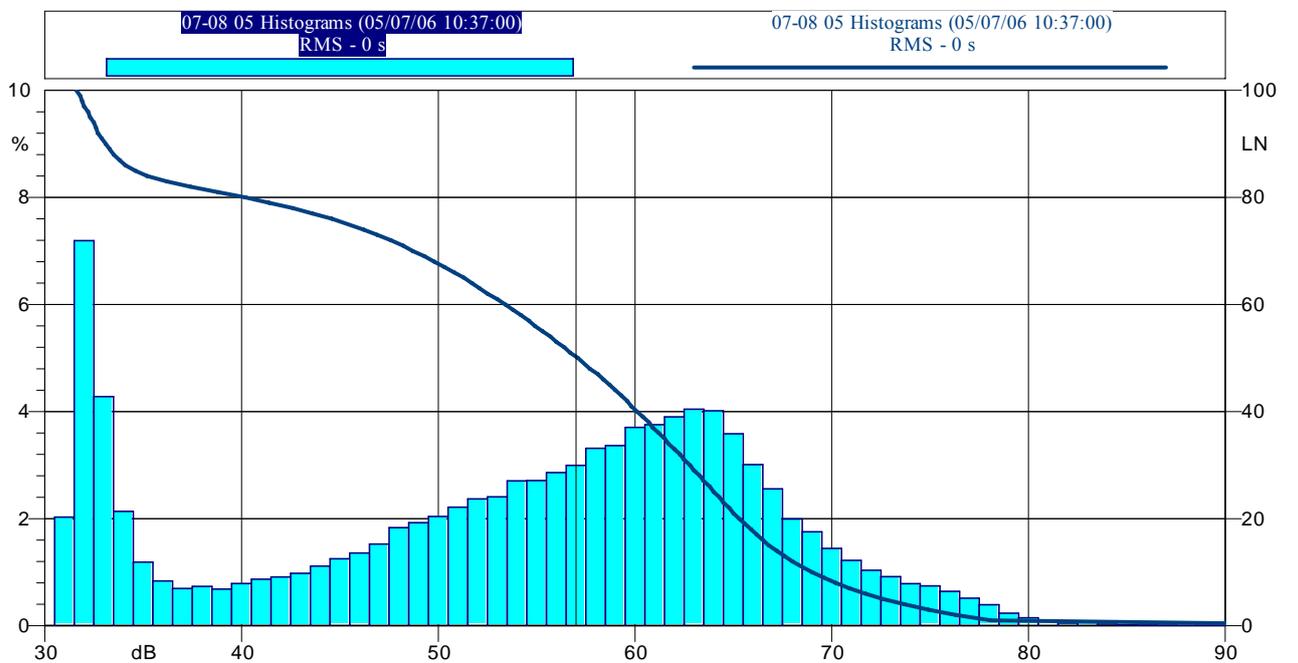
**Grafico 3.3.2.2**



**Grafico 3.3.2.3**



**Grafico 3.3.2.4**



**Grafico 3.3.2.5**

Oltre ai parametri fino ad ora riportati, al fine di valutare il disturbo prodotto dal traffico autoveicolare viene impiegato anche un altro indice di valutazione, il TNI, il quale combina i livelli statistici relativi al rumore di fondo L<sub>90</sub> e al clima di rumore L<sub>10</sub>- L<sub>90</sub> attraverso la relazione:

$$\text{TNI} = 4 (\text{L}_{10} - \text{L}_{90}) + \text{L}_{90} - 30$$

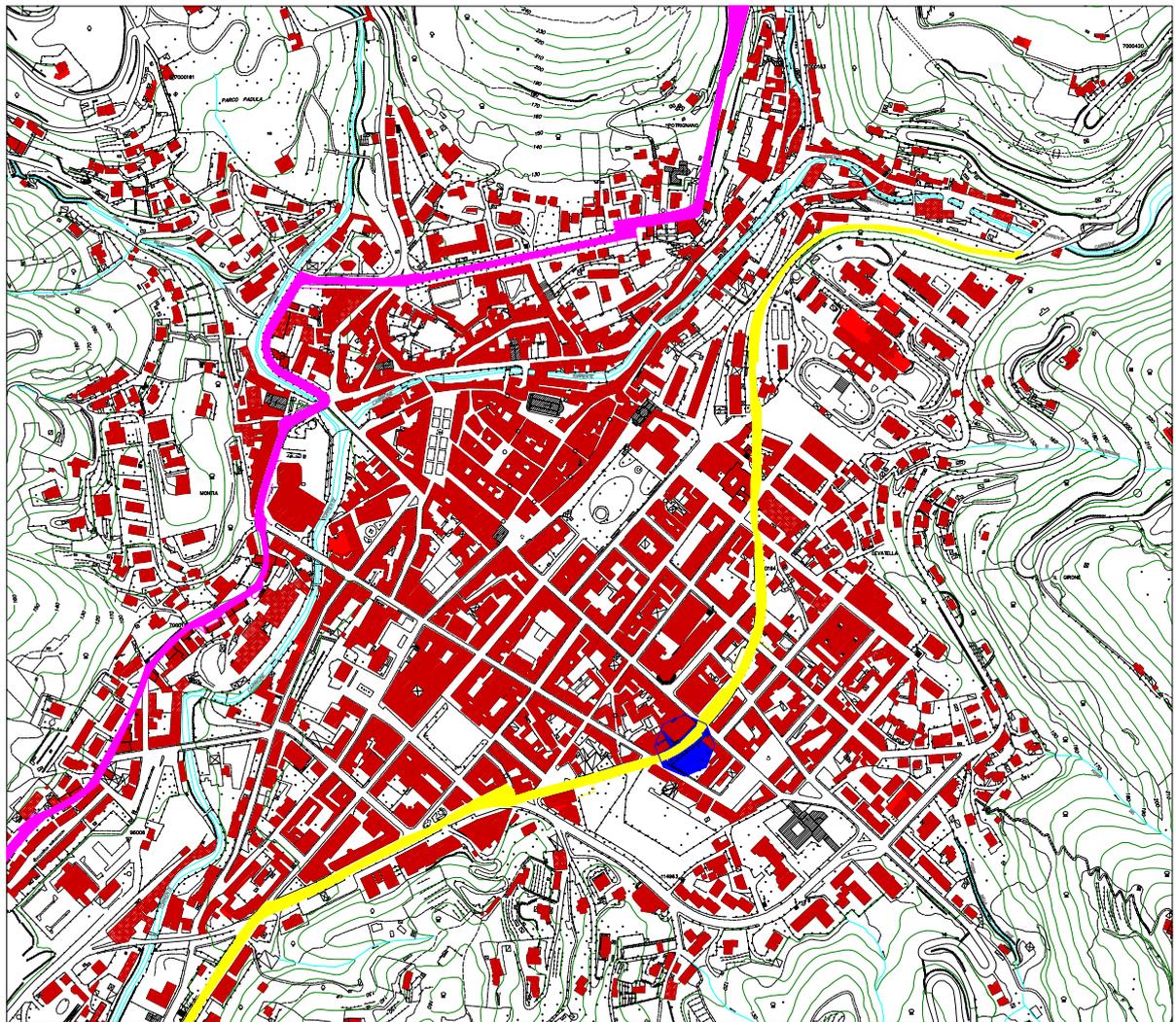
Con riferimento ai livelli statistici relativi ai cinque giorni monitorati si hanno i seguenti valori di TNI :

<b>martedì</b>		<b>mercoledì</b>		<b>giovedì</b>		<b>sabato</b>		<b>domenica</b>	
<b>TNI</b>	149.4	<b>TNI</b>	151.3	<b>TNI</b>	152.3	<b>TNI</b>	125.3	<b>TNI</b>	147.1

### 3.4 Caratterizzazione delle sorgenti sonore

La caratterizzazione delle sorgenti sonore consiste nella registrazione di passaggi di veicoli isolati con l'ausilio del fonometro integratore in modo tale da poter caratterizzare il contributo al rumore da traffico auto-veicolare urbano delle singole sorgenti sonore.

**Fig. 3.4 Aero-foto Carrara**



#### LEGENDA

-  Percorso dei camion in ingresso nella città
-  Percorso dei camion in uscita dalla città
-  Zona di monitoraggio

Le misure sono state effettuate il 12 maggio 2006 intorno alle ore 14.00, in via del Cavatore, la stessa strada monitorata per le 24 ore, ma in un tratto caratterizzato da traffico limitato alle sole corriere in un senso di marcia, in modo tale da avere tutte le componenti di traffico caratterizzanti tale strada ma da poterle individuare singolarmente.

Per effettuare tali misure il fonometro è stato posizionato a circa 1 m di distanza dalla corsia e a 1.5 m di altezza da terra; ciascuna misurazione è stata avviata all'avvistamento del veicolo e arrestata al suo passaggio.

Attraverso il programma di supporto del fonometro, per ogni misurazione, effettuata con costante di tempo fast, si è ottenuta la time history che è rappresentativa dell'evoluzione temporale della singola sorgente. Dall'osservazione di tale grafico, che riporta in ascissa il tempo in secondi di durata dell'evento e in ordinata i dB(A), è possibile riconoscere la fase di avvicinamento, di transito davanti al microfono e di allontanamento del veicolo, infatti la linea in blu rappresenta il livello sonoro fluttuante nel tempo mentre la linea in rosso è indice del livello continuo equivalente ottenuto come media sull'intero periodo di registrazione.

Oltre alla Time History è riportato lo spettro in frequenza in banda di un terzo di ottava, con sulle ascisse le frequenze in hertz e sulle ordinate il livello sonoro in dB. In tale grafico il cursore è posizionato sulla banda cui corrisponde il livello sonoro massimo.

I passaggi dei singoli veicoli registrati sono stati 87; nelle seguenti tabelle, una per ogni categoria di veicoli, sono riportati la durata dell'evento, il  $L_{Aeq}$ , il SEL e la frequenza cui corrisponde il massimo livello sonoro. Inoltre, dato che i vari tipi di veicoli sono transitati in successione casuale, sono ordinati in numeri progressivi in base all'ordine di rilevazione, mentre il numero che individua la misura è quello che il fonometro assegna progressivamente a ciascuna acquisizione.

**Tabella 3.4.1**

SORGENTE: AUTO					
n°progressivo	misura	durata (sec)	Leq dB(A)	(Hz)	SEL dB(A)
1	2	5,4	66,6	63	73,9
2	3	6,1	66,1	63	74,0
3	4	5,4	68,7	63	76,0
4	5	4,6	69,5	63	76,1
5	8	5,9	68,4	80	76,1
6	11	4,6	70,7	63	77,4
7	12	7,9	66,6	63	75,6
8	13	6,1	69,2	63	77,0
9	15	4,4	72,7	80	79,2
10	22	7,1	69,0	63	77,5
11	23	3,9	72,8	50	78,6
12	25	7,6	68,1	50	76,9
13	28	6,4	68,5	50	76,5
14	31	4,4	71,4	100	77,9
15	34	4,1	70,2	63	76,4
16	35	3,6	71,4	63	77,0
17	38	2,9	70,4	160	75,0
18	40	6,4	66,8	63	74,8
19	42	5,4	65,0	50	72,3
20	46	4,6	69,1	63	75,8
21	48	4,6	72,6	80	79,3
22	53	5,1	71,4	50	78,5
23	55	2,1	70,3	80	73,6
24	59	5,6	66,4	20	73,9
25	63	4,9	69,6	63	76,5
26	64	3,6	64,8	31.5	70,4

27	68	5,6	62,1	31.5	69,6
28	69	3,6	67,5	63	73,1
29	80	6,6	58,4	25	66,6

**Tabella 3.4.2**

SORGENTE: CAMION					
n° progressivo	misura	durata (sec)	Leq dB(A)	(Hz)	SEL dB(A)
1	1	7,6	80,8	63	89,6
2	7	11,6	78,3	50	89,0
3	16	7,6	73,8	40	82,6
4	21	4,9	76,1	31.5	83,0
5	30	5,6	77,6	50	85,1
6	36	10,6	83,1	500	93,3
7	39	7,6	73,8	63	82,6
8	41	8,6	75,6	50	84,9
9	44	9,9	76,4	63	86,4
10	51	7,1	76,1	63	84,7
11	60	10,4	76,5	31.5	86,6
12	61	6,4	78,0	40	86,0
13	66	9,1	75,3	40	84,9
14	67	8,1	77,8	80	86,9
15	70	6,1	81,7	50	89,6
16	71	8,6	79,1	20	88,5
17	72	7,1	75,1	31.5	83,6
18	73	6,4	83,3	50	91,3
19	77	5,1	77,8	31.5	84,9
20	83	6,4	79,2	31.5	87,2
21	85	7,1	81,4	40	89,9
22	87	7,6	85,7	50	94,5

**Tabella 3.4.3**

SORGENTE: FURGONI					
n°progressivo	misura	durata (sec)	Leq dB(A)	(Hz)	SEL dB(A)
1	9	6,4	67,5	100	75,6
2	14	6,1	69,2	63	77,0
3	29	3,9	75,1	63	81,0
4	37	5,6	71,5	50	79,0
5	62	8,1	73,5	63	82,6
6	78	8,9	67,6	31.5	77,1
7	86	7,1	73,0	63	81,5

**Tabella 3.4.4**

SORGENTE: AUTOCARRI					
n°progressivo	misura	durata (sec)	Leq dB(A)	(Hz)	SEL dB(A)
1	6	4,4	74,8	63	81,2
2	19	6,4	76,9	200	84,9
3	45	3,1	72,6	80	77,5
4	49	5,1	71,3	63	78,4
5	52	3,9	77,7	63	83,6
6	54	6,1	72,9	50	80,8
7	65	6,1	69,4	63	77,2
8	75	3,6	72,5	70	78,1
9	79	6,1	74,2	100	82,0

**Tabella 3.4.5**

SORGENTE: AUTOBUS					
n°progressivo	misura	durata (sec)	Leq dB(A)	(Hz)	SEL dB(A)
1	10	7,4	88,5	80	97,2
2	20	7,6	84,6	80	93,4
3	26	6,9	70,6	63	78,9
4	27	5,9	76,2	80	83,9
5	33	5,4	76,2	160	83,5
6	38	2,9	70,4	50	75,0
7	50	3,6	78,8	200	84,4
8	56	10,9	72,2	50	82,5
9	57	9,6	75,9	50	85,8
10	58	6,4	77,8	50	85,9

**Tabella 3.4.6**

SORGENTE: CICLOMOTORI					
n°progressivo	misura	durata (sec)	Leq dB(A)	(Hz)	SEL dB(A)
1	17	3,9	72,5	160	78,4
2	18	4,6	70,4	63	77,1
3	24	3,1	71,5	50	76,5
4	43	3,9	71,5	50	77,3
5	47	2,6	73,6	63	77,8
6	74	3,4	74,8	500	80,1
7	76	5,6	70,1	80	77,6
8	81	3,6	65,8	31,5	71,4
9	82	4,4	64,5	31,5	70,9
10	84	2,4	68,2	40	71,9

I livelli equivalenti sono quelli forniti dal fonometro e si ritrovano sulla tabella “valori numerici” associata alla Time History, espressi in dB(A).

Le frequenze sono relative alla banda contenente il massimo livello sonoro, in scala lineare (dB), per ciascun passaggio.

Il SEL è stato calcolato con la formula :

$$SEL = Leq + 10 \log T$$

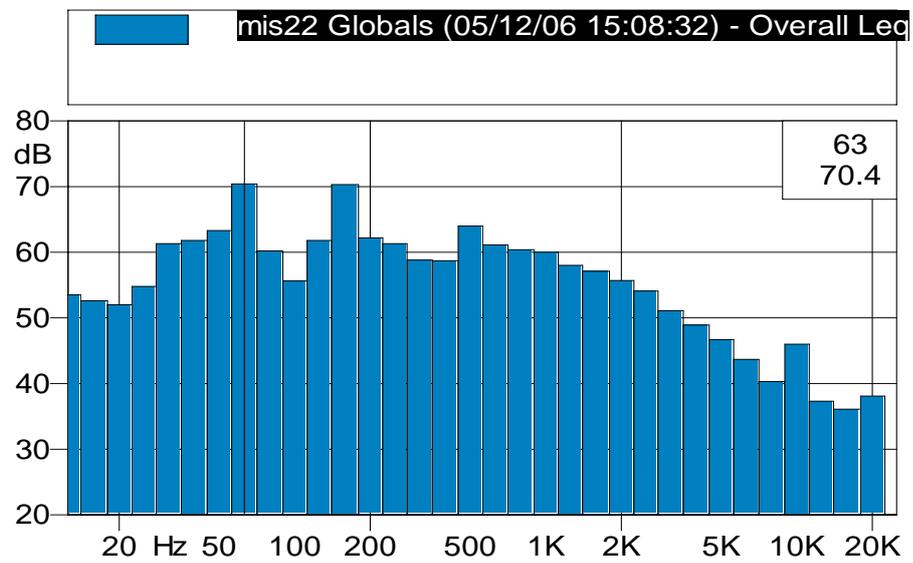
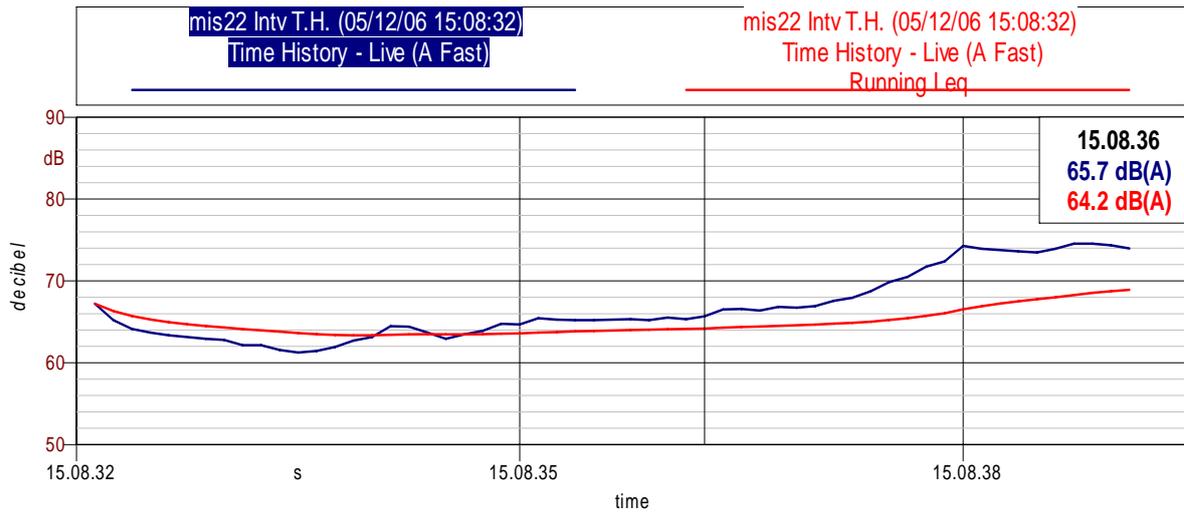
dove il  $Leq$  è quello relativo al singolo evento e riportato in tabella, mentre il tempo è quello corrispondente al passaggio del veicolo espresso in secondi.

Eseguendo una media aritmetica sui dati appena rilevati ( $Leq$ , tempi e frequenze) e scartando il 10% dei campioni, di cui un 5% dei valori massimi e un 5% dei valori minimi registrati per ciascuna categoria di veicoli, si è attribuito, ad ogni categoria, un  $Leq$  medio, una frequenza caratteristica fra quelle contenenti il massimo di livello sonoro in dB per singolo passaggio, un SEL medio calcolato con l’ausilio della precedente formula in cui è stato sostituito il  $Leq$  medio e un tempo medio rappresentativo della durata dell’evento per categoria, espresso in secondi.

I valori medi così ricavati sono riportati nella seguente tabella mentre di seguito, a titolo di esempio, è stato riportato un campione per ogni tipo di sorgente sonora di cui è rappresentato il profilo sonoro nel tempo e lo spettro in frequenza.

Tabella 3.4.7

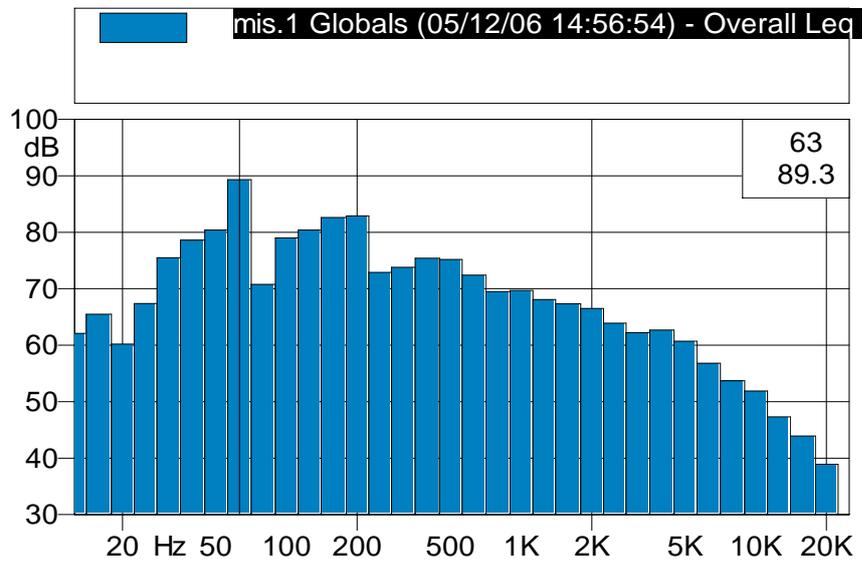
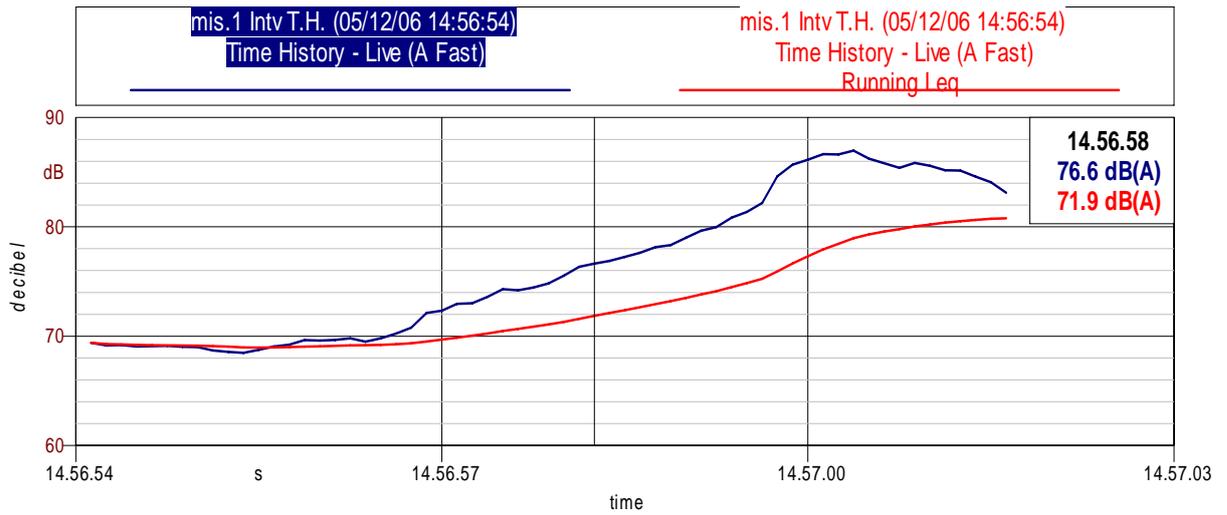
categoria	durata media (sec)	Leq medio dB(A)	range frequenze massime(Hz)	media frequenze massime	SEL medio dB(A)
Auto	5,1	68,6	50-80	60,7	75,5
Camion	7,7	78,2	40-80	47,5	86,9
Furgoni	6,6	71,1	50-63	61,9	79,1
Autocarri	5,0	73,6	63-100	83,6	80,4
Autobus	6,7	77,1	50-160	86,3	85,1
Ciclomotori	3,8	70,3	40-160	106,9	75,9



**Figura 3.4.1 – sorgente auto**



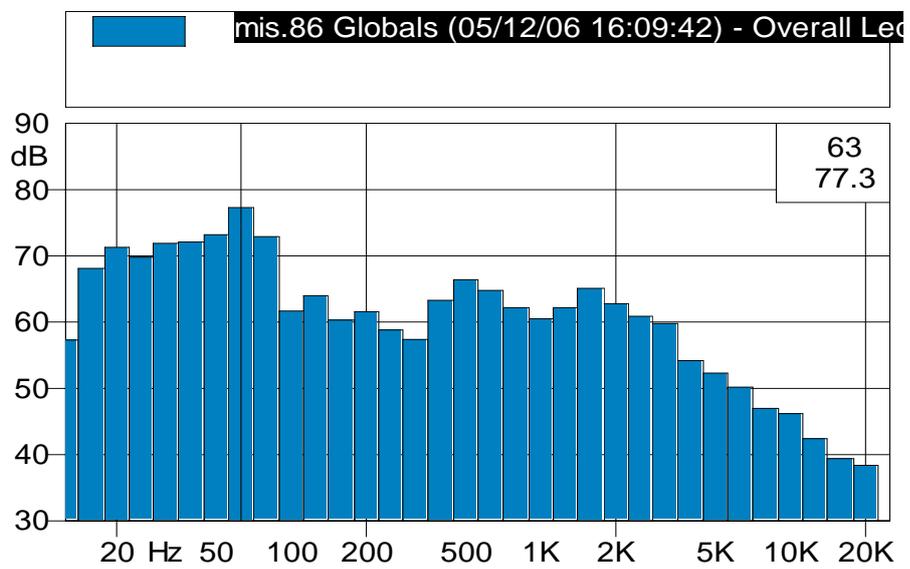
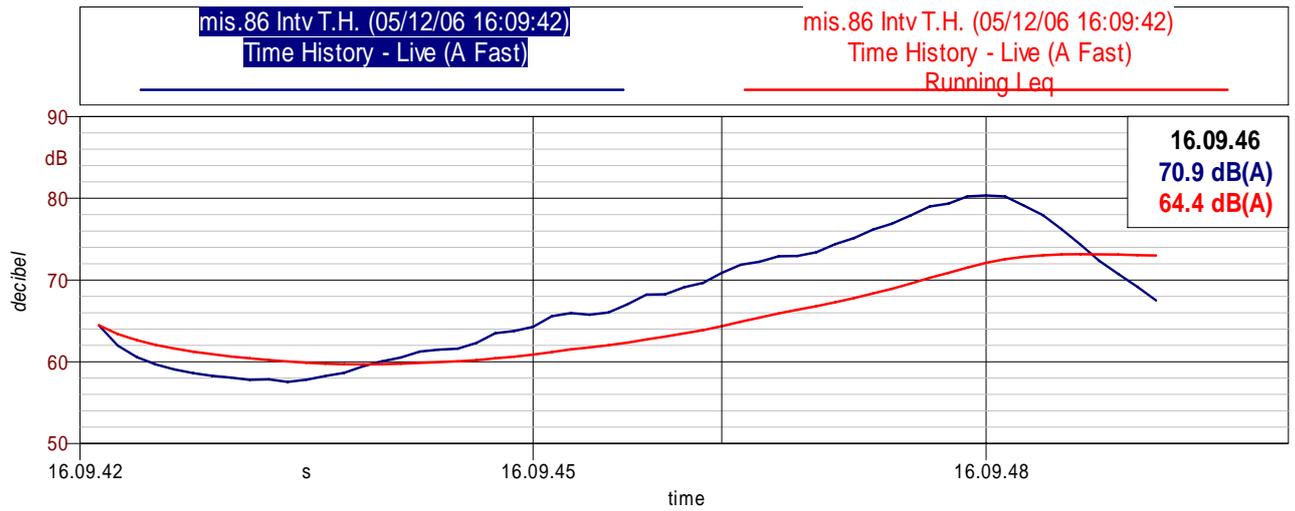
**Foto 1- auto**



**Figura 3.4.2 – sorgente camion**



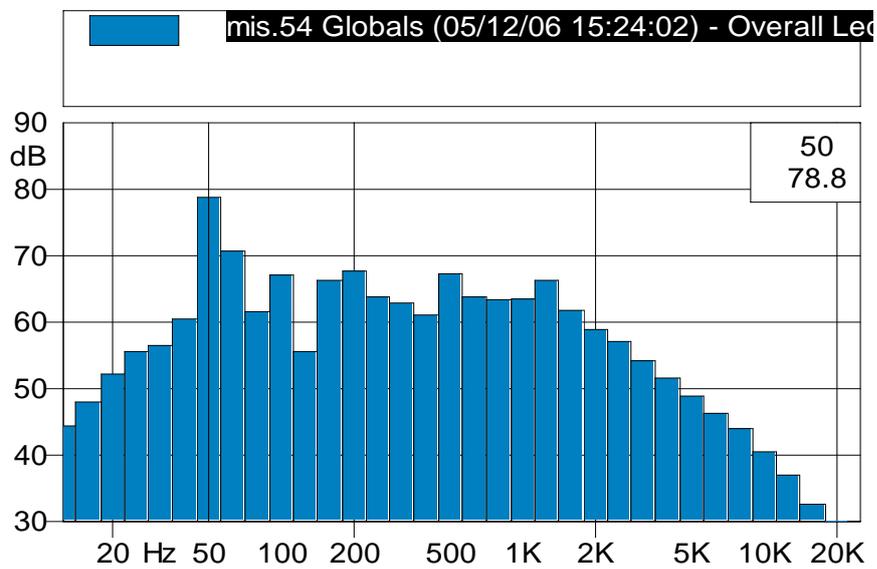
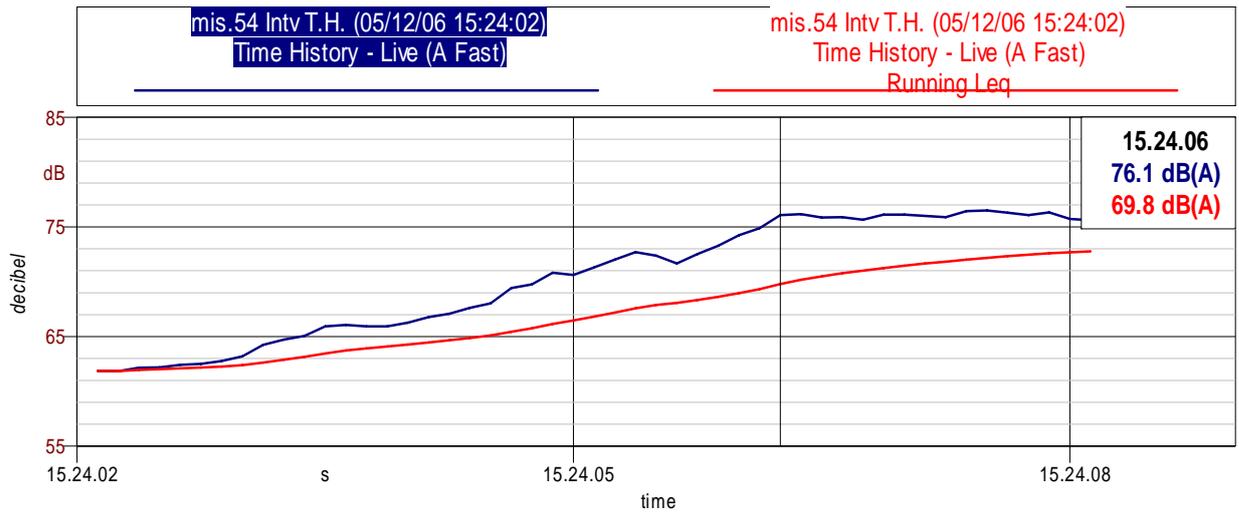
**Foto 2- camion**



**Figura 3.4.3 – sorgente furgoni**



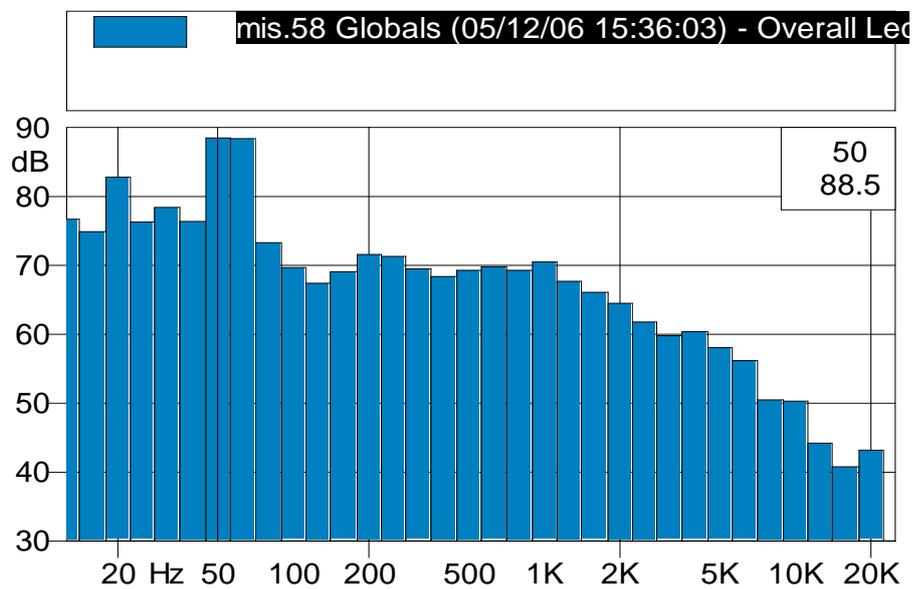
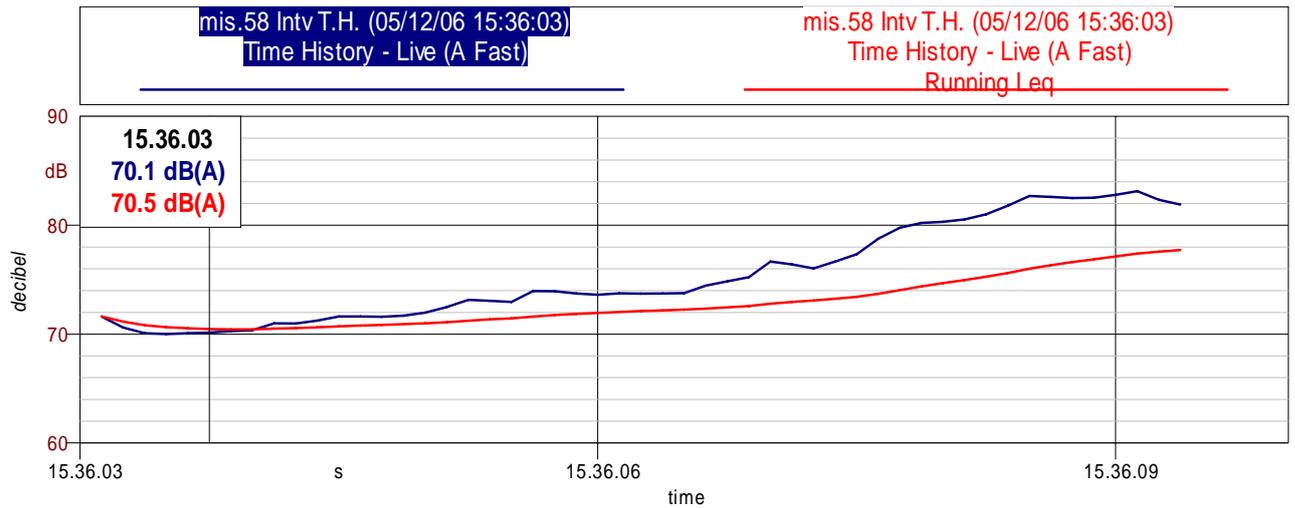
**Foto 3 – furgone**



**Figura 3.4.4 –sorgente autocarri**



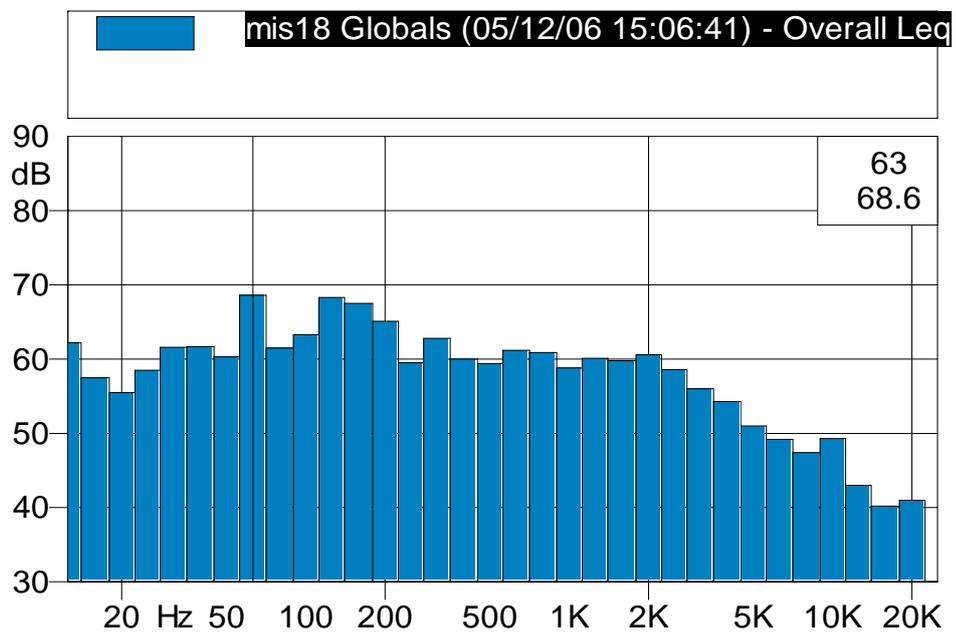
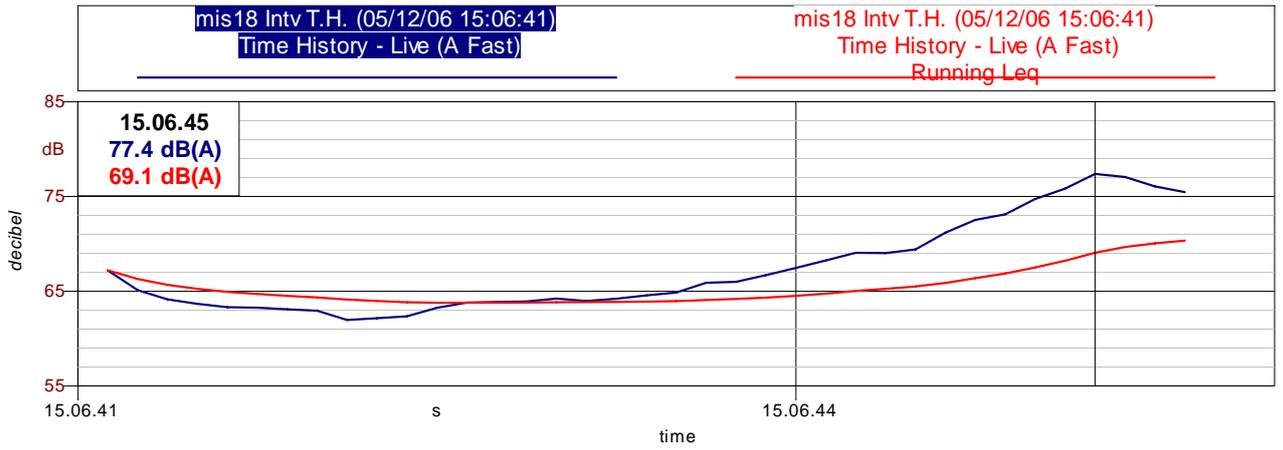
**Foto 4 – autocarro**



**Figura 3.4.5 – sorgente autobus**



**Foto 5 – autobus**



**Figura 3.4.6 – sorgente ciclomotori**

### 3.4.1 Analisi spettrale

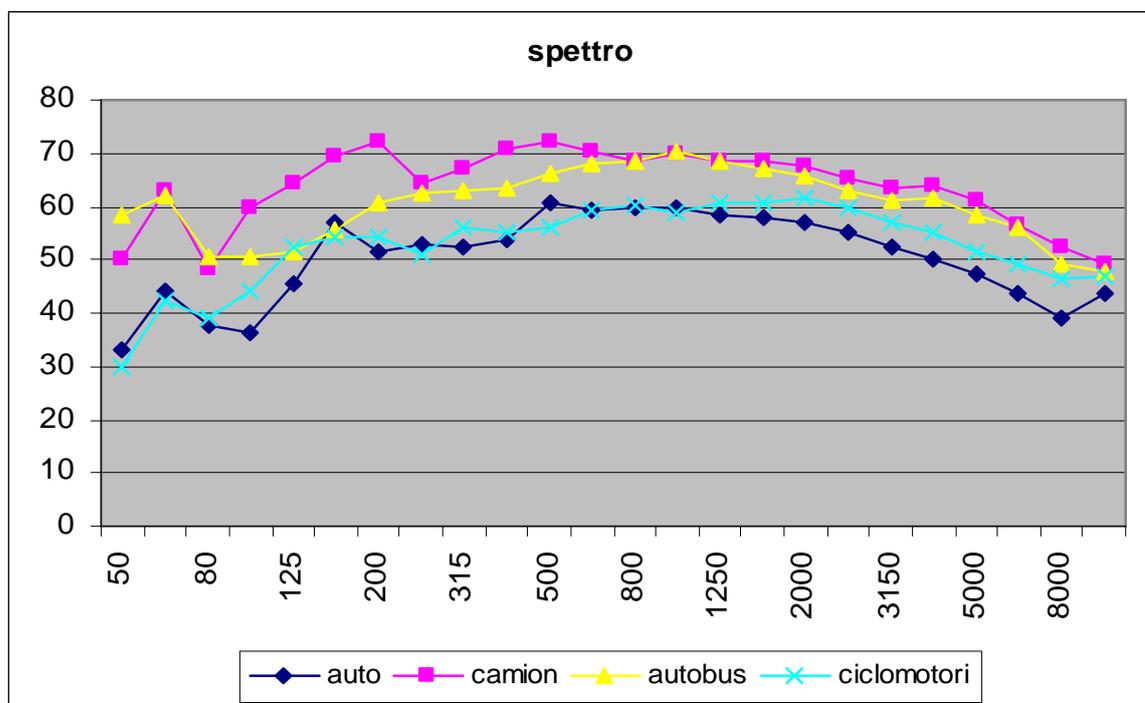
Attraverso i campioni scelti per ogni tipo di sorgente sonora, di cui alle pagine precedenti è stato riportato l'andamento sonoro nel tempo e lo spettro in frequenza, si è proceduto a costruire lo spettro con riferimento particolare ai mezzi pesanti (camion e autobus), alle auto e ai ciclomotori.

Tali campioni sono stati scelti, per ciascuna categoria, come più vicini in termini di  $L_{Aeq, SEL}$ , range di frequenza ai valori caratterizzanti ciascuna classe.

Di seguito si riporta lo spettro, per le quattro categorie di veicoli, costruito mettendo, in ascissa, tutte le bande di frequenze di un terzo di ottava comprese fra 50 e 10000 Hz e in ordinata livello sonoro, opportunamente pesato in modo da riportarlo in scala ponderata A, competente a ciascuna banda.

Scopo dell'indagine è svolgere un'analisi volta a caratterizzare il rumore emesso dalle singole sorgenti sonore dal punto di vista della composizione spettrale.

**Grafico 3.4.1.1 – spettro in bande di 1/3 di ottava per le quattro categorie**

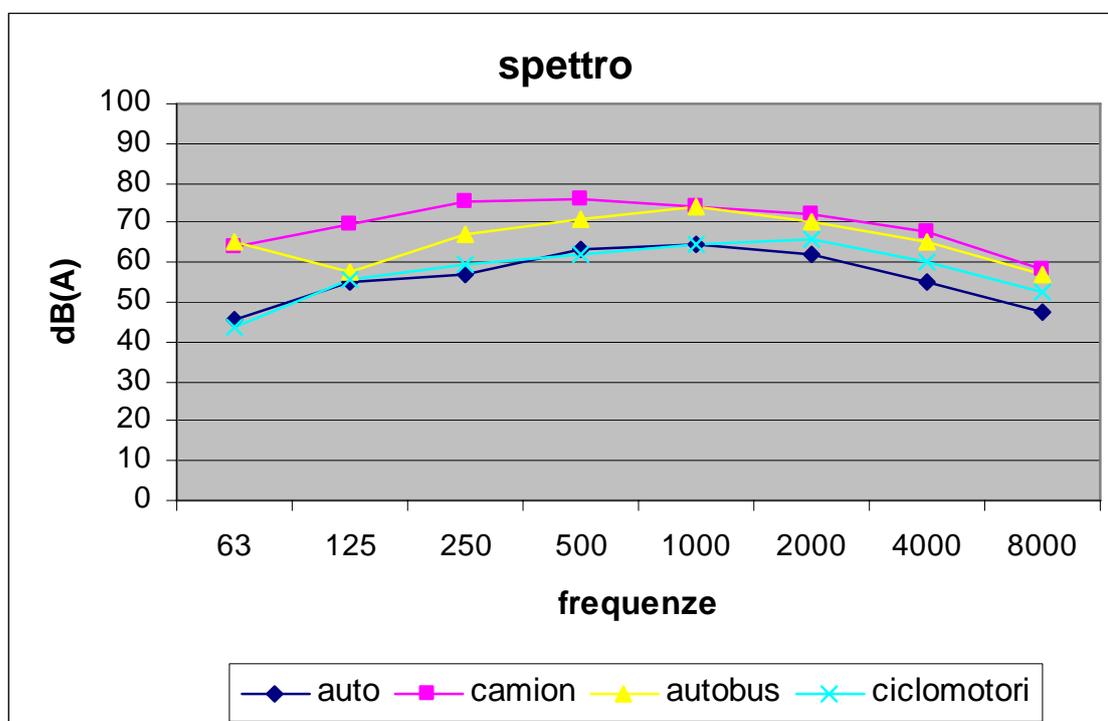


Dallo spettro in bande di un terzo di ottava si può vedere che alle basse frequenze i livelli sonori più elevati competono ai camion e agli autobus; il fastidio che essi inducono infatti è aumentato dalla risonanza e dalle vibrazioni.

L'andamento dei livelli sonori degli autoveicoli e dei ciclomotori si mantiene quasi sempre al di sotto di quello dei mezzi pesanti, sia alle basse che alle alte frequenze, anche se, tra i 125 e i 200 Hz il livello sonoro degli autobus tende a coincidere con quello delle auto e dei ciclomotori.

Attraverso l'analisi delle componenti spettrali in bande di ottava, comprese nel campo di sensibilità dell'orecchio umano, di cui è riportato lo spettro seguente:

**Grafico 3.4.1.1 – spettro in bande di ottava per le quattro categorie**



è possibile notare che la differenza più elevata tra l'andamento del livello sonoro delle auto e quello dei mezzi pesanti si ha alle basse frequenze tra 125 e 500 Hz, dove la differenza fra livelli sonori si mantiene al di sopra dei 4 dB(A). Questo, unito al fatto che autobus e camion hanno un livello sonoro più elevato rispetto alle auto, spiega il motivo per cui l'orecchio umano percepisce come più fastidioso il rumore emesso da un mezzo pesante rispetto a quello di un autoveicolo.

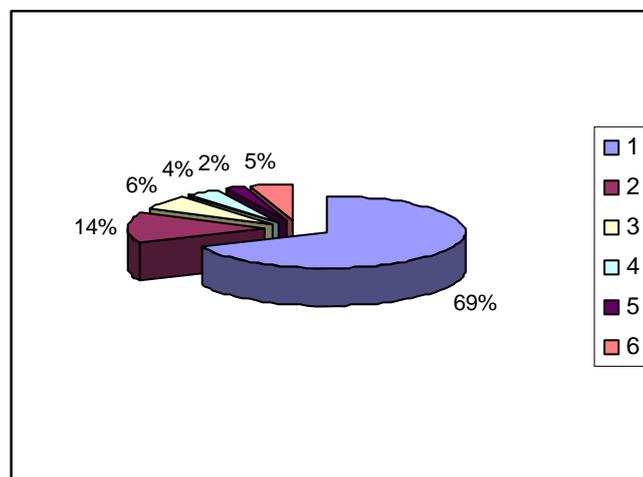
### ***3.4.2 Contributo delle sorgenti sonore al rumore ambientale***

La seguente elaborazione ha lo scopo di quantificare l'influenza di ciascuna sorgente sonora sul livello di rumore globale, attraverso un'analisi che ne individui l'incidenza massima per banda di frequenza e rapportando, quest'ultima, alla percentuale di veicoli (leggeri e pesanti) effettivamente transitanti sulla strada in esame .

A tale scopo per via del Cavatore ,è stato determinata la Capacità (veic/h), contando tutti i mezzi di locomozione transitati nell'ora di punta di un normale giorno feriale (ore 12-13 a.m. di giovedì 11 maggio 2006); i conteggi sono stati eseguiti con annotazione del singolo evento, distinto per categoria, su un foglio di lavoro.

Sul totale di transiti annotati, pari a 859 veicoli, sono state determinate le percentuali da attribuire alle diverse sorgenti sonore, riportate nel diagramma seguente:

**Grafico 3.4.2.1 – composizione veicolare del traffico per via del Cavatore**



1.auto    2.camion    3.furgoni  
4.autocarri    5.autobus    6.ciclomotori

Per la determinazione dei diversi contributi alle varie frequenze, si è fatto riferimento ad un veicolo tipo per ogni categoria, in particolare sono stati considerati gli spettri in frequenza precedentemente riportati, propri dei transiti che sono stati indicati come quelli più rappresentativi dei valori medi.

Da tali spettri è stato ricavato, per ogni frequenza, il livello sonoro equivalente continuo ( $L_{Aeq}$ ) e attraverso la :

$$SEL_{(f)} = L_{Aeq} + 10 \log \left( \frac{T_e}{t_0} \right)$$

è stato calcolato il SEL competente a ciascuna frequenza.

Il vantaggio di usare il SEL sta nel fatto che tutti i Livelli di Esposizione Sonora (SEL) misurati sono normalizzati ad un secondo e quindi risultano direttamente comparabili in termini di energia complessiva poiché indipendenti dalla durata dell'evento.

Dalla somma delle energie alla stessa frequenza fra le diverse categorie, si ricava il SEL totale relativo ad ogni banda:

$$SEL_{Tot(f)} = N_{auto} 10^{SEL(f,i)/10} + N_{autobus} 10^{SEL(f,i)/10} + N_{camion} 10^{SEL(f,i)/10} + N_{ciclomotori} 10^{SEL(f,i)/10} + N_{furgoni} 10^{SEL(f,i)/10} + N_{autocarri} 10^{SEL(f,i)/10}$$

Con la formula seguente:

$$\%SEL_{(f)} = (N_i * 10^{SEL(f,i)/10} / SEL_{Tot(f)}) 100$$

si è ripartito il SEL tra le varie frequenze tenendo conto del traffico effettivo.

Quanto fatto è stato sintetizzato nella tabella 3.4.1.1 seguente, organizzata per classi di veicolo. In essa è stato riportato il livello continuo equivalente relativo a ciascuna banda di frequenza per ogni tipo di sorgente sonora considerata, i corrispondenti SEL calcolati e quindi i SEL pesati attraverso la percentuale rappresentante l'effettivo numero di veicoli per ciascuna categoria:

Frequenze	Auto (dB)			Camion (dB)			Furgoni (dB)		
	L <sub>Aeq</sub>	SEL <sub>(f)</sub>	%SEL	L <sub>Aeq</sub>	SEL <sub>(f)</sub>	%SEL	L <sub>Aeq</sub>	SEL <sub>(f)</sub>	%SEL
12,50	53,5	62,0	10,9	62,1	70,9	17,4	57,3	65,8	2,4
16	52,6	61,1	7,4	65,5	74,3	31,7	68,1	76,6	23,6
20	52,0	60,5	2,2	60,2	69,0	3,2	71,3	79,8	17,1
25	54,8	63,3	8,2	67,4	76,2	33,1	69,8	78,3	23,5
31,5	61,3	69,8	8,7	75,5	84,3	61,8	71,9	80,4	11,0
40	61,8	70,3	7,4	78,6	87,4	78,6	72,1	80,6	7,2
50	63,3	71,8	4,0	80,4	89,2	45,8	73,2	81,7	3,6
63	70,4	78,3	4,3	89,3	98,1	84,2	77,3	85,8	2,2
80	60,2	68,7	16,8	70,8	79,6	42,7	72,9	81,4	28,3
100	55,6	64,1	1,9	79,0	87,8	93,9	61,7	70,2	0,7
125	61,8	70,3	5,8	80,4	89,2	91,6	64,0	72,5	0,9
160	70,3	78,8	20,7	82,6	91,4	77,7	60,3	68,8	0,2
200	62,2	70,7	3,6	82,9	91,7	94,1	61,6	70,1	0,3
250	61,3	69,8	18,1	72,9	81,7	57,8	58,8	67,3	0,9
315	58,8	67,3	11,6	73,8	82,6	80,8	57,4	65,9	0,8
400	58,7	67,2	8,3	75,4	84,2	86,0	63,3	71,8	2,2
500	64,0	72,5	23,3	75,2	84,0	67,7	66,4	74,9	3,7
630	61,1	69,6	22,0	72,4	81,2	65,4	64,8	73,3	4,7
800	60,4	68,9	30,1	69,5	78,3	54,1	62,2	70,7	4,1
1000	60,0	68,5	27,4	69,7	78,5	56,6	60,5	69,0	2,8
1250	58,0	66,5	23,7	68,1	76,9	53,7	62,2	70,7	5,6
1600	57,1	65,6	23,1	67,3	76,1	53,1	65,1	73,6	13,1
2000	55,7	64,2	21,8	66,5	75,3	57,8	62,8	71,3	10,1
2500	54,1	62,6	25,3	63,9	72,7	53,4	60,9	69,4	10,9
3150	51,1	59,6	20,1	62,2	71,0	57,1	59,8	68,3	13,4
4000	48,9	57,4	13,8	62,7	71,5	72,8	54,2	62,7	4,2
5000	46,7	55,2	13,4	60,7	69,5	74,1	52,3	60,8	4,4
6300	43,7	55,2	26,0	56,8	65,6	58,7	50,2	58,7	5,3
8000	40,3	48,8	14,5	53,7	62,5	69,8	47,0	55,5	6,1
10000	46,0	54,5	46,6	51,9	60,7	40,1	46,2	54,7	4,4
12500	37,3	45,8	25,9	47,3	56,1	57,2	42,4	50,9	7,6
16000	36,1	44,6	36,3	43,9	52,7	48,4	39,4	47,9	7,0
20000	38,1	46,6	64,5	38,9	47,7	17,1	38,4	46,9	6,2

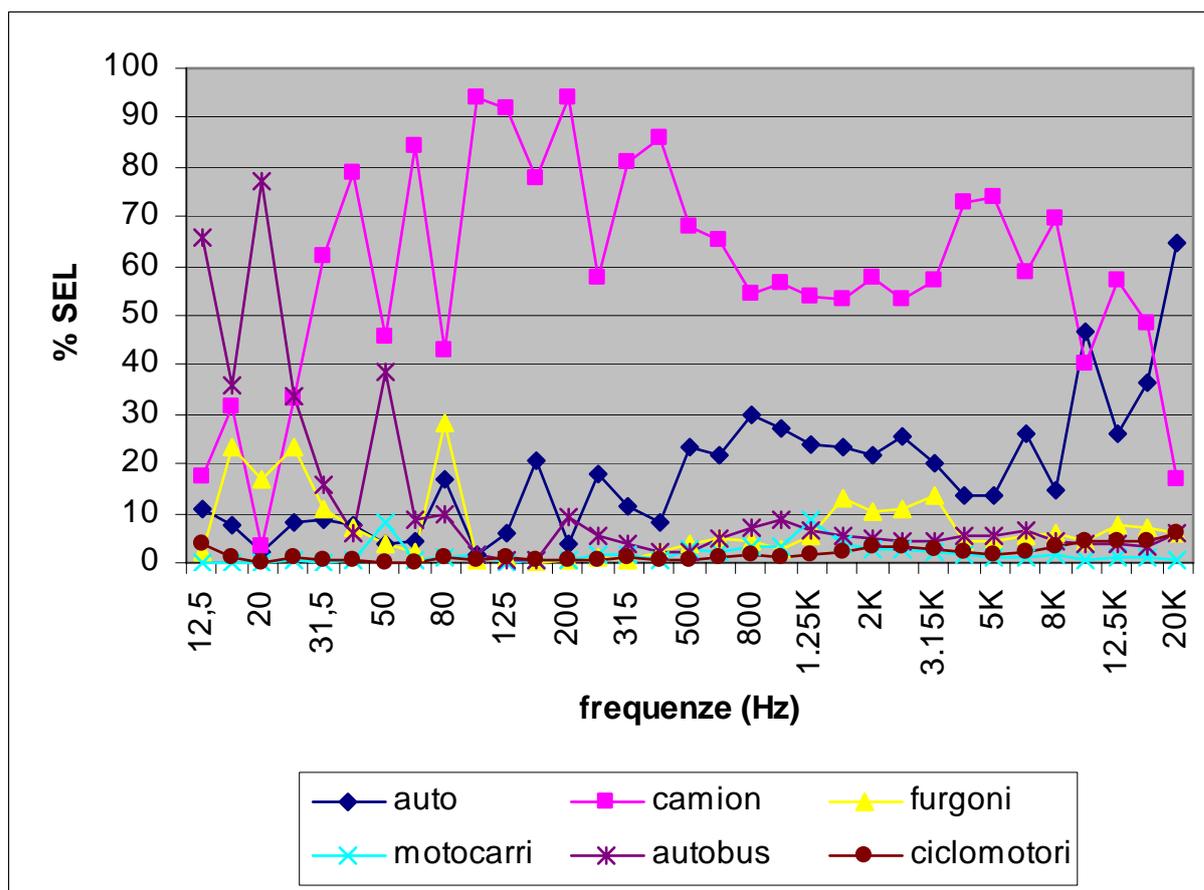
**Tabella 3.4.2.1 calcolo della % di SEL riferito allo spettro di traffico per auto, camion e furgoni**

Frequenze	Autocarri (dB)			Autobus (dB)			Ciclomotori (dB)			SEL <sub>Tot(f)</sub>
	L <sub>Aeq</sub>	SEL <sub>(f)</sub>	%SEL	L <sub>Aeq</sub>	SEL <sub>(f)</sub>	%SEL	L <sub>Aeq</sub>	SEL <sub>(f)</sub>	%SEL	
12,50	44,4	52,3	0,1	76,7	84,7	65,6	62,2	68,8	3,7	8552641510,40
16	48,0	55,9	0,1	74,9	82,9	36,1	57,5	64,1	1,1	10267824782,56
20	52,2	60,1	0,1	82,8	90,8	77,1	55,5	62,1	0,2	29634790194,38
25	55,6	63,5	0,5	76,3	84,3	33,6	58,5	65,1	0,9	15223700333,35
31,5	56,5	64,4	0,2	78,4	86,4	15,7	61,6	68,2	0,5	52696768163,94
40	60,5	68,4	0,3	76,4	84,4	6,2	61,7	68,3	0,3	84642445097,7
50	78,8	86,7	7,9	88,5	96,5	38,6	60,3	66,9	0,1	219749085129,47
63	70,7	78,6	0,3	88,4	96,4	8,9	68,6	75,2	0,2	928086897680,58
80	61,6	69,5	1,3	73,3	81,3	9,9	61,5	68,1	1,1	25866825975,27
100	67,1	75,0	1,5	69,7	77,7	1,4	63,3	69,9	0,5	77672795682,19
125	55,6	63,5	0,1	67,4	75,4	0,6	68,3	74,9	1,2	109915279492,13
160	66,3	74,2	0,5	69,1	77,1	0,5	67,5	74,1	0,5	214984247801,27
200	67,7	75,6	0,7	71,6	79,6	9,1	65,1	71,7	0,3	190108543822,21
250	63,8	71,7	1,8	71,3	79,3	5,2	59,5	66,1	0,6	30955870578,72
315	62,9	70,8	1,6	69,5	77,5	3,9	62,8	69,4	1,3	27256042027,17
400	61,1	69,0	0,8	68,4	76,4	2,2	60,0	66,6	0,5	37024308523,01
500	67,3	75,2	2,7	69,3	77,3	2,3	59,4	66,0	0,4	44882933111,65
630	63,8	71,7	2,2	69,8	77,8	4,7	61,2	67,8	1,0	24382738414,30
800	63,4	71,3	3,3	69,3	77,3	6,8	60,9	67,5	1,6	15115530317,21
1000	63,5	71,4	3,4	70,5	78,5	8,9	58,8	65,4	1,0	15144248355,21
1250	66,3	74,2	8,8	67,7	75,7	6,4	60,1	66,7	1,8	11046616956,03
1600	61,8	69,7	3,7	66,1	74,1	5,3	59,8	66,4	2,0	9291745338,46
2000	58,9	66,8	2,5	64,5	72,5	4,8	60,6	67,2	3,1	7094317283,67
2500	57,1	65,0	2,8	61,8	69,8	4,3	58,6	65,2	3,3	4220428477,84
3150	54,2	62,1	2,3	59,8	67,8	4,3	56,0	62,6	2,9	2667894818,95
4000	51,6	59,5	1,4	60,4	68,4	5,6	54,3	60,9	2,2	2346536997,75
5000	48,9	56,8	1,2	58,1	66,1	5,3	51,0	57,6	1,7	1455787662,05
6300	46,3	54,2	1,3	56,2	64,2	6,7	49,2	55,8	2,1	748662895,43
8000	44,0	51,9	1,9	50,5	58,5	4,4	47,4	54,0	3,4	308236936,31
10000	40,5	48,4	0,7	50,3	58,3	3,6	49,3	55,9	4,6	354988338,33
12500	37,0	44,9	1,3	44,2	52,2	3,7	43,0	49,6	4,4	86257625,62
16000	32,6	40,5	0,9	40,8	48,8	3,1	40,2	46,8	4,3	46595163,39
20000	28,4	36,3	0,4	43,2	51,2	6,0	41,0	47,6	5,8	41631282,66
										<b>SEL<sub>TOT(f)</sub>2,20187E+12</b>

**Tabella 3.4.2.2 calcolo della % di SEL riferito allo spettro di traffico per autocarri, autobus e ciclomotori**

In questo modo è stato possibile individuare quale veicolo è “più rumoroso” e a quale frequenza, infatti visualizzando i valori delle %SEL alle diverse frequenze per ciascuna delle sei categorie di traffico si ottiene il diagramma seguente:

**Grafico 3.4.2.2 : spettro %SEL – frequenza per le sei categorie veicolari per via del Cavatore**



E' immediato osservare che la principale causa del rumore da traffico autoveicolare urbano è da attribuirsi ai camion il cui andamento supera quello di tutte le altre categorie di veicoli da una frequenza di 31,5 Hz fino a 8000 Hz.

Alle basse frequenze, sotto i 31,5 Hz sono gli autobus che concorrono principalmente al rumore, mentre l'andamento della %SEL delle auto, pur rimanendo quasi sempre inferiore ai camion, supera quello di tutte le altre categorie di veicoli da una frequenza di circa 200 Hz .

La categoria dei furgoni ha una certa incidenza soprattutto alle basse frequenze, tra i 20 e i 125 Hz, mentre ciclomotori e autocarri sono le categorie “meno rumorose”.

Eseguendo la somma dei SEL relativi ad ogni frequenza ( $SEL_{(f)}$ ), singolarmente per ciascuna classe, si è ottenuto il SEL relativo ad ogni veicolo:

$$SEL_{Veic} = \sum 10^{SEL_{(f)}/10}$$

Quest'ultimo moltiplicato per il numero di veicoli per ogni categoria ha fornito il SEL per classe:

$$SEL_{categ.} = N_i SEL_{Veic}$$

I risultati ottenuti sono riassunti nella seguente tabella :

**Tabella 3.4.2.3**

	auto	camion	furgoni	autocarri	autobus	ciclomotori
$SEL_{Veic}$	$2,9450 \cdot 10^8$	$1,3880 \cdot 10^{10}$	$1,31397 \cdot 10^9$	$8,1612 \cdot 10^8$	$1,2412 \cdot 10^{10}$	$2,12916 \cdot 10^8$
$SEL_{categ}$	$1,7287 \cdot 10^{11}$	$1,6795 \cdot 10^{12}$	$6,96405 \cdot 10^{10}$	$3,0197 \cdot 10^{10}$	$2,3582 \cdot 10^{11}$	$8,94246 \cdot 10^9$

Sommando i SEL di categoria e passando al logaritmo:

$$SEL = \text{Log}_{10}(\sum SEL_{categ.})$$

si ricava un SEL pari a 123,4 dB(A) e attraverso la:

$$L_{eq} = SEL - 10 \text{Log}_{10}(T)$$

si ottiene un  $L_{eq}$  corrispondente pari a 87,9 dB(A) riferito ad un'ora, avendo posto T uguale a 3600 secondi.

Rapportando il SEL attribuibile alle varie categorie al SEL globale (somma delle varie energie totali già calcolate per singola frequenza):

$$SEL_{TOT} = \sum SEL_{Tot(f)}$$

si ottengono le percentuali della seguente tabella che rappresentano la ripartizione del SEL complessivo, dovuta alla presenza contemporanea delle sei sorgenti, in relazione allo spettro di traffico reale:

**Tabella 3.4.2.4 ripartizione SEL totale tra le varie classi di veicoli**

categoria	n° di veicoli transitati	% SEL
Auto	587	7,85
Camion	121	76,28
Furgoni	53	3,17
Autocarri	37	1,38
Autobus	19	10,81
Ciclomotori	42	0,51
	TOT 859	TOT 100

Si rileva che i camion costituiscono la sorgente principale di rumore, sia per il loro elevato livello di emissione sonora, sia perché rappresentano una consistente percentuale del traffico globale. Gli autobus, il cui numero di passaggi è il più basso, sono comunque successivi ai camion in termini di incidenza sul rumore generato da TAU, a causa dei loro elevati livelli sonori. Le auto, il cui numero di veicoli transitati è il maggiore, sono comunque successive agli autobus, seguono furgoni e autocarri e infine i ciclomotori, i quali hanno una quota di SEL praticamente ininfluente sulla %SEL globale.

Allo stesso modo, attraverso le formule :

$$SEL = \text{Log}_{10}(\sum SEL_{\text{categ.}}) \quad \text{e} \quad L_{\text{eq}} = SEL - 10 \text{Log}_{10}(T)$$

escludendo una o più categorie di veicoli, si può conoscere il SEL per uno spettro di traffico diverso.

Ipotizzando di escludere la categoria dei camion si otterrà:

$$SEL = 117.1 \text{ dB(A)}; \quad L_{\text{eq}} = 81,6 \text{ dB(A)}$$

## CONCLUSIONI

Sulla strada in esame, via del Cavatore, sono stati condotti i monitoraggi in continuo su un tempo di 24 ore al fine di determinare i livelli sonori continui diurni e notturni con cui i cittadini ivi domiciliati convivono.

Attraverso i livelli equivalenti orari, rilevati da ciascuno dei cinque giorni monitorati, è stato possibile determinare il livello continuo diurno e notturno per il giorno medio, che può essere ragionevolmente inteso come il livello continuo equivalente settimanale :

<b>GIORNO MEDIO</b>	<b>L<sub>Aeq</sub> continuo</b>	<b>L<sub>Aeq</sub> diurno</b>	<b>L<sub>Aeq</sub> notturno</b>
	<b>67.8</b>	<b>69.3</b>	<b>59.6</b>

Questi valori sono stati confrontati con i limiti massimi di immissione previsti dalla zonizzazione acustica redatta dal comune di Carrara, in accordo con quanto previsto dal decreto ministeriale del 14/11/97. Secondo tale strumento di gestione del territorio la zona di via del Cavatore monitorata risulta collocata in classe II, ossia in un'area particolarmente sensibile poiché in prossimità di vari edifici ospedalieri.

<i>classi di destinazione d'uso del territorio</i>	<i>tempi di riferimento</i>	
	diurno (06.00-22.00)	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

I limiti a cui dovrebbe tendere sono, pertanto, di 55 dB(A) per il giorno e 45 dB(A) per la notte, mentre i valori rilevati sia del  $L_{Aeq}$  diurno che del  $L_{Aeq}$  notturno superano di quasi 15 dB(A) tali valori limite e di conseguenza saranno anche maggiori dei valori di qualità che per la classe II dovrebbero essere ricondotti a 52 dB(A) per il giorno e 42 dB(A) per la notte.

<b>Tabella riassuntiva</b>		
	<b><math>L_{Aeq}</math> diurno</b>	<b><math>L_{Aeq}</math> notturno</b>
<b>Valori monitorati</b>	<b>69,3</b>	<b>59,6</b>
<b>Valori previsti da normativa</b>	<b>55</b>	<b>45</b>

Sui monitoraggi di 24 ore è stata inoltre condotta una analisi statistica dalla quale si è ricavato un valore di  $L_1$ , indice dei livelli di picco del segnale, pari a circa 79 decibel per i giorni feriali e a 75 decibel per i festivi, mentre il valore di  $L_{95}$ , rappresentativo del rumore di fondo, si assesta attorno ai valori di 32-34 decibel.

Inoltre, il clima acustico, indice delle fluttuazioni di un dato rumore nel tempo e definito dalla differenza  $L_{10} - L_{90}$ , dà valori piuttosto elevati per i giorni feriali, attorno ai 36 decibel, mentre scende a 29 decibel nei festivi.

Attraverso la caratterizzazione delle sorgenti sonore è stato possibile quantificare l'influenza di ciascuna sorgente sul livello di rumore globale e, come ci si aspettava, è stato rilevato che il maggior apporto di rumorosità compete ai camion, con una percentuale di SEL pari addirittura al 76,3%, a cui fanno seguito in ordine decrescente gli autobus, con una percentuale di SEL del 10 %, le auto, i furgoni, gli autocarri e infine i ciclomotori con una percentuale di SEL praticamente ininfluente.

E' stato infine calcolato che, se si impedisse il transito dei camion in via del Cavatore, si riuscirebbe a ridurre il valore del livello continuo equivalente di 6.6 dB(A).

Si fa presente che per trarre questa considerazione, si è tenuto conto della effettiva composizione del traffico veicolare in quanto è stato determinato il numero reale di veicoli transitati nell'ora di punta di un normale giorno lavorativo. La scelta dell'ora di punta consente un approccio cautelativo, tuttavia è bene precisare che l'effettivo

transito dei soli camion è sicuramente più elevato nelle prime ore del mattino, a partire dalle 5-6 a.m.

Gli interventi a difesa del rumore da traffico stradale possono essere classificati in due categorie:

1. interventi attivi, i quali agiscono sulla sorgente del rumore stesso riducendone le emissioni;
2. interventi passivi, i quali agiscono ostacolando la propagazione del rumore dalla sorgente al ricevitore.

Un metodo di mitigazione del rumore molto efficace è l'uso di asfalti fonoassorbenti, i quali possono essere considerati come interventi sia attivi che passivi: infatti, non solo riducono le emissioni di rumore prodotte dal contatto pneumatico-asfalto, ma sono anche in grado di catturare e assorbire parte del rumore emesso dal veicolo.

Rispetto ai normali rivestimenti tali asfalti presentano, infatti, una porosità più elevata, grazie alla quale si riesce a ridurre l'energia acustica riflessa dal piano stradale e soprattutto si riduce il rumore generato dall'aria che viene compressa fra i pneumatici e le piccole cavità dell'asfalto. [13]

Tra i vantaggi di questo tipo di interventi, oltre ovviamente all'abbattimento del rumore, il quale va dai 3 ai 5 dB, abbiamo una drastica riduzione degli effetti del ristagno d'acqua, il mantenimento di un'eccellente aderenza e l'assenza di impatto visivo.

Tuttavia, poiché più grandi, i pori si ostruiscono più facilmente richiedendo quindi una manutenzione molto più onerosa. Per ovviare a questo problema si tende oggi a posare tali asfalti in due strati: uno con cavità interstiziali più fini, che riducono l'ostruzione ed uno con cavità più grosse, per assorbire il rumore. In tal modo le pratiche di pulizia dei materassi drenanti risultano molto più efficaci in quanto solo un piccolo strato in superficie risulta ostruirsi e, inoltre, in caso di rifacimento del manto, si può rinnovare solo lo strato superficiale senza alterare le proprietà originali del manto stesso. [7]

Un ulteriore tipo di intervento, certo ancor più efficace, è lo studio di un percorso alternativo per il transito dei mezzi pesanti; in questo senso il comune di Carrara ha

finalmente iniziato i lavori per la costruzione di una nuova arteria con l'obiettivo di eliminare definitivamente gli effetti negativi prodotti dal trasporto pesante.

Il suo percorso è a tal fine stato disegnato lontano dai centri abitati, con largo uso di gallerie e con lunghezza di percorrenza dei mezzi pesanti minore dell'attuale.

I lavori per tale progetto sono iniziati il 15 settembre 2003 e il loro termine è previsto per il 18 gennaio 2011. [9]

Sarebbe dunque opportuno, in attesa di tale data, ridurre in maniera consistente il passaggio giornaliero dei mezzi pesanti, in modo da tutelare la salute dei cittadini, la quale ha, o comunque dovrebbe avere, un aspetto prioritario rispetto ad interessi di qualsiasi altra natura.

## Bibliografia

- [1] Luciano Rocco - *“Fondamenti di acustica ambientale”* - (ALINEA, 1984)
- [2] Italo Barducci - *“Acustica applicata”* - (MASSON, 1995)
- [3] Ian Sharland - *“L’attenuazione del rumore”* - (WOODS italiana, 1980)
- [4] R. Spagnolo - *“Manuale di acustica applicata”* - (UTET, 2001 )

## Siti Internet

- [5] <http://www.miw.it/inquinamentodatraffico7.htm>
- [6] <http://www.esiaonline.it/Rumore/strumentazione/fonometro.htm>
- [7] <http://www.euroacustici.org/ambienterumore.pdf>
- [8] <http://www.ambientediritto.it/legislazione/Rumore/rumore.htm>
- [9] <http://www.comune.carrara.ms.it>
- [10] [www.arpat.toscana.it](http://www.arpat.toscana.it)
- [11] <http://www.spectra.it>
- [12] [www.altraacustica.org](http://www.altraacustica.org)
- [13] [www.comune.firenze.it/arpas/asfalti.htm](http://www.comune.firenze.it/arpas/asfalti.htm)