

ABSTRACT	7
PREMESSA	9
INTRODUZIONE	11
1. FONDAMENTI DI ACUSTICA	15
1.1 LE EQUAZIONI FONDAMENTALI	15
1.1.1. PROPAGAZIONE DELLE ONDE SONORE NEI FLUIDI	15
1.1.2. LUNGHEZZA D'ONDA E FREQUENZA	17
1.1.3. RIFLESSIONE TRASMISSIONE E DIFFRAZIONE DELLE ONDE	19
1.1.4. LE GRANDEZZE FONDAMENTALI	21
1.2. SORGENTI SONORE	22
1.2.2. SORGENTE PUNTIFORME	22
1.2.3. SORGENTE LINEARE	23
1.2.4. SORGENTE PIANA	24
1.2.5. LA DIRETTIVITÀ DI EMISSIONE DELLE SORGENTI	24
1.3. GLI EFFETTI DI ATTENUAZIONE NELLA PROPAGAZIONE DEL SUONO	25
1.3.1. L'ASSORBIMENTO ATMOSFERICO	25
1.3.2. RIFLESSIONI E RIFRAZIONI	26
1.3.3. GLI SCHERMI ACUSTICI	27
1.3.4. GLI EFFETTI DEL TERRENO	28
1.3.5. ATTENUAZIONI DI ALBERI E FOGLIAME	29
1.3.6. I GRADIENTI DI VENTO E DI TEMPERATURA	30
1.3.7. CLASSI METEOROLOGICHE PER LA PROPAGAZIONE DEL SUONO	31
1.4. SPETTRI ACUSTICI	33
1.4.1. SCALA DEI DECIBEL E LIVELLI SONORI	33
1.4.2. COMPOSIZIONE IN FREQUENZA	34
1.5. PSICOACUSTICA	35
1.5.1. SCALE SOGGETTIVE E DIAGRAMMA NORMALE	35
2. ACUSTICA AMBIENTALE	39
2.1. L'INQUINAMENTO ACUSTICO	39
2.2. GLI EFFETTI SULLA COLLETTIVITÀ	41
2.2.1. GLI INDICATORI DEL RUMORE AMBIENTALE	42
2.2.2. CORRELAZIONE RUMORE-DISTURBO	44
2.2.3. INFLUENZA DELLE VARIABILI NON ACUSTICHE SUL GRADO DI ANNOYANCE	46
2.3. INQUINAMENTO ACUSTICO E CARATTERIZZAZIONE DEL RUMORE	48
2.4. MISURATORI DI LIVELLO SONORO	49
3. NORMATIVA IN MATERIA DI ACUSTICA AMBIENTALE	53
3.1. INTRODUZIONE	53
3.2. QUADRO NORMATIVO NAZIONALE	54
3.2.1. D.P.C.M 1 MARZO 1991	54
3.2.3. LEGGE QUADRO SULL'INQUINAMENTO ACUSTICO	54

3.2.4.D.M. 31 OTTOBRE 1997	55
3.2.5.D.P.C.M 14 NOVEMBRE 1997	56
3.2.6.DECRETO MINISTERO DELL'AMBIENTE MARZO 1998	57
3.2.7.D.P.R. 18 NOVEMBRE 1998, N.459	58
3.2.8.D.M. 29 NOVEMBRE 2000	58
3.2.9. LA DIRETTIVA 2002/49/CE	59
3.2.10.D.P.R 30 MARZO 2004	61
3.2.11.D.LGS 19 AGOSTO 2005	63
3.2.12.DIRETTIVA 2008/1/CE	64
3.3. NORMATIVA TECNICA	64
3.3.1.LA NORMA UNI ISO 8297	64
3.3.2.LA NORMA ISO 3744	65
3.3.3.LA NORMA ISO 3746	65
3.3.4.LA NORMA UNI 10855	66
3.12.5.LA NORMA UNI 11143-1:2005	66
<u>4. MODELLI PREVISIONALI PER L'ACUSTICA AMBIENTALE</u>	69
4.1. I MODELLI PREVISIONALI DI CALCOLO	69
4.2. CARATTERIZZAZIONE DELLE SORGENTI	70
4.3. MODELLO DI PROPAGAZIONE IN AMBIENTE ESTERNO - ISO 9613-2	71
4.4. MODELLO NMPB ROUTES 96	73
4.4.1.MODELLIZZAZIONE DEL TRAFFICO	74
4.4.2.L' ANALISI METEOROLOGICA DI UN SITO	75
4.5. MODELLO SMR II - STANDAARD REKEN- METHODE	79
4.6. MODELLIZZAZIONE DEL TERRENO	80
4.6.1. GENERALITÀ	80
4.6.2. MODELLO DEL TERRENO A SUPERFICI CONTINUE	80
4.7. CALIBRAZIONE DEL MODELLO	81
4.8. INCERTEZZA ASSOCIATA AI MODELLI DI CALCOLO PREVISIONALE	82
<u>5. CASO IN ESAME</u>	85
5.1.INTRODUZIONE	85
5.2 CARATTERIZZAZIONE DEL SITO DI MISURA	85
5.2.1. INDIVIDUAZIONE DELLE PRINCIPALI SORGENTI DI RUMORE	86
5.2.2. LA SCELTA DEI RICEVITORI	87
5.3. STRUMENTI E METODI DI MISURA IMPIEGATI NEI MONITORAGGI	88
5.3.1. INDAGINI FONOMETRICHE	88
5.3.2. CAMPIONAMENTO DATI METEOROLOGICI	89
5.3.3. CAMPIONAMENTO FLUSSI DI TRAFFICO	91
5.4. ANALISI DEI DATI DEI MONITORAGGI E RISULTATI	92
5.5. CALCOLO DELLA POTENZA SONORA DELLO STABILIMENTO	94
5.5.1.ANALISI DELLO STABILIMENTO SECONDO LA UNI ISO 8297	95
5.5.2.DETERMINAZIONE DELLA POTENZA SONORA DELL'IMPIANTO E LIMITI NELL'APPLICAZIONE DELLA NORMATIVA ADOTTATA	97
<u>6. SOFTWARE UTILIZZATI PER LE SIMULAZIONI DI CALCOLO</u>	101
6.1. CARATTERISTICHE GENERALI DEI SOFTWARE	101
6.2. CENNI DEL METODO RAY TRACING	101

6.3. IL SOFTWARE IMMI 6.3.1	102
6.3.1. COSTRUZIONE DEL MODELLO E IMPORTAZIONE DATI	102
6.3.2. CALCOLO ED ESPORTAZIONE RISULTATI	105
6.4. IL SOFTWARE PREDICTOR-LIMA TYPE 7810 VERSIONE 8	108
6.4.1. COSTRUZIONE DEL MODELLO E IMPORTAZIONE DATI	108
6.4.2. CALCOLO ED ESPORTAZIONE RISULTATI	109
6.5. IL SOFTWARE CADNA-A	111
6.5.1. COSTRUZIONE DEL MODELLO E IMPORTAZIONE DATI	111
6.5.2. CALCOLO ED ESPORTAZIONE RISULTATI	112
6.6. IL SOFTWARE ARCGIS 9.3	113
6.6.1. INTRODUZIONE AI SISTEMI GIS	113
6.6.2. MODELLI VETTORIALI E MODELLI RASTER	114
6.6.3. IL SISTEMA ARCGIS	115
<u>7. COSTRUZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO</u>	<u>117</u>
7.1.INTRODUZIONE	117
7.2.CARATTERISTICHE E IMPOSTAZIONI DEI MODELLI	117
7.3.RAPPRESENTAZIONE GEOGRAFICA E TOPOGRAFICA DEL SITO	118
7.3.1.POSSIBILI ERRORI NELLA MODELLIZZAZIONE DEL TERRENO	119
7.4.LA MODELLIZZAZIONE DELLO STABILIMENTO INDUSTRIALE	120
7.4.1.POSSIBILI ERRORI NELLA MODELLIZZAZIONE DEL RUMORE INDUSTRIALE	124
7.5. IL CONTRIBUTO STRADALE	124
7.5.1.CAMPIONAMENTO DEI FLUSSI DI TRAFFICO	124
7.5.2. POSSIBILI ERRORI NELLA MODELLIZZAZIONE DEL RUMORE DA TRAFFICO	128
7.6. IL CONTRIBUTO DELLA FERROVIA	129
7.6.1. INTRODUZIONE	129
7.6.2. I VEICOLI FERROVIARI	129
7.6.3. LO STUDIO DELLA RETE FERROVIARIA ITALIANA.	129
7.6.4. CALCOLO DELLA TRATTA IN OGGETTO COME UN'UNICA SORGENTE LINEARE	130
7.6.5. CALCOLO SECONDO IL METODO OLANDESE	132
7.6.6. CALCOLO SECONDO IL METODO FRANCESE	135
7.6.7. POSSIBILI ERRORI NELLA MODELLIZZAZIONE DEL RUMORE FERROVIARIO	137
7.7.CONTRIBUTO METEOROLOGICO	137
7.7.1. ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI METEOROLOGICI.	138
7.8.SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI	144
<u>8. CONFRONTO TRA LIVELLI MISURATI E LIVELLI STIMATI</u>	<u>147</u>
8.1.COMPARAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI	147
8.1.1.LIVELLI DI EMISSIONE GLOBALE	147
8.1.2.CONFRONTO TRA SOFTWARE	149
<u>9. CONCLUSIONI</u>	<u>151</u>
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>155</u>
NORMATIVA NAZIONALE	155
NORMATIVA INTERNAZIONALE	155
TESTI CONSULTATI	155
PUBBLICAZIONI	156

ARTICOLI	156
NORMATIVA TECNICA	158
<u>APPENDICE FOTOGRAFICA</u>	<u>159</u>
ALLEGATO I – SORGENTI PUNTIIFORMI A GRANDE DISTANZA –STUDIO EFFETTUATO SUL PORTO DI VENEZIA.	163
<u>RINGRAZIAMENTI</u>	<u>171</u>

A Luisa e Lucia

Abstract

I modelli previsionali per la modellizzazione acustica vengono utilizzati per: determinare il contributo delle singole sorgenti sonore in un'area oggetto di indagine, prevedere il rumore immesso nell'ambiente da un'opera di nuova realizzazione, determinare/confrontare l'efficacia di eventuali interventi di mitigazione acustica. Tramite il modello numerico è possibile rappresentare la configurazione ambientale mediante: l'individuazione delle sorgenti sonore significative, la caratterizzazione delle sorgenti (modelli di generazione), lo studio della propagazione tra la sorgente e il ricettore (modelli di propagazione). Di fondamentale importanza risulta essere la descrizione topografica del territorio (orografia ricettori).

I metodi numerici effettuano simulazioni sulla base di formule analitiche che descrivono i fenomeni fisici legati alla propagazione partendo dai dati di potenza acustica delle sorgenti.

In questa tesi si descrivono le difficoltà incontrate nella caratterizzazione delle sorgenti sonore (infrastrutture stradali, ferroviarie e sorgenti industriali), i limiti della normativa, l'incidenza delle condizioni meteorologiche, la correlazione tra misure conoscitive effettuate nel territorio e i valori di restituzione dei modelli.

Acoustic models are used to determine the contribution of individual sound sources in a define area under investigation, to forecast noise in the environment at design stage for a new settlement, to determine or compare the effectiveness of noise mitigation solutions. The use of numerical models allow to manage the environmental configuration by the identification of significant noise sources, the characterization of the sources (generation models), the study of the spread between source and receiver (propagation models). It is very important to provide a reliable topographical description of the area (topography receptors).

Numerical methods are based on analytical formulas that describes the physical phenomena related to the acoustic propagation starting from source sound power data.

In this work are described the difficulties encountered in the characterization of sound sources (road applications infrastructure, railway and industrial sources), as well as noise requirements, effect of weather conditions, correlation between cognitive measures performed in the field and the return values of the models.

PREMESSA

Le valutazioni del rumore presso i siti industriali sono stati per lungo tempo effettuate per mezzo di misure di rumore a breve termine su un numero limitato di ricettori ed effettuando alcune analisi semplificate qualitative ed eventualmente con alcuni calcoli semplici. Tuttavia l'esperienza ha dimostrato che spesso e soprattutto nelle installazioni di grandi dimensioni e complessità tale approccio oltre a non permettere di ottenere risultati fattibili né una chiara visione del reale impatto acustico non produce abbastanza informazioni per il processo decisionale.

Le misure così effettuate non permettono infatti di identificare e classificare le sorgenti di rumore e non consentono un controllo del rumore su quello esistente né di prevedere l'impatto acustico che avrebbe un nuovo stabilimento. La normativa di settore inoltre non sempre risulta applicabile.

Alcune problematiche sono state risolte grazie al forte sviluppo avuto negli ultimi anni dai programmi di calcolo previsionale, che consentono di estendere i livelli di rumore rilevati in specifiche posizioni a tutta l'area di indagine ottenendo a partire da dati di tipo puntuale un'informazione di tipo areale.

Se da un lato il loro utilizzo ha consentito di calcolare in tempi ragionevolmente veloci scenari molto complessi della generazione e propagazione del rumore, rimangono tuttavia aperte molte questioni legate sia alla caratterizzazione delle sorgenti sonore che al modello di propagazione.

Anche la propagazione acustica ambientale infatti, per quanto ampiamente studiata e fatta oggetto di molte ricerche sperimentali, presenta rilevanti margini di incertezza, derivanti in parte dalla difficoltà di valutare compiutamente i parametri che influenzano tale propagazione, in parte alla variabilità che gli stessi possono manifestare nel tempo (divergenza delle onde sonore, condizioni meteo, caratteristiche del terreno, vegetazione ecc)

Il presente lavoro di ricerca descrive le attività di analisi del rumore in ambito ambientale eseguite presso ARPAV- Dipartimento Provinciale di Venezia e le simulazioni di calcolo svolte sia presso lo stesso, con software di calcolo IMMI 6.3, che all'interno del Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Padova con il software di calcolo Predictor-Lima v.8.

Con la presente tesi si sono volute affrontare alcune delle problematiche relative alle caratterizzazione delle sorgenti (industriali, traffico) sia nella fase di ingresso ai dati di input al modello di calcolo che sia nella fase di restituzione dei risultati.

Nel modello di propagazione si è prestata particolare attenzione all'effetto meteorologico, che all'effetto del terreno. Le modellazioni svolte sono state basate su casi di studio reali supportati da indagini fonometriche eseguite.

INTRODUZIONE

La tesi si suddivide in due parti. Nella *prima sezione* che va dal *primo al quarto capitolo* si sono valutati con attenzione gli strumenti di base che hanno permesso la realizzazione dell'intero lavoro. Risulta infatti di fondamentale importanza introdurre gli aspetti tecnico normativi che hanno orientato l'intero studio prima di proseguire nella parte metodologica.

Nella *seconda sezione* della tesi, dal capitolo quinto in poi, si tratta nello specifico il caso reale affrontato. Alla preliminare fase di caratterizzazione delle sorgenti sonore rilevanti ai fini della previsione dell'inquinamento acustico, basata sulle citate indagini fonometriche, è seguita l'attività di modellazione numerica che ha individuato la conformazione più idonea a riprodurre l'area oggetto di studio.

Nella prima parte del *capitolo primo* si richiamano sinteticamente le nozioni di base relative ai fenomeni acustici, nella seconda invece viene trattata la descrizione e la propagazione del suono in ambiente esterno. In modo specifico viene trattata la propagazione dalla sorgente ai ricevitori. La propagazione del suono all'aperto risente degli effetti dovuti alle riflessioni geometriche, all'assorbimento dell'aria, alle interazioni con il terreno, alle barriere alla presenza di vegetazione e alle rifrazioni associate ai gradienti di vento e di temperatura. Vengono quindi descritti i principi fisici associati ai vari effetti di propagazione e si passano in rassegna i metodi impiegati per tenerne conto. Si è prestata particolare attenzione agli effetti del terreno e agli effetti meteorologici.

Nel *secondo capitolo* vengono affrontate le tematiche inerenti la percezione del rumore e l'inquinamento acustico. Nella prima parte si descrivono alcuni degli effetti sociali e comportamentali indotti nei soggetti maggiormente esposti all'inquinamento da rumore tra i principali troviamo: effetti psicofisiologici, annoyance, effetti di disturbo del sonno, interferenza con la comunicazione verbale ed effetti sulle prestazioni. Da molti anni si accetta infatti che il rumore provochi effetti extrauditivi e ciò è stato evidenziato in moltissimi studi. Si fa poi riferimento a quelli che sono considerati essere i principali indicatori del rumore ambientale. Le caratteristiche dell'inquinamento acustico inoltre sono tali da influenzare notevolmente le metodologie di rilevamento, nella seconda parte del capitolo vengono sommariamente descritte alcune tecniche che vengono comunemente adottate nel campionamento spaziale e temporale.

Nel *terzo capitolo* viene riassunto l'attuale quadro normativo e si citano le principali normative nazionali e internazionali utilizzate nello studio in oggetto. Il quadro normativo definito dalla legge n.447 del 1995 stabilisce assieme ai diversi decreti attuativi i principi cardine per la tutela dell'ambiente dall'inquinamento da rumore. L'armonizzazione della legislazione nazionale sul rumore ambientale derivante dalla L. 447/95 e i conseguenti adempimenti al recepimento della Direttiva 2002/49/CE, recepita dal D.Lgs. 194, dovrà considerare gli obiettivi e le finalità di entrambe le norme. Nelle more della revisione della Direttiva Europea (art. 11, Delega al governo per il riordino della disciplina in materia di inquinamento acustico) della legge del 7 luglio 2009 si configura la possibilità di una riforma complessiva della materia che riordini e dia organicità ad una normativa sviluppatasi negli anni. Si fa inoltre riferimento alla Direttiva (IPPC) 2008/1/CE, senza però entrare in dettagli tecnici che risultano peraltro assai complessi. Il primo passo per conseguire l'obiettivo stabilito dalla tale Direttiva (riferendosi alla matrice rumore) consiste nella realizzazione della mappatura acustica degli insediamenti industriali siano essi esistenti o di progetto. Nel caso di insediamenti esistenti andranno perciò condotte campagne di rilevazione fonometriche, in tal senso costituiscono indispensabili le norme della serie ISO 3740 la norma UNI ISO 8297 così come le norme nazionali della serie UNI 11143 e la UNI 10855. Nella parte conclusiva del

capitolo si richiamano perciò i punti salienti di tali norme adoperate per la caratterizzazione delle sorgenti sonore relativamente allo studio oggetto di indagine.

Nel *quarto capitolo* vengono descritte le principali norme tecniche impiegate nella modellazione di calcolo per le principali sorgenti di rumore. Molti Paesi infatti con lo scopo di ridurre l'incertezza legata all'applicazione di algoritmi diversi e talvolta nemmeno sufficientemente validati hanno sviluppato norme tecniche e linee guida che stabiliscono le regole matematiche fondamentali che il modello deve seguire per implementare il calcolo. Il modello matematico è costituito da un set di equazioni basate su ipotesi semplificative e relativi limiti di applicabilità. L'Unione Europea ha indicato nella Direttiva 2002/49/CE, per tipologia di sorgente, quali sono le normative da seguire, in particolare indica per lo studio del traffico stradale il modello francese "NMPB Routes 96", per il traffico ferroviario il modello olandese "SMR II Standard Reken Methode" e per rumore industriale la norma "ISO 9613-2", anche se in realtà quest'ultima è dedicata alla modellizzazione della propagazione sonora all'esterno e non fa riferimento alcuno a sorgenti specifiche di rumore è invece esplicita nel dichiarare che non si applica al rumore aereo e al rumore provocato da esplosioni di vario genere. I dati di ingresso idonei a questa metodologia si possono ottenere mediante una delle seguenti tecniche di rilevamento: ISO 8292:1994, EN ISO 3744:1955 ed EN ISO 3746:1995. La Direttiva pone una certa enfasi sull'attività di simulazione acustica, vanno fatte però due importanti osservazioni inerenti le simulazioni, ovvero i modelli acustici costruiti devono essere calibrati con opportune misurazioni prima del loro effettivo utilizzo e si deve tener conto che i livelli sonori calcolati sono affetti da un certo livello di incertezza. Nella parte finale del capitolo vengono perciò approfondite le tematiche relative alla calibrazione di un modello di calcolo e si passano in rassegna i contributi che principalmente influiscono sul grado di incertezza dei livelli sonori calcolati.

Il *quinto capitolo* descrive la fase di indagine fonometrica presso il sito di misura. Si vuole indagare il contributo sonoro dovuto ad uno stabilimento di tipo industriale. Il sito risulta particolarmente interessante dal punto di vista acustico sia per la presenza di molteplici e differenti sorgenti di rumore oltre allo stabilimento (presenza di una linea ferroviaria e traffico stradale) sia per il suo posizionamento geografico, che rende di difficile applicazione la normativa tecnica di settore. Per prima cosa si è definita l'area di studio ovvero la porzione di territorio all'interno della quale sono comprese tutte le sorgenti sonore che determinano degli effetti acustici non trascurabili. Dopo aver analizzato la documentazione che si aveva a disposizione (planimetrie e prospetti dello stabilimento corredate da tavole contenenti la destinazione d'uso di ogni locale), attraverso opportuni sopralluoghi, si sono acquisite informazioni riguardo la tipologia di attività svolta, i cicli produttivi e gli orari di funzionamento degli impianti. L'area è stata quindi rappresentata attraverso cartografia digitale in ambiente GIS, reperendo le informazioni relative alla classificazione acustica relativa alla porzione di territorio indagata. Dopo aver scelto i ricettori si sono effettuate le misurazioni fonometriche, nel periodo che va dal 20/07/2009 al 28/07/2009, contestualmente sono stati acquisiti i dati di flusso di traffico delle strade circostanti (mediante il posizionamento di contatraffico), e i dati meteorologici (mediante posizionamento di una centralina mobile). I dati ottenuti dopo opportuna analisi sono stati confrontati con i limiti previsti dalla normativa vigente. Per questioni di riservatezza non si riporta in questa tesi la fase di confronto con i limiti previsti dalla normativa. Inoltre non rientra tra gli scopi di questo studio verificare se ci siano o meno dei superamenti, si vuole piuttosto analizzare in quale parte lo stabilimento contribuisce al rumore. Si sono poi effettuate delle misure per caratterizzare la potenza sonora dello stabilimento così da poterla utilizzare come dato di input nelle simulazioni di calcolo. Per tale scopo si è ricorsi all'utilizzo della norma UNI ISO 8297. Tale norma consente di determinare il livello di potenza sonora emessa da un impianto industriale, sulla base di valori

di pressione sonora misurati. In particolare si assume che un insieme anche molto ampio di sorgenti sonore sia considerato come una singola sorgente sonora (è proprio questo il caso di uno stabilimento industriale). A causa della conformazione del sito si sono dovute introdurre delle semplificazioni nell'applicazione della normativa, di ciò si discuterà in dettaglio nel nono capitolo.

Il *sesto capitolo* da una rapida descrizione delle principali caratteristiche dei software di calcolo impiegati nelle simulazioni entrando poi nell'utilizzo specifico dei programmi utilizzati (IMMI 6.3, PredictorLimA v.8, CadnA). Il modello software è il programma che implementa il modello matematico su computer. Si è prestata particolare attenzione ai formati impiegati sia nell'importazione dei dati che nella restituzione dei risultati. L'obiettivo è quello di dare un quadro generale sulle procedure da seguire nella realizzazione dei modelli e sulle possibilità di rappresentazione dei risultati.

Il *settimo capitolo* viene descritta in dettaglio la costruzione del modello di calcolo relativo al sito precedentemente indagato. Il modello costruito non è altro che una particolare applicazione del modello software con specifici dati di ingresso. In particolare il calcolo è stato sviluppato a partire dalla conoscenza delle caratteristiche di emissività delle diverse sorgenti, modellizzate a seconda dei casi come sorgenti puntuali, lineari o areali, e tenendo conto dei diversi fenomeni di propagazione, riflessione, diffrazione e attenuazione delle onde sonore determinati dalla conformazione del territorio, dall'edificato e dalle condizioni climatiche. Le variabili meteorologiche che più influenzano la propagazione del suono risultano essere il gradiente verticale della temperatura e la direzione e la velocità del vento. E' stato effettuato uno studio particolareggiato delle condizioni meteo (su un arco temporale di 10 anni) che ha permesso di ricavare le condizioni di propagazione tipiche dell'area in oggetto. La simulazione della propagazione è stata sviluppata facendo riferimento, in generale, allo standard ISO 9613/2. Si è cercato inoltre di mettere in luce gli errori più comuni nella modellizzazione software nello sviluppo del modello di calcolo. Lo studio completo del sito si è effettuato con i software IMMI6.3 e Predictor-LimA v8, il software CadnA è stato utilizzato per la modellizzazione del terreno e per lo studio del traffico stradale e ferroviario. Il traffico ferroviario è stato modellizzato sia come sorgente lineare (solo con il software IMMI6.3) che utilizzando la normativa Olandese, con Predictor-LimA v.8 è stata inoltre eseguita una simulazione utilizzando la normativa ferroviaria francese. Il sito industriale è stato modellizzato sia come sorgente areale che come sorgente puntiforme (software IMMI6.3 e Predictor-LimA v8).

Seguono l'analisi delle simulazioni ottenute e le comparazioni con le misure effettuate sul territorio sviluppate nell'*ottavo capitolo* e le conclusioni riportate nel *capitolo nono*.

1. FONDAMENTI DI ACUSTICA

1.1 Le equazioni fondamentali

1.1.1. Propagazione delle onde sonore nei fluidi

Il suono è un fenomeno fisico di carattere ondulatorio che si manifesta in ogni mezzo elastico distribuito con continuità per effetto della vibrazione di un corpo all'interno di esso. Il corpo vibrante che genera le onde sonore prende il nome di *sorgente*, mentre lo spazio interessato dalla propagazione di tali onde viene chiamato *campo acustico*. Le vibrazioni prodotte dalla sorgente si trasmettono alle particelle del mezzo elastico adiacenti, provocandone l'oscillazione attorno alle loro posizioni di equilibrio; queste a loro volta trasmettono il moto oscillatorio ad altre particelle e il fenomeno si ripete per tutto il volume occupato dal mezzo, dando luogo ad un trasferimento di energia ma non di materia. Il mezzo di propagazione, può essere un solido, un liquido o un gas. Al variare delle proprietà fisiche del mezzo, variano le modalità e la velocità di propagazione del suono. Nei fluidi le onde sono *longitudinali*, essendo la direzione delle oscillazioni coincidente con quella di propagazione mentre nei solidi ci può essere una componente di oscillazione ortogonale, ossia *trasversale*.

Si deve ora definire quali siano le grandezze fisiche interessate da questo processo. Poiché le molecole del mezzo sono indotte ad oscillare nella direzione di propagazione dell'onda, si deve innanzi tutto considerare lo spostamento dalla loro posizione media a riposo e la velocità con cui avviene, la velocità locale (*velocità delle particelle*) va distinta dalla velocità con cui si propaga l'onda sonora (*velocità del suono*). A sua volta, l'oscillazione avanti e indietro di tutte le molecole contenute in una certa regione elementare del mezzo induce variazioni di densità e quindi di pressione nelle regioni immediatamente adiacenti, rispetto alla situazione media preesistente.

Una grandezza di notevole interesse risulta essere la pressione, più precisamente la sua differenza rispetto alla pressione statica, in aria alla pressione atmosferica. A tale differenza di pressione viene dato il nome di *pressione sonora*, ed è quella che di fatto viene rilevata dall'orecchio o dagli strumenti di misura:

$$(1.1) \quad \Delta p = p - p_0 \quad [Pa]$$

dove p è il valore locale della pressione in presenza di un fenomeno sonoro e p_0 è la pressione statica nello stesso punto in assenza del suono.

La pressione sonora si può caratterizzata considerandone il valore efficace:

$$(1.2) \quad p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 d\tau} \quad [Pa]$$

Di seguito verranno espone brevemente le equazioni di partenza per descrivere la propagazione delle onde sonore nei fluidi, intendendo quest'ultimi come ideali, cioè omogenei, isotropi, perfettamente elastici, e in cui le onde si propagano senza alcun effetto dissipativo. Nella trattazione ci si riferirà ad una regione elementare di fluido di volume V_0 e di dimensioni d_x , d_y e d_z , in cui si propaga un'onda longitudinale.

Equazione di Eulero: definisce le condizioni di equilibrio dinamico delle forze che agiscono sull'elemento di fluido considerato. Nel caso specifico riguarda onde sonore che inducono perturbazioni delle condizioni a riposo del mezzo di entità infinitesima:

$$(1.3) \quad \overline{\text{grad } p} = -\rho_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$$

dove p è la pressione sonora, ρ_0 la densità del fluido contenuto nel volume V_0 in condizioni normali e $\bar{u} = (u_x, u_y, u_z)$ la velocità vettoriale del fluido contenuto nel volume V_0 .

Equazione di continuità: formulazione della legge di conservazione della materia, esprime il principio che il flusso netto di massa, tra quella entrante e quella uscente dal volume V_0 nell'intervallo di tempo dt , deve essere eguagliato dalla variazione di massa contenuta all'interno del volume di fluido:

$$(1.4) \quad \frac{\partial \delta}{\partial t} = -\text{div } \bar{u}$$

Equazione di stato: esprime la relazione esistente tra le grandezze fisiche che descrivono il comportamento termodinamico del fluido. La propagazione delle onde sonore in questo caso è una trasformazione adiabatica, in quanto le oscillazioni di pressione si succedono molto rapidamente e si ipotizza l'assenza di attrito:

$$(1.5) \quad \frac{1}{p_0} \frac{\partial p}{\partial t} = \gamma \frac{\partial \delta}{\partial t}$$

dove γ indica il rapporto tra i calori specifici del gas, rispettivamente C_p a pressione costante e C_v a volume costante.

Le tre equazioni appena viste possono essere opportunamente combinate tra loro per ottenere l'*equazione dell'onda sonora*, in cui risulta, come unica variabile dipendente, la pressione sonora p :

$$(1.6) \quad \nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

con ∇^2 operatore di Laplace:

$$(1.7) \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Nell'equazione d'onda c è la velocità di propagazione dell'onda sonora nel gas, velocità del suono, definita come:

$$(1.8) \quad c = \sqrt{\gamma \left(\frac{p_0}{\rho_0} \right)} \quad [m/s]$$

L'equazione d'onda descrive il comportamento della pressione sonora nello spazio e nel tempo, e regola dunque la propagazione di onde sonore in gas omogenei, isotropi e senza perdite dissipative.

Essa può essere generalizzata a tutti i fluidi se all'espressione della velocità del suono riportata sopra si sostituisce la seguente:

$$(1.9) \quad c = \sqrt{\frac{E_s}{\rho_0}} \quad [m/s]$$

dove E_s è il cosiddetto modulo di elasticità isoentropico del fluido.

Per l'aria atmosferica, principale mezzo di propagazione per la maggior parte delle applicazioni acustiche, si può esprimere la velocità di propagazione del suono, in metri al secondo, in funzione della temperatura (nell'ipotesi di gas perfetto):

$$(1.10) \quad c = 331,6 + 0,6 T_c$$

dove T_c è la temperatura in gradi centigradi.

Mezzo Elastico	c (m/s)	Mezzo Elastico	c (m/s)
Aria (secca, 15°C)	341	Piombo	1230
Acqua	1460	Ferro	5130
Marmo	3800	Alluminio	5100
Mattoni	3650	Legno	3300
Cemento	3700	Sughero	500
Vetro	5000	Gomma elastica	35÷230

Tabella 1.2: velocità di propagazione del suono in diversi tipi di materiali.

1.1.2. Lunghezza d'onda e frequenza

Una soluzione semplice dell'equazione di propagazione dell'onda è rappresentata dall'*onda piana progressiva*, un caso speciale in cui tutte le grandezze del campo acustico variano in funzione, oltreché del tempo, di una sola coordinata cartesiana, per esempio la x , se questa è la direzione di propagazione dell'onda. Considerando la grandezza pressione sonora ciò può essere espresso dalla funzione $p = p(x, t)$, e l'equazione d'onda si riduce nella seguente forma unidimensionale:

$$(1.11) \quad \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

L'onda piana descritta da questa equazione ha come soluzione armonica la seguente espressione:

$$(1.12) \quad p = \bar{p} \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

Dove \bar{p} è l'ampiezza della pressione sonora ovvero il valore massimo che essa assume nel corso dell'oscillazione

$\omega = 2\pi f$ è la frequenza angolare data dalla sorgente sonora

$k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ è il numero d'onda;

φ_0 è una costante di fase

Un'altra tipologia di onde è quella costituita dalle *onde sferiche*, ovvero onde che si propagano con simmetria radiale da una sorgente puntiforme in uno spazio omogeneo illimitato. Con questo presupposto, le grandezze del campo acustico dipendono solamente dal tempo e dalla coordinata radiale r , cioè dalla distanza dal centro di simmetria; l'equazione d'onda per un campo di pressione sonora a simmetria sferica diventa allora:

$$(1.13) \quad \frac{\partial^2(rp)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(rp)}{\partial t^2}$$

La semplice soluzione armonica dell'onda sferica si può scrivere nella forma:

$$(1.14) \quad p = \frac{\bar{p}}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0)$$

Da questa relazione si osserva che, contrariamente a quanto avviene con l'onda piana, la pressione sonora si attenua al crescere della distanza dalla sorgente con legge $1/r$.

Le perturbazioni acustiche sono onde di tipo sinusoidale. Riferendosi per semplicità ad un'onda piana, ma le conclusioni valgono per un qualsiasi tipo di onda, in un punto fisso di coordinata x la pressione sonora oscilla regolarmente, sinusoidalmente, tra valori positivi e negativi, e ripete esattamente se stessa ad ogni incremento di ωt uguale a 2π , cioè ad intervalli sia temporali che spaziali regolari. Il tempo necessario alla generazione di un'onda completa (compressione e rarefazione), ossia a compiere una oscillazione completa, si definisce *periodo* T :

$$(1.15) \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad [s]$$

L'inverso del periodo è la *frequenza* di oscillazione f :

$$(1.16) \quad f = \frac{1}{T}$$

Essa viene espressa in *hertz* [Hz]. L'orecchio umano normale è in grado di percepire frequenze variabili da 16 a 20.000 Hz. La frequenza dà al suono la caratteristica dell'acutezza: le basse frequenze sono proprie dei suoni gravi, le alte dei suoni acuti. Frequenze al di sotto dei 16 Hz non sono udibili come suoni, ma possono essere percepite come vibrazioni. Frequenze al di sopra dei 20.000 Hz, dette ultrasoniche, non vengono udite dall'orecchio umano.

Si definisce *lunghezza d'onda* la distanza percorsa dalla perturbazione in un periodo. Ad essa corrisponde la separazione spaziale di punti che allo stesso istante hanno le medesime condizioni vibratorie.

$$(1.17) \quad \lambda = \frac{c}{f} = cT \quad [m]$$

1.1.3. Riflessione trasmissione e diffrazione delle onde

Quando un'onda sonora, nel propagarsi passa da un mezzo ad un altro, essa può venire in parte riflessa ed in parte trasmessa. Questo processo, e i fenomeni che si manifestano, dipendono dalle caratteristiche della superficie di separazione e dalle proprietà fisiche dei due mezzi.

Si consideri un'onda piana armonica, cui è associata una pressione sonora di ampiezza $\overline{p_i}$, che si propaga da un fluido ad un altro di caratteristiche diverse dal primo. In generale, ci si deve aspettare un'onda di ampiezza $\overline{p_r}$ riflessa nello stesso primo mezzo e un'onda trasmessa nel secondo mezzo di ampiezza $\overline{p_t}$.

Trascurando effetti dissipativi, si possono definire, rispettivamente, il *coefficiente di riflessione* r e il *coefficiente di trasmissione* τ della pressione sonora, come:

$$(1.18) \quad r = \frac{\overline{p_r}}{\overline{p_i}} \quad \text{e} \quad \tau = \frac{\overline{p_t}}{\overline{p_i}}$$

Il coefficiente di trasmissione τ della pressione è sempre positivo: la pressione sonora dell'onda trasmessa è sempre in fase con quella dell'onda incidente.

Il coefficiente di riflessione r della pressione varia tra -1 e 1 . Se assume un valore pari a 0 significa che l'onda è totalmente trasmessa e non c'è riflessione, se invece il suo valore è pari a 1 la pressione sonora dell'onda riflessa ha la stessa ampiezza e lo stesso segno di quella incidente (in fase), mentre se $r = -1$ è di segno contrario (in opposizione di fase).

Se l'onda incide obliquamente sulla superficie di interfaccia tra i due fluidi, e θ_i , θ_r , θ_t sono, rispettivamente, gli angoli di incidenza, di riflessione e di trasmissione, tutti definiti rispetto all'asse x normale alla superficie di separazione, valgono le seguenti leggi, che sottintendono una certa analogia con l'ottica geometrica:

$$(1.19) \quad \sin \theta_r = \sin \theta_i$$

che è una semplice legge di riflessione speculare, che stabilisce che l'angolo di riflessione è uguale a quello di incidenza.

$$(1.20) \quad \frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{c_2}{c_1}$$

dove c_1 e c_2 sono le rispettive velocità di propagazione dei due fluidi.

Quest'ultima è la *legge di Snell* che governa invece la rifrazione dell'onda trasmessa, cioè il fenomeno di variazione di direzione che si manifesta quando l'onda attraversa mezzi caratterizzati da una diversa velocità di propagazione.

Si può infine definire un cosiddetto angolo critico θ_c tale per cui:

$$(1.21) \quad \sin \theta_c = \frac{c_1}{c_2}$$

Se si verifica la condizione in base alla quale $c_1 < c_2$ e $\theta_i > \theta_c$, l'onda incidente viene totalmente riflessa.

Nelle considerazioni fatte sulla riflessione e sulla trasmissione di onde sonore sono stati applicati i principi dell'ottica geometrica, sottintendendo che le superfici di separazione dei mezzi interessati fossero infinitamente estese, o, più precisamente molto più grandi delle lunghezze d'onda dei suoni riflessi e trasmessi.

In acustica, tuttavia, questo modo di operare è molto meno generalizzabile che in ottica, poiché nella pratica comune è assai frequente avere a che fare con suoni la cui lunghezza d'onda è dello stesso ordine di grandezza o più grande delle dimensioni delle superfici, degli oggetti, delle strutture presenti nell'ambiente in cui i suoni si propagano. Quando ciò si verifica interviene un nuovo fenomeno, il fenomeno della *diffrazione*, e i metodi puramente geometrici non costituiscono più uno strumento sufficiente. Il fenomeno risulta perciò alquanto complesso da trattare, e in questo contesto ci si limita a schematizzare alcune considerazioni generali sulla natura del fenomeno.

Nella figura 1.1 è riportato un esempio di diffrazione dell'onda sonora attraverso un'apertura, praticata in un elemento divisorio perfettamente riflettente.

Se le dimensioni dell'apertura sono più piccole o dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda (fig. 1.1 a) consegue che vi è presenza di suono anche nella zona d'ombra geometrica, l'onda si propaga anche attorno all'apertura stessa; se, invece, sono più grandi della lunghezza d'onda (fig. 1.1 b), al di là del divisorio, l'onda risulta confinata spazialmente, essendosi trasmessa solo la porzione di fronte d'onda corrispondente all'apertura.

La diffrazione che si ha nel caso (a), si ha in ragione del fatto che i bordi dell'apertura, interagendo con l'onda incidente, diventano essi stessi sorgenti elementari di onde sonore che si irradiano in tutte le direzioni.

Un processo analogo si instaura quando l'onda sonora incontra oggetti fisici di dimensioni finite (fig. 1.2). Nel caso (a) la lunghezza d'onda è comparabile con le dimensioni dell'ostacolo, e quindi si ha presenza di suono anche al di là dell'ostacolo, nella sua ombra geometrica.

In conclusione, si può affermare che solo attraverso aperture di grandi dimensioni o al di là di ostacoli molto estesi è possibile che si stabiliscano zone d'ombra ben definite, e che, ribaltando il concetto, i suoni a bassa frequenza, caratterizzati da grandi lunghezze d'onda, sono molto più facilmente diffratti dei suoni ad alta frequenza, con piccola lunghezza d'onda.

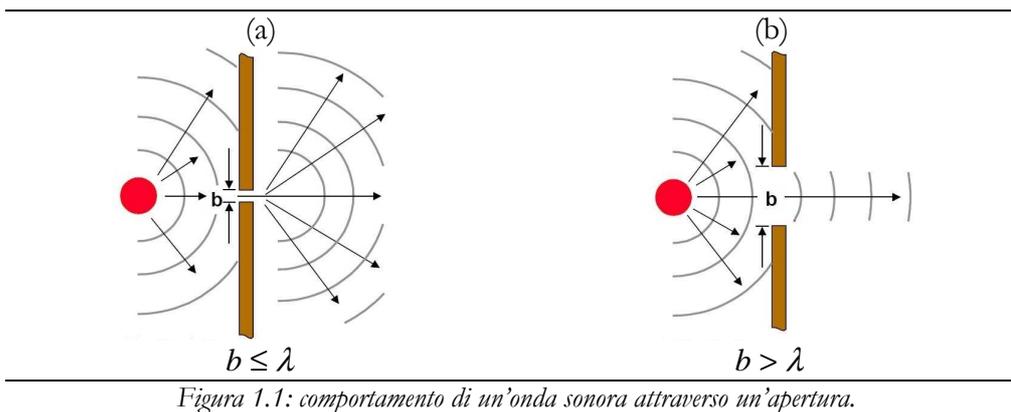
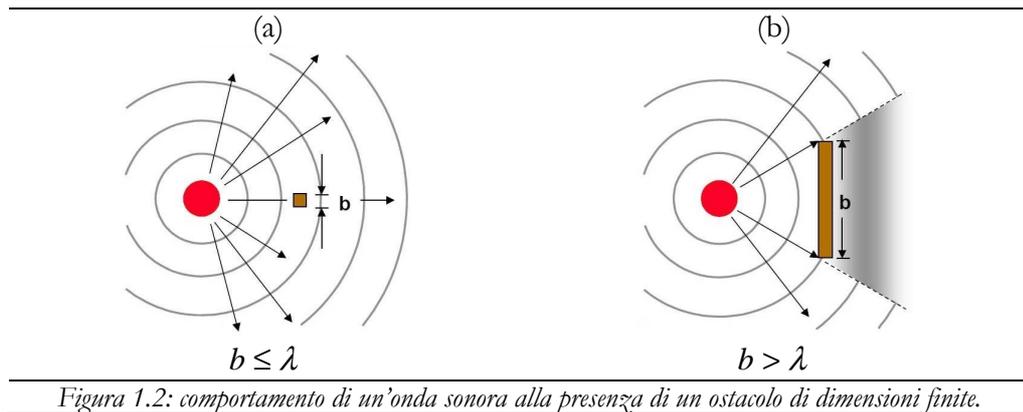


Figura 1.1: comportamento di un'onda sonora attraverso un'apertura.



1.1.4. Le grandezze fondamentali

La propagazione delle onde sonore comporta un trasferimento di energia meccanica da particella a particella, da elemento di volume ad elemento di volume del mezzo di propagazione. Qualunque sia la sorgente che genera l'onda, la legge di conservazione dell'energia impone che in ogni istante tutta l'energia generata da quella sorgente possa essere ritrovata, al netto delle eventuali perdite, all'interno del sistema acustico considerato. In più, si deve essere in grado di stabilire come e quanta energia fluisce nel tempo da una parte ad un'altra dello stesso sistema.

Le grandezze fisiche che forniscono questa descrizione sono l'intensità e la densità di energia, oltre alla potenza che caratterizza intrinsecamente la sorgente del suono.

La *potenza sonora* W di una sorgente è la totale energia sonora emessa dalla sorgente nell'unità di tempo. L'unità di misura della potenza è il watt $[W]$.

L'*intensità sonora* I è definita come la quantità di energia sonora che fluisce nell'unità di tempo, attraverso una superficie di area unitaria S perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. L'unità di misura è in watt al metro quadrato $[W/m^2]$.

$$(1.22) \quad I = \frac{W}{S} \quad [W/m^2]$$

Le onde sonore che si propagano da una sorgente puntiforme in uno spazio libero attraverso un mezzo omogeneo ed isotropo sono onde sferiche. Da ciò si ricava facilmente che l'intensità sonora in un punto è inversamente proporzionale al quadrato della distanza r del punto dalla sorgente, secondo la seguente relazione:

$$(1.23) \quad I = \frac{W}{4\pi \cdot r^2} \quad [W/m^2]$$

Ricordando la legge di Ohm acustica si ottiene facilmente la seguente espressione, valida sia per l'onda sferica armonica, che per l'onda piana:

$$(1.24) \quad I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad [W/m^2]$$

La *densità di energia sonora* D rappresenta l'energia sonora contenuta in una unità di volume del mezzo. L'unità di misura della densità di energia è watt per secondo al metro cubo, $[W \cdot s/m^3]$.

Nel caso di onde piane si ha:

$$(1.25) \quad D = \frac{p^2}{\rho_0 c^2} = \frac{I}{c} \quad [W \cdot s/m^3]$$

Se si considera un campo acustico perfettamente diffuso, nel quale, cioè, l'energia sonora sia distribuita uniformemente in tutte le possibili direzioni (ovvero si hanno infiniti fronti sonori elementari piani uniformemente distribuiti in tutte le direzioni), si ha che per esso valgono le seguenti espressioni:

$$(1.26) \quad I = \frac{p^2}{4\rho_0 c} \quad ; \quad D = \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \quad ; \quad I = \frac{Dc}{4}$$

In conclusione la relazione che collega la densità di energia sonora con il quadrato della pressione sonora efficace è la stessa sia nel caso di onde piane che di campo sonoro perfettamente diffuso.

1.2. Sorgenti sonore

1.2.1. Generalità

La posizione origine del campo sonoro prende il nome di *sorgente*. Essa è costituita da un oggetto posto in vibrazione all'interno del mezzo di propagazione e in quanto tale è dotata di dimensioni fisiche ben definite, tutte le sorgenti sonore quindi sono estese. Possiamo avere diversi tipi di sorgenti sonore: sorgenti legate alle infrastrutture di trasporto (strade, ferrovie e aeroporti ecc.), sorgenti di tipo industriale e sorgenti legate all'attività umana. Ognuna di esse può essere ricondotta ad una forma geometrica elementare, tale semplificazione porta innumerevoli vantaggi permettendo uno studio più agevole del fenomeno.

Le tre tipologie di forma con le quali possono essere schematizzate sono le seguenti:

- sorgente puntiforme;
- sorgente lineare;
- sorgente piana;

Le sorgenti di tipo lineare e superficiale possono essere a loro volta ricondotte a sorgenti puntiformi. Tale schematizzazione dipende non solo dalla forma intrinseca della sorgente oggetto di indagine ma anche dalla posizione di sorgente e ricevitore.

La sorgente sonora viene inoltre caratterizzata oltre che dal tipo di emissione dall'intensità, espressa in termini di potenza sonora, e direttività espressa in termini di fattore di direttività. Una sorgente sonora posta in ambiente esterno genera livelli di rumore che si propagano in campo libero oppure vengono ostacolati dalla presenza di schermi o barriere.

1.2.2. Sorgente puntiforme

La schematizzazione di una sorgente estesa ad un punto è valida nel caso in cui abbia dimensioni molto piccole rispetto alla lunghezza d'onda del suono generato. Nelle applicazioni pratiche si verifica molto spesso la situazione in cui il campo acustico è di dimensioni molto

più grandi rispetto a quelle della sorgente: anche in questo caso è conveniente ricorrere alla schematizzazione puntiforme.

Il caso di maggior interesse, è quello in cui la sorgente è *omnidirezionale* ovvero emette la stessa quantità di energia in ogni direzione. Il campo acustico che ne deriva è *sferico*, con origine nel punto e fronti d'onda di forma sferica con raggio pari alla distanza

Nelle condizioni di campo lontano, per $r > 1.6 \lambda$, la relazione tra l'intensità sonora I e la potenza sonora W in funzione della distanza r dalla sorgente è data dalla seguente relazione:

$$(1.27) \quad I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2}$$

Dove W è la potenza acustica emessa dalla sorgente ed S è la superficie della sfera di raggio r centrata sulla sorgente medesima.

L'energia sonora emessa dalla sorgente si distribuisce su superfici che aumentano di ampiezza all'aumentare della distanza di propagazione

$$(1.28) \quad L_T = L_W - 10\log(4\pi) - 10\log r^2 = L_W - 11 - 20\log r$$

si può dimostrare che per le usuali applicazioni $L_T = L_p$ e quindi si ricava:

$$(1.29) \quad L_p = L_W - 20\log r - 11$$

Dove L_p è il livello di pressione sonora in dB

L_W è il livello di potenza sonora della sorgente, in dB riferiti a 10^{-12} W

r è la distanza fra la sorgente e il punto di ricezione espressa in metri.

Il modello di sorgente puntiforme *omnidirezionale* è rappresentativo solo di alcune situazioni reali come ad esempio un aereo in volo ma è poco aderente ai casi reali di sorgenti posizionate vicino al terreno.

1.2.3. Sorgente lineare

Quando in una sorgente sonora una delle dimensioni è di gran lunga maggiore delle altre, si può ricorrere alla schematizzazione lineare, considerando solo la dimensione predominante e trascurando le altre.

Esempi pratici di sorgenti lineari sono dati da una strada rettilinea con una densità di traffico uniformemente distribuita lungo la sua lunghezza. Tale schematizzazione prevede la disposizione di infinite sorgenti puntiformi in ogni punto della linea che definisce la sorgente. La forma della linea rispecchia quindi l'andamento della sorgente reale ed è in genere costituita da una curva continua. Nel caso in cui tale curva sia una retta, il campo generato è *cilindrico*, con asse nella retta e superfici cilindriche di raggio pari alla distanza da essa. L'intensità acustica è quindi espressa da:

$$(1.30) \quad I = \frac{W_s}{2\pi r l}$$

Dove W_s è la potenza acustica emessa dalla sorgente

r è la distanza fra la sorgente e il punto di ricezione espressa in metri

l è la lunghezza della sorgente.

$$(1.31) \quad L_p = L_W - 8 - 10\log r$$

E' interessante osservare che per sorgenti di tipo lineare il livello di pressione sonora si riduce di 3 dB al raddoppio della distanza dalla sorgente sonora fino ad una distanza uguale a circa metà lunghezza della sorgente.

Per distanze superiori alla lunghezza della sorgente lineare si può assumere invece un decadimento di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza.

1.2.4. Sorgente Piana

Un caso tipico di sorgente piana è rappresentato dall'emissione sonora di pareti e coperture di edifici industriali. Una sorgente areale genera onde acustiche piane, nelle normali situazioni di misura onde perfettamente piane non si verificano frequentemente.

Se onde piane possono essere generate in prossimità di grandi lastre vibranti (facciate dei capannoni industriali) tale condizione di onda piana viene persa facilmente in prossimità dei bordi e all'aumentare del piano vibrante.

Per distanze non troppo elevate si può dimostrare che i livelli di rumore subiscono attenuazioni simili a quelle delle sorgenti lineari mentre per distanze molto elevate le attenuazioni sono riconducibili alle sorgenti puntiformi.

Per le sorgenti superficiali vale la relazione:

$$(1.32) \quad L_w = L_{w/A} + 10\log(A)$$

Dove $L_{w/A}$ è utilizzabile per esprimere la potenza sonora per unità di superficie

A rappresenta la superficie totale di emissione.

Se si considera quindi un'area di dimensioni $b \cdot c$ dove $c > b$, a breve distanza dalla sorgente ($r < b/\pi$) non si ha alcuna attenuazione con la distanza:

$$(1.33) \quad L_p = L_w - 10\log\left(\frac{\pi}{4bc}\right)$$

Per distanze intermedie dalla sorgente ($b/\pi < r < c/\pi$) si ha invece una riduzione dell'intensità acustica proporzionale all'inverso della distanza:

$$(1.34) \quad L_p = L_w - 10\log r - 10\log(4c)$$

1.2.5. La direttività di emissione delle sorgenti

Il campo acustico generato da una sorgente sonora è caratterizzato da una emissione di energia che varia in funzione della direzione di propagazione.

Se la sorgente è direzionale occorre aggiungere alle relazioni precedentemente scritte l'*indice di direttività*.

Il *fattore di direttività* Q viene definito come il rapporto tra l'intensità sonora nella direzione \square (I_\square) e l'intensità sonora I_0 che avrebbe il campo acustico in quel punto se la sorgente fosse omnidirezionale. Esso dipende dalla frequenza e di norma aumenta con essa.

Si definisce inoltre anche l'*indice di direttività* D dato dalla seguente relazione:

$$(1.35) \quad D = 10\log Q \quad [\text{dB}]$$

Oltre alla *direttività intrinseca* della sorgente (legata quindi alla forma e alle caratteristiche proprie del modo di vibrare della sorgente) occorre tener conto anche della direttività legata al posizionamento della sorgente su piani o in angoli.

Il campo sonoro generato può quindi essere modificato dalla presenza di ostacoli ed elementi riflettenti, si consideri ad esempio il caso della sorgente puntiforme sferica ($Q=1$), se viene posta in un piano perfettamente riflettente si ottiene $Q=2$ ($D=3$ dB); se viene posta in un angolo tra due superfici riflettenti si ottiene $Q=4$ ($D=6$ dB); se viene posta in un angolo tra tre superfici riflettenti si ottiene $Q=8$ ($D=9$ dB)

1.3.Gli effetti di attenuazione nella propagazione del suono

Quanto detto fino ad ora riguardo la propagazione del suono è valido per *un'atmosfera ideale* ovvero *omogenea, isotropica e completamente libera da superfici riflettenti*.

Per calcolare il livello di pressione sonora all'aperto dovuto ad una sorgente di cui sia noto il livello di potenza sonora si effettua perciò in primo luogo il calcolo nelle condizioni ideali utilizzando le equazioni viste in precedenza e successivamente si tiene conto delle correzioni in decibel dovuti alle varie attenuazioni. Quindi l'equazione semplificata del livello di pressione sonora valutato a una determinata distanza dalla sorgente si può esprimere mediante la seguente equazione:

$$(1.37) \quad L_p = L_w + D_c - A$$

Dove L_w è il livello di potenza sonora espresso in dB;

D_c è l'indice di direttività;

A è dato da tutti i fattori che possono contribuire all'attenuazione.

Di solito il fattore A viene suddiviso in un termine che tiene conto della divergenza geometrica e un termine legato a tutti gli altri fattori di attenuazione aggiuntiva anche detti *attenuazioni in eccesso*.

L'attenuazione legata alla divergenza geometrica è data dall'equazione:

$$(1.38) \quad A_{div} = 20 \log \frac{d}{d_0} - 11$$

Si riporta nei paragrafi successivi la descrizione dei vari fattori di attenuazione aggiuntiva.

1.3.1.L'assorbimento atmosferico

Una parte dell'energia sonora è convertita in calore attraverso l'aria. L'assorbimento atmosferico diventa significativo per le alte frequenze.

Per un'onda piana, la pressione p alla distanza x dalla posizione in cui la pressione è p_0 è data dalla formula:

$$(1.39) \quad p = p_0 e^{-\alpha x/2}$$

Il coefficiente di attenuazione α per l'assorbimento dell'aria dipende dalla frequenza, dall'umidità, dalla temperatura e dalla pressione e può essere calcolata utilizzando le formule dalla (1.37) alla (1.39)

$$(1.40) \quad \alpha = f^2 \left[\left(\frac{1.84 \times 10^{-11}}{\frac{T_0^{0.5}}{T} \times \frac{p_s}{p_0}} \right) + \frac{T_0^{2.5}}{T} \times \left(\frac{0.10680 e^{-\frac{3352}{T}} f_{r,N}}{f^2 + f_{r,o}^2} + \frac{0.01278 e^{-\frac{2239.1}{T}} \times f_{r,o}}{f^2 + f_{r,o}^2} \right) \times \frac{N_p}{m \cdot atn} \right]$$

Dove $f_{r,N}$ e $f_{r,o}$ sono frequenze associate alla vibrazione delle molecole di azoto e ossigeno.

$$(1.41) \quad f_{r,N} = \frac{p_s}{p_{s0}} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{0.5} \times \left(9 + 280 H e^{-4.17 \left[\left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/3} - 1 \right]} \right)$$

$$(1.42) \quad f_{r,o} = \frac{p_s}{p_{s0}} \left(24 + 4.04 \times 10^4 H \frac{0.02 + H}{0.391 + H} \right)$$

Dove f è la frequenza

T è la temperatura assoluta dell'atmosfera espressa in gradi Kelvin

T_0 è il valore di riferimento di T (20° C)

H è la percentuale della concentrazione molare del vapor d'acqua in atmosfera

p_s è il valore della pressione atmosferica locale

p_0 è la pressione atmosferica di riferimento.

Queste formule danno una stima dell'assorbimento dei toni puri con un accuratezza di $\pm 10\%$ per $0.05 < H < 5$ e $253 < T < 323$ e $p_0 < 200\text{kPa}$

L'assorbimento varia durante il giorno e durante l'anno (le variazioni giornaliere maggiori si hanno d'estate), l'umidità assoluta H è un fattore importante nella variazione diurna e presenta dei picchi nelle ore pomeridiane.

1.3.2. Riflessioni e rifrazioni

Come visto in precedenza riflessioni e rifrazioni seguono le leggi dell'ottica geometrica. Le riflessioni sono un fenomeno piuttosto comune e possono talvolta assumere un'importanza rilevante.

Nel concetto di riflessione qui esposto non si tiene conto della riflessione del terreno, di cui si terrà conto nell' "effetto terreno" (vedi paragrafo 1.3.4).

Le condizioni necessarie perché una riflessione venga considerata sono le seguenti:

- Deve essere possibile una riflessione di tipo speculare;
- Coefficiente di riflessione $\rho \geq 0.2$;
- La superficie riflettente deve essere sufficientemente grande rispetto alla lunghezza d'onda del suono di interesse.

Quest'ultima condizione si traduce secondo la *norma ISO 9613-2* nella seguente espressione:

$$(1.43) \quad \frac{1}{\lambda} > \left[2 / (l_{\min} \cos \beta)^2 \right] \times \left[d_{s,o} d_{o,r} l(d_{s,o} + d_{o,r}) \right]$$

Dove λ è la lunghezza d'onda del suono di interesse;

$d_{s,o}$ è la distanza sorgente ostacolo;

$d_{o,r}$ è la distanza ostacolo ricevitore;

β è l'angolo di incidenza espresso in radianti;

l_{\min} è la minima dimensione (lunghezza o altezza) dell'ostacolo riflettente.

1.3.3. Gli schermi acustici

Quanto detto fino ad ora riguarda gli effetti delle proprietà dell'aria sull'irraggiamento del suono in campo libero, nella maggior parte dei casi tra sorgente e ricevitore sono presenti edifici o altri corpi.

La maggioranza delle barriere sono collocate lungo le grosse infrastrutture di trasporto e i siti industriali. Solitamente vengono utilizzate per la protezione di vaste aree. Le barriere di altezza usuale sono generalmente inefficaci per la protezione dei ricettori che si trovano su edifici a più piani (palazzi e condomini). Una barriera antirumore blocca il percorso diretto dalla sorgente di rumore al ricevitore. In questo modo il rumore raggiunge il ricevitore solo per diffrazione attorno ai bordi della barriera. Come visto nei paragrafi precedenti la diffrazione consiste in un effetto di curvatura dei raggi sonori che riescono in tal modo ad oltrepassare un ostacolo di dimensioni finite. L'effetto diffrattivo dipende fortemente dalla lunghezza d'onda del suono considerato (quindi dalla frequenza), in particolare le basse frequenze saranno notevolmente difratte (curvatura dei raggi sonori all'interno della zona d'ombra dietro la barriera), mentre le frequenze medie e alte lo saranno molto meno (la zona d'ombra sarà quindi maggiore). Quindi il calcolo delle attenuazioni di una barriera dipenderebbe sostanzialmente dalla risoluzione di problemi di diffrazione, risolvibili mediante opportune integrazioni.

Lavori teorici a riguardo sono stati svolti da *Sommerfield* e *Mac Donald*.

Per la risoluzione dei casi pratici tuttavia si è ricorso a delle approssimazioni alle soluzioni esatte che combinate ai risultati sperimentali hanno portato a diverse formule e diagrammi che consentono la previsione dell'attenuazione acustica di una barriera con una certa approssimazione.

Utilizzando l'approssimazione di *Kirchoff-Fresnel* per gli schermi sottili e rigidi (*numero di Fresnel*) e la teoria geometrica della diffrazione per le barriere spesse e i bordi si sono derivate delle formule pratiche per il calcolo delle barriere antirumore.

Il numero di Fresnel è adimensionale e relativo alle caratteristiche del percorso geometrico sorgente-ricevitore ovvero la differenza tra il percorso diretto (in assenza di barriera) e il percorso diffratto (con barriera).

Il numero di Fresnel vale:

$$(1.40) \quad N = \pm 2(\delta / \lambda) = \pm 2(f\delta / c)$$

Dove δ è la differenza di percorso determinata sul percorso sorgente-ricevitore;

λ è la lunghezza d'onda del suono emesso dalla sorgente;

f è la frequenza del suono emesso dalla sorgente;

c la velocità del suono.

Il numero di *Fresnel* assume valori negativi nel caso in cui la linea di vista sorgente-ricettore passi oltre lo spigolo superiore dell'ostacolo (vede il ricettore)

Maekawa ha prodotto un abaco che esprime l'attenuazione di una barriera fissa rigida che si basa sul *numero di Fresnel*.

L'abaco è stato derivato empiricamente da dati sperimentali di laboratorio usando per l'appunto il *numero di Fresnel* suggerito dalla teoria *Kirchoff-Fresnel* sulla diffrazione.

L'attenuazione prevista è data dalla seguente formula:

$$(1.41) \quad \text{Attenuazione} = 10 \log(3 + 20N) \quad [\text{dB}]$$

Molti dei metodi sviluppati per il calcolo delle barriere fa riferimento a questo diagramma. La teoria di *Kurze* e *Anderson* integra la precedente e consente di incrementarne l'accuratezza a tutto l'intervallo di variabilità di N, l'attenuazione si può esprimere nel modo seguente:

$$(1.42) \quad \text{Attenuazione} = 5 + \log \left(\frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\text{tgh}\sqrt{2\pi|N|}} \right) \quad [\text{dB}]$$

Il diagramma è attendibile per barriere di altezza fino ai 5 m se vengono rispettate le seguenti condizioni:

- sorgente sonora sufficientemente compatta;
- altezza della sorgente dal suolo maggiore della sua radice quadrata della sua distanza dalla barriera;
- altezza del punto di ricezione dal suolo maggiore della radice quadrata della sua distanza dalla barriera.

Anche gli edifici possono essere considerati dei veri e propri schermi acustici.

Nella norma tedesca DIN 18005 ad esempio una fila di edifici viene schematizzata tramite il rapporto pieno/vuoto (ovvero il rapporto tra la lunghezza totale del tratto considerato nel quale sono presenti edifici e quella in cui non ci sono), tale tipo di approccio risulta utile sulla mappatura a larga scala ma di scarsa utilità nel caso di situazioni locali.

Un altro tipo di approccio viene utilizzato nella norma ISO 9613-2. La norma considera la presenza di edifici industriali o di insediamenti residenziali in termini macroscopici.

Per gli impianti industriali l'effetto viene descritto attraverso un coefficiente di attenuazione fornito in dB/m mentre per gli insediamenti residenziali l'attenuazione viene valutata in funzione della densità di edifici sul percorso di propagazione in rapporto all'area totale occupata e della distanza sorgente ricevitore.

1.3.4. Gli effetti del terreno

L'effetto acustico del terreno è un fenomeno complesso e di difficile modellizzazione teorica

I “*ground effects*” sono il risultato dell'interferenza tra la componente diretta del suono dalla sorgente al ricevitore e la componente riflessa dal terreno quando sia sorgente che ricevitore si trovano molto vicino a questo. A volte tale fenomeno prende il nome di assorbimento del terreno, ma l'interazione del suono all'esterno con il terreno è complicata dal fenomeno dell'interferenza, ci possono essere quindi degli incrementi dovuti ad un'interferenza di tipo costruttivo oppure delle attenuazioni risultanti dall'interferenza distruttiva. Tale interferenza è simile al *Lloyd's mirror effect* dell'ottica geometrica anche se non direttamente analogo.

Vicino al terreno di tipo non poroso, all'asfalto o al cemento la pressione del suono più o meno raddoppia, tali superfici vengono definite *dure*.

Per contro le superfici porose come terreno erboso, la sabbia e la neve (la neve è molto più porosa della sabbia) vengono definiti *soffici*.

Mentre il primo favorisce la propagazione del suono (si possono avere degli incrementi dell'ordine di 1-3 dB) il secondo ha l'effetto contrario.

La superficie porosa permette al suono di penetrarvi all'interno ed esservi assorbito e "ritardato" nel suo percorso per effetto dell'attrito e gli scambi di temperatura.

Il terreno viene solitamente trattato in modo empirico utilizzando un coefficiente G che assume valori pari a zero nel caso di terreno duro e 1 per il terreno soffice (vedi capitolo 5). L'effetto terreno va sicuramente considerato sulle grandi distanze dalla sorgente (superiori ai 70 m), sperimentalmente si è infatti verificata un'attenuazione in eccesso di 5-10 dB su distanze dell'ordine dei 300 m con punte molto elevate in corrispondenza delle frequenze medio alte.

In genere l'attenuazione su terreno erboso è dell'ordine di 5 dB/100 m per ogni raddoppio di frequenza.

1.3.5. Attenuazioni di alberi e fogliame

La presenza di un bosco o di una fascia consistente di vegetazione può avere tre tipi di effetti sull'influenza del suono.

Il primo effetto è dovuto al terreno, esso risulta significativo se è presente uno spesso strato di fogliame parzialmente decomposto nella zona del sottobosco. In tale situazione la superficie del terreno è formata da uno strato molto poroso con una resistenza al flusso molto bassa che dà una prima attenuazione alle frequenze più basse di quella che si avrebbe su un tipico terreno erboso. (simile all'effetto che si ottiene sopra la neve).

Il secondo effetto è dato dai tronchi e i rami che riflettono il suono lontano dal terreno tra la sorgente e il ricevitore.

Il terzo è dato dalle foglie che attenuano il suono attraverso l'attrito viscoso. Per calcolare l'attenuazione totale dei boschi Price sommò tra loro i contributi di attenuazione attraverso cilindri spessi (tronchi) e cilindri fini (rami) e il terreno. I calcoli risultavano coerenti qualitativamente con le misure ma occorre sistemare alcuni parametri per ottenere risultati soddisfacenti anche dal punto di vista quantitativo. Price scoprì che le foglie davano un maggiore contributo sopra 1 kHz e l'attenuazione delle foglie approssimativamente aumentava linearmente con la frequenza.

Molti lavori di ricerca hanno portato a definire alcuni valori tipici di attenuazione dovuta alla vegetazione.

Uno studio Danese riporta attenuazioni di circa 3 dB(A) sul rumore da traffico ottenute attraverso la creazione di fasce di alberi (15-41 m) posizionate in modo opportuno su terreno soffice ai lati delle strade.

Secondo uno studio di Heisler 100 m di foresta di pino rosso possono arrivare ad attenuazioni di 8 dB(A).

Defrance mettendo in relazione i risultati ottenuti dagli studi di Heisler e Huisman con misurazioni effettuate in differenti condizioni meteorologiche ha ottenuto una equazione di tipo parabolico e l'ha adattata al traffico stradale (le strade sono state modellizzate come una serie di sorgenti puntiformi equivalenti poste ad un'altezza di 0.5 m dal livello del terreno). Secondo il suo modello quando ci si ritrova in condizione di rifrazione verso il basso l'attenuazione dovuta agli alberi è di 3 dB, di 2 dB in condizioni omogenee e 1 dB per rifrazione verso l'alto.

Facendo una stima complessiva si può affermare che in condizioni di rifrazione verso il basso l'attenuazione dovuta al bosco (foresta intesa come vegetazione molto fitta) va da 2 ai 6 dB con il ricevitore ad almeno 100 m dalla strada.

Un'altra relazione proposta e applicabile mediamente per varie tipologie di alberi è la seguente:

$$(1.43) \quad A_{foresta} = 0.01(f)^{1/3}$$

1.3.6.I gradienti di vento e di temperatura

L'atmosfera è in costante movimento come conseguenza dei gradienti di vento e di temperatura. Lo strato adiacente al suolo prende il nome di *troposfera*, esso possiede uno spessore variabile tra i 7 km in prossimità dei poli e i 17 km sull'equatore. La maggior parte dei fenomeni meteorologici avviene al suo interno.

La caratteristica fondamentale della troposfera è costituita dalla sua elevata capacità di rimescolamento verticale tra gli strati prossimi al suolo e quelli sovrastanti.

Il forte rimescolamento verticale è determinato dall'influenza del suolo, sebbene in realtà, a scala temporale giornaliera questa influenza è ristretta allo strato iniziale di 1,0-1,5 km denominato *Planetary Boundary Layer* (PBL).

La temperatura nella troposfera diminuisce con la quota in media di 6,5°C/km.

Il maggior interesse dal punto di vista delle previsioni del rumore è fissato sulla parte ancor più bassa chiamata anche *surface layer*. Nel *surface layer* i flussi turbolenti sono a meno del 10% della loro magnitudine mentre sono elevati i gradienti di temperatura la velocità del vento e i gradienti di temperatura.

Nelle condizioni tipiche giornaliere la *surface layer* si estende dai 50 ai 100 m. Di solito è meno spesso durante la notte. In molte condizioni meteorologiche la velocità del suono cambia con l'altezza dal terreno, di solito la temperatura diminuisce con l'altezza in assenza di vento ciò determina che le onde sonore si piegano o rifrangono verso l'alto. Quando la sorgente si trova *sottovento* rispetto al ricevitore il suono si propaga sopravvento.

Con l'aumentare dell'altezza aumenta anche la velocità del vento. In generale, la relazione tra il profilo verticale della velocità del suono $c(z)$, il profilo verticale della temperatura $T(z)$ e il profilo verticale del vento $u(z)$ nella direzione di propagazione del vento è dato dalla formula:

$$(1.44) \quad c(z) = c(0) \sqrt{\frac{T(z) + 273.15}{273.15}} + u(z)$$

Dove T è espressa in °C

u è espresso in m/s

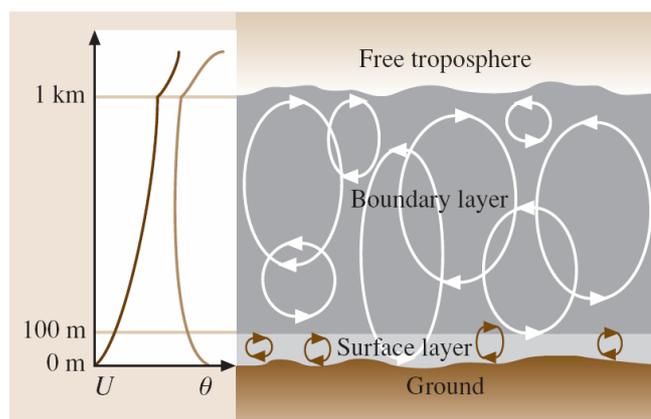


Figura 1.3 : Andamento tipo della velocità del vento (U) e del profilo della temperatura θ - Immagine da Springer - Handbook of Acoustic

1.3.7. Classi meteorologiche per la propagazione del suono

La stabilità dell'atmosfera in rispetto della dispersione del "plume" (pennacchio) è descritto nella classi di stabilità di *Pasquill* (vedi tabella n.1 e tabella n.2).

La classificazione si basa sulla radiazione solare le ore del giorno e la velocità del vento.

Secondo la classificazione di *Pasquill* le classi di stabilità sono sei e vanno dalla lettera A alla lettera F. Le classi dalla A alla D sono appropriate per il periodo diurno mentre le classi dalla D alla F per il periodo notturno.

La classe A rappresenta un'atmosfera molto instabile, la classe F rappresenta un'atmosfera molto stabile la classe D invece rappresenta un'atmosfera meteorologicamente neutra. (la classe D non coincide necessariamente con il caso acusticamente neutro).

La classificazione delle condizioni meteorologiche di *Pasquill* era stata adottata come sistema di riferimento per le schematizzazioni alla base dei sistemi di previsione del rumore. Tuttavia come si può osservare dalle tabelle 1 e 2 la classe meteorologicamente neutra include una vasta gamma di velocità del vento e non risulta adatta come categoria per le valutazioni sul rumore.

Velocità del vento (m/s)	Giorno - Radiazione solare (mW/cm ²)				1h prima del tramonto /dopo il sorgere del sole
	>60	30-60	<30	Overcast	
≤ 1.5	A	A-B	B	C	D
2.0 - 2.5	A-B	B	C	C	D
3.0 - 4.5	B	B-C	C	C	D
5.0 - 6.0	C	C-D	D	D	D
> 6.0	D	D	D	D	D

Tabella 1 – Classificazione di Pasquill - giorno

Velocità del vento (m/s)	Notte- copertura nuvolosa		
	0-3	4-7	8
≤ 1.5	F o G	F	D
2.0 - 2.5	F	E	D
3.0 - 4.5	E	D	D
5.0 - 6.0	D	D	D
> 6.0	D	D	D

Tabella 2 – Classificazione di Pasquill - notte

Per tali motivi la CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe) propone un'altra classificazione che si basa sulla precedente e introduce ben 18 sottocategorie che dipendono dalla velocità del vento. In questa classificazione la categoria 4 corrisponde alle condizioni acusticamente neutre. La velocità del vento e i gradienti di temperatura non sono indipendenti, ad esempio temperature molto alte e gradienti della velocità del vento non possono coesistere. Turbolenze molto forti associate ad alte velocità del vento non permettono lo sviluppo di stratificazioni termiche ben definite.

Lo schema adottato dal CONCAWE richiede analisi in bande di ottava e le correzioni meteorologiche si basano fondamentalmente sugli studi di *Parkin* e *Scholes* che insieme hanno

effettuato molte misure presso siti industriali. L'eccesso di attenuazione per ogni banda di ottava tende ai limiti asintotici con l'incremento della distanza (vedi tabelle 3 e 4).

Per la propagazione acustica la componente (vettore) del vento nella direzione tra sorgente e ricevitore è molto importante perciò le categorie del vento (W) devono tenerne conto. E' possibile inoltre dare delle descrizioni più dettagliate per ogni categoria (vedi tabella 5). In tabella si riportano inoltre le possibili combinazioni.

Categoria meteorologica	Classi di Pasquill e velocità del vento (m/s)		
	A,B	C,D,E	F,G
1	$V < -3.0$	-	-
2	$-3.0 < V < -0.5$	$V < -3.0$	-
3	$-0.5 < V < +0.5$	$-3.0 < V < -0.5$	$V < -3.0$
4	$+0.5 < V < +3.0$	$-0.5 < V < +0.5$	$-3.0 < V < -0.5$
5	$V > +3.0$	$+0.5 < V < +3.0$	$-0.5 < V < +0.5$
6	-	$V > +3.0$	$+0.5 < V < +3.0$

Tabella 3 – Classificazione CONCAWE

Frequenza	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Categoria 1	8.9	6.7	4.9	10.0	12.2	7.3	8.8
Categoria 6	-2.3	-4.2	-6.5	-7.2	-4.9	-4.3	-7.4

Tabella 4 – Correzioni meteorologiche secondo CONCAWE

W1	Vento forte > 3-5 m/s dal ricevitore alla sorgente
W2	Vento moderato ~ 1- 3 m/s dal ricevitore alla sorgente, o vento forte a 45°
W3	Assenza di vento
W4	Vento moderato ~ 1- 3 m/s dalla sorgente al ricevitore, o vento forte a 45°
W5	Vento forte > 3-5 m/s dalla sorgente al ricevitore
TG1	Molto negativo: giorno con radiazione forte, superficie secca e poco vento
TG2	Negativo moderato: superficie secca e poco vento
TG3	Vicino all'isoterma: mattino presto o tardo pomeriggio
TG5	Positivo moderato: notte con cielo coperto
TG6	Positivo forte: notte con cielo chiaro vento da poco ad assente

Tabella 5- Classi meteorologiche basate su descrizioni qualitative

	W1	W2	W3	W4	W5
TG1	-	Grande attenuazione	Piccola attenuazione	Piccola attenuazione	-
TG2	Grande attenuazione	Piccola attenuazione	Piccola attenuazione	Influenza meteorologica nulla	Piccolo incremento
TG3	Piccola attenuazione	Piccola attenuazione	Influenza meteorologica nulla	Piccolo incremento	Piccolo incremento
TG5	Piccola attenuazione	Influenza meteorologica nulla	Piccolo incremento	Piccolo incremento	Grande incremento
TG6	-	Piccolo incremento	Piccolo incremento	Grande incremento	-

Tabella 6- Possibili combinazioni di W e TG

1.4. Spettri acustici

1.4.1. Scala dei decibel e livelli sonori

L'orecchio umano è in grado di percepire una pressione sonora minima dell'ordine di $20\mu Pa$. All'estremo opposto, una pressione sonora di circa $20Pa$ induce sensazione di panico, e valori ancora superiori producono danni uditivi immediati. Dunque il campo di valori entro il quale può variare la pressione sonora percepibile risulta esteso su oltre sei ordini di grandezza. Inoltre, poiché la risposta soggettiva appare maggiormente correlata all'energia, quindi al quadrato della pressione sonora, il campo di variazione diventa dell'ordine di 10^{-12} .

Due fondamentali ragioni inducono allora a rappresentare le variazioni di tali grandezze, anziché su una scala lineare, su una scala compressa, di tipo logaritmico: la prima è per evitare l'oggettiva difficoltà di trattare con numeri molto piccoli o molto grandi, dispersi in un campo eccessivamente esteso; la seconda, è che proprio l'enorme capacità dinamica dell'apparato uditivo suggerisce una risposta organizzata più in termini logaritmici che non lineari.

L'uso della scala logaritmica consente di confrontare i valori della grandezza in esame con valori convenzionali della stessa grandezza assunti come riferimento. Il logaritmo decimale, moltiplicato per 10 (onde evitare un'eccessiva compressione della scala), del rapporto di questi valori rappresenta il livello della grandezza in esame; livello rispetto al valore di riferimento della stessa grandezza. Il risultato viene espresso in decibel (dB).

Il *livello della pressione sonora* L_p è dato dalla seguente relazione:

$$(1.45) \quad L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [dB]$$

Dove p è la pressione efficace del suono considerato

p_0 è una pressione efficace di riferimento pari a $20 \times 10^{-6} Pa$

L'intervallo di valori del livello della pressione sonora nei limiti di udibilità è compreso fra 0 e 120 dB.

Analogamente a quanto fatto per la pressione, si può definire *il livello di potenza sonora* L_w di una sorgente come:

$$(1.46) \quad L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [dB]$$

dove W è la potenza sonora della sorgente in esame e W_0 è la potenza sonora di riferimento assunta convenzionalmente uguale a $10^{-12}W$.

Il *livello dell'intensità sonora* L_I si definisce analogamente, avendo assunto un'intensità I_0 di riferimento pari a $10^{-12}W/m^2$:

$$(1.47) \quad L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [dB]$$

1.4.2 Composizione in frequenza

Fino ad ora, il campo acustico è stato descritto mediante una pressione sonora che varia nel tempo armonicamente, secondo un regolare andamento sinusoidale. Questo significa trattare con suoni caratterizzati da una sola, ben specificata frequenza, che si definiscono *toni puri*.

Più spesso si ha a che fare con suoni periodici, la cui ampiezza cioè si ripete regolarmente nel tempo, ma non semplicemente sinusoidali; tali suoni si definiscono *toni complessi*.

Si è visto che un suono o un rumore è la risultante di innumerevoli vibrazioni elementari e perciò, come qualsiasi vibrazione periodica complessa, può essere scomposto in una serie discreta di componenti elementari sinusoidali secondo il teorema di Fourier. In sintesi, il teorema di Fourier stabilisce che qualunque funzione periodica $f(t)$, comunque complessa, può essere espressa come somma di semplici termini armonici, le cui frequenze sono multipli interi della frequenza di ripetizione della funzione data.

Se $f(t)$ rappresenta la pressione sonora di un suono di periodo T , cui corrisponde una frequenza angolare $\omega = 2\pi/T$, essa può allora essere scritta come somma di armoniche, del tipo $\cos(\omega + \varphi)$, di frequenza angolare 2ω , 3ω e così via e ciascuna con una propria fase φ :

$$(1.48) \quad f(t) = \sum_0^\infty A_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$$

dove n è un numero intero ($n = 1, 2, 3, \dots$) e le A_n sono delle costanti numeriche che indicano quanto ogni armonica concorre al suono complesso e quindi rappresentano l'ampiezza di ciascuna componente.

L'espressione scritta è detta serie di Fourier per la funzione $f(t)$. L'analisi di Fourier consiste nel determinare l'ampiezza e la frequenza delle singole armoniche presenti nel suono complesso. Il risultato di tale analisi viene solitamente rappresentato sotto forma di grafico, detto *spettro di frequenza del suono*, in cui sull'asse delle ascisse è riportata la frequenza e su quello delle ordinate il quadrato dell'ampiezza, proporzionale all'intensità di ogni singola componente e quindi legato di conseguenza ai livelli sonori. Fatte queste considerazioni risulta evidente che lo spettro sonoro di un tono puro risulta essere una linea verticale, a rappresentare l'unica frequenza quello di un suono periodico è invece composto da una serie di linee che forniscono i livelli sonori della frequenza fondamentale e delle sue armoniche, composizione di frequenze discrete.

Oltre ai suoni periodici, esistono nella realtà molti altri suoni che non presentano le stesse caratteristiche di regolarità, sia nel dominio del tempo, sia nel dominio della frequenza, come ad esempio i suoni di tipo impulsivo di brevissima durata, o altri suoni che presentano un

andamento nel tempo irregolare e casuale, non prevedibile a priori. Questi suoni si definiscono *aperiodici*.

Per descrivere tali ‘rumori’ non è più possibile utilizzare l’analisi in serie discreta di Fourier, proprio perché la loro caratteristica è di possedere un grandissimo numero di frequenze, uno spettro cosiddetto continuo. Per tali suoni risulta più utile procedere secondo un’*analisi per bande*. Lo spettro sonoro si costruisce cioè suddividendo il campo di udibilità in gruppi di frequenze acustiche (bande) e per ciascuno viene riportato il valore energetico medio derivante dall’integrazione dell’intensità sonora all’interno della banda stessa. Per ogni gruppo viene misurata la pressione sonora, escludendo con appositi filtri le frequenze estranee al gruppo. I gruppi più comuni sono caratterizzati da bande di frequenza di larghezza percentuale costante (CPB), in cui cioè è mantenuto costante il rapporto f_s/f_i , dove f_s e f_i sono rispettivamente la frequenza superiore e la frequenza inferiore della banda. Più comunemente $f_s/f_i = 2$, oppure $f_s/f_i = 2^{1/3}$; nel primo caso si parla di analisi per *banda d’ottava*, nel secondo di analisi per *bande di terzo d’ottava*. La frequenza superiore della banda è doppia rispetto alla frequenza inferiore per banda d’ottava; è invece pari a $\sqrt[3]{2}$ volte la frequenza inferiore per banda di terzo d’ottava. In tutti i casi, si usa identificare le bande di frequenza con la corrispondente frequenza centrale f_c , cioè la frequenza che divide in due intervalli uguali l’ampiezza di banda $f_s - f_i$, definita come:

$$(1.49) \quad f_c = \sqrt{f_i f_s}$$

Per banda d’ottava risulta infine:

$$(1.50) \quad \frac{f_s - f_i}{f_c} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Le frequenze centrali normalizzate f_c (Hz) per banda d’ottava sono:

16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
----	------	----	-----	-----	-----	------	------	------	------	-------

1.5. Psicoacustica

1.5.1 Scale soggettive e diagramma normale

Per *psicoacustica* s’intende lo studio delle relazioni che intercorrono tra le grandezze acustiche *oggettive*, cioè misurabili con uno strumento, e grandezze di tipo *soggettivo* cioè legate ai meccanismi fisiologici di percezione uditiva. In particolare, quello che più interessa è proprio il rapporto tra il livello sonoro oggettivo e il livello di sensazione soggettiva corrispondente. Ogni volta che si fa riferimento a grandezze di tipo soggettivo, non essendo queste direttamente misurabili, si deve considerare come oggetto delle proprie indagini un *campione statistico* rappresentativo, composto da un adeguato numero di soggetti sani nell’apparato uditivo: i risultati che derivano dallo studio su tale campione, rappresentano il cosiddetto *ascoltatore medio statistico*, che esprime convenzionalmente una scala di valutazione delle sensazioni uditive corrispondenti a determinati stimoli sonori.

Il sistema uditivo umano non è in grado di percepire tutti i fenomeni sonori ambientali, ma solo quelli compresi in un preciso campo di frequenza e di ampiezza. I suoni di frequenza inferiore a circa 16 Hz non sono udibili e prendono il nome di infrasuoni, così come non sono udibili i suoni di frequenza superiore a circa 20 kHz, detti ultrasuoni. Per quanto riguarda

L'ampiezza del suono il range di udibilità varia a seconda della frequenza del suono e la relazione fra intensità oggettiva, misurabile strumentalmente, e intensità soggettiva non è lineare. Se in un soggetto si misura l'ampiezza minima udibile in dB, detta *soglia di udibilità*, si osserva che questa è funzione principalmente della frequenza, ma dipende anche da altri parametri, ad esempio dal fatto che il suono sia continuo o interrotto, che sia accompagnato da altri suoni o rumori, dalla direzione di provenienza, e così via. In modo particolare i suoni di frequenza tra 2 kHz e 5 kHz necessitano di un'ampiezza minore per poter essere uditi.

Per studiare l'intensità soggettiva in suoni di frequenza diversa, si utilizza un sistema per confronto con la sensazione sonora prodotta da un suono di riferimento. Il suono di riferimento utilizzato è un tono puro a 1 kHz, con la sorgente posta di fronte all'osservatore, e la pressione misurata in corrispondenza dell'osservatore in campo libero, cioè senza apprezzabili riflessioni delle onde sonore. La sensazione sonora ottenuta per confronto sul parametro ampiezza prende il nome di *livello di sensazione uditiva* e l'unità di misura è il *phon*. Un tono puro di 1 kHz a pressione sonora di n dB induce un livello di sensazione sonora di n phon. Suoni a frequenza diversa che diano la stessa sensazione soggettiva di intensità sono detti isofonici. Tali risultati si possono leggere immediatamente sull'audiogramma normale di *Fletcher-Munson* (Fig.1.3), che raccoglie graficamente l'andamento delle curve isofoniche. Dall'esame dell'audiogramma normale si osserva che il livello della pressione sonora di soglia è molto vicino a 0 dB per una frequenza da 800 a 5000 Hz. Il livello di soglia aumenta notevolmente sia al di sopra che al di sotto di questo intervallo entro il campo già considerato da 16 a 20.000 Hz; come a dire che il massimo di udibilità si trova in corrispondenza delle frequenze del linguaggio parlato. L'aumento della pressione sonora oltre certi livelli crea sensazioni di disagio per condurre poi a sensazioni dolorose. Una forte sensazione di fastidio è provocata da suoni con livello della pressione sonora di circa 120 dB: ciò è valido per ogni frequenza udibile. La soglia di passaggio a sensazioni dolorose è posta a circa 130 dB, ancora su tutte le frequenze, che viene definita appunto *soglia del dolore* (Fig 1.4). L'appiattimento sempre più evidente che si riscontra nelle isofoniche superiori, indica la minor sensibilità dell'orecchio per valori elevati della pressione sonora. Si deve inoltre tener conto che la sensibilità dell'orecchio non è costante. La soglia può variare notevolmente per la precedente percezione di altri suoni. Va considerata anche la sensibilità dell'orecchio a cambiamenti dell'intensità di stimolazione. Un cambiamento di intensità di 1 dB non viene praticamente percepito; sono necessari almeno 3 dB per avere la percezione della modifica intervenuta. Con 5 dB il diverso livello di intensità è chiaramente percepibile. Si ha, infine, la sensazione del raddoppio dell'intensità per un aumento di 10 dB.

Le *curve isofoniche* descrivono la relazione fra suoni percepiti soggettivamente come ugualmente intensi e il rispettivo valore di intensità oggettiva, ma non consentono di trovare la relazione tra intensità oggettiva e intensità soggettiva. A tal fine viene quindi utilizzata un'altra grandezza soggettiva, chiamata *sensazione sonora*, la cui unità di misura è il *son*. Per convenzione 1 *son* corrisponde alla sensazione sonora indotta da un tono puro di 1 kHz e di 40 dB. È possibile infine ricavare una relazione tra sensazione sonora L [son] e livello di sensazione sonora L_s [phon], espressa dalla formula:

$$(1.51) \quad L = 2^{(L_s - 40)/10}$$

Servendosi dell'audiogramma normale di *Fletcher-Munson* si può attribuire agevolmente un livello di sensazione acustica ad un tono puro. Tuttavia, nella realtà si è quasi sempre di fronte a toni complessi o a rumori e non è più sufficiente conoscere frequenza ed intensità per ottenere un indice della sensazione corrispondente.

Le curve isofoniche sono entrate a far parte della legislazione italiana in materia di inquinamento acustico. Secondo il D.M.16/03/1998 infatti l'analisi in frequenza del rumore

ambientale per determinare eventuali *componenti tonali* del rumore deve essere svolta in bande normalizzate di terzi d'ottava tra i 20 Hz e i 20kHz. Ci si trova in presenza di una componente tonale se il livello minimo di una banda supera i livelli minimi delle bande adiacenti per almeno 5 dB, si applicano in tal caso gli opportuni fattori di correzione.

Per la valutazione del rumore rispetto ai suoi effetti sull'uomo si deve stabilire una corrispondenza tra dati oggettivi e la sensazione sonora. Per fare ciò a partire dalle isofoniche si opera una ponderazione mediante opportuno filtro e in funzione della frequenza sul rumore. In sede di normativa internazionale si è fatto ciò normalizzando le curve di ponderazione A, B, e C che corrispondono all'incirca alle isofoniche di 40, 70, e 100 phon. Per la valutazione degli effetti sull'uomo, come si vedrà nel capitolo successivo, si utilizza l'uso della sola curva A.

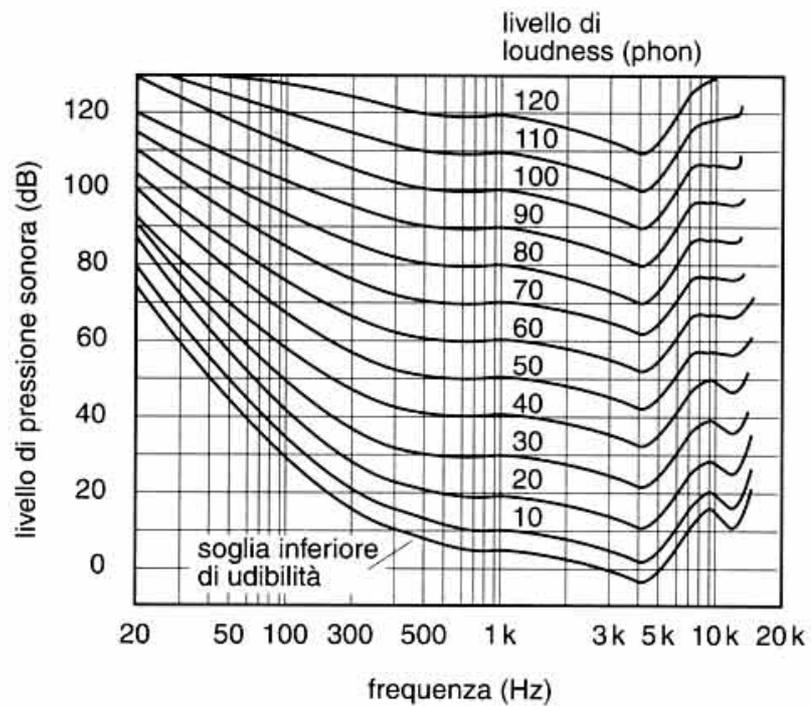


Figura 1.4: audiogramma normale di Fletcher-Munson ISO 226(1987)

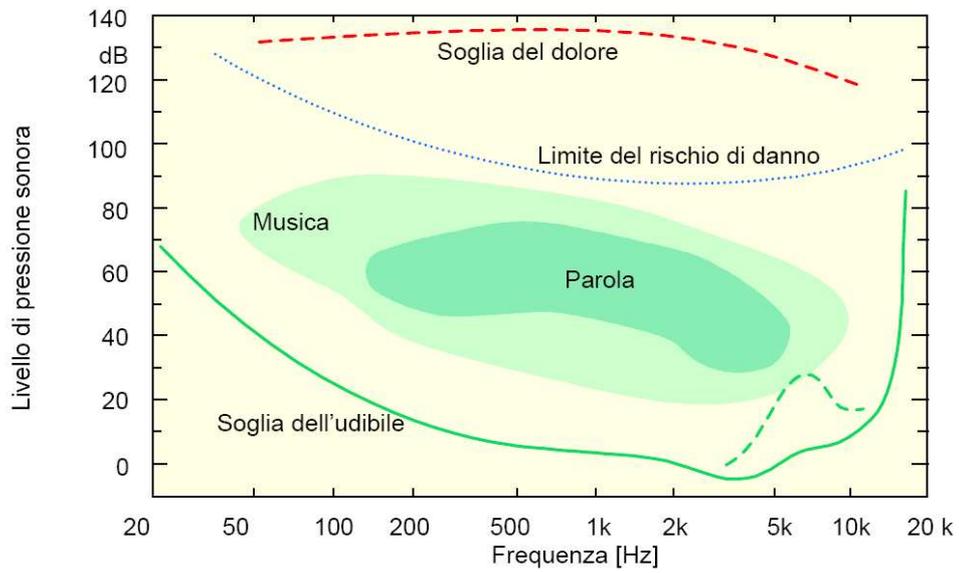


Figura 1.5: diagramma del campo dell'udibile

2. ACUSTICA AMBIENTALE

2.1.L'inquinamento acustico

L'inquinamento acustico negli ambienti di vita ha assunto una forte rilevanza come fattore di degrado ambientale e di pregiudizio della qualità della vita in tutti i paesi industrializzati. Ciò costituisce l'inevitabile conseguenza del modello di sviluppo socio-economico che si è avuto dal dopoguerra in poi.

Gli effetti dell'inquinamento derivante dal rumore immesso nell'ambiente urbano dalle numerose attività antropiche sono stati per lungo tempo trascurati in quanto giudicati meno importanti di altre problematiche ambientali.

La gerarchia, in termini di importanza ed incidenza, degli eventi responsabili dell'inquinamento acustico nell'ambiente esterno, rispetta la seguente classificazione:

- traffico veicolare su gomma;
- traffico ferroviario e aereo;
- insediamenti produttivi e commerciali;
- altre cause.

Il rumore del traffico veicolare su gomma è la causa che espone il maggior numero di persone ai livelli sonori più elevati nella maggior parte delle realtà urbane. Questo fenomeno appare come l'ovvia conseguenza della primaria esigenza di una viabilità rapida e funzionale per un competitivo sistema economico.

Il rumore ambientale non raggiunge livelli di pressione sonora tali da determinare perdite uditive, ma è responsabile di effetti indiretti (extra uditivi) sulla salute, per alcuni dei quali può costituire una concausa mentre per altri rappresenta certamente l'elemento scatenante.

Dai risultati degli studi condotti dall'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (O.C.S.E.)¹, sono emerse indicazioni che portano alla identificazione delle seguenti soglie di rumore:

- un rumore esterno compreso tra 55 e 60 dB(A) provoca disturbo e turbe del sonno;
- un rumore esterno compreso tra 60 e 65 dB(A) comporta un considerevole aumento del disturbo;
- al verificarsi di rumori esterni al di sopra dei 65 dB(A), si verificano modificazioni del comportamento che sono indice di gravi danni prodotti dal rumore.

La stessa Organizzazione stimava, all'inizio degli anni '80, che più di 130 milioni di individui dei Paesi membri (circa il 15% della popolazione totale) erano esposti a livelli di rumore superiori a 65 dB(A) causati prevalentemente dal traffico stradale. Tale cifra era indicativa della gravità della diffusione dell'inquinamento acustico nelle aree abitate dei Paesi più industrializzati.

Ciò ha indotto l'O.C.S.E. stessa a promuovere iniziative di sensibilizzazione affinché i vari Governi si orientassero verso politiche di lotta contro il rumore per limitarne l'incremento, che fossero in grado, a distanza di anni, di indicare quanto meno sui grandi numeri una tendenza al contenimento del fenomeno. Se tuttavia si comparano, come riportato nella tabella 1.1, i dati O.C.S.E. del 1980 ed i dati emersi da un Rapporto per la Comunità Europea prodotto nel 1994 si nota con chiarezza che la percentuale di popolazione esposta ai livelli sonori più elevati è aumentata dal 15% al 22,3%.

¹ L'O.C.S.E. è un'organizzazione internazionale che aiuta i governi a far fronte alle sfide economiche, sociali e ambientali poste da un'economia mondializzata. Essa raggruppa 30 paesi industrializzati e svolge un ruolo guida nella promozione della "good governance" nei settori pubblici e privati.

Più dettagliatamente, il Rapporto della C.E. del 1994 ha fornito stime dell'esposizione della popolazione in relazione ai diversi sistemi di trasporto. Nelle tabelle 1.2, 1.3 e 1.4 vengono mostrati tali livelli di esposizione e si coglie con immediatezza che il traffico veicolare è di gran lunga la sorgente più importante e diffusa.

Per ottenere un quadro completo sulla consistenza dell'impatto del rumore occorre tuttavia conoscere gli effetti che tali livelli di pressione sonora determinano sul comportamento umano. Dal medesimo Rapporto si evince che i dati sugli studi delle reazioni delle collettività sono insufficienti per fornire risposte in tal senso. Inoltre si sottolinea come la comparazione appaia problematica per il fatto che nei diversi Paesi ove tali studi socio-acustici sono stati condotti, si sono utilizzati criteri differenti di indagine ed anche gli indicatori utilizzati (*Annoyed, Affected, Severely affected*) presentano differenze dal punto di vista del significato (vedi tabella 1.5).

	Dati O.C.S.E. 1980	Dati C.E. 1995
% popolazione esposta a L_{eq} diurno > 65 dB(A)	15,0	22,3

Tabella 1.1: Stima dell'incremento della popolazione esposta al rumore diurno superiore a 65 dB(A)

Esposizione diurna	% popolazione esposta	Numero di esposti
< 55 dB(A)	39,6	136.972.000
55 - 60 dB(A)	21,7	75.124.000
60 - 65 dB(A)	19,1	65.893.000
65 - 70 dB(A)	12,8	44.252.000
70 - 75 dB(A)	5,5	18.911.000
> 75 dB(A)	1,3	4.563.000

Tabella 1.2: Esposizione al rumore da traffico su gomma della popolazione della C.E.

Esposizione diurna	% popolazione esposta	Numero di esposti
< 55 dB(A)	90,2	312.008.000
55 - 60 dB(A)	5,2	17.943.000
60 - 65 dB(A)	2,9	9.991.000
65 - 70 dB(A)	1,3	4.425.000
70 - 75 dB(A)	0,3	1.175.000
> 75 dB(A)	0,03	173.000

Tabella 1.3: Esposizione al rumore ferroviario della popolazione della C.E.

Esposizione diurna	% popolazione esposta	Numero di esposti
65 - 70 dB(A)	0,6	2.074.000
70 - 75 dB(A)	0,35	1.210.000
> 75 dB(A)	0,05	173.000

Tabella 1.4: Esposizione al rumore aeroportuale della popolazione della C.E.

Stato membro	Indicatore	Traffico su gomma	Ferrovie	Aerei	Industrie
Germania (1986)	Severely affected	25	3,9	16,5	3,2
Francia (1989)	Annoyed	21	1,8	1,7	--
Gran Bretagna (1991)	Annoyed Affected	15 28	1 4	5 16	-- 2
Olanda (1987)	Very affected	20	1,5	15	4,5

Tabella 1.5 Percentuali di popolazione “disturbata” dal rumore di sistemi di trasporto e industrie

Per tali ragioni, nell’ambito dei lavori preparatori per la stesura della recente Direttiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, relativa alla determinazione ed alla gestione del rumore ambientale, è stato dato mandato ad uno specifico gruppo di lavoro di fare il punto sulle conoscenze in merito al rapporto esistente tra il rumore ambientale ed i suoi effetti. I risultati di questo lavoro, basato su numerose indagini condotte in diversi paesi, hanno sintetizzato curve dose-risposta che mostrano il variare della percentuale di disturbati al variare del rumore ambientale espresso come L_{den} (livello giorno-sera-notte, adottato dalla direttiva CE 49/2002 come uno dei descrittori).

2.2. Gli effetti sulla collettività

Gli ambienti rumorosi producono nei soggetti esposti un certo numero di effetti sociali e comportamentali. Dagli studi socio acustici emergono dati che consentono di correlare gli effetti comportamentali all’esposizione al rumore. Gli effetti comportamentali maggiormente studiati sono la chiusura delle finestre per lo svolgimento di determinate attività, le modifiche nell’utilizzo degli ambienti all’interno delle abitazioni, l’isolamento delle stesse abitazioni e il trasferimento verso aree meno rumorose.

La rumorosità percepita (*noisiness*) è sinonimo di quello che si intende con il termine “*annoyance*” comunemente definita come un sentimento di scontentezza associato a qualsiasi condizione che si sa o si ritiene ci riguardi e ci coinvolga in maniera negativa. Tale termine viene quindi comunemente usato per indicare sia la reazione al suono che le relative sensazioni derivanti dal contenuto emozionale del fenomeno.

Diversi autori ritengono che la rumorosità percepita (*noisiness*), che rappresenta una delle dimensioni della risposta umana al rumore simile ma distinta dall’altezza o forza di un suono (*loudness*), sia un miglior descrittore rispetto a quest’ultima.

La differenza tra intensità (*loudness*) e rumorosità (*noisiness*) in termini di contenuto spettrale è piccola per suoni a banda larga ma diventa importante quando i suoni si manifestano in modo irregolare nel tempo ed hanno componenti tonali.

Le più recenti ricerche sulla percezione del rumore hanno mostrato che la gente può differenziare concetti come “*intensità*” di un suono, “*sensazione sonora*” ed “*annoyance*”, ma soltanto quando tali concetti sono ben definiti.

2.2.1 Gli indicatori del rumore ambientale

La percezione del rumore ambientale comporta la percezione di molte sorgenti nello stesso tempo ed in tale miscela di suoni l'orecchio umano è in grado di identificare e riconoscere una specifica sorgente di rumore, cosicché un'emissione può contribuire all'*annoyance* più di quanto non possa essere stimato in base al livello che ad essa compete.

Il livello equivalente energetico, L_{eq} , è oggi il parametro più usato come indice descrittore del rumore ambientale. Tale valore è idoneo a comparare situazioni simili, come sorgenti dominanti di rumore o rumori con spettro a banda larga senza discontinuità, tuttavia numerosi autori (*Fields e Walker, 1982; Gjestland, 1980*) hanno mostrato come il L_{eq} non sia applicabile quando si comparano situazioni rumorose di diverso carattere, per esempio rumore da traffico stradale e rumore ferroviario, rumore da traffico continuo ed intermittente.

In queste condizioni è quindi importante adottare indici basati su misure fisiche che corrispondono alla qualità della percezione nelle differenti situazioni. Tale qualità è funzione di un insieme di fattori psicologici e personali come le attese, l'abitudine e l'attività sociale. Di conseguenza appare appropriato l'uso di un certo numero di indici basati su differenti parametri fisici ognuno designato ad uno specifico scopo.

Dal punto di vista della percezione, importanti parametri fisici per la descrizione del rumore ambientale possono essere il livello sonoro (istantaneo, massimo, equivalente) e la distribuzione dei livelli (livelli statistici), lo spettro in frequenza, il livello del singolo evento con la relativa quantità di episodi e la distribuzione nel tempo, la variazione (tempo di salita, livello, spettro della variazione in ampiezza).

Tali parametri rispettano le seguenti definizioni:

- *Livello sonoro equivalente*: livello sonoro di un ipotetico rumore costante che, se sostituito al rumore reale, variabile nel tempo, comporta la stessa quantità di energia sonora. Si tratta quindi di una media energetica. La sua espressione, adottando la ponderazione A, è la seguente:

$$(2.1) \quad L_{Aeq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right]$$

Questo parametro ci consente di caratterizzare l'entità dei rumori con un unico indice numerico in modo tale da poterli classificare in modo significativo ai fini della valutazione dei loro effetti indesiderati.

- *Livello percentile*: livello di pressione sonora superato per una fissata frazione del tempo di misura (ad esempio il livello percentile L_{90} è il livello di pressione sonora che viene superato per il 90% del tempo di misura). Tale valore rappresenta un livello istantaneo, seppure derivante da un'analisi statistica, e non può quindi essere confrontato direttamente con il livello sonoro equivalente che ha natura energetica.
- *Livello di esposizione sonora* (SEL o livello del singolo evento):

$$(2.2) \quad SEL = 10 \log \left[\frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right]$$

Dove T_0 è il tempo di riferimento pari ad 1s e in modo del tutto analogo al livello equivalente compare sotto l'integrale il quadrato del rapporto tra pressione efficace e pressione di riferimento. Con il SEL il contenuto di energia globale del segnale viene

raggruppato in un intervallo di tempo di 1 s. La relazione tra L_{Aeq} e livello equivalente sonoro, SEL , è la seguente:

$$(2.3) \quad SEL = L_{Aeq} + 10 \log \left(\frac{T_e}{t_0} \right)$$

Dove t_0 individua il tempo di riferimento pari ad un secondo.

La grandezza risulta perciò particolarmente indicata per descrivere il contenuto energetico di un singolo evento quale ad esempio quello di un treno che passa oppure per confrontare tra loro i contenuti di energia di segnali che hanno durate molto diverse tra loro integrando da quando il rumore non è percepibile a quando è terminato, il risultato è quindi rapportato allo stesso livello di tempo.

Infine, è importante sottolineare che la Direttiva CE 49/2002 ha introdotto il descrittore L_{den} , basato sul contenuto energetico e su cui vengono applicate correzioni per i periodi serale e notturno.

$$(2.3) \quad L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left[T_{DAY} 10^{\frac{L_{DAY}}{10}} + T_{EVENING} 10^{\frac{L_{EVENING}+5}{10}} + T_{NIGHT} 10^{\frac{L_{NIGHT}+10}{10}} \right]$$

L_{den} è il livello di pressione sonora relativo al tempo di riferimento pari ad un anno calcolato dalla composizione dei livelli relativi a tre periodi della giornata. Il giorno è pari a 12 ore, la sera pari a 4 ore e la notte pari a 8 ore che gli stati membri possono adottare in base alle proprie abitudini di vita.

Gli studi condotti sull'*annoyance* da rumore hanno mostrato, come più volte detto, bassi coefficienti di correlazione con il parametro acustico utilizzato per descrivere l'esposizione; questo ha spinto i ricercatori a testare indici diversi dal livello equivalente, che è attualmente il più utilizzato.

Un descrittore di largo uso è il *Livello Giorno Notte (LDN)* nel quale i livelli che competono al periodo notturno tra le 22 e le 7 sono penalizzati di 10 dB allo scopo di tenere nel debito conto il maggior disturbo che il rumore esercita nelle ore notturne. La definizione segue la relazione (1.4) dove L_d è il livello equivalente nel periodo diurno e L_n è il livello equivalente nel periodo notturno.

$$(2.4) \quad LDN = 10 \log \left[\frac{15}{24} 10^{0,1L_d} + \frac{9}{24} 10^{0,1(L_n+10)} \right]$$

Come appare logico mettere in relazione l'effetto del rumore con il suo contenuto energetico, risulta altresì intuitivo attribuire un peso al modo con cui l'energia si distribuisce nel tempo di durata del fenomeno sonoro.

Il "*clima di rumore*", che si basa sulla differenza tra L_{10} (rumori di picco) e L_{90} (rumore di fondo), è uno degli indici compositi di disturbo messi a punto negli studi socio-acustici che si trova nella formula dell'indice *Traffic Noise Index*, (*TNI*), proposto da *Griffiths* e *Langdon* per il rumore da traffico stradale:

$$(2.5) \quad TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30$$

Recenti studi europei hanno dimostrato che si può ottenere una buona correlazione dose-risposta se la dose di rumore si basa su parametri quali il numero degli eventi rumorosi che

superano una certa soglia, il numero dei livelli massimi ed il tempo cumulativo in cui il rumore supera un certo livello.

Bjorkman e *Rylander*, in uno studio sulle reazioni al rumore da traffico stradale del 1991 nella città di *Gotteborg*, hanno utilizzato differenti descrittori. L'area studiata era costituita da zone residenziali prossime a strade a medio ed elevato traffico variabile tra 220 e 6300 veicoli all'ora con presenza di veicoli pesanti. La relazione trovata è analoga a quella precedentemente riportata e lo studio sottolinea che oltre i 1500 eventi di transito giornalieri non si manifestano ulteriori aumenti di *annoyance*.

Lo studio di *Lambert* pubblicato nel 1995 riguardante il rumore dei treni ad alta velocità, ha testato diversi indicatori acustici nello studio delle correlazioni con le reazioni della popolazione. Sono stati valutati quelli classici, basati sul L_{eq} , cioè il livello equivalente sui diversi periodi della giornata, il livello equivalente parziale dovuto al solo passaggio dei treni nel periodo di tempo di riferimento considerato, ma anche il numero di eventi sonori che superano le soglie di 70 e di 80 dB(A), la loro durata cumulata ed il livello massimo al passaggio del treno, espresso come L_{eq} in 1 secondo. Dallo studio emergono i seguenti risultati:

- Sulle 24 ore, sia d'inverno che d'estate, il livello massimo, e in misura minore il numero di eventi sonori al di sopra dei 70 dB(A), mostrano le migliori correlazioni con il disturbo globalmente inteso (*annoyance*).
- Durante il periodo diurno di riferimento dello studio (8:00-20:00) il livello equivalente, il livello massimo, il numero degli eventi sonori e la loro durata al di sopra dei 70 dB(A) risultano ben correlati sia col disturbo soggettivo globale che con il disturbo alle attività (conversazione all'interno e all'esterno delle abitazioni, riposo, ascolto di radio e televisione).
- Per la notte, l'interpretazione dei risultati è più delicata per il modesto livello del traffico, tuttavia gli indici più appropriati appaiono il numero di eventi sonori e il livello massimo di rumore.

2.2.2 Correlazione rumore-disturbo

Nelle società urbane l'*annoyance* da esposizione al rumore riguarda la maggior parte degli abitanti. Il processo della risposta umana al rumore comincia con la percezione dello stimolo che crea le basi per una possibile sensazione di *annoyance*. Questa sensazione può essere modulata da molte variabili psico-sociali come le condizioni di vita, l'attitudine nei confronti della sorgente, la precedente esposizione a rumore, le variabili socio-economiche.

I numerosi studi socio-acustici, ossia le indagini di tipo epidemiologico sulle reazioni delle collettività al rumore, mostrano che l'esposizione al rumore può spiegare oltre lo 85% della varianza dell'*annoyance* mediamente espressa da un gruppo, mentre la predizione della risposta individuale rimane difficile.

Job (1988) sostiene che soltanto una piccola percentuale della variazione della reazione individuale (normalmente meno del 20%) è attribuibile al rumore. Variabili come l'attitudine verso le sorgenti di rumore e la sensibilità al rumore contribuiscono ad una maggior variazione della reazione di quanto non faccia l'esposizione al rumore.

L'O.C.S.E. fornisce le indicazioni di tabella 1.6 sugli effetti attesi in base ai livelli diurni presenti in facciata di edificio.

Esposizione diurna	Tipo di reazione
< 55 dB(A)	Le condizioni acustiche consentono il normale svolgimento della maggior parte delle attività che potrebbero essere disturbate dal rumore.
55 - 60 dB(A)	Può cominciare ad esserci disturbo per le persone più sensibili.
60 - 65 dB(A)	Cominciano a manifestarsi comportamenti finalizzati a ridurre il disturbo ma non si individua situazione di costrizione.
> 65 dB(A)	Il comportamento è determinato da una situazione di costrizione sintomatica di elevato disturbo.

Tabella 1.6: Reazioni della collettività al livello di rumore durante il periodo diurno

Le inchieste socio-acustiche studiano, mediante l'uso di questionari, che raccolgono le risposte di un campione di popolazione, la relazione che intercorre tra i livelli di esposizione al rumore ambientale e le reazioni espresse. Può essere studiata la reazione dei singoli individui mettendo in relazione le risposte di ogni soggetto con i rispettivi livelli di esposizione (correlazione di dati individuali) o di gruppi di individui, mettendo in relazione i livelli medi di esposizione di tali gruppi, esposti a livelli simili, con le reazioni medie espresse dal gruppo (correlazione di dati raggruppati).

Numerose analisi condotte sui dati individuali, rilevano come soltanto il 17,6 % della variazione nella reazione è attribuibile all'esposizione al rumore e tale bassa correlazione può essere dovuta all'inaccuratezza delle misure di rumore, della misura della reazione, al ristretto intervallo di esposizione a rumore del campione, al fatto che la relazione rumore-reazione non è oggettivamente molto forte.

Schultz (1978) ha suggerito che l'attenuazione dell'edificio può causare un "non-parallelismo" tra le misure di rumore all'esterno ed il reale rumore al quale l'intervistato è esposto; a parità di rumore esterno, il rumore interno dipende infatti dal differente grado di isolamento. A supporto di questa ipotesi *Schultz* cita risultati che mostrano un incremento nella correlazione rumore-reazione quando le finestre sono aperte rispetto a quando sono chiuse: la situazione di finestre aperte elimina infatti l'influenza del diverso isolamento limitando la dispersione dei dati.

Griffiths (1980) ha esaminato la reazione al rumore nelle diverse stagioni: il risultato atteso era un incremento dell'*annoyance* da rumore nelle stagioni in cui le finestre rimangono più a lungo aperte; i risultati supportano l'assunto che nella stagione calda le finestre sono più spesso aperte, ma non che l'*annoyance* è maggiore. Tuttavia, come lo stesso autore rileva, questi risultati possono essere il frutto di un'autoselezione, ovvero determinati dal fatto che le persone più sensibili al rumore sono meno disposte a rimanere in una stanza con le finestre aperte.

Schultz (1978) ha calcolato che avere una stanza non direttamente affacciata sulla sorgente di rumore causa una diminuzione della reazione uguale a quella attribuibile a un decremento di 4 dB nell'esposizione; la possibilità di trasferirsi in una stanza più tranquilla nello stesso appartamento è quindi un fatto significativo in termini di condizionamento della risposta.

L'intraprendere azioni per modificare il rumore è secondo alcuni autori un determinante importante della reazione ed influisce su questa; *Bullen* e altri nel 1985 hanno condotto un'indagine sul personale di alcune basi aeree studiando la differenza delle reazioni di coloro che avevano intrapreso qualche azione contro il rumore (*modificatori*), come chiudere porte e finestre e gli altri (*non modificatori*).

A parità di livelli di esposizione esterni od interni i modificatori hanno espresso una maggiore reazione al rumore dei non modificatori, il che porta ad ipotizzare che i primi abbiano una maggiore sensibilità nei confronti del rumore, che è la ragione che li porta ad esprimere giudizi più severi e che si manifesta attraverso le azioni intraprese.

Sulla opportunità di misurare e reazioni con una sola domanda o con più domande non c'è accordo tra gli autori. Infatti mentre alcuni sostengono che una misura della reazione basata su una sola domanda può portare ad incertezze equivalenti ad un errore grossolano nelle misure del rumore, altri ritengono che l'uso di domande multiple non sia in grado di aumentare l'attendibilità della misura.

In conclusione, anche accurate misure del rumore e delle reazioni non portano a miglioramenti sostanziali nella valutazione della correlazione rumore-reazioni non arrivando il rumore ambientale a spiegare più del 40 % della variazione nella reazione; questo significa che variabili diverse dalla esposizione, di tipo psicologico e individuale, sono in grado di modulare in maniera importante la risposta individuale.

2.2.3 Influenza delle variabili non acustiche sul grado di annoyance

Considerato che i livelli di esposizione al rumore ambientale non spiegano più del 40% della varianza delle reazioni, è ipotizzabile che la maggior parte della varianza sia da attribuire a fattori soggettivi; la sensazione sonora, così come le altre percezioni sensoriali, è correlata con lo stimolo fisico esterno ma viene resa attraverso il cervello.

Essendo il processo di risposta modulato da fattori psicologici è logico il permanere di una variabilità delle risposte allo stesso stimolo, è comunque evidente l'interesse dei ricercatori nello studiare quali siano tali variabili.

La rassegna di *J. Fields* del 1992 sull'influenza sulla risposta al rumore ambientale delle variabili personali è basata sui risultati di oltre 680 lavori tratti da 282 inchieste. I risultati di questi lavori sono stati studiati secondo 26 variabili non acustiche che possono modulare le reazioni al rumore.

Oltre la metà dei risultati delle inchieste socio-acustiche indicano che l'annoyance non è fortemente influenzata dalle variabili demografiche considerate (età, sesso, stato sociale, reddito, educazione, proprietà della casa, tipo di appartamento, durata del periodo di residenza, il ricevere benefici dalla sorgente) ma che è positivamente associata con le variabili attitudinali (la paura per il pericolo attribuito alla sorgente, la sensibilità verso il rumore in generale, il credere che le autorità possano controllare il rumore, la consapevolezza della presenza di impatti della sorgente diversi dal rumore, il credere che la sorgente di rumore non sia importante).

Per ogni variabile è stata sottoposta a verifica una ipotesi di influenza e questa è stata giudicata supportata nel caso in cui importanti effetti fossero presenti in oltre il 50% delle indagini. Gli effetti sono inoltre stati ritenuti importanti quando la variabile esaminata si è dimostrata in grado di influire sulla reazione come una variazione di 3 dB del livello di rumore, o di creare una differenza del 5% nella percentuale dei disturbati, o di spiegare l'1% della varianza nel punteggio dell'*annoyance*.

Si ipotizza che le persone anziane siano più disturbate dal rumore perché invecchiando c'è una diminuzione della soglia di tolleranza rispetto ai problemi ambientali ed inoltre perché le persone anziane, spesso afflitte da presbiacusia, possono individuare nel rumore ambientale un elemento che aumenta le difficoltà nella comprensione del parlato.

I risultati delle indagini non supportano però l'ipotesi di una relazione diretta tra età ed *annoyance*, infatti meno del 20% dei risultati supportano l'ipotesi. L'ipotesi opposta, che i giovani sono più disturbati, è meglio supportata, ma comunque in meno del 50% delle inchieste.

Riguardo il sesso, l'ipotesi è che le donne siano maggiormente disturbate degli uomini perché più sensibili al rumore e presenti al domicilio per un periodo più lungo. Oltre il 90 % dei risultati indica che, non vi sono differenze nell'*annoyance* manifestata dai due sessi ed i pochi risultati che sostengono dell'ipotesi non raggiungono le soglie stabilite nell'analisi per essere ritenute importanti.

L'ipotesi contraria, che gli uomini manifestino maggiore *annoyance*, perché soggetti a più stress sul lavoro, meno capaci di adattarsi allo stress e perché presenti a casa nei periodi del giorno in cui la rumorosità è più alta, non è supportata da alcun risultato.

Stato sociale, reddito ed educazione non hanno effetti importanti sull'*annoyance*. L'ipotesi studiata è che le persone di stato sociale più elevato, con maggiore reddito e con più elevato livello culturale sono più disturbate, perché meno afflitte da problemi, perché in generale più sensibili ai problemi, perché ammettono più facilmente di essere afflitti da problemi, perché occupati in attività domestiche più tranquille o, infine, perché sono più interessate alla qualità socio-economica della zona.

Meno della metà dei risultati supporta questa ipotesi. Mentre la maggior parte degli studi evidenzia che non ci sono differenze importanti, nessuno evidenzia l'ipotesi opposta ossia che uno stato sociale più basso comporti una reazione di *annoyance* più grande. In sostanza è possibile che sussista qualche lieve effetto di modulazione della risposta che però non viene verificato dal criterio utilizzato.

L'ipotesi che i proprietari dell'abitazione possano manifestare un maggiore disturbo in quanto hanno sostenuto un investimento finanziario non è supportata. Come per le variabili socio-economiche è pertanto possibile che ci sia un piccolo effetto che non viene evidenziato dal criterio utilizzato ed è comunque possibile che l'investimento aumenti la probabilità di intraprendere azioni contro il rumore.

Circa l'influenza del tipo di appartamento, l'ipotesi sottoposta a verifica è che chi vive in edifici singoli sia più disturbato perché vorrebbe un ambiente più tranquillo. Tale condizione non è supportata in modo significativo.

Per la durata del periodo di residenza, intesa come numero di mesi o di anni che il residente ha vissuto nella dimora attuale, l'ipotesi è che chi risiede da più lungo tempo è meno disturbato perché è intervenuto un processo di assuefazione. L'ipotesi è supportata soltanto dal 25% dei risultati, questo starebbe a dimostrare che l'*annoyance* non scompare con l'aumentare del tempo di residenza.

L'intervenire di forme di adattamento al rumore col trascorrere del tempo può tuttavia essere mascherato per effetto del graduale cambiamento del livello di rumore, della correlazione tra età e durata del periodo di residenza e dalla possibilità che i maggiori adattamenti possano avvenire nei primi giorni o mesi di residenza.

L'ipotesi che coloro che beneficiano della sorgente sonora in esame, traendone occupazione o modi di trasporto, siano meno disturbati è supportata soltanto da 4 studi sui 18 considerati a dimostrazione della scarsa influenza di questo aspetto sull'*annoyance* espressa.

L'ipotesi, infine, che le cinque seguenti variabili attitudinali abbiano influenza sulla risposta con una correlazione positiva con l'*annoyance* è verificata in oltre il 70 % delle indagini considerate:

- la paura per il pericolo attribuito alla sorgente;
- la sensibilità verso il rumore in generale;
- il credere che le autorità possano controllare il rumore;
- la consapevolezza della presenza di impatti della sorgente diversi dal rumore;
- il credere che la sorgente di rumore non sia importante.

I primi tre fattori sono stati studiati in almeno 11 inchieste ed appare evidente che l'*annoyance* è associata con:

- la paura di un incidente aeronautico o la paura del pericolo nelle vicinanze delle vie di comunicazione di superficie; l'ipotesi che la paura della sorgente aumenti l'*annoyance* è spiegata col fatto che se si avverte paura per la sorgente, allora udire il rumore di quella sorgente porterà alla mente quel senso di paura ed aumenterà l'*annoyance* da rumore;
- il credere che il rumore degli aerei può essere prevenuto o ridotto dai progettisti, piloti o dalle autorità in accordo con le compagnie aeree;
- la sensibilità al rumore in generale.

L'evidenza è più debole per le altre due variabili, soltanto due inchieste mostrano infatti che i residenti sono più disturbati quando la sorgente di rumore viene associata a qualche fattore inquinante diverso dal rumore che alteri ad esempio la qualità dell'aria o comporti in generale la presenza di inquinanti.

Tre inchieste su quattro supportano l'ipotesi che l'*annoyance* da rumore è minore per chi crede che la sorgente sia economicamente o in altro modo utile per la zona o per la comunità.

Una delle variabili che è viene normalmente studiata è l'atteggiamento nei confronti di altri aspetti dell'area di residenza. *Langdon* (1976) ha dimostrato che un atteggiamento in generale positivo verso altri aspetti ambientali dell'area di residenza è associato con una minore *annoyance* da rumore e tuttavia l'associazione tra questi atteggiamenti e l'*annoyance* deve essere interpretata con cautela. Alcuni soggetti infatti possono essere così disturbati dal rumore di una determinata sorgente da cominciare a ritenere che possa esistere qualche altro problema riguardante quella sorgente (per esempio pericolo o fattori di rischio ambientale diversi).

2.3 Inquinamento acustico e caratterizzazione del rumore

Le sorgenti sonore che in ambiente urbano concorrono a determinare il rumore sono molteplici e diversificate sotto molteplici aspetti (disposizione sul territorio, intensità, andamento temporale, ecc). Principali fonti di rumore sono il traffico stradale, ferroviario e aeroportuale, le eventuali altre infrastrutture di trasporto e le sorgenti sonore specifiche.

Con sorgenti sonore specifiche si indica un ampio insieme sorgenti che possono risultare alquanto diversificate per estensione, collocazione sul territorio, modalità e tempi di funzionamento e caratteristiche del rumore prodotto. In esse rientrano tutte le sorgenti riconducibili alle attività di produzione, agli esercizi commerciali, agli impianti fissi degli edifici, ai cantieri e alle attività ricreative e sportive.

Le caratteristiche dell'inquinamento acustico sono tali da influenzare notevolmente le metodologie di rilevamento e hanno portato allo sviluppo di particolari tecniche per il campionamento spaziale e temporale. Particolarmente condizionanti sono la non permanenza del rumore alla cessazione dell'emissione nell'ambiente e la diffusione unicamente nelle aree limitrofe alle sorgenti sonore.

• *Campionamento spaziale*; le tecniche utilizzabili sono solitamente distinte nelle seguenti tipologie:

- *Casuale*: i siti di rilevamento sono scelti in modo casuale o per coincidenza con i nodi di una maglia di passo prefissato. Se un nodo si localizza in un punto inaccessibile o impraticabile, come all'interno di un edificio o al centro di una strada, il valore in questa posizione dovrà essere dedotto in base alle informazioni sulle misure vicine. Il campionamento casuale non è molto efficiente in ambito urbano.
- *Stratificato per tipologie*: si utilizza per incrementare l'efficienza dei campionamenti e prevede la preventiva individuazione di aree in cui la variabilità interna del rumore sia inferiore a quella esistente tra le diverse aree. La finalità è quella di garantire con un'elevato numero di rilevamenti un'adeguata definizione delle aree più rumorose o più significative, contenendo il numero globale di rilevamenti.
- *Orientato al ricevitore*: i siti sono scelti per in modo da descrivere correttamente esposizione sonora di prefissati ricevitori.
- *Orientato alla sorgente*: la distribuzione spaziale dei punti di misura è eseguita in funzione all'ubicazione delle sorgenti sonore, pertanto i risultati derivanti da questo rilevamento non sono confrontabili con quelli relativi alle altre tecniche.

• *Campionamento temporale*; consente di determinare il livello equivalente di pressione sonora riferito ad un tempo significativo a partire dai dati rilevati in prefissati intervalli di breve durata, senza la necessità di sostare con continuità per periodi medio-lunghi. Comporta un

indubbio risparmio di tempo e di risorse, introducendo però un'inevitabile grado di imprecisione crescente con la variabilità del rumore.

Il campionamento segue in genere la classificazione riportata dal D.M. Ambiente del 16 marzo 1998:

- *Tempo a lungo termine* T_L , con durata stabilita in base alle necessità dell'indagine e pari ad un anno, alcuni mesi o a specifici periodi.
- *Tempo di riferimento* T_R , interno al tempo di riferimento e tale da indicare il periodo della giornata in cui si eseguono le misure. La legislazione italiana prevede il tempo di riferimento diurno (dalle 6 alle 22) e notturno (dalle 22 alle 6).

$$(1.6) \quad T_L = \sum_{i=1}^r T_{Ri}$$

- *Tempo di osservazione* T_O , è un periodo di tempo compreso nel T_R nel quale si verificano le condizioni di rumorosità da rilevare.

$$(1.7) \quad T_{Ri} = \sum_{j=1}^o T_{Oj}$$

- *Tempo di misura* T_M , fissato in base alla variabilità del fenomeno e con lunghezza tale da rendere rappresentativa la misurazione.

$$(1.8) \quad \sum_{k=1}^m T_{Mk} \leq T_{Oj}$$

Risulta di particolare interesse il livello equivalente di pressione sonora ponderato A relativo al tempo a lungo termine T_L ($L_{Aeq,TL}$) che rappresenta il valore da confrontare con i limiti di attenzione di cui al DPCM 14/11/97 al di sopra dei quali scatta l'obbligo di adottare piani di risanamento.

2.4. Misuratori di livello sonoro

La tipologia e le caratteristiche della strumentazione da utilizzare per il rilevamento dipendono dagli obiettivi dell'indagine e dai molteplici parametri che caratterizzano l'ambiente nel quale vanno eseguite le misurazioni.

Per eseguire le misure del livello della pressione sonora si utilizzano i *fonometri* (Sound Level Meter). Le caratteristiche minime che un fonometro doveva possedere erano specificate nella normativa IEC 651/1979 (recepita con norma europea EN 60651/94) essa fissava inoltre la classe di appartenenza dello strumento a seconda della precisione delle sue misure. (vedi tabella n.7)

Importanti cambiamenti nelle specifiche dei fonometri sono state apportate dal 2002 con la pubblicazione della norma IEC 61672 che sostituisce le IEC 60651 e 60804.

Le principali modifiche apportate riguardano i seguenti aspetti:

- Riduzione a 2 classi di precisione (1 e 2) rispetto alle 4 precedenti;
- Tolleranze più ampie rispetto alle precedenti in quanto sono incluse le incertezze di misura tipiche di un laboratorio di prova;

- Ponderazione in frequenza “A” è obbligatoria per tutti i fonometri, mentre la “C” è obbligatoria solo per quelli in classe 1;
- Viene aggiunta una nuova ponderazione in frequenza facoltativa denominata “ Z” lineare ($\pm 1,5$ dB) nel campo di frequenza 10 : 20000 Hz;
- Le condizioni di riferimento vengono cambiate a 23°C e 50% di umidità relativa rispetto alle precedenti (20 °C e 65% U.R.)
- La risposta in frequenza facoltativa che nella IEC 60651 era denominata “*linear*” nella nuova normativa viene rinominata “*flat*”.

Tipo	Categoria	Precisione
0	Da laboratorio di riferimento	± 0.4 dB
1	Da laboratorio di precisione	± 0.7 dB
2	Per misure sul campo	± 1.0 dB
3	Per misure di controllo	± 1.5 dB

Tabella 7 – classi di appartenenza dello strumento secondo la IEC 651/1979

Un *fonometro* è composto essenzialmente da:

- *microfono* – è un trasduttore ovvero converte la variazione oscillatoria della pressione acustica in un segnale di tipo elettrico. I microfoni più diffusi sono quelli a *condensatore* grazie alla loro elevata sensibilità, la bassa sensibilità alle variazioni di temperatura e l'ampia risposta in frequenza.(per contro risultano molto sensibili all'umidità e risultano abbastanza fragili). I microfoni a condensatore possono essere classificati in due categorie strettamente legate alle condizioni di utilizzo, i microfoni a *campo libero* e microfoni ad *incidenza casuale*. I primi sono appositamente progettati per misurare un suono che proviene da un'unica direzione (massima accuratezza per incidenza di 0°). I secondi sono invece progettati per avere una elevata accuratezza nel caso di campo diffuso o altamente riverberante. La scelta del tipo di microfono è legata al tipo di applicazione e alla normativa che si intende seguire per le misure.
- *preamplificatore*- fornisce il supporto al microfono e ha la funzione di adattare le alte impedenze d'uscita del microfono alle basse impedenze necessarie per alimentare l'ingresso delle apparecchiature ad esso collegate.(minimizza la perdita di segnale). Esso determina la minima frequenza e la minima ampiezza misurabili che risultano legate alla sua impedenza d'ingresso e al suo rumore di fondo.(il livello a 20 dB è il minimo rilevabile)
- *amplificatore*- riceve e amplifica il segnale proveniente dal preamplificatore(la sua dinamica in ampiezza è data dal rapporto tra il livello del suo rumore di fondo a cui si aggiungono 5 dB e il livello a cui si verifica la saturazione del segnale)
- *filtri di ponderazione* – quando selezionati eseguono automaticamente una correzione sul segnale elettrico in ingresso al fine di attenuare certe componenti dello spettro in frequenza e di esaltarne delle altre. Esistono quattro gruppi principali di curve di ponderazione: A, B, C, D normalizzate in campo internazionale. Nei fonometri è sempre presente il filtro della curva di ponderazione A vedi figura 1.4.(meno frequenti sono la curva B e D –quest'ultima tipica per la misura del rumore prodotto dal traffico aereo)
- *filtri per l'analisi in frequenza* – in alcuni fonometri sono presenti filtri di tipo passabanda specifici per eseguire un'analisi in frequenza del segnale sonoro

- *rilevatore* (convertitore Rms e convertitore logaritmico)- esso trasforma la tensione alternata del segnale elettrico che gli viene fornito in ingresso dal tratto precedente della catena di misura, in una tensione continua che è proporzionale al valore efficace (convertitore rms) o al valore di picco del fenomeno acustico analizzato. Mediante un apposito convertitore logaritmico si può passare dal valore efficace al livello in dB. Tramite apposito comando esterno si riescono ad impostare le costanti di tempo di misura, che determinano la rapidità con la quale lo strumento è in grado di seguire le fluttuazioni di segnale. Sono state normalizzate quattro costanti di tempo, *fast*, *slow*, *impulse* (costanti di tempo esponenziali) e *peak*. (vedi tabella 8)
- *strumento di lettura*- serve per visualizzare i risultati della misura
- *memorie*- si possono suddividere in : *memoria di display*, consente di salvare i dati visualizzati sul display a fine della misura; *memoria storica o log*, si archiviano in questa memoria ad intervalli di tempo prestabiliti i valori misurati; *memoria statistica*, serve per consentire un'analisi statistica dei dati

Tipo	Valore
Slow	1s
Fast	125 ms
Impulse livelli crescenti	35 ms
Impulse livelli decrescenti	1,5 s
Peak	20 μ s

Tabella 8

3. NORMATIVA IN MATERIA DI ACUSTICA AMBIENTALE

3.1. Introduzione

Il settore dell'inquinamento acustico nell'ambiente esterno è disciplinato da una molteplicità di fonti legislative raggruppabili in prima istanza in:

- normative di carattere generale;
- normative di settore, con validità nazionale o internazionale;

Citando questa ultima categoria ci si riferisce alla tutela offerta dal codice civile e dal codice penale.

L'art. 659 c.p. afferma che «*Chiunque, mediante schiamazzi o rumori, ovvero abusando di strumenti sonori o di segnalazioni acustiche, ovvero suscitando o non impedendo strepiti di animali, disturba le occupazioni o il riposo delle persone, ovvero gli spettacoli, i ritrovi o i trattenimenti pubblici, è punibile con l'arresto fino a tre mesi o con l'ammenda fino a lire seicentomila (euro 310). Si applica l'ammenda da lire duecentomila a un milione (da euro 103 a euro 510) a chi esercita una professione o un mestiere rumoroso contro le disposizioni della legge o le prescrizioni dell'Autorità*».

Diverse pronunce della Cassazione penale evidenziano che giurisprudenza non ha un giudizio unanime riguardo alla sopravvivenza della rilevanza penale a seguito dell'entrata in vigore della *Legge quadro sull'inquinamento acustico n. 447/1995*. L'indecisione è legata all'attinenza del principio di specialità di cui all'art. 9, legge 689/1981.

In ambito civile la legislazione, tramite l'art. 844 c.c., fissa il principio secondo il quale «*il proprietario di un fondo non può impedire le immissioni di fumo o di calore, le esalazioni, i rumori, gli scuotimenti e simili propagazioni derivanti dal fondo del vicino, se non superano la normale tollerabilità*». Nel seguito dell'articolo si chiarisce che la normale tollerabilità va determinata in considerazione della condizione dei luoghi, delle esigenze della produzione e della priorità di un determinato uso.

L'applicazione di questa norma ha portato a numerose pronunce giurisprudenziali che hanno rafforzato due principi:

- La disciplina di settore riveste una finalità di carattere pubblico e non esclude l'applicabilità dell'art. 844 c.c. ai rapporti tra privati.
- «I criteri stabiliti dal *D.P.C.M. 1° marzo 1991* per la determinazione dei limiti massimi di esposizione al rumore, benché dettati per la tutela generale del territorio, possono essere utilizzati come parametro di riferimento per stabilire l'intensità, e di riflesso, la soglia di tollerabilità delle immissioni rumorose nei rapporti tra privati purché, però, considerati come limite minimo e non massimo»².

In altre parole, i limiti del suddetto decreto sono da ritenersi meno ristrettivi di quelli applicabili ai singoli casi di rilevanza civile e pertanto la violazione dell'art. 844 c.c. può manifestarsi anche per immissioni consentite dal *D.P.C.M. 1° marzo 1991*.

Il quadro normativo di riferimento in materia di inquinamento acustico ambientale è costituito dalla *Legge quadro 447 del 26/10/95* e relativi disposti attuativi, e dal *D.Lgs. 194 del 19/08/2005*, il quale recepisce la *Direttiva Europea 2002/49/CE del 25/06/2002* relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale.

² Cass. Civ., sez. II, 18 aprile 2001, n. 5697

3.2. Quadro normativo nazionale

3.2.1.D.P.C.M 1 marzo 1991

Tale Decreto stabilisce i limiti di accettabilità dei livelli di rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno. Con esso si introduce per la prima volta il concetto di classificazione del territorio in zone diverse nelle quali si fissano i limiti massimi dei livelli sonori equivalenti in base alla diversa destinazione d'uso, demandando alle regioni l'adozione di direttive per la predisposizione da parte dei comuni dei piani di risanamento.

Si regola l'inquinamento acustico proveniente da:

- Ambienti interni agli edifici;
- Impianti tecnici;
- Infrastrutture stradali e ferroviarie;
- Attività lavorative ed impianti industriali interni nel caso di diffusione di rumore all'esterno;
- Attività lavorative ed impianti industriali esterni quando provocano diffusione di rumore in zone limitrofe;
- Aree adibite ad infrastrutture sportive e ricreative;
- Parcheggi;
- Depositi.

Ai fini della determinazione dei valori limite il decreto istituisce il criterio della zonizzazione. Ogni Comune deve dividere il proprio territorio in sei fasce ognuna delle quali soggetta ad un limite di rumorosità che numericamente coincide con i Valori Limite Assoluti di Immissione proposti nel successivo *DPCM 14/11/97*.

Si introduce inoltre il criterio differenziale, ovvero la differenza tra il livello equivalente di rumore ambientale (rumore rilevato con la sorgente rumorosa attiva) e il rumore residuo (rumore rilevato escludendo la sorgente disturbante) non può essere superiore a 5 dB (A) durante il periodo diurno e a 3 dB (A) durante il notturno. Il criterio differenziale non si applica nel caso delle zone esclusivamente industriali.

3.2.3. Legge quadro sull'inquinamento acustico

Con la *Legge quadro 447/1995*, dal regime normativo precedente che era basato su una disposizione provvisoria contenuta nella norma istitutiva del Ministero dell'ambiente (*articolo 2, comma 14, legge 349/1986*, attuata col *D.P.C.M del 1° marzo 1991* sui limiti di esposizione) si passa a un sistema molto più articolato che rimanda a un consistente numero di decreti ministeriali.

La *Legge quadro n. 447/1995* definisce in primo luogo una suddivisione di competenze tra Stato, regioni, province e comuni.

Sono *competenze statali*:

- la determinazione dei valori di cui all'art. 2, comma 1, lettere e), f), g) e h);
- la definizione delle tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico;
- il coordinamento dell'attività e la definizione della normativa tecnica generale per il collaudo, l'omologazione, la certificazione e la verifica periodica dei prodotti finalizzati al contenimento del rumore;
- il coordinamento dell'attività di ricerca e di sperimentazione tecnico scientifica;
- la determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici e dei criteri per la progettazione, l'esecuzione e la ristrutturazione delle costruzioni edilizie e delle infrastrutture di trasporto ai fini della tutela dall'inquinamento acustico.

Alle regioni, entro un anno dall'entrata in vigore della legge, spetta la definizione dei criteri in base ai quali i comuni devono procedere alla classificazione del proprio territorio. Tali criteri devono tener conto delle preesistenti destinazioni d'uso, ma non possono consentire il contatto diretto tra aree, anche appartenenti a comuni confinanti, quando i valori di qualità ad esse attribuiti si discostano di più di 5 dB (A). In caso di inerzia dei comuni, le regioni possono fissare interventi sanzionatori ma anche esercitare poteri sostitutivi ed infine, in base alle proposte pervenute ed alle disponibilità finanziarie assegnate dallo Stato, le regioni definiscono un piano triennale di intervento per la bonifica dall'inquinamento acustico.

Le amministrazioni provinciali hanno funzioni di controllo e di vigilanza sugli ambiti territoriali in cui la competenza ricade tra più comuni. Nello svolgimento di questa mansione hanno facoltà di utilizzare le strutture delle agenzie regionali per l'ambiente. Alle province spetta inoltre l'assolvimento delle funzioni ad esse delegate dalle regioni.

La classificazione del territorio, il coordinamento degli strumenti urbanistici, l'adozione dei piani di risanamento ed eventualmente di limiti maggiormente restrittivi in aree di particolare interesse paesaggistico, ambientale e turistico, sono infine di competenza comunale. I comuni devono inoltre, nel rilasciare le concessioni edilizie, verificare il rispetto della normativa per la tutela dall'inquinamento acustico e autorizzare lo svolgimento di attività temporanee. Sempre di competenza comunale è il controllo delle emissioni sonore prodotte dai veicoli.

La legge quadro, al pari del precedente Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri, prevede una zonizzazione del territorio in aree acusticamente omogenee distinte in sei tipologie. Tale suddivisione verrà ripresa dal *D.P.C.M. del 14 novembre 1997*.

La Legge quadro conferma altresì che i comuni devono provvedere all'adozione di piani di risanamento approvati dal consiglio comunale in caso di superamento dei limiti di attenzione, quindi al verificarsi di anche una sola delle due situazioni seguenti:

- Livello di pressione sonora, riferito ad un lungo tempo, superiore ai valori limite di immissione. Per lungo tempo si intende un valore multiplo intero del tempo di riferimento, deciso in funzione delle specifiche realtà locali;
- Livello di pressione sonora, misurato con tempo di riferimento pari ad un'ora, superiore ai valori limite di immissione maggiorati di 10 dB nel periodo diurno e di 5 nel periodo notturno.

I piani di risanamento devono in primo luogo individuare la tipologia e l'entità dei rumori presenti e i soggetti cui compete l'intervento. Inoltre dovranno indicare le priorità, le modalità ed i tempi per il risanamento, la stima degli oneri finanziari e dei mezzi necessari, le eventuali misure urgenti per la tutela dell'ambiente e della salute pubblica.

La Legge quadro conferma infine, nell'attesa della completa predisposizione degli strumenti necessari, la vigenza del regime transitorio così come descritto la precedente *D.P.C.M. 1 marzo 1991* e ribadisce l'obbligo, per le imprese interessate, di presentare entro sei mesi dalla classificazione del territorio comunale il proprio piano di risanamento o di eseguire gli interventi necessari al soddisfacimento della normativa.

3.2.4.D.M. 31 ottobre 1997

Tale decreto si applica ai fini del contenimento dell'inquinamento acustico negli aeroporti civili e negli aeroporti militari aperti al traffico civile. Oltre ad una definizione diversa del periodo di riferimento diurno che si protrae sino alle ore 23.00 è significativa l'introduzione della "caratterizzazione acustica dell'interno aeroportuale". Si tratta di evidenziare, nell'interno aeroportuale, tre zone di rispetto denominate zona A, B, C, per le quali vi è uno stabilito valore limite dell'indice LVA crescente dalla zona A alla C. L'indice LVA rappresenta il "livello di valutazione del rumore aeroportuale" necessario per la determinazione delle curve di isolivello e quindi all'assegnazione della zona.

3.2.5.D.P.C.M 14 novembre 1997

Il D.P.C.M, in attuazione a quanto stabilito dalla Legge Quadro stabilisce i valori limite di *emissione, immissione, di attenzione di qualità*.

I limiti dipendono dalla classe acustica di appartenenza stabilita dai comuni sulla base della destinazione d'uso (i valori sono fissati suddividendo il territorio in 6 zone).

Il decreto risulta più articolato rispetto al vecchio *D.P.C.M. 01/3/1991* esso infatti oltre ai limiti di zona (valori limite di immissione) vedi tabella 3.1, definisce anche:

- I *valori di attenzione*, valori di rumore che segnalano la presenza di un potenziale rischio per la salute o per l'ambiente (se vengono superati diventa d'obbligo il piano di risanamento comunale);
- I *valori di qualità*, ovvero i limiti di zona cui si deve tendere con il piano di risanamento (nel breve, medio, lungo periodo)(vedi tabella 3.2);
- I *valori limite di emissione*, valori massimi di rumore che possono essere emessi da una sorgente, il superamento dei quali comporta l'obbligo di attuare i provvedimenti di bonifica acustica.

Per le infrastrutture stradali e ferroviarie i *limiti di immissione* non si applicano all'interno di particolari fasce di pertinenza individuate da specifici decreti.

Il decreto fissa inoltre il valore *limite differenziale* (5 dB per il giorno e 3 dB per la notte), ovvero la differenza tra il livello del rumore ambientale (in presenza di sorgenti disturbanti) e quello del rumore residuo (in assenza di sorgenti).

Tale valore non si applica nei casi in cui il rumore misurato a finestre aperte sia inferiore a 50 dB(A) durante il giorno, e a 40 dB(A) di notte e quello a finestre chiuse sia inferiore a 35 dB(A) per il giorno e a 25 dB(A) per la notte.

Classi di destinazione d'uso del territorio		Tempi di riferimento	
		Diurno	Notturmo
I	Aree particolarmente protette	50	40
II	Aree destinate ad uso prevalentemente residenziale	55	45
III	Aree di tipo misto	60	50
IV	Aree di intensa attività umana	65	55
V	Aree prevalentemente industriali:	70	60
VI	Aree esclusivamente industriali.	70	70

Tabella 3.1- Valori limite assoluti di immissione Leq in dB(A)
di cui alla tabella C del DPCM 14/11/97

Classi di destinazione d'uso del territorio		Tempi di riferimento	
		Diurno	Notturmo
I	Aree particolarmente protette	43	35
II	Aree destinate ad uso prevalentemente residenziale	50	40
III	Aree di tipo misto	55	45
IV	Aree di intensa attività umana	60	50
V	Aree prevalentemente industriali:	65	55
VI	Aree esclusivamente industriali.	65	65

**Tabella 3.2- Valori limite assoluti di emissione Leq in dB(A)
di cui alla tabelle B del DPCM 14/11/97**

Classi di destinazione d'uso del territorio		Tempi di riferimento	
		Diurno	Notturmo
I	Aree particolarmente protette	47	37
II	Aree destinate ad uso prevalentemente residenziale	52	42
III	Aree di tipo misto	57	47
IV	Aree di intensa attività umana	62	52
V	Aree prevalentemente industriali:	67	57
VI	Aree esclusivamente industriali.	70	70

**Tabella 3.3- Valori di qualità Leq in dB(A)
di cui alla tabella D del DPCM 14/11/97**

I limiti differenziali non sono inoltre applicabili agli impianti a *ciclo produttivo continuo* esistenti al momento dell'entrata in vigore del *D.P.C.M. 1 marzo 1991*, purché rispettosi dei limiti assoluti di immissione.

La Circolare del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del 6 settembre 2004 chiarisce che un impianto è da ritenersi a *ciclo produttivo continuo* quando non è possibile interromperne l'attività senza provocare danni all'impianto stesso, pericolo di incidenti, alterazioni del prodotto o quando l'esercizio è regolato da contratti collettivi nazionali di lavoro o da norme di legge sulle 24 ore per cicli settimanali. La stessa circolare chiarisce che se l'impianto esistente è oggetto di modifica il criterio differenziale si rende applicabile limitatamente agli impianti che costituiscono la modifica.

3.2.6. Decreto Ministero dell'ambiente marzo 1998

Tale decreto, emanato in ottemperanza al disposto dell'art.3 comma 1, lettera c della Legge Quadro, individua le specifiche che devono essere soddisfatte dal sistema di misura e le relative norme di riferimento; modalità di calibrazione della strumentazione e requisito tecnico che rende valido un rilevamento fonometrico. Il decreto obbliga gli strumenti alla *certificazione di taratura* e al loro controllo ogni due anni presso laboratori accreditati. Il certificato di taratura è diverso dal certificato di omologazione che viene rilasciato da enti qualificati al riguardo al termine di una serie verifiche complesse su un campione di strumentazione fornito

dal produttore. (si pensi ad esempio al PTB tedesco ovvero il *Phusikalisch Technische Bundesanstalt*). La parte A del decreto è dedicato alle definizioni, i criteri e le modalità di esecuzione delle misure sono regolate nell'allegato B, ad eccezione di quelli relativi al rumore stradale e ferroviario cui è dedicato l'allegato C. Nell'allegato d sono invece previsti gli interventi necessari affinché il rapporto contenente i dati relativi alle misure sia valido.

3.2.7.D.P.R. 18 novembre 1998, n.459

Tale decreto rappresenta il primo dei regolamenti di esecuzione di cui all'art. 11 della legge quadro relativo alle infrastrutture per la mobilità e si riferisce unicamente all'inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario.

In esso viene definito il concetto di "fascia di pertinenza" (art. 3), ovvero individua due fasce (per infrastrutture già esistenti), la prima di larghezza 100 metri dalla mezzzeria dei binari denominata "Fascia A" e la seconda di larghezza 150 metri, a partire dal limite della fascia A, denominata "Fascia B" entro le quali le strutture ricadenti nel campo di applicazione del decreto in oggetto devono rispettare dei limiti assoluti di immissione. I limiti a loro volta si suddividono in due categorie secondo la sensibilità dei potenziali ricettori: limiti più bassi si applicano a scuole, ospedali, case di cura e case di riposo.

I valori limite prescritti dal D.P.R. 459/98 sono riportati nella tabella sottostante.

Tipologia	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)
Infrastrutture ferroviarie esistenti e di nuova realizzazione con velocità di progetto ≤ 200km/h	Fascia A 100	50	40	70	60
	Fascia B 150			65	55
Infrastrutture ferroviarie di nuova realizzazione con velocità >200 km/h	250	50	40	65	55

Tabella 3.4- Ampiezza fasce di rispetto e relativi limiti di rumore per le infrastrutture ferroviarie di cui al DPR 18/11/98 n°459

3.2.8.D.M. 29 novembre 2000

Tale decreto fissa i criteri per la redazione da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici e di trasporto o delle relative infrastrutture dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore.

In tali piani devono essere specificati costi, priorità e modalità di intervento e tempistiche di attuazione. Si fissa inoltre il periodo entro il quale devono essere completate le opere di risanamento, ovvero 15 anni dalla data di presentazione del piano a Regioni, Comuni e Ministero dell'Ambiente.

Vengono fissati i criteri in base ai quali calcolare la priorità degli interventi e i criteri di progettazione acustica di tali interventi .

Vengono inoltre riportati i criteri per la qualificazione dei materiali e la conformità dei prodotti (UNIEN 1793 e UNI-EN 1794) .

I Piani dovranno essere articolati in due fasi distinte, e precisamente: entro 18 mesi dalla data di entrata in vigore, a partire dal 16 giugno 2004 , la Società o l'Ente gestore individua le aree dove sia stimato o rilevato il superamento dei limiti previsti e trasmette i dati relativi ai Comuni e alla Regione competente;

Entro i successivi 18 mesi la Società o l'Ente gestore presenta ai comuni interessati e alla Regione competente il piano generale di contenimento e abbattimento del rumore, in cui

siano definite le priorità di intervento, i costi delle opere di bonifica e le tempistiche di intervento.

Il testo definisce anche i contenuti essenziali che ciascun piano di risanamento deve avere ovvero:

- L'individuazione degli interventi e le relative modalità di esecuzione;
- L'indicazione delle eventuali altre infrastrutture di trasporto concorrenti all'immissione nelle aree in cui si abbia il superamento dei limiti;
- La definizione della priorità di esecuzione per ciascun intervento;
- Le motivazioni per eventuali interventi sui ricettori.

Gli interventi vengono realizzati in base a dei criteri di priorità per i quali si introduce per l'appunto l'*Indice di Priorità (P)* la cui procedura di calcolo numerico è definita nell'allegato al decreto stesso.

3.2.9. La Direttiva 2002/49/CE

La direttiva, brevemente detta *END*, mira a combattere il rumore cui sono esposte le persone attraverso la valutazione dello stato acustico del territorio e lo sviluppo di piani d'azione coordinati per il contenimento del rumore ambientale e la preservazione delle zone silenziose sulla base di criteri comuni agli Stati Membri. Il perseguimento di tali obiettivi implica la definizione di descrittori e metodi di valutazione armonizzati e l'individuazione di opportuni criteri da adottare per il calcolo degli elaborati (mappe acustiche).

La direttiva *non* si applica al rumore generato dalla persona esposta stessa, dalle attività domestiche o dal vicinato, né al rumore sul posto di lavoro o a bordo dei mezzi di trasporto o dovuto ad attività militari svolte nelle zone militari.

La END definisce i seguenti descrittori acustici :

- L_{den} descrittore acustico *giorno-sera-notte* usato per qualificare il disturbo legato all'esposizione al rumore, è il risultato di una media pesata dei valori rilevati nei *periodi diurno serale e notturno*. L'ampiezza dei *periodi* è fissata in 12, 4 e 8 ore con orario di inizio a discrezione dello Stato Membro. Le fasce orarie standard sono 07.00-19.00 per il periodo diurno, 19.00-23.00 per il serale e 23-07.00 per il notturno;
- L_{night} descrittore acustico *notturno* relativo ai disturbi del sonno.

Tali descrittori acustici L_{den} e L_{night} servono ad elaborare le mappe acustiche strategiche. Si possono usare altri descrittori per la pianificazione e la delimitazione delle zone acustiche e in casi specifici (cfr. allegato I della direttiva). I valori di L_{den} e L_{night} sono definiti usando i metodi di determinazione stabiliti all'allegato II della direttiva.

La Commissione stabilirà metodi di valutazione comuni per la determinazione di L_{den} e L_{night} . Fino a tale momento gli Stati possono usare metodi nazionali per la determinazione dei descrittori comuni, a condizione che siano conformi all'*allegato II*.

Per la prevenzione e la riduzione degli effetti nocivi dell'esposizione al rumore ambientale la direttiva predispose l'attuazione di alcune azioni successive:

- La realizzazione della *mappatura acustica strategica*, essa permette la determinazione globale dell'esposizione al rumore in una zona esposta a varie sorgenti di rumore e la definizione di previsioni generali per questa zona. Le mappe strategiche devono rispondere ai requisiti minimi descritti all'allegato IV della direttiva. Entro il 30 giugno 2005, e successivamente *ogni 5 anni*, gli Stati membri notificano alla Commissione *gli assi stradali principali* su cui transitano *più di 6 milioni di veicoli l'anno*, *gli assi ferroviari principali* su cui transitano *più di 60 000 convogli l'anno*, *gli aeroporti principali* e *gli agglomerati urbani con più di 250 000 abitanti* situati nel loro territorio. Entro il 30 giugno 2007 al più tardi, sono elaborate e, ove opportuno, adottate mappe acustiche strategiche relative al precedente anno solare delle infrastrutture e degli agglomerati sopra citati. Entro il 31 dicembre 2008 gli Stati membri notificano alla Commissione tutti gli agglomerati con *più di 100 000 abitanti* e tutti gli assi stradali e ferroviari principali situati nel loro territorio.

- Entro il 30 giugno 2012, e successivamente ogni 5 anni, sono elaborate ed adottate mappe acustiche strategiche dell'anno precedente per tali agglomerati e assi. Le mappe acustiche sono riesaminate e, se necessario, rielaborate ogni cinque anni;
- Adozione dei *piani di azione*, essi mirano a gestire i problemi di inquinamento acustico e i relativi effetti, compresa, la sua riduzione. Devono soddisfare i requisiti minimi di cui all'*allegato V* della direttiva. Le misure dei piani di azione sono lasciate a discrezione delle autorità competenti, ma devono corrispondere alle priorità che possono derivare dal superamento dei valori limite pertinenti o di altri criteri scelti dagli Stati membri e sono applicate in particolare alle zone più importanti determinate dalla mappatura strategica. Entro il 18 luglio 2008, devono essere elaborati i piani di azione per *gli assi stradali principali* su cui transitano più di 6 milioni di veicoli l'anno, *gli assi ferroviari principali* su cui transitano più di 60 000 convogli l'anno, gli aeroporti principali e gli agglomerati urbani con più di 250 000 abitanti. Entro il 18 luglio 2013 si devono stabilire piani di azione per tutti i grandi agglomerati e gli aeroporti, gli assi stradali e ferroviari principali. I piani di azione devono essere rielaborati ogniqualvolta sviluppi sostanziali si ripercuotano sulla situazione acustica esistente e, in ogni caso, *ogni cinque anni*;
 - *Informazione al pubblico*, gli Stati membri provvedono affinché sia realizzata una consultazione pubblica e i suoi risultati siano esaminati, prima dell'adozione dei piani d'azione. Gli Stati membri provvedono affinché le mappe acustiche strategiche e i piani di azione siano resi accessibili al pubblico conformemente agli *allegati IV e V* della *Direttiva 2002/49/CE* e alle disposizioni della direttiva concernente la libertà di accesso all'informazione in materia di ambiente;
 - Costituzione di una *base di dati* per lo sviluppo di misure comunitarie di contenimento del rumore generato dalle principali sorgenti, che consentano alla commissione la predisposizione di proposte legislative da presentare al Parlamento Europeo.

Sorgente sonora	Metodo di calcolo raccomandato
Rumore Industriale	ISO 9613-2 "Acoustics- Attenuation of sound propagation outdoors, Part2:general method of calculation". I dati di ingresso idonei a questa metodologia possono essere ottenuti mediante una delle seguenti tecniche di rilevamento: <ul style="list-style-type: none"> - ISO 8297:1994 - EN ISO 3744:1955 - EN ISO 3746:1995
Rumore degli aeromobili	Documento 29 ECAC.CEAC "Report on standard method of computing noise contours around civil airports",1997
Rumore stradale	Metodo ufficiale francese "NMPB-Routes-96". Per i dati di ingresso concernenti le emissioni si fa riferimento al documento:"Guide du bruit des transportes terrestres, fascicule prevision des niveaux sonores, CETUR1980"
Rumore ferroviario	Metodo ufficiale olandese pubblicato in" Reken-en Meet- voorschrift Rail-verkeerslawaai'96"

Tabella 3.5- Metodi di calcolo raccomandati dalla Commissione Europea

3.2.10.D.P.R 30 marzo 2004

In questo decreto vengono fissati i limiti di immissione acustica differenziati a seconda della tipologia dell' infrastruttura stradale definendo inoltre le fasce di pertinenza all'interno delle quali non si applicano le zonizzazioni acustiche comunali.

Dal Decreto Legislativo n. 285 del 1992 Le strade in funzione delle caratteristiche costruttive tecniche e funzionali possono essere classificate nel seguente modo:

- *Autostrada (A)*: strada extraurbana o urbana a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia, eventuale banchina pavimentata a sinistra e corsia di emergenza o banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso e di accessi privati, dotata di recinzione e di sistemi di assistenza all'utente lungo l'intero tracciato, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore e contraddistinta da appositi segnali di inizio e di fine. Deve essere attrezzata con apposite aree di servizio ed aree di parcheggio, entrambe con accessi dotati di corsie di decelerazione e di accelerazione;
- *Strada extraurbana principale (B)*: strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia e banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso, con accessi alle proprietà laterali coordinati, contraddistinta dagli appositi segnali di inizio e fine, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore per eventuali altre categorie di utenti devono essere previsti opportuni spazi. Deve essere attrezzata con apposite aree di servizio, che comprendano spazi per la sosta, con accessi dotati di corsie di decelerazione e di accelerazione;
- *Strada extraurbana secondaria (C)*: strada ad unica carreggiata con almeno una corsia per senso di marcia e banchine;
- *Strada urbana di scorrimento (D)*: strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico, ciascuna con almeno due corsie di marcia, ed un eventuale corsia riservata ai mezzi pubblici, banchina pavimentata a destra e marciapiedi, con le eventuali intersezioni a raso semaforizzate per la sosta sono previste aree attrezzate con apposita corsia di manovra, esterna alla carreggiata;
- *Strada locale (E,F)*: strada urbana od extraurbana opportunamente sistemata ai fini di cui al comma 1 non facente parte degli altri tipi di strade;

Strada esistente	Sottotipo ai fini acustici	Fascia di pertinenza acustica	Scuole, Ospedali, Case di cura e di riposo		Altri ricettori	
			Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)	Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)
A		100 fascia A	50	40	70	60
		150 fascia B			65	55
B		100 fascia A	50	40	70	60
		150 fascia B			65	55
C	Ca	100 fascia A	50	40	70	60
					65	55
	Cb	150 fascia B	50	40	70	60
					65	55
D	Da	100	50	40	70	60
	Db	100	50	40	65	55
E		30	Definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in tabella C allegata al d.p.c.m. in data 14 novembre 1997 in modo conforme alla Zonizzazione acustica delle aree urbane			
F		30				

Tabella 3.6 –Limiti di facciata per infrastrutture esistenti e relative fasce di competenza

Strada di nuova realizzazione	Sottotipo a fini acustici	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		250	50	40	65	55
B		250	50	40	65	55
C	C1	250	50	40	65	55
	C2	150	50	40	65	55
D		100	50	40	65	55
E		30	Definiti dai comuni, nel rispetto dei valori riportati in tabella C allegata al dpcm 14/11/1997 in modo conforme alla sonorizzazione acustica delle aree urbane, come prevista dall'art. 6 comma 1, lettera a) della legge n. 447 del 1995			
F		30				

Tabella 3.7 –Limiti per infrastrutture di nuova realizzazione

3.2.11.D.lgs 19 agosto 2005

Il d.lgs. n. 194 del 2005 recepisce la direttiva europea 2002/49/CE. Allo stato attuale tale decreto incontra notevoli difficoltà di applicazione in quanto non sono ancora stati emanati i decreti attuativi previsti per una armonizzazione delle novità introdotte dal nuovo decreto con il quadro normativo nazionale vigente.

In questo decreto vengono definite le procedure per:

- L'elaborazione della mappatura acustica e delle mappe acustiche strategiche;
- L'elaborazione e l'adozione dei piani di azione per evitare e ridurre il rumore ambientale dove necessario, in caso di livelli di esposizioni tali da risultare nocivi alla salute umana nonché ad evitare aumenti nelle zone silenziose;
- Assicurare l'informazione e la partecipazione del pubblico in merito al rumore ambientale ed ai relativi effetti.

Per la redazione di tali elaborati vengono utilizzati i descrittori acustici L_{den} , L_{day} , $L_{evening}$

L_{night}

Dove per L_{day} si intende il livello continuo equivalente ponderato "A" a lungo termine che è relativo al periodo dalle 06:00–20:00, per $L_{evening}$ si intende il livello continuo equivalente ponderato "A" a lungo termine relativo al periodo 20:00-22:00 e per L_{night} il livello continuo equivalente ponderato "A" a lungo termine relativo al periodo dalle 22:00-06:00.

Il descrittore acustico L_{den} (livello giorno-sera-notte) ovvero il livello continuo equivalente ponderato "A" a lungo termine relativo all'intera giornata viene definito dalla seguente formula:

$$(3.3) \quad L_{den} = 10 \log \left[\left(14 \cdot 10^{L_{day}/10} + 2 \cdot 10^{(L_{evening}+5)/10} + 8 \cdot 10^{(L_{night}+10)/10} \right) / 24 \right]$$

Per le operazioni di misura dei descrittori sopra elencati ci si riferisce alle norme ISO1996-2 e ISO1996-1.

L'elaborazione delle mappe acustiche e dei piani di azione delle infrastrutture di trasporto principali (strade, ferrovie, aeroporti) all'interno e all'esterno degli agglomerati è demandata ai gestori delle infrastrutture e alle società di servizi pubblici di trasporto.

La mappatura degli agglomerati ed i relativi piani di azione sono, invece assegnati alle autorità individuate dalle Regioni o dalle Province autonome di appartenenza.

La raccolta ed il controllo dei risultati sono affidati a:

- L'autorità individuata dalla Regione per le mappe e i piani d'azione eseguiti dai gestori relativi alle infrastrutture principali ricadenti negli agglomerati;
- La Regione per gli agglomerati e le infrastrutture di trasporto principali di carattere regionale;
- Il Ministero dell'Ambiente per le infrastrutture di trasporto principali che interessano più regioni.

Secondo il decreto le scadenze per l'elaborazione delle mappe, la raccolta dei dati e le verifiche sono cadenzate con periodicità trimestrale, a partire dalla data del 31/12/2006 e successivamente ogni 5 anni. La struttura appare analoga per i piani d'azione in questo caso le scadenze partono dal 31/01/2008 e si propongono inalterate per i cicli successivi, a distanza di 5 anni. Si rileva che le scadenze imposte per il primo ciclo di mappatura non sono state rispettate dalla maggior parte dei gestori delle infrastrutture e dei responsabili degli agglomerati.

3.2.12. Direttiva 2008/1/CE

La Direttiva (IPPC) 2008/1/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 gennaio 2008 riguarda la prevenzione e la riduzione integrale dell'inquinamento.

Come si può osservare all'*articolo 2* della Direttiva, *rumore e vibrazioni* integrano il concetto di inquinamento (*comma 2*) e sono esplicitamente richiamati nella definizione di emissione (*comma 5*).

Il principio base di tale norma risulta essere il seguente: "*chi inquina paga*", in armonia con i principi della comunità europea si prevede di ridurre e dove possibile eliminare l'inquinamento intervenendo direttamente alla fonte.

Nella norma viene inoltre specificato che "*per affrontare i problemi dell'inquinamento in modo più diretto ed efficace, un gestore dovrebbe tener conto dei parametri ambientali. Tali parametri dovrebbero essere comunicati alle autorità competenti affinché possano verificare, prima di rilasciare un'autorizzazione, che tutte le idonee misure di prevenzione o di riduzione dell'inquinamento siano state previste*".

Prevedere le idonee misure di prevenzione o riduzione dell'inquinamento significa applicare in modo responsabile quanto di meglio viene messo a disposizione dalla tecnologia al momento della progettazione o successiva realizzazione degli interventi. Per connotare l'idea si ricorre all'utilizzo dell'acronimo BAT, ovvero "*Best Available Techniques*".

Come già detto in precedenza lo scopo della norma è quello di valutare le ricadute sull'intera area di influenza (vale a dire le immissioni) determinate dalla realizzazione di un'opera più che stabilire procedure volte a verificare il rispetto di determinati valori limite.

3.3. Normativa Tecnica

3.3.1. La norma UNI ISO 8297

La norma ISO 8297- "*Determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment - Engineering method*", consente di determinare il livello di potenza sonora emessa da un impianto industriale, sulla base di valori di pressione sonora misurati.

Si assume che un insieme anche molto ampio di sorgenti sonore (es. un intero insediamento industriale) sia considerato come una singola sorgente sonora; e ciò richiede molta cautela nel valutare i risultati ottenuti da tale metodologia di prova e competenza nell'utilizzarli ai fini dell'applicazione in un modello di calcolo: non è infatti quasi mai possibile, per ottenere un risultato affidabile, inserire l'intera sorgente estesa come unica sorgente, ma è necessario scomporla, in più sorgenti.

Nel gennaio 2005 la Commissione Acustica decise di adottare in lingua italiana la norma internazionale ISO 8297:1994, richiamata nella direttiva 2002/49/CEE relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale, recepita il 19 agosto 2005 con il decreto legislativo n. 194.

La nuova UNI ISO 8297 specifica un metodo tecnico progettuale per determinare i livelli di potenza sonora di grandi insediamenti industriali multisorgente, da utilizzare per la valutazione dei livelli di pressione sonora immessi nell'ambiente circostante. Questi livelli di pressione sonora possono essere utilizzati in un appropriato modello previsionale per detta valutazione.

Il metodo è limitato a grandi insediamenti industriali con sorgenti multiple di rumore (combinazione di un numero imprecisato di sorgenti individuali), le cui dimensioni principali giacciono prevalentemente su un piano orizzontale e che irradiano il rumore in modo sostanzialmente uniforme in tutte le direzioni sul piano orizzontale.

I risultati ottenuti sono espressi in livelli di potenza sonora in banda di ottava e, se richiesto, in livelli di potenza sonora ponderati A.

Il metodo è valido per insediamenti industriali per i quali la maggiore delle dimensioni sul piano orizzontale è compresa tra 16 m e 320 m circa.

La norma è applicabile ad aree industriali in cui la maggior parte degli impianti funziona all'aperto, come per esempio, complessi petrolchimici, insediamenti, cave di pietra, impianti di macinazione e installazioni minerarie che irradiano rumore a banda larga, a banda stretta e con presenze tonali e/o impulsive. Il procedimento descritto è applicabile sia ad un rumore stazionario sia ad un rumore non stazionario, purché quest'ultimo sia statisticamente stazionario.

I dati ottenuti usando la UNI ISO 8297 sono adatti per:

- calcolare il livello di pressione sonora in punti prestabiliti intorno a un insediamento in condizioni atmosferiche determinate, purché la distanza di questi punti dal centro geometrico dell'area dell'insediamento sia uguale ad almeno 1,5 volte la dimensione più grande dell'area dell'insediamento. Tutte le singole sorgenti entro l'area dell'insediamento sono trattate, in tal modo, come un'unica sorgente puntiforme posta nel centro geometrico dello insediamento;
- identificare aree industriali o particolari parti di esse al fine di determinare il loro contributo di pressione sonora in determinati punti dell'ambiente circostante;
- confrontare sorgenti diverse (insediamenti interi o installazioni che li costituiscono) in termini di livello di potenza sonora;
- tenere sotto controllo i rumori emessi da un insediamento.

3.3.2.La norma ISO 3744

La norma ISO 3744 - *"Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Engineering method in an essentially free field over reflecting plane"* descrive un metodo di calcolo finalizzato alla determinazione della potenza sonora emessa da macchine appoggiate su una superficie riflettente con campo essenzialmente libero, pertanto le superfici riflettenti diverse dal suolo dovranno essere localizzate a notevole distanza dalla macchina.

L'algoritmo, che consente di determinare il livello di potenza sonora in bande d'ottava o di terzi d'ottava, necessita della conoscenza dei livelli di pressione sonora indotti su una superficie di misura semisferica o parallelepipedica che avvolge la macchina.

Il metodo presenta un livello di precisione che consente di classificarlo come "tecnico progettuale" in quanto la riproducibilità dei risultati presenta una deviazione inferiore a 1,5 dB.

3.3.3.La norma ISO 3746

La norma ISO 3746- *"Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane"* è formalmente simile alla norma ISO 3744 ma, a differenza di questa, consente di effettuare misure del livello di potenza sonora anche in ambienti lievemente riverberanti e con rumori di fondo leggermente più elevati.

Il ricorso alla norma ISO 3746 è pertanto frequente nella valutazione di macchine installate in ambienti industriali, ma fornisce risultati con attendibilità inferiore rispetto a quelli forniti dalla norma 3744. La precisione espressa come riproducibilità dei risultati varia tra 3 e 5 dB e consente di considerare il metodo "di controllo".

Il procedimento descritto prevede la preliminare individuazione di una superficie detta di riferimento con forma di parallelepipedo che sia in grado di racchiudere la sorgente sonora, e di una superficie di misura distanziata da questa di una distanza, d , preferibilmente pari ad 1 m e comunque superiore a 0,15 m. Quest'ultima superficie va suddivisa in aree elementari di pari dimensioni e con postazioni microfoniche individuate al centro di ciascuna di esse.

Assumendo il livello di pressione sonora riscontrato nel punto di misura come significativo per l'intera area elementare di appartenenza, la norma prevede la determinazione del livello medio superficiale di pressione sonora ed in seguito della potenza sonora

complessiva in base alla relazione 2.9, ove L_{pFA} indica il livello di pressione sonora medio corretto con coefficienti idonei a contemplare la presenza di elevati valori di rumore di fondo e residuo.

$$(2.9) \quad L_{wA} = L_{pFA} + 10 \log S$$

3.3.4. La norma UNI 10855

La norma UNI 10855 - " *Misura e valutazione del contributo acustico delle singole sorgenti*", fornisce una serie di metodi per identificare il contributo di singole sorgenti sonore in contesti ove non è trascurabile l'influenza di altre sorgenti. Le tecniche metrologiche suggerite si basano sul confronto fra il livello di rumore ambientale, L_A , ed il livello continuo equivalente di pressione sonora imputabile a tutte le sorgenti di rumore esistenti trascurando la sola sorgente specifica, L_R .

La norma suggerisce un processo valutativo logico che propone preliminarmente i criteri più semplici e solo in seguito, quando questi non consentono di ottenere adeguati risultati, criteri più complessi. È tuttavia importante sottolineare che la maggior complessità di un metodo di valutazione non è sempre legata ad una più ricca richiesta di strumenti, ma presuppone piuttosto una più approfondita competenza tecnica.

I metodi proposti dalla norma sono:

- valutazione in base alla misurazione dei livelli sonori equivalenti ambientali e residuo;
- valutazione in base all'analisi temporale o all'analisi statistica;
- valutazione in base all'analisi in frequenza,
- valutazione del contributo di sorgenti sonore non disattivabili;
- analisi della propagazione acustica (metodo semplificato);
- analisi della propagazione acustica (metodo analitico);
- analisi della propagazione acustica (modelli di simulazione matematica);
- valutazione in base al criterio del punto analogo.

3.12.5. La norma UNI 11143-1:2005

La norma " *Descrive una metodologia per la stima dell'impatto acustico in funzione delle diverse tipologie di sorgenti o attività, allo scopo di definire un percorso chiaro per il progettista e per chi, da parte dell'amministrazione competente, è deputato a valutare e decidere di conseguenza*".

Essa è suddivisa in cinque parti, la parte relativa al rumore da insediamenti produttivi è trattata nella quinta parte.

Si riportano di seguito le principali definizioni riportate nella norma:

- *clima acustico*, "andamento spaziale e temporale del rumore presente in un sito";
- *punto di ricezione*, "punto di misura in corrispondenza di un ricettore ritenuto significativo per valutare il clima acustico e gli effetti acustici in un area";
- *punto di riferimento*, "punto di misura in prossimità di una sorgente disturbante e che costituisce il riferimento rispetto al quale eseguire la calibrazione dei modelli matematici previsionali in relazione alle caratteristiche di emissione delle sorgenti primarie";
- *Punto di verifica*, " punto significativo utilizzato per la verifica della corretta calibrazione del modello matematico previsionale".

Per la valutazione del clima acustico è prevista l'acquisizione dei dati informativi sul territorio, il clima, le sorgenti sonore influenti sull'area.

Vengono poi definiti i criteri per la valutazione attraverso le misurazioni ovvero la scelta dei punti di misura, i periodi e la durata delle misurazioni, la metodologia di misura.

Nei casi in cui risulta troppo onerosa la caratterizzazione acustica dell'area mediante misurazioni è possibile inoltre ricorrere a modelli di calcolo.

La norma definisce i criteri per l'utilizzazione e per la calibrazione dei codici di calcolo relativamente a delle situazioni specifiche.

La taratura riguarda solo le situazioni in cui è possibile confrontare i dati ottenuti con il modello con quelli sperimentali.

Per il calcolo della propagazione sonora ci si riferisce alla norma ISO 9613.

Nella parte finale vengono descritte inoltre le modalità di rappresentazione dei dati rilevati.

4. MODELLI PREVISIONALI PER L'ACUSTICA AMBIENTALE

4.1. I modelli previsionali di calcolo

Nell'acustica ambientale si utilizzano solitamente modelli basati su relazioni matematiche semiempiriche. I metodi numerici effettuano simulazioni sulla base di formule analitiche che descrivono i fenomeni fisici legati alla propagazione partendo dai dati di potenza acustica delle sorgenti oggetto di studio.

Tali modelli si avvalgono per la maggior parte di tecniche di calcolo basate su metodi geometrici di raytracing e di sorgenti immagine.

Esistono in commercio dei modelli di tipo numerico molto più dettagliati e più precisamente, metodi agli elementi finiti (Finite Element Method – FEM) e metodi agli elementi al contorno (Boundary Element Method - BEM). I metodi FEM risultano particolarmente adatti a trattare problemi di acustica di interni (sono gli unici a poter calcolare i modi acustici) mentre i BEM sono particolarmente adatti per problemi inerenti la radiazione sonora.

I modelli previsionali per l'acustica ambientale possono essere utilizzati per svariati scopi ad esempio:

- per determinare il contributo delle singole sorgenti sonore nell'area oggetto di indagine;
- per prevedere il rumore immesso in un ambiente da un'opera di nuova realizzazione;
- per determinare l'efficacia di eventuali interventi di mitigazione acustica.

Tramite il modello numerico è possibile rappresentare la configurazione ambientale mediante l'individuazione delle sorgenti sonore significative, la loro caratterizzazione (modelli di generazione) e lo studio della propagazione tra la sorgente e il ricettore (modelli di propagazione). I modelli che considerano entrambi gli aspetti vengono detti modelli di tipo completo esistono però anche modelli che considerano solo uno dei due aspetti si pensi ad esempio al modello ISO 9613 dedicato al problema della propagazione in ambiente esterno senza descrivere alcuna tecnica specifica di modellizzazione delle sorgenti.

I dati necessari per la stima dei livelli di pressione sonora possono essere così riassunti:

- andamento altimetrico del terreno;
- localizzazione e caratterizzazione tridimensionale di tutti gli ostacoli alla propagazione del rumore;
- localizzazione forma e altezza degli edifici;
- caratterizzazione delle sorgenti di rumore (potenza sonora, flussi di traffico ecc.);
- rilievi fonometrici per la calibrazione del modello di calcolo.

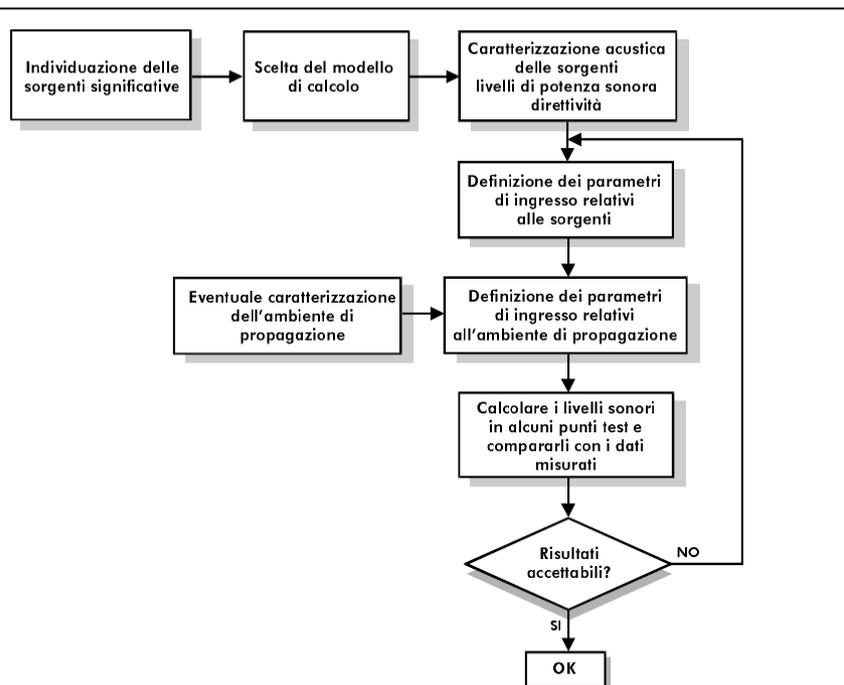


Figura 4.1: diagramma di flusso inerente i passi salienti da compiere nella realizzazione di un modello

Nei paragrafi successivi si analizzeranno gli aspetti salienti riguardanti la creazione di un modello di calcolo relativo ad un sito indagine di studio.

4.2. Caratterizzazione delle sorgenti

Possiamo avere diversi tipi di sorgenti sonore: sorgenti legate alle infrastrutture di trasporto (strade, ferrovie e aeroporti ecc.), sorgenti di tipo industriale e sorgenti legate all'attività umana. Ognuna di queste sorgenti può essere ricondotta ad una forma geometrica elementare, tale semplificazione porta innumerevoli vantaggi.

Le tre tipologie di forma con le quali possono essere schematizzate sono le seguenti:

- sorgente puntiforme;
- sorgente lineare;
- sorgente superficiale (areale);

Le sorgenti di tipo lineare e superficiale possono essere a loro volta ricondotte a sorgenti puntiformi. Tale schematizzazione dipende non solo dalla forma intrinseca della sorgente oggetto di indagine ma anche dalla posizione di sorgente e ricevitore.

La sorgente sonora viene inoltre caratterizzata oltre che dal tipo di emissione dall'intensità, espressa in termini di potenza sonora, e direttività espressa in termini di fattore di direttività. (vedi capitolo 1).

I software di calcolo per la mappatura del rumore si basano su dati geometrici implementati su sistemi GIS (geographical information system). Il terreno viene spesso descritto da piani di triangoli, le strade le ferrovie e le barriere da linee e le sorgenti individuali da punti, le case sono invece modellate con rettangoli.

4.3. Modello di propagazione in ambiente esterno - ISO 9613-2

L'unione Europea ha scelto come riferimento per la modellizzazione del rumore industriale la norma ISO 9613-2 "*Acoustic Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2; General method of calculation*", dedicata alla modellizzazione della propagazione in ambiente esterno.

Di fatto tale norma non fa riferimento alcuno a sorgenti specifiche di rumore è invece esplicita nel dichiarare che non va applicata al rumore aereo, durante in volo dei veivoli, e al rumore generato da esplosioni di vario tipo.

La norma pur non addentrandosi nella definizione delle sorgenti, specifica i criteri per la riduzione di sorgenti di vario tipo a sorgenti puntiformi, ovvero la semplificazione risulta valida solo se la distanza tra il punto rappresentativo della sorgente ed il ricevitore è maggiore del doppio del diametro massimo dell'area emittente reale.

L'algoritmo suggerito dal metodo di calcolo permette di determinare il livello sonoro in condizioni meteorologiche favorevoli alla propagazione, $L_{Downwind}$ (DW sottovento) quindi in presenza di moderata inversione termica e con vento che soffia dalla sorgente al ricevitore con velocità fra 1 e 5 m/s e direzione entro un angolo di $\pm 45^\circ$ rispetto alla direzione individuata dalla retta che congiunge il centro della sorgente sonora dominante alla regione dove è situato il ricevitore.

Il valore di pressione sonora in condizioni favorevoli alla propagazione si ottiene con la relazione (4.1) ove L_w rappresenta il livello di potenza sonora emessa e D, detto direttività della sorgente, individua l'aumento dell'irraggiamento nella direzione in esame rispetto al caso di sorgente omidirezionale.

$$(4.1) \quad L_{Downwind} = L_w + D - A$$

$$(4.2) \quad A = A_{Div} + A_{Atm} + A_{Ground} + A_{Refl} + A_{Screen} + A_{Misc}$$

Il termine di attenuazione, A , è anch'esso specifico delle singole bande d'ottava e imputabile ai seguenti fenomeni:

- A_{Div} , contributo legato alla divergenza geometrica delle onde sonore determinabile con la (5.3), dove d_0 è la distanza di riferimento pari ad 1m e d la distanza fra la sorgente ed il ricevitore. La divergenza comporta una diminuzione del livello di pressione sonora di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza.

$$(4.3) \quad A_{Div} = 20 \cdot \log \frac{d}{d_0} + 11$$

- A_{Atm} , attenuazione derivante dall'assorbimento dell'aria:

$$(4.4) \quad A_{Atm} = \frac{\alpha d}{1000}$$

dove α è un fattore dipendente dall'umidità detto coefficiente di attenuazione atmosferica, espresso in dB/km.

- A_{Ground} , contributo attenuativo legato all'interferenza fra il suono che giunge direttamente al ricevitore e quello riflesso dal terreno. Nella determinazione di questo parametro si distinguono tre regioni (Vedi figura 5.1) con un proprio fattore di suolo:

- Terreno duro: acqua, ghiaccio, cemento e tutti gli altri terreni a bassa porosità, $G=0$;

- Terreno poroso: aree ricoperte d'erba, alberi o altra vegetazione, $G=1$;
 - Terreno misto: aree in cui si ha presenza sia di terreno duro che di terreno poroso, G compreso tra 0 e 1.
- A_{Refli} , apporto delle riflessioni su superfici più o meno verticali tali da aumentare il livello di pressione sonora presso il ricevitore. Questo termine, che apparirà con valore negativo, non considera le riflessioni dovute al terreno e l'effetto schermante delle superfici verticali poste tra la sorgente ed il ricevitore.
 - A_{Scen} , attenuazione legata all'interposizione di barriere con densità superficiale pari ad almeno 10 kg/m^2 . Questi elementi dovranno essere larghi, nella direzione perpendicolare alla linea sorgente-ricevitore, più della lunghezza d'onda centrale, λ , della banda considerata e alti a sufficienza per limitare la vista fra questi due elementi.
 - A_{Misc} , riassume l'attenuazione di fenomeni per i quali non è possibile dare un metodo di calcolo generale. In esso si conteggiano i contributi di:
 - *Insedimenti industriali*: nei quali l'attenuazione è legata alla diffrazione che si origina in presenza di edifici e installazioni.
 - *Insedimenti urbani*: ove la propagazione viene influenzata dalle molteplici schermature e riflessioni derivanti dalla presenza di edifici.
 - *Fogliame*: capace di conferire attenuazioni molto limitate e solo quando la presenza è densa al punto di bloccare la vista.

La norma propone una tabella di valori di attenuazione in dB/m relativa alla vegetazione composta da alberi densamente distribuiti con *fogliame* denso.

La determinazione del valore di pressione sonora significativo per l'intero spettro, $L_{\text{Aeq,T}}$, si otterrà con la (4.5). Estendendo infine la valutazione ad un lungo tempo si dovrà contemplare, come indicato nella (4.6), il contributo attenuante della reale condizione atmosferica.

$$(4.5) \quad L_{\text{AeqT}} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10}$$

$$(4.6) \quad L_{\text{Aeq,LT}} = L_{\text{Aeq,T}} - C_{\text{meteo}}$$

Il termine C_{meteo} deriva da equazioni approssimate che richiedono una conoscenza della situazione locale:

$$(4.7) \quad C_{\text{meteo}} = 0 \quad \text{per } d_p < 10(h_s + h_r)$$

$$(4.8) \quad C_{\text{meteo}} = C_0 [1 - 10(h_s + h_r)/d_p] \quad \text{per } d_p > 10(h_s + h_r)$$

Dove h_s è l'altezza della sorgente dominante, h_r è l'altezza del ricevitore e d_p è la proiezione della distanza tra sorgente e ricevitore su un piano orizzontale. C_0 è una correzione che dipende dalla situazione locale e varia tra 0 e 5 dB.

Tra le varie formule presenti per il calcolo di C_0 si può citare la presente:

$$(4.9) \quad C_0(a, g) = -10 \log \left(\sum_{i=0}^{I-1} Q \frac{W_i(\theta_i)}{2} [1 + g - (1 - g) \cos(\theta_{\text{rec}} - \theta_i)] + 1 - Q \right) \text{ dB}$$

Dove θ_{rec} = l'angolo tra il nord e la congiungente sorgente ricevitore;

g = parametro variabile tra 0,1 e 0,01 che tiene conto dell'attenuazione in direzione sopravvento;

θ_i = angolo tra il nord e la i -esima direzione del vento;

I = numero di direzioni del vento;
 $I - Q$ = probabilità che non ci sia vento.

La ISO al paragrafo 9 "Accuracy and limitation of the method" fa riferimento inoltre alla possibilità di determinare una incertezza associata alla previsione.

La variabilità dei parametri meteorologici viene indicata come principale causa di incertezza nel definire le possibili fluttuazioni del valore da attribuire al suono durante la propagazione all'aperto.

A tal proposito la ISO chiarisce che è ragionevole attendersi valori contenuti per tale incertezza solo nel caso si confronti il valore calcolato con la media dei risultati di diverse misure statisticamente indipendenti e non con l'esito di rilievi estemporanei.

Nel caso di condizioni favorevoli alla propagazione, tralasciando l'incertezza con cui si può determinare la potenza sonora, nonché problemi di riflessioni, si ipotizza che l'accuratezza associabile alla previsione di livelli sonori globali sia quella presentata nella tabella sottostante. [3]

Altezza media di ricevitore e sorgente m	Distanza $0 < d < 100$ m	Distanza $100 < d < 1000$ m
$0 < h < 5$	± 3 dB	± 3 dB
$5 < h < 30$	± 1 dB	± 3 dB

Tabella 1

4.4. Modello NMPB Routes 96

L'Unione Europea ha indicato nella Direttiva 2002/49/CE e nella Raccomandazione della Commissione del 6 agosto 2003, il metodo di calcolo "NMPB-96" ovvero "Nouvelle Methode de Prevision de Bruit", messa a punto da i Servizi Tecnici del Ministero de l'Equipement (CSTB, SETRA, LCPC, LRPC) come metodo da utilizzare per la determinazione e la gestione del rumore ambientale prodotto dal traffico veicolare.

Tale metodo, sviluppato a partire dalla "Guide de Bruit" (1980) a seguito di un decreto del 5/5/1995 che richiedeva espressamente che si tenesse conto anche degli effetti meteorologici sulla propagazione del rumore (art. 6) recepisce anche le novità introdotte dalla ISO 9613. Nella Linea Guida il metodo di calcolo è denominato "XPS 31-133".

Le caratteristiche salienti del metodo "NMPB-96" sono :

- la possibilità di modellizzare il traffico mediante dettagli relativi alla sezione stradale (larghezza della carreggiata, distanza tra il bordo e il centro strada, pendenza, senso di marcia), alla sua superficie (asfalto, cemento, ecc.), alle caratteristiche del flusso di traffico (continuo, accelerato, decelerato, pulsato) e alla relativa tipologia veicolare (flusso orario dei veicoli leggeri e pesanti e relative velocità medie)
- L'attenzione rivolta alla propagazione su lunga distanza (effetto suolo)
- La correzione meteorologica (assorbimento atmosferico, condizioni favorevoli o sfavorevoli alla propagazione)

L'evoluzione rispetto alla precedente Guide de Bruit risulta notevole: si passa da una modellizzazione basata su degli abachi ad una caratterizzazione del traffico stradale completa considerando quest'ultimo nella sua complessità e inserito in un contesto spazio-temporale adeguato alla rappresentazione del disturbo.

4.4.1. Modellizzazione del traffico

Nel modello NMPB la relazione utilizzata per il calcolo del livello di potenza sonora dell'i-esimo trattino di strada (assimilato a sorgente puntiforme) è dato da:

$$(4.10) \quad L_{AWi} = [(E_{VL} + 10 \log Q_{VL}) (+) (E_{PL} + 10 \log Q_{PL})] + 20 + 10 \log (I_i) + R(j)$$

Dove (+) indica l'operazione di somma energetica;

L_{AWi} = livello di potenza sonora (ponderata A) dell'i-esimo tratto di strada di lunghezza I_i (in metri);

E_{VL}, E_{PL} = sono i livelli di emissione calcolati con l'abaco del C.ET.UR. per i veicoli leggeri e pesanti ($E_{VL}, E_{PL} = L_{Aeq}$ di un'ora prodotto dal transito di 1 veicolo rispettivamente leggero o pesante, misurato a 30 metri dal limite della carreggiata e a 10 metri di altezza - dalla Pubblicazione di Poggi e Casini - convegno AIA Ancona 2005);

Q_{VL}, Q_{PL} = Flusso orario rispettivamente di veicoli leggeri e pesanti (n° veicoli/ora)

$R(j)$ = valore dello spettro di rumore stradale normalizzato tratto dalla EN 1793-3.

		NMPB 96	XPS 31-133
j	Octave band	R(j) in dB(A)	R(j) in dB(A)
1	125 Hz	-14	-14.5
2	250 Hz	-10	-10.2
3	500 Hz	-7	-7.2
4	1 kHz	-4	-3.9
5	2 kHz	-7	-6.4
6	4 kHz	-12	-11.4

Tabella 2 –R(j) calcolato secondo la EN 1793-3

Per una modellizzazione corretta occorre quindi introdurre i seguenti dati di input :

- flusso orario di veicoli leggeri e pesanti e relative velocità di transito;
- tipologia di traffico;
- numero di carreggiate;
- distanza del centro della carreggiata dal centro strada;
- profilo della sezione stradale.

Mentre la *guide de Bruit del 1980* definiva il problema della propagazione in termini di livello globale in dB(A), il modello NMPB tiene conto del comportamento della propagazione al variare della frequenza a causa dell'effetto fondamentale che tale parametro assume in relazione alla propagazione a distanza.

Il criterio di distanza adottato per la suddivisione della sorgente lineare in sorgenti puntiformi è:

$$(4.11) \quad L = 0.5 d$$

dove L è la lunghezza del tratto omogeneo di strada e d la distanza tra sorgente e ricevitore.

Il suolo viene modellizzato assumendo che il termine "G" possa valere zero oppure uno (vedi ISO 9613). Il valore zero viene dato nel caso in cui si ipotizzi assorbimento nullo ovvero per suoli compatti, il valore uno viene assegnato nel caso di assorbimento totale.

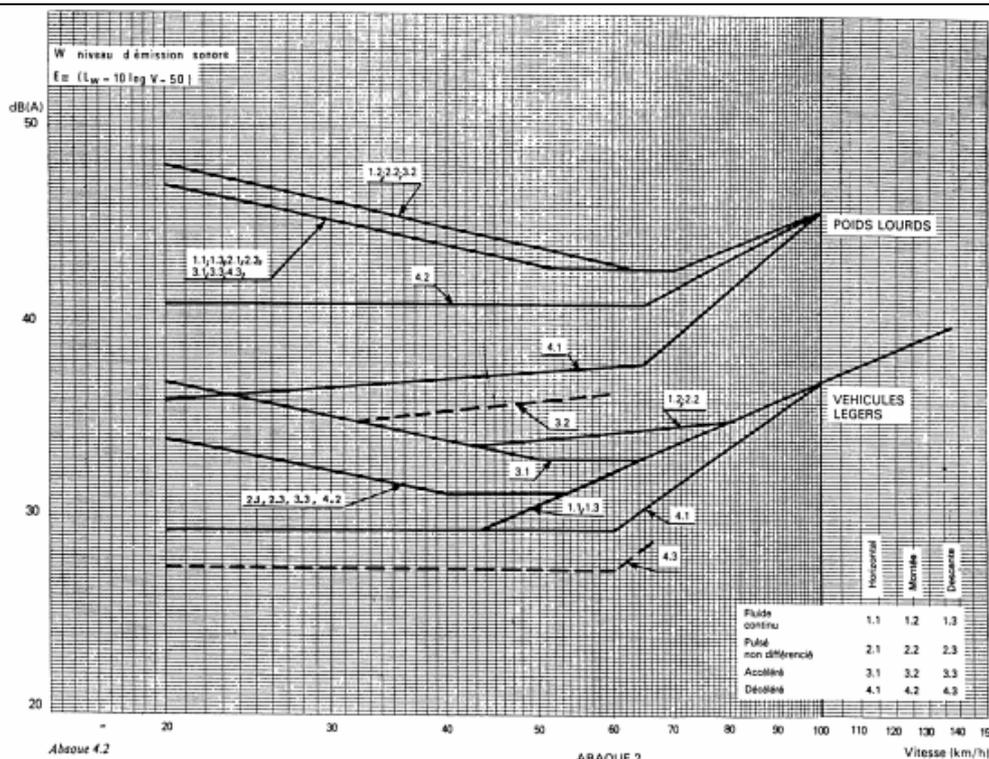


Figura 4.2: Valore del livello sonoro equivalente su un'ora in dB(A) generato dalla circolazione di un veicolo leggero o di un veicolo pesante.

4.4.2.L' analisi meteorologica di un sito

Gli aspetti collegati alla propagazione del suono dovuti alle condizioni meteorologiche compaiono, per la prima volta come requisito normativo, nella Direttiva Europea 2002/49/CE laddove, descrivendo l'indicatore armonizzato L_{DEN} , si specifica che tale indicatore deve essere valutato per un "anno medio sotto il profilo meteorologico".

L'indicazione di anno medio non è definita da un punto di vista tecnico nella Direttiva Europea, e neppure nel suo recepimento ad opera del D.Lgs. 194/2005.

Un'indicazione viene tuttavia fornita successivamente dalla "Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure" prodotto dal WG-AEN (Working Group - Assessment of Exposure to Noise) della Commissione Europea, che costituisce il principale supporto per la produzione di mappe di rumore in accordo con la Direttiva 2002/49/CE. Tale linea guida raccomanda di valutare le condizioni meteorologiche da un punto di vista acustico, adattando quanto riportato nella ISO 1996-2:1987, ed impiegando quindi la definizione di quadro meteorologico "favorevole" della ISO per distinguere la condizione di propagazione acustica.

I dati necessari per tale analisi dovrebbero essere raccolti da un sistema di monitoraggio rappresentativo per vicinanza al sito di interesse e per un periodo non inferiore ai 10 anni.

L'effetto meteorologico cresce con la distanza ed è misurabile quando la distanza sorgente - ricevitore è superiore a 100 m.

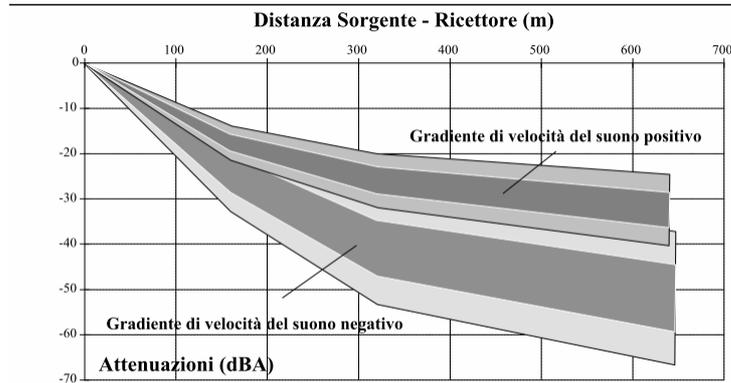


Figura 4.3: Dispersione dei livelli sonori in funzione del segno gradiente verticale di velocità del suono

Il parametro che permette di riassumere le condizioni meteorologiche e correlarle agli effetti acustici che queste determinano è il raggio di curvatura acustico. La variazione di livello sonoro a grande distanza è dovuto al fenomeno di rifrazione delle onde sonore nella bassa atmosfera.

La rifrazione è dovuta alla variazione di velocità nella zona di propagazione causata da gradienti di temperatura dell'aria e dalla velocità del vento.

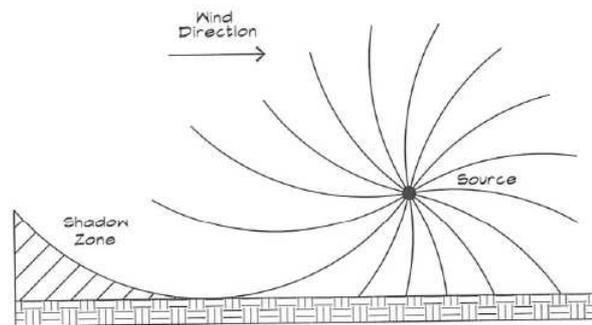


Figura 4.4: Propagazione in presenza di gradiente di vento

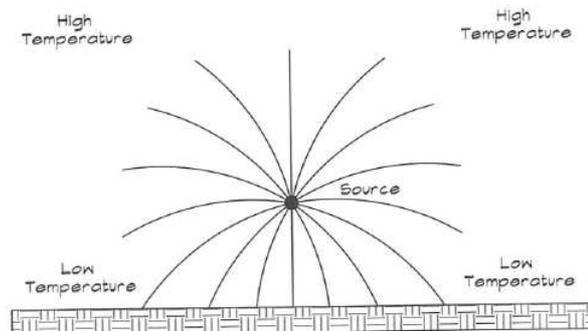


Figura 4.5: Propagazione in presenza di gradiente di temperatura

I fenomeni di rifrazione delle onde sonore sono molto più evidenti su un piano verticale.

Si caratterizza il tipo di propagazione del suono con il profilo verticale di velocità del suono o con il suo gradiente verticale, a seconda della forma di tale profilo la propagazione avverrà in modi differenti.

I fattori termici e aerodinamici influiscono sulla velocità del suono.

Si possono considerare tre tipi principali di propagazione dipendenti dalla forma del profilo verticale della velocità del suono:

- *propagazione del suono gradiente verticale negativo*: i raggi acustici sono risalenti in queste condizioni il livello sonoro a grande distanza è più contenuto rispetto all'assenza di effetti meteo. C'è la presenza di una zona d'ombra acustica nella quale nessun raggio acustico diretto vi penetra e dove il livello sonoro è dovuto unicamente a fenomeni di diffrazione e turbolenza. Questo tipo di condizioni è *sfavorevole* alla propagazione del suono.

- *propagazione del suono con gradiente verticale positivo*: i raggi sonori sono ridiscendenti. In queste condizioni il livello sonoro a grande distanza è più elevato che in assenza di effetti meteorologici. Questa situazione è *favorevole* alla propagazione del suono. Durante il giorno, le condizioni favorevoli si verificano ad esempio con un vento portante dalla sorgente al ricevitore con velocità superiore a 1,5 m/s in presenza di tempo coperto oppure con una velocità maggiore a 3 m/s con tempo soleggiato. Durante la notte invece queste condizioni si manifestano in assenza di vento o con vento portante (si considera l'inversione termica sistematica)

- *propagazione con gradiente verticale di velocità del suono nullo*: il verificarsi di tali situazioni micro meteorologiche è assai raro, un'assenza di gradiente verticale di velocità del suono si può verificare in due circostanze particolari: a) quando la velocità del vento è totalmente nulla e la temperatura dell'aria è costante in funzione dell'altezza del suolo; b) quando gli effetti termici tendono a compensarsi, tale compensazione avviene solo per precisi valori e determinate altezze. Tali condizioni determinano una propagazione sonora per raggi rettilinei, ci si trova in questo caso in condizioni di propagazione in un mezzo omogeneo.

Nella realtà le condizioni termiche e aerodinamiche sono relativamente indipendenti.

Per tener conto delle varie situazioni nella norma viene proposta una griglia a doppia entrata che permette di conoscere la variazione qualitativa del livello sonoro a grande distanza in relazione ai fattori meteorologici osservabili.

Lo stato del vento è caratterizzato nelle colonne da U_1 a U_5 mentre i dati termici corrispondono alle righe da T_1 a T_5 .

Per il gradiente termico vengono individuate dalla norma 5 classi:

- T_1 : forte instabilità, si verificano condizioni di forte instabilità della colonna d'aria per la presenza di aria calda a livello del suolo. Queste condizioni si verificano ad esempio in presenza di forte irraggiamento con terreno secco;
- T_2 : instabilità, una situazione simile alla precedente ma meno significativa;
- T_3 : *omoterminia* e scarso gradiente verticale, sono le condizioni che si verificano all'alba o al tramonto o in presenza di cielo coperto;
- T_4 : stabilità, la superficie al contatto con il suolo si presenta più fredda dell'aria soprastante. Condizione che si può ad esempio riscontrare di notte con cielo parzialmente nuvoloso;
- T_5 : estrema stabilità. Si può verificare di notte con cielo sereno.

Anche per quanto riguarda il vento si attua una classificazione in 5 classi come segue:

- U_1 : vento forte, ≥ 3 m/s, contrario alla direzione sorgente-ricevitore;
- U_2 : vento medio/debole, da 1 a 3 m/s, contrario o vento forte poco contrario;
- U_3 : vento debole, ≤ 1 m/s, da qualsiasi direzione o nullo o medio/debole da settori poco favorevoli o poco contrari;
- U_4 : vento medio/debole favorevole o vento forte poco favorevole;
- U_5 : vento forte favorevole alla direzione sorgente-ricevitore.

La combinazione delle due variabili crea condizioni favorevoli, sfavorevoli o neutre alla propagazione del suono in campo libero e va ad influire soprattutto quando la distanza tra sorgente e ricevitore è superiore ai 100 di metri. Si riportano le combinazioni possibili nella tabella sottostante.

	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅
T ₁		--	-	-	
T ₂	--	-	-	N	+
T ₃	-	-	N	+	+
T ₄	-	N	+	+	++
T ₅		+	+	++	

Tabella 9

I simboli “-” e “--” indicano condizioni sfavorevoli o molto sfavorevoli alla propagazione del suono nella direzione sorgente-ricevitore; “N” indica condizioni meteorologiche neutre alla propagazione del suono; “+” e “++” indicano condizioni favorevoli o molto favorevoli. Le caselle che non presentano alcun simbolo, indicano una situazione che ordinariamente in natura non è raggiungibile e quindi non sono state messe. Un vento forte è sintomo di un cambiamento della stabilità della colonna d’aria quindi non può verificarsi in condizioni di grande stabilità della colonna d’aria, ma non può verificarsi neanche in presenza di grande instabilità in quanto ostacolerebbe i moti verticali che sono il sintomo dell’instabilità del profilo termico. La valutazione del raggio di curvatura acustico si basa principalmente sulla disponibilità di informazioni non comuni, ovvero: la misura diretta dei gradienti di temperatura e della velocità del vento per mezzo di torri meteo, oppure la loro valutazione tramite le relazioni di micro-meteorologia le quali, a loro volta, necessitano di particolari acquisizioni svolte con l’ausilio di anemometri tridimensionali ad ultrasuoni.

La norma riporta inoltre nell’allegato 1:

- due tabelle, suddivise nei periodi diurno e notturno, inerenti la percentuale di condizioni favorevoli alla propagazione sonora (con una suddivisione della rosa dei venti secondo angoli di 20°);
- una carta contenente la collocazione geografica delle stazioni meteorologiche di riferimenti;
- diciotto carte isolivello relative alle condizioni favorevoli alla propagazione (le direzioni sono definite secondo angoli di 40°) ad esclusione delle zone con un’altitudine superiore ai 500 m.

In assenza di dati meteo in grado di fornire informazioni sulle condizioni meteorologiche favorevoli alla propagazione del rumore, *la Linea Guida WG-AN (final draft - version 2, 13 January 2006)* suggerisce l’utilizzo delle seguenti condizioni (toolkit 17).

Periodo	%
Day (06.00-20.00)	50 %
Evening (20.00-22.00)	75%
Night (22.00 -06.00)	100%

Tabella 10 -Probabilità di accadimento delle condizioni favorevoli durante l'anno

4.5. Modello SMR II - Standaard Reken- Methode

Tale metodo di calcolo olandese è stato scelto dall'Unione Europea come riferimento per il calcolo ferroviario, esso può essere utilizzato per il calcolo del livello equivalente di immissione in prossimità di sorgenti di traffico ferroviario o in termini di livello globale equivalente ponderato "A" (SRM I, 1987) o in termini spettrali per bande di ottava (SRM II, 1996).

E' consigliabile eseguire una previsione in termini di bande di frequenza (SRM II).

La relazione che permette di calcolare il livello sonoro equivalente in bande di ottava la seguente:

$$(4.12) \quad L_{Aeq,l} = 10 \log \sum_{j=1}^j \sum_{n=1}^n 10^{\Delta L_{eq,i,j,n}/10}$$

Dove i è la *iesima* banda (da 63Hz a 8kHz), j è il numero di settore nel quale è suddiviso l'angolo di vista totale ed N il numero di punti sorgente per ogni settore.

Il contributo $L_{eq,i,j,n}$ per ciascuna banda di ottava è dato da:

$$(4.13) \quad \Delta L_{eq,i,j,n} = L_{E,i} - L_{G,i} - L_{T,i} - L_{B,i} - L_{R,i} - 58,6$$

Dove $L_{E,i}$ = indice di emissione in funzione dell'altezza della sorgente;

$L_{G,i}$ = termine per la divergenza geometrica;

$L_{T,i}$ = attenuazione dovuta al terreno;

$L_{B,i}$ = attenuazione dovuta a presenza di schermi;

$L_{R,i}$ = attenuazione dovuta a riflessioni;

$L_{E,i}$ si ricava per ciascuna banda di ottava in una determinata sezione di binario considerando l'emissione di tutti i treni, suddivisi per tipologia alla velocità specificata.

$$(4.14) \quad L_{E,i} = 10 \log \sum_{c=1}^{N_c} 10^{E_{c,i}/10} \sum_{c=1}^{N_c} 10^{E_{br,c,i}/10}$$

Dove N_c è il numero di tipologie di treno, $E_{c,i}$ è il termine di emissione per la categoria c alla propria velocità operativa, $E_{br,c,i}$ è un termine simile ma valido in condizioni di frenata.

Il termine di emissione $E_{c,i}$ è dato da:

$$(4.15) \quad E_{c,i} = a_{c,i} + b_{c,i} \log V_c + 10 \log Q_c + C_{bb,c,i}$$

Dove $a_{c,i}$ e $b_{c,i}$ = fattori di emissione per tipologia [dB]

V_c = velocità media della tipologia di treno [km/h]

Q_c = passaggi di vagoni per tipologia per ora [unità ora]

$C_{bb,c}$ = termine di correzione per tipo di binario e tipologia [dB]

I fattori di emissione $a_{c,i}$ e $b_{c,i}$ e il termine di correzione $C_{bb,c}$ sono disponibili in forma tabellare.

Per l'applicazione di tale metodo occorre quindi una conoscenza dettagliata delle categorie di treni e del materiale rotabile delle velocità e delle tipologie di struttura ferroviaria.

4.6. Modellizzazione del terreno

4.6.1. Generalità

Con il termine “*Digital Terrain Model*” si indica la rappresentazione digitale della superficie del terreno, meglio conosciuta anche come “DTM”.

Un modello digitale dell’altimetria, descrive la superficie terrestre nelle tre componenti spaziali x, y, z a partire da una serie di dati campionati al suolo relativi all’altezza del terreno. Le x e le y rappresentano la posizione di ciascun punto sul piano mentre la coordinata z individua l’altitudine rispetto a una superficie di riferimento.

Il DTM è l’elemento base nonché uno degli ostacoli principali da affrontare in ogni mappatura a larga scala. Una corretta rappresentazione tridimensionale del terreno risulta di fondamentale importanza per la mappatura acustica di un sito.

Il WG-AEN (European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise) raccomanda che la precisione relativa all’altezza del terreno adiacente alle sorgenti di rumore abbia l’accuratezza di 1 m.

Un grosso problema insorge nei programmi di calcolo soprattutto quando il DTM viene utilizzato per aree molto vaste. (si pensi che per una griglia 5x5m vengono utilizzati fino a 40000 punti per km²). La maggior parte dei software acustici utilizzati permette una semplificazione dei punti di griglia del terreno, che permette una appropriata riduzione dei tempi di calcolo.

Nel calcolo possono esserci differenti modalità di analisi dello spazio tridimensionale ovvero l’approccio geometrico analitico nello spazio 3D e il metodo del raytracing (diretto o inverso). Il primo è basato sull’utilizzo della geometria analitica per la determinazione delle intersezioni fra gli elementi presenti nello spazio ed il percorso sonoro di propagazione. Tale metodo permette di analizzare tutte le riflessioni possibili senza che nessun percorso venga trascurato. Il secondo utilizza un raggio cercatore che viene emesso dalla sorgente (ray-tracing) o dal ricevitore (ray-tracing inverso). Il metodo prende in considerazione unicamente quelle sorgenti, barriere e riflessioni che sono trovate dai raggi "cercatori". La complessità computazionale dei metodi di raytracing dipende dalla ricchezza della scena e dal numero dei punti di calcolo.

4.6.2. Modello del terreno a superfici continue

Il dato raster geografico viene costruito a partire da un dato vettoriale puntuale. Esistono due metodi principali per derivare un raster da dati vettoriali: la triangolazione e l’interpolazione.

La triangolazione prevede la creazione di una rete di triangoli irregolari adiacenti (triangolazione di Delaunay) chiamata TIN (Triangulated Irregular Network). Se si esegue una triangolazione da punti quotati e da curve di livello, i vertici dei triangoli generati coincideranno coi punti quotati e con punti ubicati lungo le curve di livello in questo caso in ogni triangolo viene calcolata l’acclività e l’esposizione e tutti i punti contenuti nel triangolo sono caratterizzati da un determinato attributo quota derivato dal processo di triangolazione. Il TIN è un modello di dati ideato propriamente per creare modelli digitali altimetrici.

La rete di triangoli di cui è composto il TIN contiene essenzialmente tre valori:

- la quota (elevation), distribuita puntualmente sulla sua superficie da un massimo ad un minimo ovvero ogni punto del triangolo ha un diverso valore della quota interpolato dai valori reali dei tre vertici;
- la pendenza (slope);
- l’esposizione (aspect).

L'interpolazione invece può avvenire secondo diversi criteri (Thiessen, Inverse Distance Weighted –IDW, Splines, Kriging) che permettono di riempire lo spazio vuoto tra i punti o le linee di attributi noti.

Di fatto in questo raster la griglia è formata da celle di dimensioni uguali che portano come attributo l'altitudine media dell'area geografica che il pixel rappresenta.

Il DTM o DEM (Digital Elevation Model) può essere derivato dal TIN a sua volta creato da punti quotati e curve di livello oppure direttamente dai punti quotati. Esso rappresenta il modello digitale del terreno in formato raster che risulta, in virtù del suo modello di dati, più gestibile sia per quanto riguarda la velocità di visualizzazione sia per quella di elaborazione (questo accade per il software IMMI)

Nel caso della costruzione di un DEM a partire da un'informazione non continua, come ad esempio dei punti quotati, si esegue un'interpolazione per rendere il dato continuo e generalizzato sull'intera superficie terrestre rappresentata dai pixel.

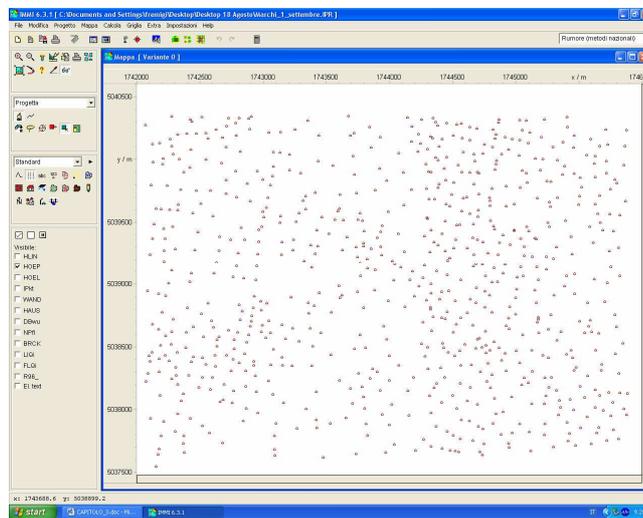


Figura 4.2: modellizzazione del terreno a partire dai punti di quota - IMMI 6.3

4.7. Calibrazione del modello

E' necessario effettuare la calibrazione del modello di calcolo ogni qualvolta si utilizzino i risultati ottenuti in modo puntuale da verifiche strumentali per estendere lo studio ad un'area più vasta di quella indagata.

I modelli costruiti devono essere quindi essere calibrati mediante opportune misurazioni fonometriche prima di essere utilizzati. Per consentire una corretta calibrazione i dati devono essere sufficientemente accurati, il periodo di misura da considerare deve essere adeguato e non vanno trascurati i parametri meteorologici che intercorrono durante la fase di misura (temperatura, velocità e direzione del vento) e le caratteristiche delle infrastrutture direttamente indagate o presenti nell'area di interesse.

La calibrazione avviene per confronto con le misurazioni effettuate sul sito oggetto di indagine. Per calibrare il modello di calcolo si fanno variare alcuni parametri critici al fine di avvicinare i valori calcolati con i valori misurati: ciò richiede l'identificazione accurata dei parametri che si ritiene abbiano maggiori responsabilità nel determinare le differenze tra i

valori misurati e quelli calcolati. (minimizzazione della somma degli scarti quadratici calcolati ed i valori misurati)

Occorre quindi effettuare delle misurazioni di livello sonoro, in funzione della frequenza, sia in punti di riferimento prossimi alle sorgenti sonore individuate (punti di calibrazione delle sorgenti) sia in punti più lontani ed in prossimità dei ricettori (punti di calibrazione dei ricettori e di verifica). I punti di verifica devono essere generalmente diversi dai punti di calibrazione. Ne risultano i valori di livello sonoro L_{mc} nei punti di calibrazione e L_{mv} nei punti di verifica;

Sulla base dei valori che si sono misurati si determinano quindi i valori dei parametri di ingresso del modello di calcolo (potenza sonora e direttività delle sorgenti sonore, tipologia puntuale, lineare od aerale delle sorgenti sonore, ecc.), in maniera tale che la media degli scarti $|L_{cc}-L_{mc}|$ al quadrato tra i valori calcolati con il modello, L_{cc} , ed i valori misurati L_{mc} , nei punti di calibrazione delle sorgenti sia minore di 0,5 dB:

$$(4.16) \quad \sum_{c=1}^{N_s} \frac{|L_{mc} - L_{cc}|^2}{Nr} \leq 0.5dB$$

Sulla base dei valori misurati ai ricettori (calibrazione ai ricettori) minimizzare la somma dei quadrati degli scarti regolando i parametri del modello che intervengono sulla propagazione, in maniera tale che la media degli scarti al quadrato sia minore di 1,5 dB:

$$(4.17) \quad \sum_{c=1}^{N_s} \frac{|L_{mc} - L_{cc}|^2}{Nr} \leq 1.5dB$$

Dove: NR è il numero di punti di misura ricettore-orientati utilizzati per la calibrazione, calcolare i livelli sonori nei punti di verifica, L_{cv} ;

Se lo scarto $|L_{cv}-L_{mv}|$ tra i livelli sonori calcolati L_{cv} , e quelli misurati L_{mv} , in tutti i punti di verifica, è minore di 3 dB(A), allora il modello di calcolo è da ritenersi calibrato; altrimenti è necessario riesaminare i dati di ingresso del modello di calcolo (specificatamente quelli relativi alla propagazione acustica) e ripetere nuovamente il processo.

4.8. Incertezza associata ai modelli di calcolo previsionale

I livelli sonori calcolati sono affetti da un grado di incertezza che dipende dai seguenti contributi:

- *incertezza associata ai dati di ingresso* – contribuisce in modo importante all’accuratezza del risultato restituito dal modello, esistono a riguardo dei “toolkit” proposti nella Linea guida “*Good Practice Guide*” elaborata da un apposita Commissione Europea che suggeriscono in base alle informazioni che si hanno a disposizione le metodologie più appropriate per la stima dei parametri per il calcolo dei livelli di rumore prodotti dalle infrastrutture;

- *incertezza del modello matematico* – i modelli matematici sono un’ approssimazione della realtà perciò il modello di base avrà sempre un’insufficiente rappresentatività.. Per alcuni modelli si trovano in letteratura delle valutazioni legate all’incertezza attesa in casi tipo rappresentativi. Un grosso problema lo si trova quando gli sviluppatori dei software commerciali implementano delle varianti del modello base senza dichiarare esplicitamente le semplificazioni che vengono adottate.

- *incertezza del modello software* – esistono errori legati all'implementazione delle equazioni base, è per questa ragione che il software deve essere sottoposto ad una procedura di validazione prima di essere commercializzato.

In alcuni paesi europei sono già state sviluppate norme tecniche nazionali per la validazione dei software. In Germania ad esempio per quanto riguarda i test si ricorre alla norma *DIN 45687*, che definisce il grado di confidenza ottenibile dall'implementazione tramite un pacchetto software nei confronti di un algoritmo di calcolo normalizzato. La norma si occupa della valutazione della quota parte di incertezza dovuta al software nel processo di calcolo. Fa parte dell'incertezza del modello software anche l'incertezza di rappresentazione che comprende gli errori dovuti all'interpolazione grafica dei risultati (vedi paragrafo 5.6.2)

Il concetto alla base dei metodi di interpolazione è quello di partire da punti di valore calcolato (in base al passo di griglia definita per il calcolo) attribuendo alle celle del grid risultante, per le quali non siano noti i valori, un valore interpolato a partire dai primi. L'elemento che più di ogni altro influenza la superficie interpolante è l'algoritmo utilizzato;

- *incertezza del modello costruito* – dipende dall'insieme delle approssimazioni e semplificazioni operate nella fase di costruzione del modello, se sono disponibili dati misurati di livello sonoro riferiti al caso analizzato il modello si può ottimizzare sulla base di questi (calibrazione del modello costruito). Non si deve dimenticare che anche i dati misurati sono affetti da incertezza quindi nel valutare l'incertezza del risultato prodotto occorre tener conto anche dell'incertezza associata alle misure.

Si deve inoltre tener conto degli errori dovuti agli operatori del programma ad una scorretta comprensione/applicazione della linea norma utilizzata, scarsa conoscenza del software

5. CASO IN ESAME

5.1. Introduzione

Nel caso oggetto dello studio si voleva valutare il rumore prodotto dallo stabilimento industriale.

Nella maggior parte delle situazioni riscontrabili nella realtà la rumorosità ambientale raramente è determinata da un'unica sorgente sonora, solitamente vi concorrono in misura e con modalità assai diversificate molteplici sorgenti di diversa natura (rumore da traffico stradale, rumore ferroviario, rumore antropico ecc.)

La difficoltà più ricorrente nella pratica di rilevamento, sia nell'ambiente esterno che in quello abitativo è quella di poter discriminare tra rumore ambientale, prodotto da tutte le sorgenti sonore esistenti in un dato luogo e durante un determinato periodo (escludendo gli eventi sonori "atipici" ovvero di natura eccezionale), e rumore residuo, rilevato quando la sorgente sonora in esame risulta essere disattivata, determinando così il contributo delle singole sorgenti.

Nella prima parte del capitolo sarà descritta la metodologia di misura impiegata per la valutazione del rumore ai ricettori nella seconda parte invece sarà trattata la metodologia impiegata per il calcolo della potenza sonora dello stabilimento che sarà poi utilizzata nel capitolo successivo come dato di ingresso nella simulazione con i software di calcolo.

Al fine di perseguire tali obiettivi sono disponibili diverse metodologie di valutazione alcune di esse sono vengono trattate nella norme UNI 10855 e UNI 11143 (vedi capitolo 3).

5.2 Caratterizzazione del sito di misura

Lo stabilimento industriale confina a nord con la ferrovia, a sud con una strada provinciale ed a ovest con due strade di tipo F (vedi figura 5.1).

Nell'impianto si producono prodotti chimici, l'attività è caratterizzata principalmente da processi a *ciclo continuo* e, alcune attività di minor rilevanza vengono eseguite con processi discontinui ed essenzialmente in periodo diurno.

Dato che tali stabilimenti non possono fermare la loro attività al fine di misurare ogni singola sorgente singolarmente, è necessaria una opportuna procedura per ottenere la potenza sonora con l'azienda in condizioni operative normali.

Nello studio in oggetto sono stati effettuati tre monitoraggi in continuo presso alcune abitazioni all'interno di aree di loro pertinenza, in posizioni limitrofe all'azienda sia nel periodo diurno che in quello notturno in cui all'interno di essa si svolgeva la normale attività produttiva. Le valutazioni si sono protratte anche nel periodo successivo al precedente durante il quale parte dell'attività produttiva è stata oggetto di fermo causa manutenzione agli impianti. Questo periodo, seppure l'attività non era completamente sospesa, è stato utilizzato come periodo di riferimento atto a determinare confronto con i limiti di emissione, tenendo presente perciò che tale valore sarà sottostimato.

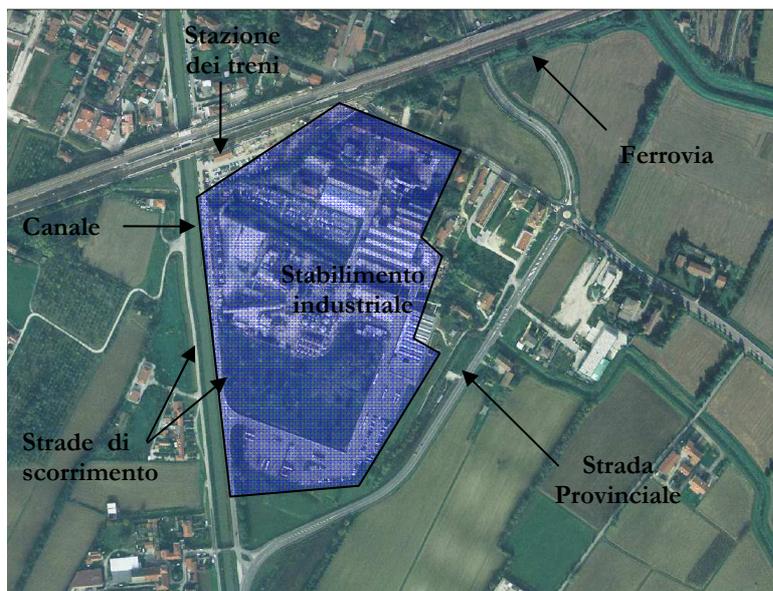


Figura 5.1: Individuazione del sito - ortofoto da ArcviewGis 3.3

5.2.1. Individuazione delle principali sorgenti di rumore

L'attività industriale costituisce un luogo di concentrazione di sorgenti generatrici di rumore (meccanismi in movimento, motori, correnti fluide, getti aeriformi) in grado di influenzare il clima acustico dell'area circostante e di innalzare il livello di pressione sonora presso i ricevitori situati in prossimità degli impianti.

Nel corso dei sopralluoghi effettuati si è preso visione degli impianti e si è cercato di individuare le singole sorgenti sonore che potevano avere un'importanza nel determinare il livello sonoro emesso all'esterno. Le sorgenti più rumorose sono risultate essere collocate sul lato nord ovest dell'impianto (vedi figura 5.2).

Si riporta di seguito l'elenco delle sorgenti principali individuate all'interno dell'azienda:

- *Generatori di servizio e di emergenza*, posti nell'area interna di pertinenza orientati verso il confine lato ovest ed in prossimità dello stesso – i generatori di servizio sono situati al piano primo in un locale fonoisolato, uno dei due è sempre in funzione mentre il secondo viene utilizzato in sostituzione del primo. I generatori di emergenza sono situati nella stessa area dei precedenti al piano terra in un locale ad esso esclusivamente adibito e fonoisolato. Tipo di emissione *stazionaria variabile*;

- *Torri di evaporazione* per raffreddamento lato nord impianto acido solforico;

- *Impianto di solfonazione*: sono presenti un ventilatore centrifugo e una pompa molto rumorosi, in posizione prossima al suolo, tali sorgenti sono lontane dai confini e parzialmente schermate dagli altri impianti ;

- *Circolazione automezzi* – area interna di pertinenza- per consegna materie prime e prelievo prodotto, e movimentazione materiali con pala meccanica: secondo quanto riferito si tratta attività discontinua, di consistenza variabile, con orari più o meno estesi e massimi in caso di arrivi di materia prima via mare, anche in orario serale, mai comunque in orario notturno oltre le ore 23.



Figura 5.2: Pianta stabilimento individuazione sorgenti sonore

5.2.2. La scelta dei ricettori

Dopo vari sopralluoghi presso il sito d'indagine si sono individuati i ricettori presso i quali effettuare i monitoraggi.

A nord del primo ricettore *R1* è situata la linea ferroviaria, ad est si trova via A.D., non soggetta a traffico intenso in quanto utilizzata dai soli residenti. Parallela a via A. D. si trova via M., quest'ultima è interessata da volumi di traffico legati all'accesso all'azienda e dal traffico legato all'utilizzo dei treni in arrivo e partenza, perciò il traffico è strettamente legato dalle fasce orarie dei treni. Il punto relativo al monitoraggio in continuo, indicato nella relazione con "*M1*", si trova a 15 m dall'abitazione e a 10 m da via A.D. ed è stato posizionato a 4 m di altezza dal suolo.

In prossimità del ricettore *R2* si trova via B. la quale è interessata dalla presenza di volumi di traffico consistenti. Tale via di recente realizzazione si raccorda a nord con via C. e ad sud-ovest con via M. Il punto di misura relativo al monitoraggio in continuo, *M2*, è situato in prossimità all'area est della fabbrica che è delimitata da un'alta recinzione in muratura. La strumentazione è stata posizionata tra la fabbrica e l'abitazione in un'area adibita ad orto in un punto poco frequentato, a circa 20 m dalla recinzione in muratura e a 30 m dall'abitazione ed è stato posizionato ad un'altezza di 1,5 m dal suolo.

Sul lato est del ricettore *R3* è situata via B. la quale, si collega a nord a via C. ambedue le strade sono caratterizzate da un consistente traffico veicolare. Sul lato nord vi percorre il tratto ferroviario. Il punto di misura, "*M3*" è posto a circa 7 metri di altezza in un terrazzo accessibile da una scalinata esterna delimitata da un cancello chiuso.

Presso i ricettori si sono inoltre effettuate delle misure puntuali posizionate a 2 m dalla facciata delle abitazioni ed a un'altezza di 1,5 m dal suolo.

Sia nelle misure di monitoraggio in continuo che nelle misure puntuali sono stati identificati e sottratti i contributi dovuti ad eventi sonori atipici non connessi con l'attività dell'azienda. Per le foto dei punti di misura si rimanda all'appendice fotografica.

Sulla base della classificazione acustica del comune (riportata nell'allegato II) dove si trova il sito in oggetto il ricettore *R1* ricade in *classe III* (aree di tipo misto), il ricettore *R2* in *classe V* (area prevalentemente industriale) ed infine il ricettore *R3* in area di *classe II* (Aree prevalentemente residenziali) i limiti applicabili sono pertanto i seguenti:

Ricettori	Leq Diurno dB(A)	Leq Notturmo dB(A)
R3	55	45
R1	60	50
R2	70	60

Tabella 1

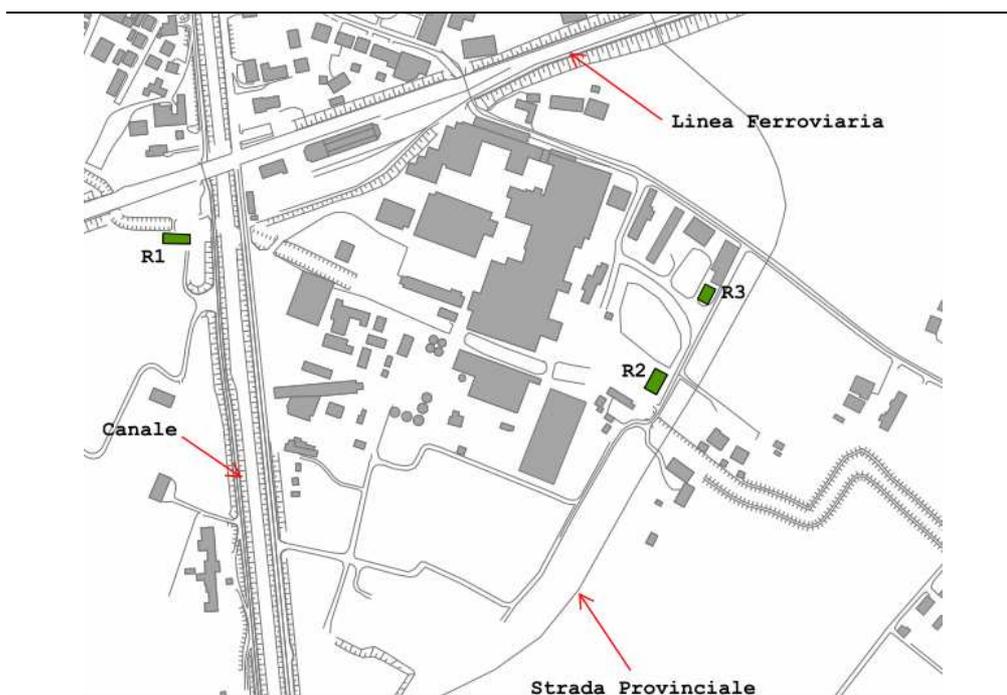


Figura 5.3: Individuazione dei ricettori - ArcviewGis 3.3

5.3. Strumenti e metodi di misura impiegati nei monitoraggi

Le misurazioni fonometriche, l'acquisizione dei dati meteorologici e il rilevamento dei flussi di traffico stradale sono state eseguite nel periodo dal 20/07/2009 al 28/07/2009.

5.3.1. Indagini fonometriche

L'indagine fonometrica è stata realizzata mediante analizzatori di frequenza in tempo reale con relativi microfoni muniti di cuffia antivento aventi le caratteristiche stabilite dal DM 16/03/1998 (per il sistema di misura conformità alle norme EN 60652/1994 e EN 60804/1994 relativamente alla classe 1; per i microfoni conformità alle norme EN 61094-2/1993, EN 61094-3/1995 e EN 61094/1995; per i filtri alle norme EN 61260/1995 (IEC 1260) e EN 61094-1/1994) - procedendo alla memorizzazione delle misure eseguite la cui elaborazione è stata effettuata utilizzando un programma direttamente acquisito dal fornitore dello strumento di misurazione. Inoltre, è stato impiegato un calibratore conforme alle norme CEI 29-14 e IEC 942/1998.

In particolare si sono utilizzati i seguenti strumenti:

- Larson Davis 824 SLM s.n. 3312 -microfono B&K 4184 s.n. 1657847;
- Larson Davis LD 824 s.n. 3763 - microfono L&D 2541 s.n. 8431;
- Larson Davis LD 824 s.n. 2888 - microfono B&K 4184 s.n. 1734125;
- Larson Davis LD 824 s.n. 2883 – microfono B&K 4184 s.n. 1734124;
- Calibratore B&K 4231 s.n. 2507062

Nelle misure *puntuali* i microfoni (per *campo libero*) sono stati orientati verso la sorgente. Prima e dopo ogni misurazione si è operata la calibrazione dell'intera catena strumentale.



Foto 1 – Microfono per campo diffuso

5.3.2. Campionamento dati meteorologici

Per il campionamento dei dati meteorologici è stata utilizzata la Centralina Meteo mobile modello “*Davis Vantage Pro*”, della ditta *Davis Instruments* (vedi foto n.2).

L'hardware della stazione meteo si compone di due elementi principali:

- *Centralina digitale* – dotata di display per la visualizzazione dei dati che riceve dai sensori esterni. Può essere collegata al PC tramite cavo USB per scaricare i dati rilevati;
- *Gruppo di sensori per esterno* - formato da:
 - *Anemometro* di tipo meccanico con funzionamento a “*coppe*”- misura la velocità del vento, si suddivide in *anemoscopio* propriamente detto (banderuola mobile), che misura la direzione del vento e in *anemometro* che ne misura la velocità (parte a coppe), sfruttando la portanza (resistenza al flusso d'aria) delle coppette (restituisce la velocità del vento a seconda dei giri compiuti);
 - *Pluviometro a “bascula”*- le precipitazioni piovose raccolte nell'imbuto passano alternativamente in una delle due piccole vaschette poste su una base basculante. Man mano che il recipiente si riempie il baricentro del sistema basculante si sposta. Una volta raggiunto un certo grado di riempimento la vaschetta si ribalta: sotto all'imbuto c'è una vaschetta vuota, mentre quella piena si svuota rapidamente ;
 - *Termoigrometro* – rileva temperatura e umidità;

Con la stazione meteo è quindi possibile rilevare i parametri ambientali riportati in tabella:

Parametri	Range	Intervallo di aggiornamento	Accuratezza
Pressione barometrica	850-1050 hPa	10 minuti	±3 hPa
Umidità	10-99%	31 s	±5 %
Pioggia	0-9999 mm	37 s	<5 %
Velocità del vento	0-30 m/s	62 s	±0,1 m/s
Direzione del vento	0°-360°	62 s	±22.5°

Tabella 2 – Dati rilevabili dalla centralina meteo.

La stazione meteo è inoltre dotata di apposito software (*Weather Link*), per poter disporre dei dati raccolti e per poterli analizzare.



Foto 2 - Centralina Meteo



Foto 3 - Dettaglio pluviometro e anemometro a coppe

La centralina è stata posizionata in modo tale che i sensori fossero ad un'altezza di 2 m dal suolo e in zona libera da ostacoli.

Si sono così acquisiti i valori medi dei parametri di temperatura, umidità e velocità del vento, la direzione prevalente del vento e l'eventuale presenza di precipitazioni con la periodicità di 10 minuti. Qualora non siano state rispettate le condizioni di validità della misura in base al DM 16/03/1998 l'intervallo è stato reso non valido. Gli intervalli anomali sono stati adeguatamente mascherati in fase di elaborazione della misura.

Per quanto concerne il parametro pioggia si può ritenere che un intervallo di 10 minuti sia considerato *piovoso* nei seguenti casi:

- deposito acqua maggiore o uguale ad 1mm;
- deposito acqua nell'intervallo precedente a quello oggetto di analisi maggiore o uguale a 3mm;

5.3.3. Campionamento flussi di traffico

Tale sorgente sonora è quasi sempre presente nelle rilevazioni fonometriche ambientali e costituisce di norma soprattutto nelle aree urbane la sorgente predominante. Nel caso in cui non venga indicato come causa specifica di disturbo rientra nel rumore residuo.

Per il conteggio e la classificazione dei veicoli sono stati utilizzati due analizzatori di traffico a microonde con sensore radar doppler bidirezionale Modello *TMMSA* della ditta Icoms. Tali strumenti permettono la misurazione della velocità (dai 10 ai 255 km/h) e la classificazione dei veicoli in due classi di lunghezza con marcatura oraria (menzione della data e dell'ora di passaggio di ogni veicolo).



Foto 4 – Posizionamento contatraffico

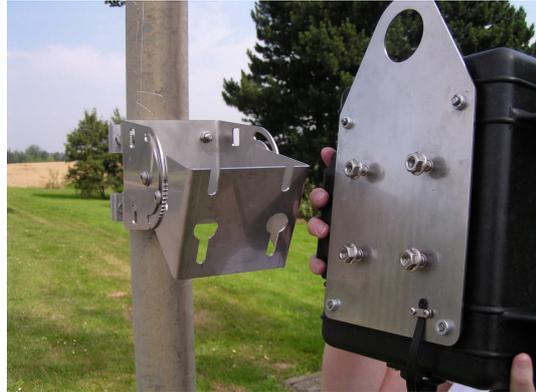


Foto 5 - Dettaglio del sistema di ancoraggio del radar

Il monitoraggio dei flussi di traffico è stato effettuato in continuo per la durata di una settimana, gli strumenti sono stati fatti funzionare in *modalità bidirezionale*.

I rilevatori sono stati installati a bordo strada sui pali dell'illuminazione pubblica, ad un'altezza di 3 m dal piano stradale, scegliendo la posizione più idonea mantenendosi lontano da rotonde, incroci e fermate degli autobus e da tutto ciò che avrebbe potuto condizionare le caratteristiche di un flusso di traffico scorrevole.

L'insieme dei veicoli stradali è stato raggruppato in due categorie, veicoli pesanti (autocarri, autobus, autoarticolati) e veicoli leggeri (automezzi furgoni moto e motorini).

Si riportano nei grafici sottostanti i dati relativi al campionamento della S.P. e di via C.

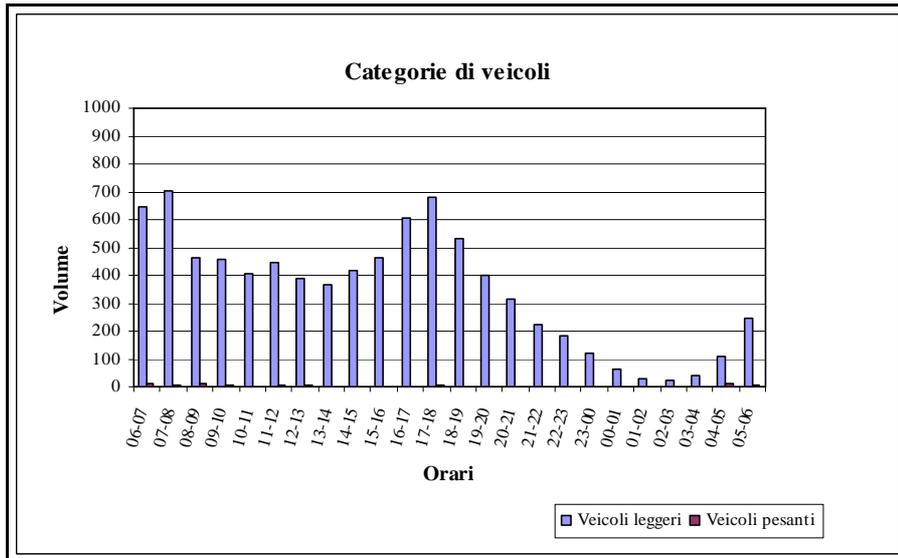


Grafico 1 – media settimanale S.P.

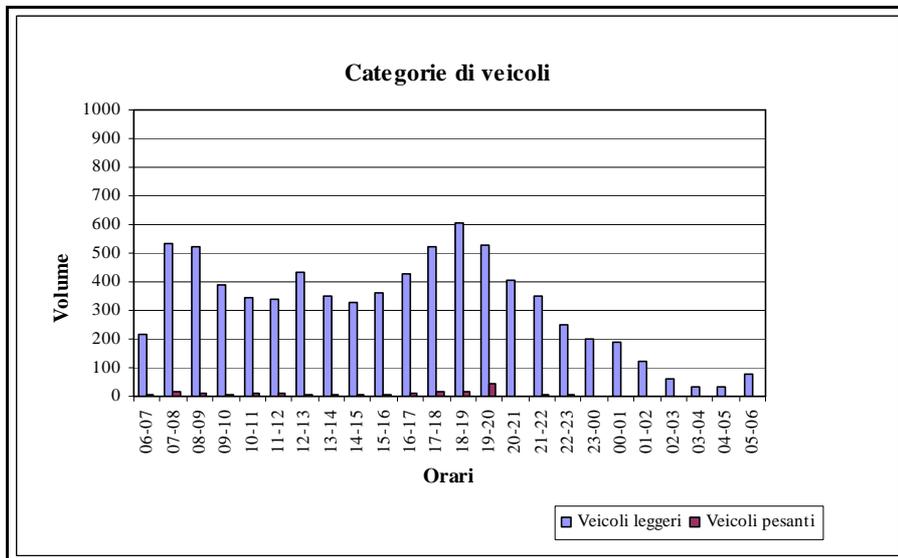


Grafico 2- media settimanale via C.

5.4. Analisi dei dati dei monitoraggi e risultati

Terminate le operazioni di monitoraggio si è eseguita l'analisi delle misure e la valutazione dei risultati. L'analisi dei dati ha documentato l'identificazione di eventi anomali tramite l'analisi della "time history" e di periodi non validi secondo le condizioni meteo e quando necessario si è provveduto alla mascheratura. (Nelle tabelle sottostanti i valori indicati con * indicano che il campionamento risulta parziale a causa di dati non validi per condizioni meteo avverse).

Le emissioni generate dal traffico ferroviario sono caratterizzate da una sequenza di eventi sonori di durata variabile che normalmente risultano ben distinguibili rispetto alla rumorosità di fondo.

Trovandosi i ricettori in prossimità della ferrovia (R1 in particolare) l'accertamento assistito per una parte del tempo della misura (permettendo di identificare gli eventi) ed il confronto con i tabulati ferroviari della stazione vicina alla posizione di misura hanno facilitato la correlazione tra gli eventi misurati e l'effettivo transito ferroviario. (vedi tabella n.3)

Orario	Tipologia di Treno	Linea
22:22	Viaggiatori	AV/AC
22:25	Viaggiatori	Storica
22:32	Viaggiatori	AV/AC
22:39	Viaggiatori	AV/AC
22:53	Viaggiatori	Storica
23:01	Viaggiatori	AV/AC
23:09	Viaggiatori	AV/AC
23:19	Viaggiatori	AV/AC
23:47	Viaggiatori	AV/AC
0:00	Merci	AV/AC
00:30	Viaggiatori	AV/AC
00:57	Viaggiatori	AV/AC
01:01	Merci	AV/AC
03:19	Viaggiatori	AV/AC
04:51	Merci	Storica
05:01	Viaggiatori	AV/AC
05:16	Merci	AV/AC
05:33	Viaggiatori	AV/AC
05:49	Viaggiatori	AV/AC
05:57	Viaggiatori	Storica
05:57	Viaggiatori	Storica
06:00	Viaggiatori	AV/AC

Tabella 3 – estratto passaggio treni periodo notturno

Relativamente al ricettore R1, si riportano in *tabella 4* i livelli di immissione globale comprensivi di *traffico ferroviario e stradale* e in *tabella 5* i livelli di emissione dell'*attività industriale*.

L_{Aeq}^{TR} <i>Diurno*</i>	-	58.5	57.5	58.5	-	57.0	55.5	58.5
L_{Aeq}^{TR} <i>Notturmo</i>	55.5	55.5	56.0	55.0	-	53.5	54.5	52.5

Tabella 4

L_{Aeq}^{TR} <i>Diurno*</i>	-	57.5	56.0	57.5	-	53.5	53.0	56.5
L_{Aeq}^{TR} <i>Notturmo</i>	51.0	52.5	53.5	53.0	-	51.0	48.5	49.0

Tabella 5 ci devo sommare lo stradale

Relativamente al ricettore R2, si riportano in *tabella 6* i livelli di immissione globale comprensivi di *traffico ferroviario e stradale* e in *tabella 7* i livelli di emissione dell'*attività industriale* e del *traffico stradale*.

L_{Aeq}^{TR} <i>Diurno*</i>	---	53.0	53.5	53.0	---	52.5	51.5	54.5
L_{Aeq}^{TR} <i>Notturmo</i>	53.0	51.5	52.0	52.0	51.5	50.5	50.5	56.0

Tabella 6

L_{Aeq}^{TR} Diurno*	-	53.0	53.5	52.5	-	52.0	51.0	54.5
L_{Aeq}^{TR} Notturno	52.0	51.0	51.0	51.5	51.0	49.0	49.0	55.5

Tabella 7

Relativamente al ricettore R3, si riportano in *tabella 8* i livelli di immissione globale comprensivi di *traffico ferroviario e stradale* e in *tabella 9* i livelli di emissione dell'*attività industriale* e del *traffico stradale*.

L_{Aeq}^{TR} Diurno*	-	55.4	55.8	55.8	-	55,6	53.6	55.0
L_{Aeq}^{TR} Notturno	53.4	53.3	53.5	53.2	53.8	53.3	53.0	52.5

Tabella 8

L_{Aeq}^{TR} Diurno*	-	54.7	55.2	55.0	-	53,7	52.4	54.2
L_{Aeq}^{TR} Notturno	51.7	52.0	51.6	51.8	52.9	51.1	50.1	50.8

Tabella 9

5.5. Calcolo della potenza sonora dello stabilimento

L'attività industriale costituisce un luogo di concentrazione di sorgenti generatrici di rumore (meccanismi in movimento, motori, correnti fluide, getti aeriformi).

In un impianto la superficie (ideale o reale) che lo racchiude costituisce a sua volta sede di generazione di onde sferiche che sommandosi le une alle altre producono un campo sonoro in genere di difficile schematizzazione.

La modellizzazione acustica di un sito industriale può essere realizzata mediante l'utilizzo di specifici codici di calcolo previsionali.

Focalizzando l'attenzione sui dati di ingresso del modello di calcolo una delle fasi più delicate e complesse consiste nella determinazione della potenza sonora delle sorgenti individuate.

Risulta perciò necessario integrare le attività legate alla costruzione dei modelli mediante calcolatore, con quelle connesse alla caratterizzazione acustica delle sorgenti sonore mediante opportune campagne di misura strumentali.

In tal senso ci si può riferire ad alcuni concetti espressi nella norma tecnica UNI 11143 "*Metodo per la stima dell'impatto e del clima acustico per tipologia di sorgenti*" anche se tale norma lascia impregiudicata la procedura di determinazione della potenza sonora delle sorgenti.

La norma UNI 10855 pur non descrivendo una procedura di determinazione della potenza acustica bensì un metodo per la misura e valutazione del contributo di singola sorgente può costituire con le dovute cautele un utile strumento di lavoro per la caratterizzazione delle sorgenti industriali.

Può infatti risultare efficace applicare la procedura di analisi della propagazione acustica descritta nel metodo "F" della norma UNI 10855 per determinare a ritroso facendo ricorso alla norma UNI ISO 9613-2 la potenza sonora da misure di pressione, rilevate in uno specifico e delimitato intorno della sorgente sonora in esame.

Gli elementi dell'attività che possono dare origine ad emissioni sonore significative possono essere rappresentate attraverso una o più sorgenti di tipo puntiforme, lineare o areale.

Le sorgenti di tipo areale vengono rappresentate da una matrice di sorgenti puntiformi il cui livello di potenza è stimato a partire dalle caratteristiche di emissione della sorgente areale (potenza sonora per unità di superficie) e dall'area rappresentata dalla sorgente puntiforme.

Anche le sorgenti lineari vengono rappresentate da una sequenza di sorgenti puntiformi il cui livello di potenza sonora è stimato a partire dalle caratteristiche delle emissioni della sorgente lineare (potenza sonora per unità di lunghezza) e dall'estensione del segmento rappresentato dalla singola sorgente puntiforme.

5.5.1. Analisi dello stabilimento secondo la UNI ISO 8297

In un impianto la superficie (ideale o reale) che lo racchiude costituisce a sua volta sede di generazione di onde sferiche che sommandosi le une alle altre producono un campo sonoro in genere di difficile schematizzazione.

Poiché appare problematica la determinazione delle caratteristiche di emissione in relazione con quelle delle singole sorgenti contenute nel complesso è necessario procedere al rilevamento sperimentale della potenza sonora emessa: a tale scopo la norma UNI ISO 8297 riporta un metodo di rilevamento che ricalca nelle sue linee essenziali quello già in uso per le sorgenti singole, con definizione di una superficie di riferimento costituita da una *fascia rettangolare* che correndo tutto intorno alla sorgente si eleva rispetto al terreno di un'altezza compresa tra i 5 m e l'altezza del punto di emissione più elevato. L'energia emessa ad altezze superiori non trova interesse in quanto si può supporre che le abitazioni circostanti vengano raggiunte solo dall'energia irradiata in direzione orizzontale o quasi. Come già detto in precedenza, il metodo risulta valido per insediamenti industriali per i quali la maggiore delle dimensioni sul piano orizzontale è compresa tra 16 m e 320 m circa. Il procedimento che si andrà descrivendo è applicabile sia ad un rumore stazionario sia ad un rumore non stazionario, purché quest'ultimo sia statisticamente stazionario.

Entrando nel dettaglio del procedimento si elencano di seguito le principali definizioni date nella norma (vedi figura 5.4):

- *Area dell'installazione, S_p* - area entro la quale sono contenute tutte le sorgenti sonore dell'installazione. Essa è espressa in metri quadrati;
- *Area di misurazione, S_m* - area totale racchiusa dal contorno definito dalle postazioni di misura. Essa è espressa in metri quadrati;
- *Distanza di misurazione, d* - distanza tra una data postazione di misurazione e il punto più vicino del perimetro esterno dell'insediamento. Essa è espressa in metri;
- *Distanza tra postazioni di misurazione, D_m* - distanza tra posizioni adiacenti di misurazione. Misurata lungo il contorno di misurazione. Essa è espressa in metri;
- *Altezza caratteristica dell'insediamento, H* - altezza media delle sorgenti di rumore interne all'insediamento. Essa è espressa in metri;

Si riportano i punti salienti del procedimento:

- Si traccia un percorso chiuso di forma semplice (contorno di misurazione) intorno all'area dell'insediamento, in modo che siano soddisfatti tutti i requisiti previsti dalla norma (paragrafo 9.1- punti a, b, c);
- Una volta individuato un contorno di misurazione che sia soddisfacente si ricavano la *lunghezza l* del contorno, l'*area di misurazione S_m* , e l'*altezza caratteristica dell'insediamento H* (paragrafo 9.2 - punti a, b, c);
- Per ogni postazione di misura si determina quindi la relativa altezza di misurazione (che comunque non deve mai essere minore di 5 m) mediante la seguente formula:

$$(5.1) \quad h = H + 0.025\sqrt{S_m}$$

- Si procede alla misura del livello di pressione sonora nelle postazioni microfoniche precedentemente stabilite, tra loro equidistanti lungo il percorso;
- Si calcola infine il livello medio di potenza sonora, L_w in decibel ponderato A per ogni banda di ottava mediante la seguente formula:

$$(5.2) \quad L_w = \overline{L_p} + \Delta L_s + \Delta L_f + \Delta L_m + \Delta L_\alpha$$

Dove:

$$(5.3) \quad \overline{L_p} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}} \right] dB ;$$

$$(5.4) \quad \Delta L_s = 10 \log \left(\frac{2S_m + hl}{S_0} \right) dB$$

Dove ΔL_s è il *coefficiente di area* e S_0 è un'area di riferimento uguale a 1 m^2 ;

$$(5.5) \quad \Delta L_f = \log \frac{\overline{d}}{4\sqrt{S_p}} dB$$

Dove ΔL_f è un *coefficiente correttivo* e d è il valore medio della distanza;

$$(5.6) \quad \Delta L_m = 3 \left(1 - \frac{\theta}{90} \right) dB$$

Dove ΔL_m è il *coefficiente correttivo microfonico* e per un microfono omnidirezionale vale zero;

$$(5.7) \quad \Delta L_\alpha = 0.5\alpha\sqrt{S_m} dB$$

Dove ΔL_α è il *coefficiente di attenuazione del suono* (dovuta all'assorbimento atmosferico) i valori tipici di “ α ” (ricavati dalla norma ISO 3891) sono riportati nel prospetto 3 della norma in oggetto.

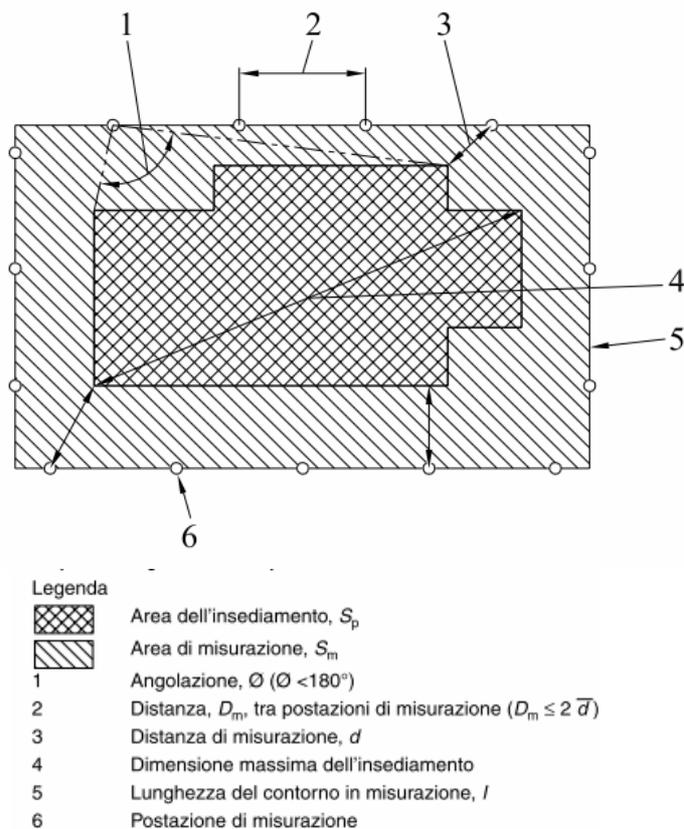


Figura 5.4: Disposizione generale delle postazioni di misurazione sul contorno di misurazione dell'insediamento

5.5.2. Determinazione della potenza sonora dell'impianto e limiti nell'applicazione della normativa adottata

Nel caso in oggetto i limiti più importanti nell'applicazione della normativa sono costituiti dalla conformazione geografica del territorio.

Si è individuata una superficie di misura di lato 60m x 60m centrata sul blocco dell'area ovest dello stabilimento, essendo concentrate in quest'area le sorgenti rumorose. Lo stabilimento risulta inoltre circondato dai vecchi ruderi del precedente impianto che hanno un effetto schermante (su tutto il lato est corre la vecchia cinta muraria dell'impianto che risulta ben più alta degli attuali stabili).

I microfoni sono stati posizionati lungo il lato ovest ad un' altezza di 5 m dal suolo le posizioni di misura distano 10 m l'una dall'altra. (vedi figura 5.5). A causa della conformazione geografica del sito le misure si sono potute effettuare solamente lungo il lato ovest, nel calcolo si è ipotizzato che le misure ottenute fossero speculari rispetto gli altri lati.

Si è così potuto ricavare lo spettro di emissione sonora riportato nel grafico e la tabella sottostante.

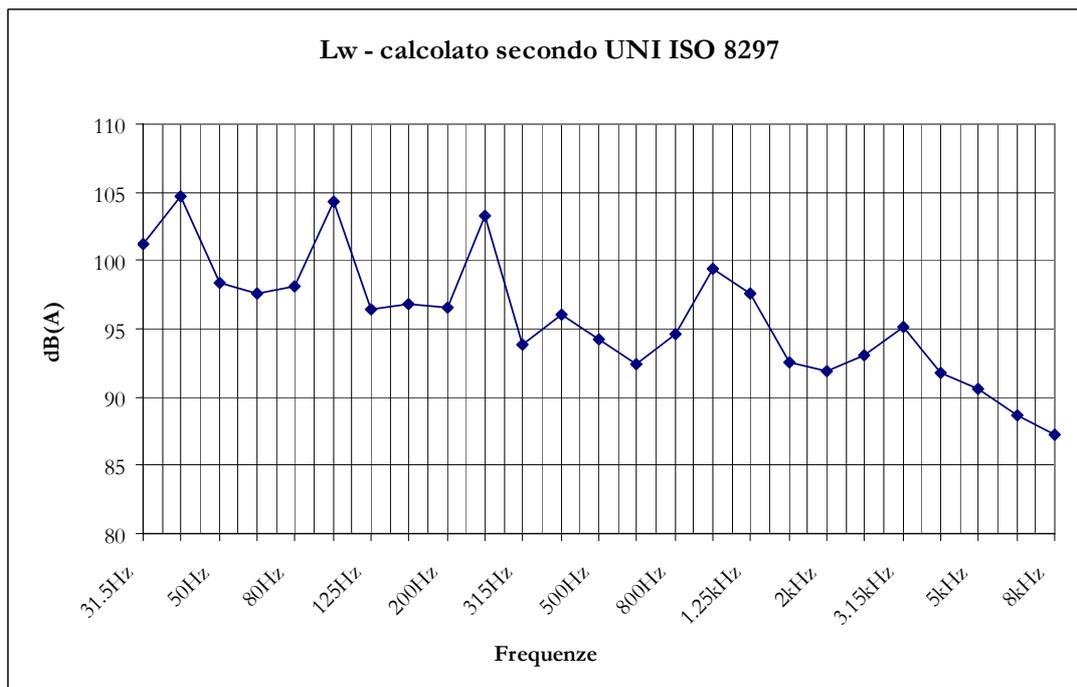


Grafico 3

31.5Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz
101,2	104,8	98,3	97,6	98,1	104,4	96,4	96,9	96,6	103,3
315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz	2,5kHz
93,9	96,1	94,2	92,4	94,7	99,4	97,6	92,6	91,9	93,0
3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	6.3kHz					
95,1	91,8	90,6	88,7	87,3					

Tabella 11- Spettro della potenza acustica calcolato secondo la UNI ISO 8297- valori espressi in dB (A)



Figura 5.5: Disposizione delle postazioni di misurazione sul contorno di misurazione dell'insediamento



Foto 6 – Foto di alcuni dei punti di misura per il calcolo della potenza sonora

6. SOFTWARE UTILIZZATI PER LE SIMULAZIONI DI CALCOLO

6.1. Caratteristiche generali dei software

I metodi di calcolo “ad interim” proposti dalla direttiva europea 2002/49 propongono la medesima equazione di base per determinare il livello di rumore in un punto ricevitore:

$$(7.1) \quad L_p = L_e + AE + R$$

Dove:

L_p = livello di pressione sonora al punto ricevitore

L_e = livello di emissione suono alla sorgente

AE = attenuazioni in eccesso

R = contributo dovuto alle riflessioni

Il termine “ AE ” comprende le attenuazioni dovute a: divergenza geometrica, assorbimento atmosferico, effetto terreno, diffrazione, correzioni meteorologiche.

Il fattore principale che determina il tempo di calcolo per una mappa di rumore è l’analisi geometrica delle condizioni di propagazione nello spazio tridimensionale. Questo processo è necessario al fine di determinare la funzione di trasferimento per tutti i percorsi di propagazione fra sorgente e ricevitore. La complessità dell’analisi e il tempo richiesto per una stessa configurazione geometrica variano in funzione del metodo di calcolo in base al numero maggiore o minore di parametri che esso richiede.

Anche le differenze nel modo di trattare le diffrazioni multiple possono essere importanti: sia il metodo NMPB/XP S 31-133 sia la ISO 9613 prendono in considerazione la posizione reale dei bordi multipli di diffrazione sul percorso di propagazione; il metodo RMR/SRMII, invece non tratta il problema nello stesso modo ovvero in presenza di barriere multiple, determina una singola “barriera equivalente” avente altezza pari a quella della barriera più alta e alla posizione che fornisce la massima attenuazione schermante.

Tali differenze possono portare ad incrementi significativi del tempo di calcolo della funzione di trasferimento tra sorgente e ricevitore.

Altri parametri che influenzano i tempi di calcolo sono: la definizione del passo della griglia di calcolo e la suddivisione delle sorgenti lineari e superficiali in sorgenti elementari puntiformi.

6.2. Cenni del metodo ray tracing

Nella tecnica del *Ray Tracing* si ammette che l’energia sonora si propaghi nello spazio frazionata lungo traiettorie rettilinee o raggi sonori (Schroeder; KroKstad, Kulowsky). Si fanno le seguenti ipotesi di base:

- Validità delle approssimazioni dell’acustica geometrica;
- Riflessione del suono in modo speculare sulle superfici di contorno;
- L’energia sonora della sorgente viene quantizzata in un numero finito di pacchetti associati a raggi sonori;
- I raggi sonori hanno sezione idealmente infinitesima e costante;

- La divergenza geometrica dell'energia sonora emessa è rappresentata dalla divergenza geometrica dell'insieme dei raggi sonori;
- I raggi sonori perdono energia per l'assorbimento delle superfici di confine urtate e per l'attenuazione del suono nell'aria;
- In ricezione i quanti di energia associati ai raggi possono essere sommati tra loro.

La generazione dei raggi può avvenire attraverso due modalità: la deterministica e la statistica. In quest'ultima a differenza della prima l'uniformità della distribuzione dei raggi è garantita qualunque sia il loro numero purchè elevato, tuttavia gli algoritmi di generazione casuale sono molto più difficili da realizzare.

I programmi che realizzano il ray tracing operano generalmente in due fasi, nella prima vengono determinati in modo iterativo i percorsi seguiti dai raggi nella seconda vengono calcolati i valori della potenza ricevuta.

Un tipico algoritmo di ray tracing deve seguire per ogni raggio ogni superficie ed ogni ordine di riflessione le seguenti regole:

- I raggi sonori devono colpire la faccia interna delle superfici di contorno;
- I raggi sonori devono viaggiare davanti alle superfici;
- Ogni punto di riflessione deve giacere sulla relativa superficie di riflessione;
- Ogni raggio sonoro deve seguire il minimo percorso per colpire una superficie.

Si riportano di seguito la descrizione delle principali caratteristiche dei software utilizzati per le simulazioni di calcolo.

6.3. Il software IMMI 6.3.1

6.3.1. Costruzione del modello e importazione dati

IMMI è prodotto dalla casa tedesca Wölfel Meb-Systeme & Software GmbH, si avvale di tecniche di calcolo improntate alle teorie classiche del "ray-tracing" (tracciamento dei raggi) e delle sorgenti immagine. Tali tecniche permettono di costruire delle funzioni di trasferimento parametriche fra sorgente e ricevitore (ray-tracing classico) o anche, al contrario, fra ricevitore e sorgente (ray-tracing inverso) attraverso le quali è possibile tenere in opportuno conto la divergenza geometrica e le attenuazioni in eccesso.

Le procedure di calcolo predisposte al suo interno sono rivolte in particolare alla trattazione del rumore originato dalle infrastrutture di trasporto e dai siti industriali, rifacendosi ai metodi previsti da varie normative di validità nazionale e internazionale. Il programma implementa inoltre il rumore aeroportuale in accordo con gli indicatori AzB/AzB-L, DIN 45684-1, OAL24, e ECAC/CEAC Doc.29. Esso supporta le richieste della direttiva 2002/49/EC del 25 giugno 2002.

In IMMI le basi costruttive del modello di calcolo sono costituite dagli "elementi".

Escludendo altre proprietà possibili, gli elementi sono principalmente punti, linee o superfici e possono essere costituiti di uno o più nodi definiti da coordinate [x,y,z].

Il software prevede che la descrizione del sito venga ultimata utilizzando tipologie di elementi, specifiche del modello di calcolo prescelto, individuate tra quelle elencate di seguito (si riportano le principali):

- *Hoep -Hoel* - i due elementi punto altimetrico e linea altimetrica formano la base per il modello del terreno, le coordinate z devono essere espresse come altezze assolute.
- *House* - modella l'effetto di schermatura e riflessione imputabile ad un edificio. Per ognuno degli oggetti introdotti va specificato il fattore di riflessione. Esiste un campo

di input relativo al numero di abitanti presenti nell'edificio (per il calcolo dei livelli di facciata secondo la direttiva UE)

- *Wand* - è utilizzato per modellizzare elementi di schermo verticale e considera i seguenti effetti: schermatura, riflessione e trasmissione. In aggiunta ai campi standard di input, l'elemento fornisce un campo per introdurre un valore costante di altezza della parete più un insieme di campi per specificare le proprietà riflettenti.
- *Refl* - è utilizzato per modellizzare superfici riflettenti collocate in qualunque posizione nello spazio. Come per gli elementi barriera ed edificio questo elemento è sottoposto agli effetti di schermatura, riflessione e trasmissione.
- *DBw* - definisce un'area che contribuisce all'attenuazione dovuta alla presenza di vegetazione, tale elemento non è considerato da tutte le sorgenti ma solamente da quelle che considerano l'attenuazione dovuta alla vegetazione. Si può inoltre introdurre una altezza relativa costante per la vegetazione. Questo valore è applicato come coordinata z relativa al terreno.
- *DBod* - effetto del terreno, definisce un'area con proprietà specifiche relative alla riflessione del terreno. E' considerato solo dalle linee guida che considerano la riflessione da parte del terreno. Esso è riconducibile al "G" parametro adimensionale per la definizione della struttura del terreno e varia da 0 per terreno duro a 1 per terreno morbido. Asfaldi o superfici acque sono classificate come dure, mentre suolo coltivato o erba sono soffici.
- *NuGe* - L'elemento destinazione d'uso serve a due scopi, per definire in modo flessibile le aree per il calcolo delle griglie e per definire un'area di uso omogeneo caratterizzato da valori limite specifici e densità di popolazione data.
- *NPFL* - la definizione di un nord è richiesta quando devono essere utilizzati parametri meteo che variano con la direzione.
- *IPTK* - è utilizzato per modellizzare punti in cui eseguire la previsione del rumore. In aggiunta ai campi standard di input il punto ricevitore richiede di specificare parametri aggiuntivi per la definizione di limiti e valori obiettivo.

Ci sono poi gli elementi legati alle tipologie di sorgenti relative alle specifiche linee guida e quindi la caratterizzazione delle sorgenti puntiformi (EZQa) lineari (LIQa) e areali (FLQa).

E' possibile importare i dati di ingresso al modello, creando dei "filtri" ad hoc, sia in formato shape (formato compatibile con i software di tipo GIS) che in formato dxf (compatibile con i software CAD). I filtri creati possono essere salvati e nuovamente utilizzati nell'impiego successivo del programma.

L'interfaccia con i programmi di tipo GIS come Arc-View risulta particolarmente utile, i filtri di importazione ed esportazione dei formati si trovano nel file menu.

I file di Arc-View sono organizzati in temi, ogni tema corrisponde ad un tipo di elemento di IMMI.

I file Arc-View si suddividono in tre formati:

- *.SHP – Shape Files - contiene i dati inerenti la geometria, i file generati con le prime versioni di Arc-View contenevano solo le coordinate geometriche x ed y;
- *.DBF – Files - è il file database che contiene ogni tipo di informazione tecnica organizzata per colonne, ogni informazione è collegata al rispettivo elemento geometrico;
- *.SHX – Files- sono i link tra i file SHP e i DBF.

Per una corretta importazione i dati geometrici devono essere espressi in metri e devono corrispondere a un sistema Cartesiano (x,y,z) di coordinate. Nell'importazione delle polilinee c'è una limitazione ad un massimo di 500 nodi.

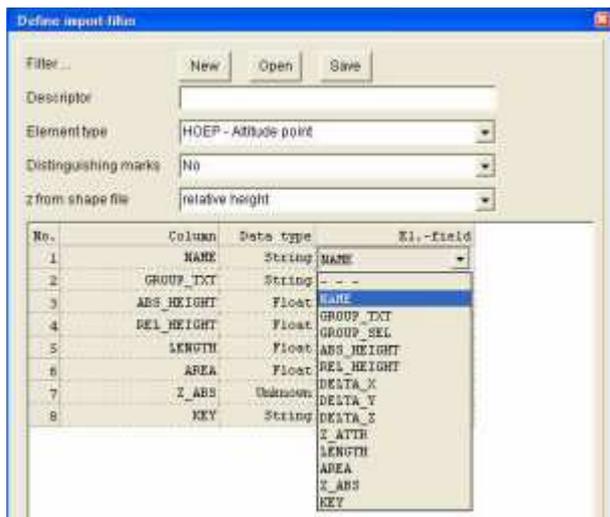


Figura 1- importazione di punti altimetrici

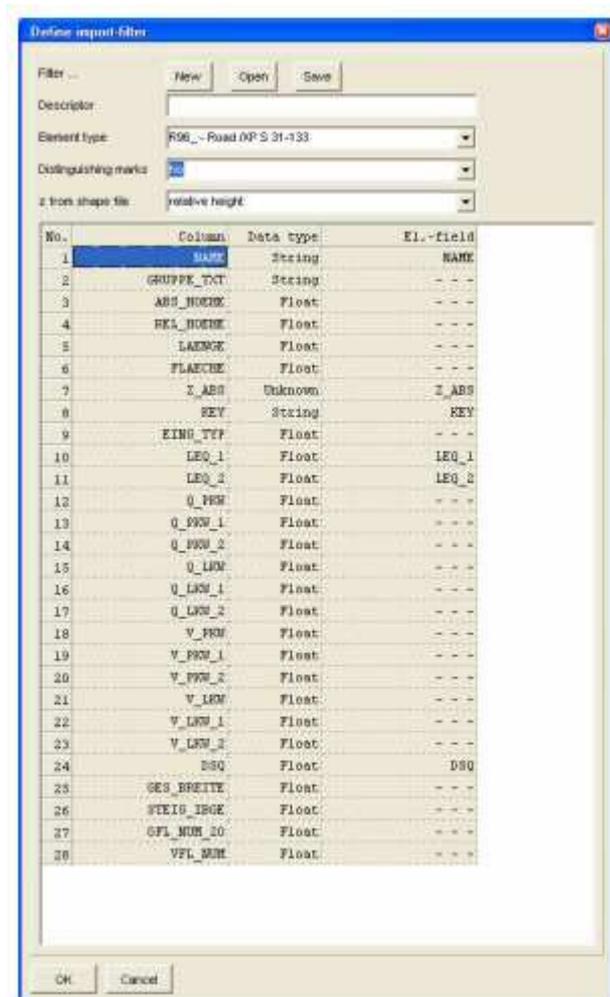


Figura 2- importazione di una strada

Il programma permette inoltre di creare dei *modelli 3D* delle aree di studio, all'interno dei quali è possibile muoversi andando a controllare i punti critici del modello costruito. Il software permette inoltre di navigare all'interno dell'ambiente 3D con diverse modalità:

- ad *altezza d'uomo* - come si stesse camminando per il sito d'indagine;

- a volo d'uccello;
- sorvolo con elicottero;

6.3.2. Calcolo ed esportazione risultati

Una volta che tutti gli elementi e le relative proprietà sono stati inseriti nel modello si procede alla fase di calcolo.

Le funzioni del menù di calcolo permettono di :

- verificare il modello acustico completo;
- definire i parametri di calcolo;
- eseguire i calcoli e rappresentare e stampare i risultati;

Il modello permette di differenziare il calcolo tra *metodo rigido* e *semplificato*.

Il calcolo rigido segue in maniera sistematica la procedura indicata dalla normativa o linea guida di riferimento, mentre il calcolo semplificato permette l'impostazione di diverse approssimazioni per ridurre i tempi di calcolo. L'impostazione può essere scelta in maniera indipendente per il calcolo delle griglie e per il calcolo di singoli punti ricevitore.

Per valutare l'effetto prodotto dall'uso del metodo semplificato sulla precisione e sui tempi di calcolo, è possibile utilizzare il comando "Previsione".

Nel metodo rigido, la maggior parte dei parametri sono predefiniti perché la procedura è regolamentata da standard. L'unico campo non specificata da standard è il campo delle riflessioni di ordine superiore.

Per quanto riguarda il metodo semplificato per il menù generale:

- *Adatta l'area di calcolo alla posizione del ricettore*: definisce in metri il lato del quadrato centrato sul punto ricettore al di fuori del quale gli elementi (sorgenti, ostacoli) non all'interno del quale vengono considerati gli elementi per il calcolo. E' un parametro molto importante per i tempo di calcolo; di default è 2000 m, si può ridurre a 500.
- *Campo libero davanti alla superficie (in m)*: le sorgenti sonore sono riflesse su superfici riflettenti solo se i punti ricevitori e sorgenti sonore non ricadono entro una distanza minima dalla superficie di 1 m.
- *Bordo bianco nella griglia*: se si esclude il calcolo dei punti della griglia all'interno degli edifici viene evidenziato un bordo bianco attorno agli edifici per i punti che fossero in parte all'esterno e in parte all'interno dell'edificio.
- *Messaggi intermedi per singoli punti e per il calcolo della griglia*: se i modelli acustici sono molto grossi il calcolo di un singolo punto ricevitore può impiegare molti minuti non osservando progressi sullo schermo può venire il dubbio che il programma si sia bloccato, i messaggi provvisori che compaiono sulla barra di stato in fondo allo schermo mi indicano gli eventuali punti in cui il programma si è bloccato.

per il menù parametri:

- *Proiezione di sorgente lineare*: definisce le modalità di frazionamento delle sorgenti lineari: il metodo rigido utilizza il criterio della distanza prescritto dalla norma; l'ottimizzazione considera l'eventuale presenza di barriere, però aumenta i tempi di calcolo.
- *Lunghezza minima per le sezioni*: riguarda la frammentazione delle sorgenti sonore ovvero il valore minimo di lunghezza al di sotto del quale non si deve scendere.
- *Limite di cut-off per intertion loss*: per la perdita per intersezione da normativa il programma taglia a 25 dB secondo la ISO-9613/2
- *Numero di riflessioni*: è consigliato mantenere 1, altrimenti i tempi di calcolo aumentano in maniera esponenziale.

- *Gamma di interesse per superficie riflettente*: definisce in metri la distanza da una superficie riflettente al di là della quale la riflessione sulla superficie non viene più considerata; di default è 200 m; Può essere diminuita in ambito urbano, per ridurre i tempi di calcolo.
- *Fattore G del terreno*: nella sezione impostazione parametri di calcolo si imposta il valore di default, potrebbe essere $G=0$; poi le zone a cui si vuole dare G diverso da 0 devono essere definite come elementi con determinato valore di G e bisogna impostare la priorità in modo che nel calcolo consideri il valore assegnato e non quello di default.
- *Sottrai valore effetto terreno*: deve essere impostata

Il comando calcolo del terreno non è utilizzato per il calcolo delle griglie, né un successivo calcolo di punti ricevitore richiede che il “controllo del modello del terreno” sia attivato. Tale strumento è solo uno strumento di controllo.

Dopo il completamento del calcolo, I risultati sono disponibili in liste con vari livelli di dettaglio. Cliccando sul tasto “Risultati” si aprirà una finestra di dialogo dove è possibile visualizzare, stampare ed esportare la lista desiderata.

La “*Lista breve di livello di rumore*” contiene i risultati di calcolo in forma compatta.

La “*Lista media dei livelli di rumore*” contiene i risultati intermedi che mostrano il contributo di ogni separata sorgente sonora al livello complessivo. La lista media può essere modificata per facilitare l’identificazione della sorgente sonora principale

La “*Lista completa*” contiene dettagliati risultati intermedi, che indicano anche i singoli termini dei contributi di attenuazione, quali la distanza di misura, l’effetto del terreno ecc. Dato che la lista può comprendere migliaia di linee nel caso di progetti di grosse dimensioni, è suddivisa in diversi livelli.

I risultati del modello possono essere visualizzati in tabelle che riportano il livello di pressione sonora presso i ricevitori e che consentono il confronto con i valori calcolati in altri modelli. In questo modo è possibile, ad esempio, valutare l’apporto di elementi, quali un area industriale ed un’infrastruttura viaria, che non possono essere calcolati sul medesimo modello ed eseguire la somma degli effetti. E’ tuttavia possibile mediante il comando “valutazione” eseguire direttamente delle somme e delle differenze energetiche su griglie calcolate nelle medesime aree. In tal caso risulta opportuno avere a disposizione delle griglie calcolate con il medesimo passo.

E’ possibile esportare anche i risultati in formato .shp.

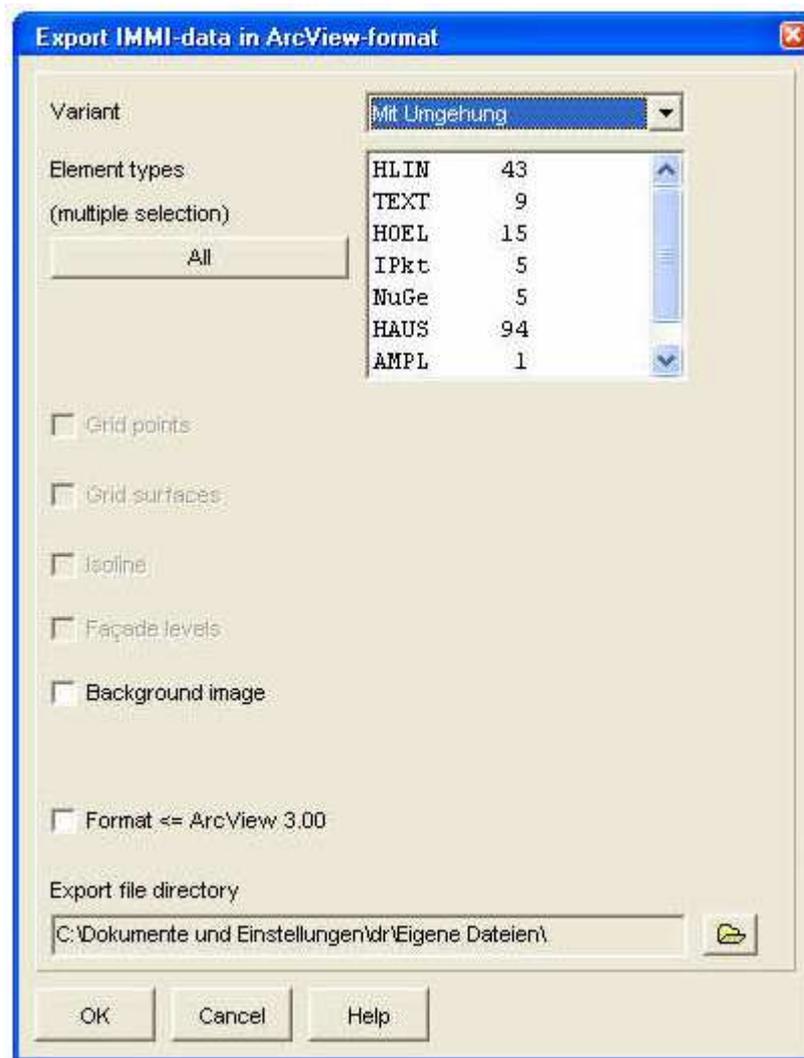


Figura 3- Maschera di esportazione dei file in formato Arc-View

Le griglie di dati possono essere esportate in formato “txt” in modo da essere utilizzabili con l'estensione *Spatial Analyst* di Arc-View.

I vantaggi dell'esportare i risultati ottenuti in dei formati che siano compatibili con i software Gis sono molti (vedi figura 4), tra i principali si possono citare i seguenti:

- facile gestione di grandi quantità di dati;
- rapidità nell'interrogazione ed estrazione delle informazioni di cui si necessita grazie alla creazione di database;
- possibilità di aggiornamento progressivo del database;
- facilità di confronto dei risultati in diverse situazioni.



Figura 4: Importazione dei risultati del calcolo in ambiente Gis

6.4. Il software Predictor-LimA Type 7810 versione 8

6.4.1. Costruzione del modello e importazione dati

Il software *Predictor-LimA Type 7810 v.8* è stato sviluppato dalla *DGMR consulting engineers, Nederland*, con copyright appartenente alla *Brüel & Kjaer Sound and vibrations measurement A/S, Naerum, Danmark*.

Predictor e *LimA* possono essere impiegati come applicazioni “standalone” o come un’applicazione integrata grazie all’utilizzo dell’opzione *Lima-link*. Entrambi i codici utilizzano il medesimo “core” di calcolo, questo garantisce loro una notevole velocità.

La *suite* offre tre implementazioni di base, per le simulazioni di calcolo della presente tesi è stata utilizzata la versione di *Predictor* comprendente *LimA link* con interfaccia utente *Predictor*. Con tale opzione il modello di dati grezzi può essere trasferito da *Predictor* a *Lima*, essere modificato e trasferito nuovamente a *Predictor*.

L’impiego del software è principalmente legato ad attività di mappatura del rumore in ampie zone, di previsione dell’efficacia di interventi mitigativi e di valutazione dell’incremento del livello di pressione sonora che accompagna piani di sviluppo. Le procedure di calcolo predisposte al suo interno sono rivolte alla trattazione del rumore originato da *siti industriali* e da *infrastrutture di trasporto*, rifacendosi ai metodi previsti da varie normative di *validità nazionale e internazionale*. (ISO 9613.1/2, DAL 32 XPS/NMPB, CRTN, RMR/SRM2, Harmonoise.). Nell’archiviazione dei progetti, il software propone un’organizzazione gerarchica delle informazioni e distingue tra *Areas*, usate per definire il nome generale e la collocazione del progetto, *Versions* e *Models*. Le versioni descrivono studi specifici o particolari condizioni proprie dei periodi di misura, i modelli sono gli effettivi sviluppi, con le opportune metodologie di calcolo, delle situazioni in esame. Una volta ultimato lo sviluppo di un modello è possibile convertirlo in *Final model*, onde evitarne modifiche accidentali.

Si elencano di seguito alcune delle novità del nuovo software rispetto alle precedenti versioni:

- Se si aprono progetti creati con versioni precedenti del software, questi vengono automaticamente aggiornati alla nuova versione;
- C'è un nuovo modello di definizione del formato;
- Per quanto riguarda il collegamento a "Limalink" (tipo 7810-A/B/G/H) l'opzione "macro Execute" è stata rinominata in "collegamento Lima" e si trova ora sul menù principale;
- Se è già presente un'estensione a LimA la nuova versione viene utilizzata per l'esecuzione della macro.

Il programma come il precedente permette di creare dei *modelli 3D* delle aree di studio e di spostarsi all'interno dell'ambiente virtuale.

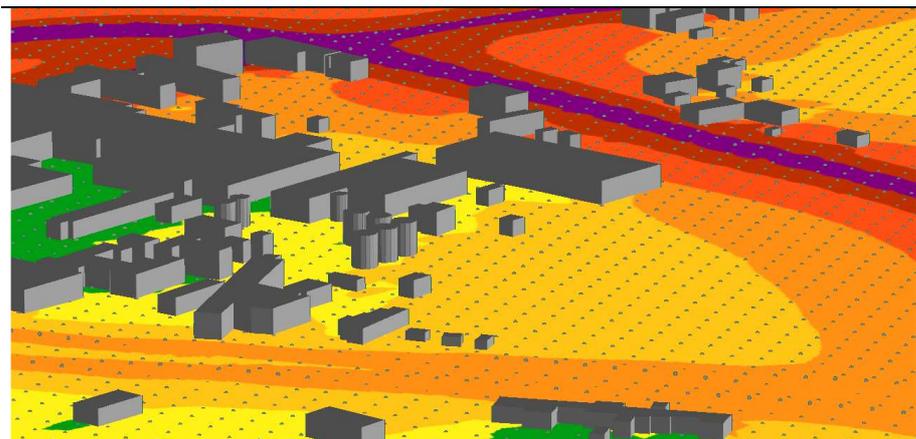


Figura 5: Vista 3D- dettaglio traffico stradale – Predictor Lima Type 7818 v8

6.4.2. Calcolo ed esportazione risultati

La descrizione del sito oggetto di studio avviene con modalità sostanzialmente indipendenti dalla normativa di riferimento prescelta e prevede in primo luogo il settaggio dei parametri del calcolo. Questi includono la definizione della correzione meteorologica, del fattore di suolo di validità generale e delle caratteristiche dell'aria necessarie a quantificare l'assorbimento atmosferico, quindi umidità, pressione e temperatura.

In seguito si dovrà caratterizzare la conformazione altimetrica del sito mediante *height line*. Queste avranno forma di elementi polinomiali con due o più nodi, ad ognuno dei quali potrà essere attribuita una diversa altezza.

Il software prevede che la descrizione del sito venga ultimata utilizzando tipologie di elementi, specifiche del modello di calcolo prescelto, individuate tra quelle elencate di seguito:

- *Building* - modella l'effetto di schermatura e riflessione imputabile ad un edificio. Questi elementi, con base a forma di rettangolo o di poligono, sono caratterizzati da un'unica altezza e pertanto la rappresentazione di edifici complessi si realizza per sovrapposizione di più *buildings*. Per ognuno degli oggetti introdotti va specificato il fattore di riflessione, tipicamente pari a 0.8, che rappresenta la quota di energia incidente che viene riflessa.
- *Foliage region* - rappresenta l'effetto di schermatura attribuibile ad una folta presenza di foglie. Questi elementi dovranno essere definiti con assegnazione dell'altezza.
- *Ground region* - riproduce un'area con fattore di suolo diverso da quello di validità generale definito tra i parametri del calcolo. In caso di sovrapposizione tra due *ground region* verrà considerato un fattore di suolo medio tra quelli delle due aree.

- *Housing region* - si utilizza in progetti ampi, nei quali non è pensabile una rappresentazione che descriva individualmente i singoli edifici. Le *housing region*, così come descritto nella norma 9613 parte 2, introducono gli effetti di schermatura dei fabbricati, considerando al contempo i fenomeni di riflessione che compensano in parte l'attenuazione del livello di pressione sonora indotta. Questi elementi dovranno essere specificati con l'indicazione di un'altezza rappresentativa degli edifici e della percentuale di superficie occupata.
- *Industrial site* - necessita dell'introduzione di un valore di attenuazione predeterminato dall'utente e rappresenta l'effetto imputabile alla presenza degli elementi propri di un sito industriale (tubature, elementi strutturali, ecc.).
- *Barrier* - introduce l'effetto di schermatura e la riflessione di muri e barriere acustiche. Naturalmente la sua introduzione dovrà essere accompagnata dalla definizione del fattore di riflessione di entrambi i lati.
- *Receiver point* - individua il punto in cui si vuole determinare il livello di pressione acustica. Ogni elemento rappresenta in realtà una colonna di ricevitori che potranno essere localizzati a sei diverse altezze.
- *Point source* - modella l'emissione sonora di una sorgente puntiforme di noti valori di direttività e livello di potenza sonora. Un *point source* può essere messo in relazione con un edificio simulando la direttività propria di una facciata o di una copertura emittente.
- *Line source* - si introduce per valutare l'emissione di sorgenti lineari quali ad esempio condutture o nastri trasportatori. Nella valutazione dell'attenuazione che intercorre tra sorgente e ricevitori, questo elemento viene schematizzato con una sequenza di *point source*.
- *Moving source* - rappresenta il contributo di una sorgente mobile di fissata velocità ed emissione sonora. Ha forma di elemento polinomiale con nodi localizzabili a diverse altezze.
- *Railway e Road* - sono elementi rappresentabili come linee polinomiali che introducono rispettivamente le emissioni di ferrovie e strade. La loro definizione prevede la conoscenza dei flussi di traffico per tipologia di veicolo e delle caratteristiche acustiche della superficie infrastrutturale.

Una volta che tutti gli elementi e le relative proprietà sono stati inseriti nel modello si procede alla fase di calcolo. Questa si distingue in un primo stadio in cui vengono elaborati i dati relativi alla descrizione morfologica del sito e nel successivo calcolo del modello.

La fase di *Ground model calculation* si basa sulle *height line* e sulla definizione altimetrica degli elementi posizionati. Questa viene eseguita automaticamente, se si avvia il calcolo del modello o se si richiede la visione tridimensionale del sito, e necessita di essere ricalcolata completamente se si aggiunge anche un solo elemento o se ne varia la posizione. Se nell'elaborazione vengono riscontrate delle anomalie, come la sovrapposizione di *height line* contraddistinte da diverse altezze, il processo si arresta ed in un'apposita finestra viene riportato l'elenco delle irregolarità.

Prima di avviare il vero e proprio calcolo del modello è possibile impostare il grado di dettaglio con cui si intende immagazzinare i risultati. Con l'opzione *Source results* il software memorizza i valori di attenuazione per ogni coppia ricevitore/sorgente, questo aumenta i tempi di elaborazione ma consente un rapido aggiornamento dei risultati se viene a variare il valore di emissione di una sorgente sonora o la suddivisione di queste in gruppi.

Meno dettagliate sono le opzioni *Group results* e *Total results*. La prima memorizza per ogni ricevitore gli effetti totali indotti dai singoli gruppi di sorgenti, pertanto qualora si verificasse una variazione dell'emissione di una sorgente, saranno soltanto i calcoli del relativo gruppo ad essere rieseguiti. Selezionando *Total results* il software registra unicamente il risultato globale

per ciascun ricevitore, pertanto la variazione nell'emissione di una sola sorgente determina la necessità di ricalcolare completamente il modello.

Per modelli di grandi dimensioni è possibile ridurre il tempo di elaborazione selezionando l'ottimizzazione del calcolo. Tale impostazione è basata sulla scelta di un raggio di influenza arbitrario ed è attivabile solo se si intende memorizzare i risultati di ciascuna coppia ricevitore/sorgente (opzione *Source results*). Attivando l'ottimizzatore, il software contempla unicamente gli elementi (sorgenti ed oggetti) posti ad una distanza dal ricevitore non superiore al raggio di influenza. È importante sottolineare che, per sua concezione, l'ottimizzatore del calcolo non aumenta la velocità di elaborazione ma introduce un migliore livello di approssimazione.

I risultati del modello possono essere visualizzati in tabelle che riportano il livello di pressione sonora presso i ricevitori e che consentono il confronto con i valori calcolati in altri modelli. In questo modo è possibile, ad esempio, valutare l'apporto di elementi, quali un'area industriale ed un'infrastruttura viaria, che non possono essere calcolati sul medesimo modello ed eseguire la somma degli effetti. Analogamente è possibile confrontare i risultati con valori di controllo impostati dall'utente che rappresentino limiti di emissione o esiti di misure in sito.

Se è stata introdotta una griglia di ricevitori, Predictor consente di visualizzare curve isolivello di pressione sonora. Questi diagrammi sono personalizzabili nelle scale cromatiche e visualizzabili nelle tre dimensioni. Alla rappresentazione è inoltre possibile affiancare etichette contenenti i valori espliciti di pressione sonora riscontrati presso i ricevitori (vedi figura 3.5).

I diagrammi contenenti le curve isolivello possono essere esportati, andando a realizzare un file vettoriale (formato DXF), nel quale le curve si distribuiranno in layer diversi.

L'installazione di Predictor consente l'utilizzo di tre applicazioni di supporto:

- *Sound Power Manager*, è un software che agevola la creazione e la gestione di cataloghi di sorgenti sonore in cui archiviare i dati relativi alla tipologia di sorgente e ai valori di emissione per banda d'ottava o di terzi d'ottava. È prevista anche la possibilità di riportare informazioni aggiuntive, quali ad esempio il metodo e gli strumenti di misura utilizzati per determinare le potenze sonore.
- *Acoustic Determinator Software*, è uno strumento finalizzato alla determinazione del livello di potenza sonora emesso nelle varie direzioni da sorgenti industriali. Il software ha la capacità di utilizzare diversi algoritmi di calcolo derivanti da norme di validità nazionale o internazionale, tra queste la norma ISO 8297 (*Determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of pressure levels*). Le sorgenti possono essere accompagnate da immagini utili ad una loro chiara identificazione ed i valori di emissione calcolati possono essere traslati in progetti eseguiti con Predictor Type 7810.
- *Predictor Analyst Module*, è un'applicazione che consente di creare e analizzare mappe di rumore, mantenendo la strutturazione per periodi e per tipologia di sorgente, a partire da dati noti di pressione sonora.

Le elaborazioni sono basate su algoritmi di triangolazione che permettono di sovrapporre gli effetti di più sorgenti sonore e di confrontare i risultati con alcune semplici informazioni prelevate da sistemi GIS, quali ad esempio il numero di persone esposte al rumore.

Una volta terminata l'analisi, i risultati possono essere stampati come immagini vettoriali o raster ed esportati in formati compatibili con sistemi GIS.

6.5. Il software Cadna-a

6.5.1. Costruzione del modello e importazione dati

Cadna-A (Computer Aided Noise Abatement) è prodotto dalla casa tedesca DataKustic. Il software supporta le richieste della direttiva 2002/49/EC del 25 giugno 2002 oltre che

normative nazionali ed internazionali, implementa inoltre gli standard AzB/AzB-L, DIN 45684-1, OAL24, e ECAC.CEAC Doc.29 per il rumore aeroportuale.

È possibile utilizzare lo stesso modello anche quando i livelli di rumore vengono calcolati in base a standard nazionali differenti senza modificare il modello stesso.

Si interfaccia con i programmi GIS (Atlas-Gis, Arc-View, MapInfo) e CAD(formato .dxf) permette inoltre l'importazione di 40 formati di file immagine tra cui anche GoogleEarth.

Da la possibilità di simulare ogni sorgente schematizzabile come puntiforme, lineare , superficiale orizzontale e superficiale verticale (propagazione piana). I livelli sui punti della griglia (mappe acustiche) possono essere sommati, sottratti ed elaborati.

Come per il software IMMI6.3 e per Predictor-LimA v.8 anche Cadna-A prevede che la descrizione del sito venga ultimata attraverso l'utilizzo di elementi specifici si riportano i principali:

- *Curve di livello* - costituiscono la base per la creazione del modello del terreno.
- *Strada* - i punti di inserimento della strada definiscono solo il corso della strada, le caratteristiche geometriche, i materiali di cui si compone la superficie stradale e i flussi di veicoli leggeri e pesanti vengono inseriti attraverso l'apposita finestra di interfaccia.
- *Schermo* - si può inserire la perdita di riflessione in decibel oppure il coefficiente di assorbimento per ciascun lato dello schermo, sono disponibili dei valori reimpostati per diverse superfici .Si può anche inserire uno spettro specifico di frequenza esistente nel progetto di database.
- *Edificio* - Contrariamente agli elementi "strada" e "schermo", gli edifici sono delle poligonali chiuse.
- *Assorbimento del terreno* - viene considerato solo dalle linee guida che prendono in considerazione la riflessione da parte del terreno. Si può ricondurre al parametro dimensionale "G" , esso varia da 0 (presenza di terreno duro) a 1 (presenza di terreno morbido).
- *Sorgente puntiforme* – la propagazione è di tipo sferico.
- *Sorgente lineare* – la propagazione è cilindrica.
- *Sorgente piana* - la propagazione è di tipo piano.
- *Sorgente piana verticale*- la propagazione è di tipo piano.

La casella degli strumenti è parte della finestra principale CadnaA contiene le icone che rappresentano i diversi tipi di oggetto. Questi ultimi possono essere inseriti direttamente nella finestra principale oppure caricati mediante gli appositi "filtri".

Per tutti gli oggetti che si può determinare se l'altezza di riferimento è relativa alla topografia della terra, quella assoluta o se riferita al tetto.(Caso in cui l'oggetto si trova sopra un altro oggetto, si pensi a un sistema di condizionamento posto su un edificio)

Anche Cadna permette di effettuare modellizzazioni 3d delle aree di studio e consente inoltre la realizzazione di piccoli file video (possibilità di generare percorsi con filmati aerei). Cadna presenta al suo interno un *database* , aggiornabile comprendente i valori di potenza sonora in bande d'ottava per numerose tipologie di macchinari e impianti industriali

6.5.2. Calcolo ed esportazione risultati

Il programma consente di definire il passo della griglia di calcolo nell'area oggetto di studio. Come già visto in precedenza un passo di griglia molto fitto aumenta notevolmente i tempi di calcolo. E' anche possibile eseguire il calcolo solo in alcune postazioni sensibili ed avere informazione sui contributi parziali di tutte le sorgenti nelle posizioni definite esportabili sottoforma di tabelle.

Si possono inoltre effettuare delle sezioni verticali per la visualizzazione dell'evoluzione del rumore in senso verticale. I livelli in facciata possono essere calcolati una volta assegnata l'altezza dell'edificio, l'altezza di ciascun piano e la distanza orizzontale tra gli appartamenti.

Per la restituzione dei risultati esistono diverse possibilità, si riportano di seguito i principali:

- stampa dei parametri di input e dei risultati in forma tabellare.
- esportazione in formato ASCII (*.txt) o Rich-Text-Format (*.RTF) dal menu File Export, predefinito oppure definito dall'utente per i sistemi di video scrittura o di fogli di calcolo (come MS Word o Excel)
- è possibile inoltre copiare ogni tabella negli appunti con la possibilità di copiarla all'interno di altri programmi o di stamparla direttamente.
- l'output grafico tramite gli appunti ("Copia per gli appunti ") oppure tramite il menu File Stampa Grafica, predefinito o definito dall'utente.

Le tabelle dei risultati sono una sorta di foglio di calcolo semplici informazioni prelevate da sistemi GIS, quali ad esempio il numero di persone esposte al rumore.

Una volta terminata l'analisi, i risultati possono essere stampati come immagini vettoriali o raster ed esportati in formati compatibili con sistemi GIS.

6.6. Il software ArcGIS 9.3

6.6.1. Introduzione ai sistemi GIS

Un *sistema informativo territoriale* viene realizzato allo scopo di acquisire, archiviare, gestire, analizzare, misurare, modificare, presentare oggetti e/o fenomeni georeferenziati presenti sulla superficie terrestre nel tempo. I G.I.S. (o S.I.T.) sono potenti strumenti in grado di associare al dato spaziale attributi alfanumerici grazie al database e condividere l'informazione dei vari aspetti dell'ambiente fisico, antropico e del sistema Terra.

Georeferenziare significa riferire ad un dato spaziale collocato sulla superficie terrestre una coppia di coordinate relative ad un sistema di riferimento geografico che identificano la sua posizione

Il sistema di riferimento geografico è rappresentato da un piano cartesiano che viene utilizzato per il calcolo delle coordinate geografiche di un qualsiasi dato spaziale situato sulla superficie terrestre. Esso può essere bidimensionale e quindi definito rispetto ad un piano, oppure tridimensionale ovvero definito rispetto a due piani ortogonali.

Per poter rappresentare uno spazio bi-tridimensionale terrestre in uno spazio bi-tridimensionale di una mappa si deve utilizzare una superficie di riferimento attraverso un metodo di proiezione.

Il modello che viene utilizzato è l'Ellissoide di rotazione (o Sferoide) (circa 150 utilizzati) in grado di riprodurre le dimensioni della Terra e eliminare le irregolarità.

Viene così definito il "DATUM"

Esistono diversi tipi di DATUM che consentono di sfruttare al meglio la precisione nei diversi contesti. WGS1984 è un DATUM mondiale con origine il centro della Terra.

La descrizione cartografica è una forma di descrizione di elementi geografici del territorio e delle loro relazioni spaziali. Ovvero tramite relazioni spaziali degli elementi geografici è possibile effettuare una descrizione del territorio.

Nella cartografia numerica i dati sono organizzati con un opportuno criterio in un archivio digitale permettendo all'utente di ricostruire gli oggetti di interesse, rappresentandoli attraverso le loro coordinate.

Questo archivio strutturato di dati (Database) che possono essere interrogati ed elaborati prende il nome di Geodatabase o Database geografico.

I database gestiti con sistemi DBMS (DataBase Management System) possono essere classificati in tre categorie, *database gerarchici*, *database reticolari* e *database relazionali*.

I GeoDatabase, utilizzati in ambiente GIS, sono prevalentemente di tipo relazionale, essi permettono di definire regole di integrità e di comportamento dei dati spaziali e quindi di

modellare elementi geografici. In un GIS attraverso un modello di tipo relazionale è possibile connettere l'informazione spaziale all'informazione non spaziale.

Gli elementi geografici possono essere distinti in due gruppi fondamentali:

- *Oggetti*: sono entità fisiche (come edifici, strade ecc.) oppure giuridiche (come stati, comuni, proprietà, ecc.) che hanno un limite individuabile e dunque possono essere considerate come entità discrete.
- *Fenomeni*: sono invece grandezze continue (come l'altitudine, la temperatura, la pendenza del suolo, ecc.), esistono ovunque (ogni punto del suolo ha una altitudine e una pendenza) e non hanno limiti individuabili.

6.6.2. Modelli Vettoriali e Modelli Raster

In un S.I.T. (Sistema Informativo Territoriale), un geodatabase può essere strutturato utilizzando due modelli:

- *Modello vettoriale*: sono punti, linee e poligoni. Solitamente rappresentano gli oggetti, le entità discrete, tutto ciò che ha un limite individuabile (per esempio edifici, regioni, strade, ecc...).
- *Modello raster* (o a griglia): è un insieme di celle uniformi sistematicamente organizzate. Solitamente vengono utilizzati per la rappresentazione, ed eventualmente l'analisi, di grandezze continue. Non hanno limiti individuabili (per esempio temperatura, altitudine, ecc...).

Si possono tuttavia utilizzare modelli vettoriali per descrivere grandezze continue e modelli raster per descrivere entità discrete.

Si distinguono tre tipi di dati vettoriali che rappresentano le *unità spaziali* minime che identificano gli elementi geografici:

- *Punti*: rappresentati attraverso una singola coordinata (X,Y);
- *Linee*: attraverso un multiplo di coordinate (X1,Y1; X2,Y2, X3,Y3.....Xn,Yn); una linea è costituita da due coppie di coordinate mentre una polilinea da più di due coppie;
- *Poligoni*: attraverso un multiplo di coordinate (più di due coppie) dove l'ultima coppia coincide con la prima determinando la sua chiusura.

Un elemento geografico in un modello vettoriale all'interno di un geodatabase può essere rappresentato in modi diversi a seconda dello scopo che ci si vuole prefiggere nella rappresentazione. Per esempio, a seconda della scala di rappresentazione, gli edifici possono essere rappresentati come punti o come poligoni.

Per la rappresentazione dei modelli raster invece viene utilizzata una griglia ortogonale orientata composta da celle (pixels) le quali rappresentano le unità minime spaziali. La griglia viene rappresentata come una matrice di numeri dove è assegnato un valore per ogni cella (pixel). La dimensione della griglia viene definita come il prodotto del numero di colonne per il numero di righe (numero totale di celle). A ciascuna cella (pixel) è associato un attributo che definisce le caratteristiche dell'elemento rappresentato. Per esempio in un modello digitale che rappresenta la temperatura in una determinata zona a ciascun pixel è associato il valore della temperatura in quel determinato punto.

Nei modelli raster l'informazione viene associata a ogni cella con un valore (solitamente numerico) che identifica l'evento rilevato in una determinata zona e che si vuole rappresentare (temperatura, piovosità, rumorosità, altitudine, ecc.).

Il valore assegnato può essere *quantitativo* (temperatura, rumore ecc.) oppure *qualitativo* (descrittivo di una determinata zona). L'informazione all'interno di questi modelli può essere inoltre distinta in informazione *spaziale* e *non spaziale*.

Per quanto riguarda l'informazione non spaziale, nei *modelli vettoriali* i punti, le linee, e i poligoni eventualmente associati all'informazione alfanumerica (attributi) sono inseriti in una tabella. Le geometrie differenti vengono gestite in tabelle diverse.

Una tabella è costituita da un insieme di righe "*records*" e colonne "*field*". Gli oggetti sono elencati nelle righe della tabella e ogni riga è univoca per ogni *records*. Nei *fields*, detti anche campi, vengono raccolti i dati descrittivi delle proprietà degli oggetti. La tabella del database contiene informazioni di tipo alfanumerico e può essere gestita tramite un DBMS.

Nei *modelli raster* invece l'informazione all'interno delle celle (pixels) può essere codificata in due modi differenti attraverso gli "*integer grids*" ovvero i valori sono espressi con numeri interi e attraverso i "*floating points grids*" ovvero i valori sono espressi con numeri decimali.

6.6.3. Il sistema ArcGIS

Il GIS desktop è l'ambiente primario in cui gli utenti dei G.I.S. creano, trasformano, condividono e pubblicano l'informazione geografica

Con il software ArcGIS è possibile svolgere molte operazioni tra le quali:

- *creazione di mappe*: rappresentazione grafica dei risultati;
- *geoprocessing*: esecuzione metodica di una sequenza di operazioni effettuate su dati geografici al fine di creare nuove informazioni;
- *organizzazione dei flussi di dati*: raccolta, trattazione e archiviazione dei dati.
- *editing*: creare e/o modificare i dati geografici;
- la visualizzazione dei dati.

L'applicazione "*ArcCatalog*" viene utilizzata per gestire e organizzare tutte le informazioni all'interno del G.I.S. Ovvero permette di:

- gestire, organizzare e visualizzare i dati;
- convertire i dati;
- creare nuovi dati;
- creare e visualizzare la documentazione inerente ai dati (es. metadati);
- creare i geodatabase;
- gestire la struttura dei server GIS.

Nell' applicazione *ArcMap* i dati vengono utilizzati per organizzare l'informazione geografica in file e database. Essa consente di visualizzare sia la vista "*Data View*" con i dati geografici contenuti nei "*Layers*" e "*Features*" archiviati che vengono utilizzati per la creazione dei dataset ovvero:

- elementi geografici vettoriali;
- elementi geografici raster;
- immagini;
- dati tabellari.

Sia quella di layout "*Layout View*" per la creazione di mappe tematiche accessibili a diversi utenti e disponibili per molte applicazioni come ad esempio:

- WEB;
- 2D e 3D;
- dispositivi mobile.

Nella vista contenente i dati geografici "*Data View*" può essere visualizzato solo un "*Dataframe*" alla volta, mentre nella vista di layout "*Layout View*" possono essere visualizzati contemporaneamente tutti i "*Dataframe*". Si ha anche a disposizione una *TOC* (Table Of Contents) ovvero l'indice utile nell'organizzazione, gestione e controllo delle proprietà dei layers. Vi sono inoltre le applicazioni "*ArcToolbox*", ovvero una serie di strumenti (tools) che consentono di effettuare tutte le operazioni di geoprocessing (struttura chiave per un'analisi geografica), e delle funzioni "*Editing*" di base.

7. COSTRUZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO

7.1. Introduzione

Si vuole ora studiare il sito industriale precedentemente analizzato, tramite l'applicazione delle tecniche di calcolo previsionale che consentirà di estendere i livelli di rumore rilevati in specifiche posizioni a tutta l'area di indagine ottenendo un'informazione di tipo areale a partire da dati di tipo puntuale.

Lo studio sarà affrontato ricorrendo a vari metodi di modellizzazione delle sorgenti.

Ricordando quanto già detto precedentemente il *modello matematico* è costituito da un set di equazioni basate su ipotesi semplificative e relativi limiti di applicabilità, il *modello software* è il programma che implementa il modello matematico su computer (esso include un modello di interpolazione) ed infine il *modello costruito* non è altro che una particolare applicazione del modello software con specifici dati di ingresso.

Tale analisi, è resa possibile dall'utilizzo di programmi di simulazione acustica, nello specifico *IMMI 6.3*, *Predictor-Lima V8.00* e *Cadna-A*.

I calcoli sono stati svolti utilizzando il metodo del *raytracing*. In particolare il calcolo è stato sviluppato a partire dalla conoscenza delle caratteristiche di emissività delle diverse sorgenti, modellizzate a seconda dei casi come sorgenti puntuali, lineari o areali, e tenendo conto dei diversi fenomeni di propagazione, riflessione, diffrazione e attenuazione delle onde sonore determinati dalla conformazione del territorio, dall'edificato e dalle condizioni climatiche. La simulazione della propagazione è stata sviluppata facendo riferimento, in generale, allo standard ISO 9613/2. I risultati delle elaborazioni sono presentati tramite una serie di mappe di rumore e di sintesi tabellari di calcolo in corrispondenza dei punti ricettori.

Le mappe di rumore sono calcolate secondo normativa a 4m di altezza dal piano campagna locale, ogni colore rappresenta un intervallo che corrisponde a determinati livelli di rumore (tipicamente intervalli di 5 dB) le tabelle degli scarti vengono riportate nel capitolo successivo.

7.2. Caratteristiche e impostazioni dei modelli

E' innanzi tutto importante riconoscere che l'output di una simulazione di rumore ambientale rappresenta una foto istantanea della gamma degli effettivi livelli di rumorosità che si potrebbero verificare nel tempo e nello spazio. La modellizzazione è uno strumento di stima del rumore che si riferisce ad uno specifico insieme di condizioni.

Le condizioni chiave alle quali un modello si riferisce sono:

- La ricognizione delle sorgenti di rumore per le quali i livelli di rumore ambientale sono di interesse;
- L'approssimazione dell'ambiente fisico in cui si propaga il rumore dalla sorgente di rumore verso la regione di interesse (il terreno, l'ambiente costruito, le condizioni atmosferiche);
- La tipologia di sorgente (modalità di propagazione-sorgente lineare-puntiforme ecc.);

I modelli di rumore ambientale coinvolgono molteplici sorgenti sonore e la propagazione nei punti di interesse avrà complessi percorsi di trasmissione. In tali scenari il modello di rumore ambientale viene calcolato per ogni sorgente sonora, tenendo conto di ogni percorso di trasmissione e ogni posizione dei ricevitori. Il livello totale del suono in ogni

posizione viene quindi calcolata sommando energeticamente il contributo di ogni singola sorgente.

Per garantire il massimo grado di omogeneità delle condizioni di prova, sono stati desunti dalla cartografia regionale in formato digitale gli elementi di base comuni (curve isolivello, bordi strada, scarpate, edifici) per costruire i modelli 3D completi del terreno e delle aree fabbricate, all'interno di ciascun software.

Le sorgenti sonore lineari e i punti ricettori sono stati introdotti importando in ogni applicazione i medesimi temi ad essi associati.

In particolare, i livelli sonori sono stati valutati su delle griglie di calcolo aventi un passo di 10x10 m. Si mette inoltre in evidenza inoltre che le quote degli edifici, delle sorgenti e dei ricettori sono state introdotte come altezze relative, ossia riferite allo specifico modello di terreno implementato da ciascun programma.

Per quanto riguarda le impostazioni acustiche e di calcolo, sono state adottate le seguenti specifiche comuni:

- condizioni meteorologiche relative al sito di indagine (vedi par. 7.7)
- superfici delle aree edificate completamente riflettenti;
- un solo ordine di riflessione;
- fattore suolo costante su tutta l'area di lavoro;
- calcolo della diffrazione sugli elementi lineari del terreno e sugli spigoli delle aree fabbricate;
- area di lavoro intorno a ciascun punto ricettore considerata nel calcolo pari a 500 m;

7.3. Rappresentazione geografica e topografica del sito

La cartografia tecnica tematica e i modelli digitali dell'elevazione sono le principali tipologie di livelli informativi che devono essere acquisiti nell'ambito dei progetti di analisi territoriale.

La cartografia in formato digitale ".shp" - *shape files* (compatibile con i software GIS più diffusi) in scala 1:5000, georeferenziata e comprendente dati relativi alla conformazione del terreno, alla dislocazione, forma ed altezza degli edifici è stata acquisita dal sito ufficiale della Regione Veneto. La carta tecnica regionale (CTR) è la carta topografica di maggior dettaglio che rappresenti l'intero territorio regionale.

E' stata necessaria una fase di rielaborazione delle informazioni acquisite per poterle trattare in ingresso ai modelli di calcolo. Le curve di livello e i punti di quota del terreno ricavabili dalla CTR non sempre garantiscono una accurata modellizzazione in prossimità delle infrastrutture stradali e ferroviarie ovvero in presenza di rilevati, ponti e corsie in trincea.

In una prima fase, per tener conto dei punti particolarmente critici in cui la cartografia tecnica comunale non dava una adeguata rappresentazione, le elaborazioni del terreno sono state effettuate con il software GIS *ArView 3.3*, in particolare si è utilizzata l'estensione "*Spatial Analyst*" aggiuntiva al programma.

Si sono così potuti interpolare i punti quotati disponibili ottenendo delle curve di livello del terreno più dettagliate e si sono "esportate" nel formato ".shp", direttamente "importabile" all'interno dei software di simulazione in modo da poter creare il DTM del sito di studio.

L'operazione di interpolazione ha consentito di modellizzare più accuratamente alcune zone a discapito di altre, perciò in una seconda fase la modellizzazione del terreno nelle aree critiche si è effettuata direttamente all'interno degli ambienti software IMMI 6.3, Cadna-A e Predictor LimA V.8.00, mediante l'utilizzo di specifiche funzioni.

Per ogni software di calcolo precedentemente menzionato, si è creato un modello del terreno che è stato "esportato" nei formati compatibili agli altri software ed "reimportato" in ciascuno di essi.

A questo punto tra i tre modelli generati si è scelto un modello del terreno unico per tutti e lo si è usato per le simulazioni in tutti e tre i software.

Si sono poi reperite le informazioni relative alla classificazione acustica comunale dell'area in esame, relativi valori limite imposti dalla normativa vigente.

Con l'utilizzo degli strumenti GIS è stato così possibile incrociare l'elaborazione dei dati relativi alle mappe di rumore ricavate dalla simulazione con la cartografia relativa alla zonizzazione acustica consentendo un rapido confronto con i limiti previsti da quest'ultima.

Il terreno oltre ad influenzare la propagazione acustica per la sua conformazione geometrica, lo influenza anche per le caratteristiche di assorbimento che possiede. Come visto in precedenza, le onde sonore riflesse dal terreno interferiscono con le onde dirette, producendo effetti di attenuazione e talora di amplificazione in precisi intervalli di frequenza

Tali fenomeni risultano di difficile valutazione soprattutto se ci si trova in presenza terreni piuttosto *irregolari*, solitamente le formulazioni matematiche empiriche a cui si ricorre non forniscono risultati affidabili in tutte le bande d'ottava.

Il problema si complica spesso anche a causa delle modifiche che il terreno subisce nel breve e nel lungo periodo (ad esempio presenza di ghiaccio o di neve).

7.3.1. Possibili errori nella modellizzazione del terreno

Risultano frequenti gli errori dovuti all'errata impostazione delle altezze relativamente ai *layer*.

Gli elementi costitutivi del modello possono essere infatti definiti sull'asse z in diversi modi ovvero:

- utilizzando coordinate assolute, riferite quindi alla quota 0;
- utilizzando coordinate relative, dove le altezze sono riferite al livello del suolo;
- si può inoltre inserire la quota relativa al livello del suolo e dell'altezza che l'elemento misura da questa.

Può accadere di importare gli elementi appartenenti ai vari layer in modo scorretto impostando altezze non coerenti tra loro, è il caso tipico delle strade sospese in aria o degli edifici non correttamente appoggiati al terreno.

E' utile in tal senso, una volta importati tutti i *layer* effettuare delle *simulazioni 3d* che permettono di individuare in modo rapido le eventuali aree critiche.

Un altro problema è costituito dalla difficoltà di modellizzazione di rilevati (scarpate) e corsie in trincea, sebbene tutti i software siano dotati di apposite funzioni occorre prestare molta attenzione nel compiere tali operazioni in quanto l'inserimento di questi elementi modifica in *modo permanente* le curve isolivello del terreno (ovvero una volta effettuate le modifiche non si può più tornare indietro a meno di non ricaricare nuovamente il terreno di origine).

Anche nel caso della modellizzazione dei *ponti* occorre verificare in modo adeguato che essi siano realmente appoggiati al terreno (bisogna inoltre ricordarsi di controllare gli attributi dell'elemento in modo tale da assegnarli la giusta riflessione), come a loro volta devono essere appoggiate ad essi le strade. (In Immi 6.3, esiste una particolare funzione che consente di verificare nodo per nodo l'aderenza delle strade ai ponti – permettendo di correggere manualmente gli eventuali errori).

Il terreno oltre ad influenzare la propagazione acustica per la sua conformazione geometrica, lo influenza anche per le caratteristiche di assorbimento che possiede. Come visto in precedenza, le onde sonore riflesse dal terreno interferiscono con le onde dirette, producendo effetti di attenuazione e talora di amplificazione in precisi intervalli di frequenza

Tali fenomeni risultano di difficile valutazione soprattutto se ci si trova in presenza terreni piuttosto *irregolari*, solitamente le formulazioni matematiche empiriche a cui si ricorre non forniscono risultati affidabili in tutte le bande d'ottava.

Il problema si complica spesso anche a causa delle modifiche che il terreno subisce nel breve e nel lungo periodo (ad esempio presenza di ghiaccio o di neve).

I software provvisti di anteprima di calcolo (tutti quelli utilizzati per le simulazioni di questa tesi ne sono provvisti) in genere in presenza di gravi errori (di tipo geometrico) non consentono lo svolgimento dei calcoli.

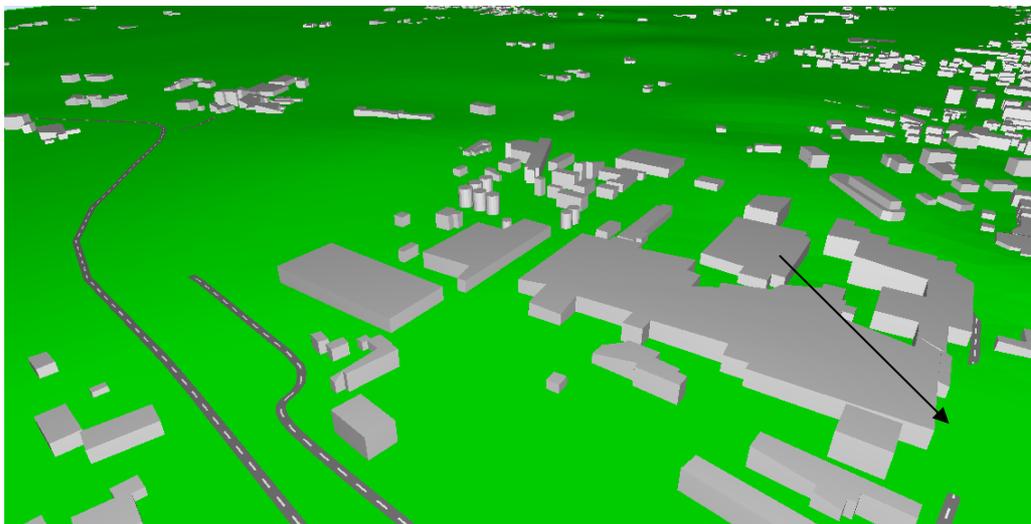


Figura 7.1: Cadna 3D viewer – esempio di strada “affossata” nel terreno dovuta ad una cattiva gestione delle altezze

7.4. La modellizzazione dello stabilimento industriale

Verranno di seguito descritte le diverse semplificazioni utilizzate per la modellizzazione dello stabilimento industriale mediante software e gli errori più frequenti che si incontrano nel farlo.

Come già accennato, la parte più critica di tutto il processo di simulazione si colloca all'intorno del processo di validazione e taratura del modello virtuale. Scopo di questa operazione è determinare, nota la potenza sonora delle sorgenti ed in base ad ipotesi derivanti dalle osservazioni in sito, la conformazione più idonea a garantire una corretta rappresentazione della situazione reale.

Questa condizione si persegue confrontando i dati ottenuti nelle simulazioni con i valori effettivamente riscontrati presso i punti di controllo. Essendosi svolte le misure di potenza sonora contestualmente alle misure fonometriche del monitoraggio ambientale, si è utilizzato come punto di controllo il punto R1 del monitoraggio che si trova a circa 50 m dallo spigolo ovest dello stabilimento.

Per questa parte di studio le simulazioni sono state svolte con IMMI 6.3 e Predictor-Lima v.8.

In una prima fase la sorgente industriale è stata modellizzata mediante una superficie areale, avente area pari al quadrato di misura precedentemente definito e potenza pari a quella precedentemente calcolata, opportunamente distribuita sulla superficie del quadrato. Tale modellizzazione è stata possibile grazie alle caratteristiche dei software che si avevano a disposizione. Il tipo di software utilizzato vincola non poco non solo la scelta di rappresentazione della sorgente ma anche le modalità stesse con cui si determina la potenza sonora. Si è provato quindi a modellizzare lo stabilimento mediante l'utilizzo di sorgenti

sonore puntiformi (prima al centro del quadrato di misura - ove risulta nella realtà concentrata la maggior parte delle sorgenti di rumore poi sul tetto dello stabilimento e a varie altezze), si è infine utilizzata una superficie areale verticale ponendola sul lato ovest del capannone più esposto.

Alla fine lo stabilimento è stato modellizzato come un'unica sorgente areale. La conformazione prescelta ha garantito la validazione di tale sorgente basandosi sul confronto con il livello di pressione sonora misurato presso il punto di controllo.

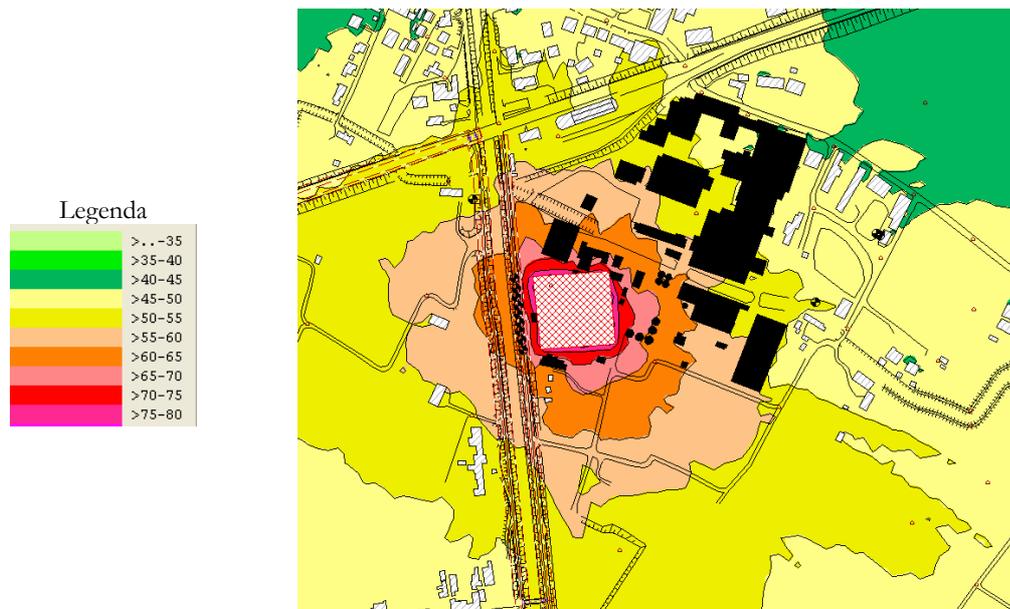


Figura 7.2: Periodo diurno – IMMI sorgente areale

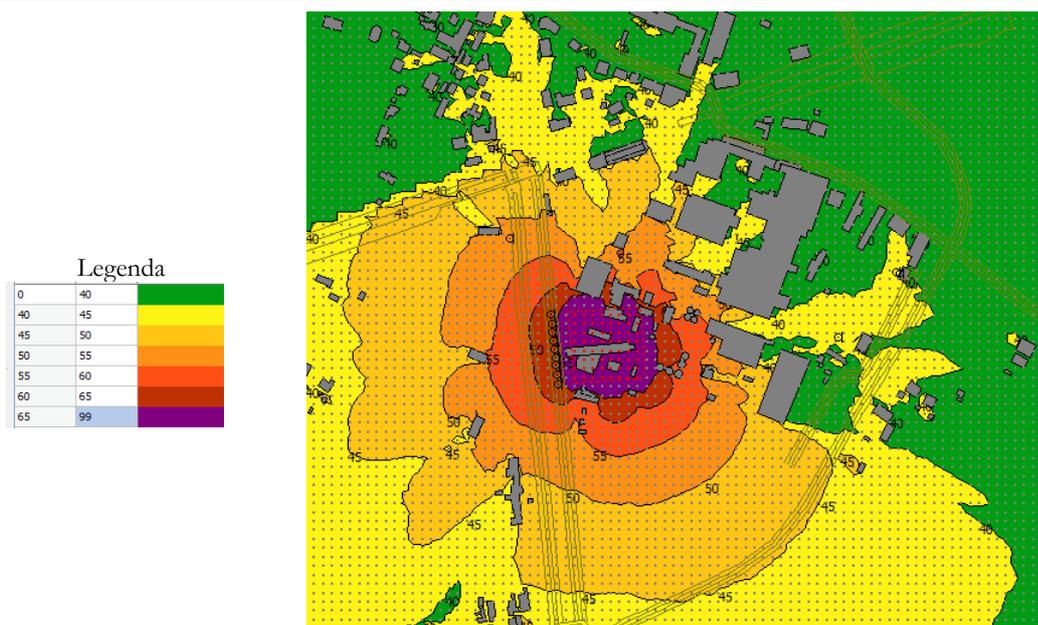


Figura 7.3: Periodo diurno – Predictor sorgente areale

	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Punto di controllo R1	56,0	56,1	-0,1
Posizione 1	63,9	62,4	1,5
Posizione 2	64,0	64,7	-0,7
Posizione 3	63,3	64,7	-1,4
Posizione 4	63,7	64,9	-1,2
Posizione 5	64,2	65,8	-1,6
Posizione 6	65,0	64,0	1,0
Posizione 7	65,5	64,7	0,8
Posizione 8	63,8	63,3	0,5

**Tabella 1 - Sorgente di tipo areale - Software IMMI 6.3 –
differenza tra valori calcolati e misurati**

	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Punto di controllo R1	57,1	56,1	1,0
Posizione 1	63,3	62,4	0,9
Posizione 2	64,0	64,7	-0,7
Posizione 3	64,0	64,7	-0,7
Posizione 4	62,9	64,9	-2,0
Posizione 5	62,8	65,8	-3,0
Posizione 6	64,2	64,0	0,2
Posizione 7	64,4	64,7	-0,3
Posizione 8	63,9	63,3	0,6

**Tabella 2 - Sorgente di tipo areale - Software Predictor –
differenza tra valori calcolati e misurati**



Figura 7.4: Contributo Sorgente Industriale Periodo diurno - IMMI 6.3.1

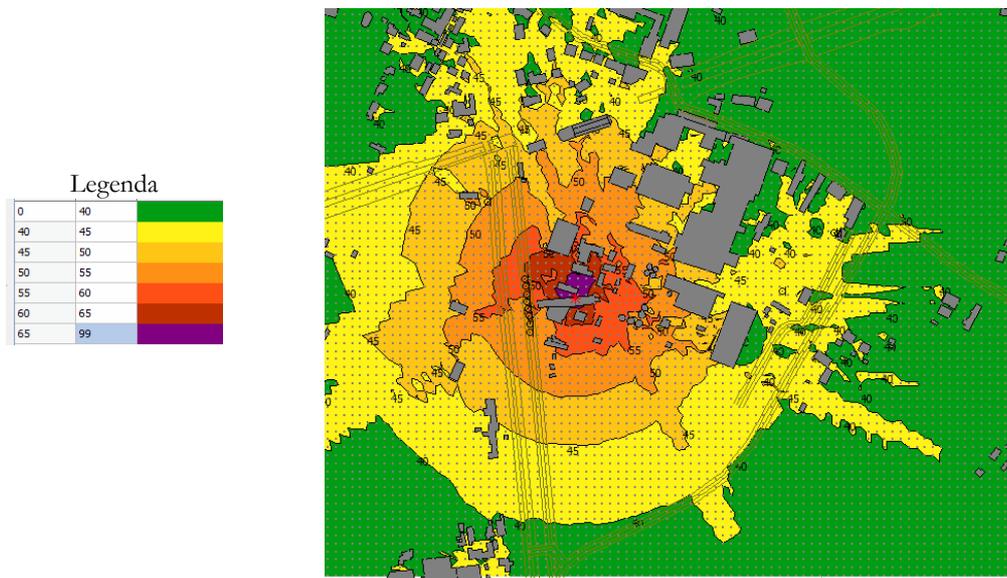


Figura 7.5: Somma Energetica Contributo Sorgente Industriale Periodo diurno - Predictor

7.4.1. Possibili errori nella modellizzazione del rumore industriale

L'utilizzo di *banche dati* può risultare *dannoso* soprattutto nel caso in cui non vengano indicate dettagliatamente le fonti, i periodi di riferimento (nei quali sono state effettuate le misurazioni), la consistenza del campione analizzato e soprattutto le modalità di misura impiegate nella determinazione della potenza sonora delle sorgenti.

Anche se si è certi della provenienza dei dati che si stanno utilizzando la cosa migliore, quando risulta possibile farlo è quella di effettuare delle misurazioni di verifica prima di impiegare i dati come input ai modelli.

Un altro problema è rappresentato dalla direttività delle sorgenti, non sempre risulta possibile caratterizzare le sorgenti presenti in modo adeguato.

7.5. Il contributo stradale

7.5.1. Campionamento dei flussi di traffico

Il modello di calcolo standardizzato utilizzato per la stima dei livelli sonori prodotti dal traffico stradale (NMPB) comprende al suo interno un algoritmo per la stima dell'emissione sonora media degli autoveicoli sulla base della velocità di transito e delle caratteristiche della strada, basato su dati rilevati in fase di definizione dello standard stesso dalle Autorità francesi.

Nel NMPB la grandezza utilizzata per descrivere l'immissione sonora è il L_{Aeq} , il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato *A* a *lungo termine*.

Per l'applicazione di tale metodo di calcolo occorre tener conto dei flussi di traffico e delle condizioni meteorologiche prevalenti.

Il rumore dovuto al traffico stradale è un fenomeno molto variabile nel tempo in quanto costituito dall'insieme delle emissioni sonore associate al transito dei singoli veicoli che compongono il flusso veicolare. Quest'ultimo è assai diversificato nelle sue configurazioni (flusso scorrevole, congestionato, intermittente, ecc.) e a questa variabilità quella derivante dalle caratteristiche dei veicoli stessi, differenti per tipologia (veicoli leggeri e pesanti), modalità di guida e stato di manutenzione. Ne deriva quindi una casistica assai ampia che va dal rumore con fluttuazioni assai contenute, rilevabile in strade a traffico intenso nel quale risulta difficile separare il rumore prodotto dal transito dei singoli veicoli, a quello con fluttuazioni ampie presente in strade locali a traffico scarso per il quale, invece, sono individuabili gli eventi sonori associati al passaggio dei singoli veicoli.

I veicoli stradali, inoltre rispetto a quelli ferroviari si possono spostare da una corsia all'altra, assumendo posizioni casuali all'interno della carreggiata stradale.

I dati sui flussi di traffico devono essere rappresentativi della media settimanale del numero totale di veicoli transitanti rispettivamente nell'arco dei periodi diurni (ore 6-22), e notturni (22-6) di una settimana tipo.

Lo spettro del rumore, soprattutto per i veicoli pesanti risulta molto spesso spostato verso le basse frequenze.

Essendo i veicoli corti (anche i mezzi pesanti hanno una lunghezza limitata) emettono rumore come sorgenti puntiformi senza direzionalità particolari nella propagazione, quando i flussi di traffico della strada oggetto di studio risultano elevati l'insieme di sorgenti puntiformi che emettono nello stesso istante possono essere considerate come una sorgente lineare.

Per ciascuna strada campionata è stata redatta una scheda in cui si sono evidenziate le caratteristiche geometriche della strada (tipologia, larghezza, numero di corsie, presenza di intersezioni, incroci, semafori, rotatorie, marciapiedi, presenza di fermate degli autobus, dossi artificiali, attraversamenti pedonali, piste ciclabili, parcheggi, barriere antirumore), ed è stata effettuata un'analisi sulle caratteristiche del traffico (suddivisione in veicoli leggeri, pesanti, velocità medie, ora di punta) e il tipo di flusso.

Per il conteggio e la classificazione dei veicoli sono stati utilizzati due analizzatori di traffico a microonde con sensore radar doppler bidirezionale, modello TMMSA della Icoms.

Come già visto in precedenza tali strumenti consentono la misurazione della velocità (dai 10 ai 255 km/h) e la classificazione dei veicoli in due classi di lunghezza con marcatura oraria (menzione della data e dell'ora di passaggio di ogni veicolo).

I rilevatori sono stati installati a bordo strada sui pali dell'illuminazione pubblica, ad un'altezza di 3 m dal piano stradale, scegliendo la posizione più idonea mantenendosi lontano da rotonde, incroci e fermate degli autobus e da tutto ciò che avrebbe potuto condizionare le caratteristiche di un flusso di traffico scorrevole.

Il monitoraggio dei flussi di traffico è stato effettuato in continuo per la durata di una settimana, gli strumenti sono stati fatti funzionare in *modalità bidirezionale*.

	Veicoli Leggeri [n/h]	Veicoli Pesanti [n/h]	Velocità [km/h]
Via C.	420	8	50
C. T.	15	0	50
Via M.	10	0	50
Via V.	12	0	50
S.P.	473	4	50

Tabella 3 - Periodo Diurno (06 -22)

	Veicoli Leggeri [n/h]	Veicoli Pesanti [n/h]	Velocità [km/h]
Via C.	88	2	50
C. T.	4	0	50
Via M.	1	0	50
Via V.	4	0	50
S.P.	100	2	50

Tabella 4 – Periodo Notturno (22- 06)

Il calcolo mediante software è stato effettuato su una griglia di passo 10 x 10 m ad un'altezza di 4 m dal piano campagna si è considerato un raggio di azione delle sorgenti stradali pari a 500 m.

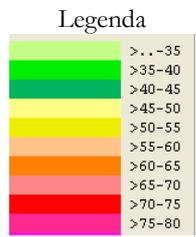


Figura 7.6: Contributo stradale - Periodo Diurno - IMMI 6.3.1



Figura 7.7: Contributo stradale - Periodo Notturno - IMMI 6.3.1

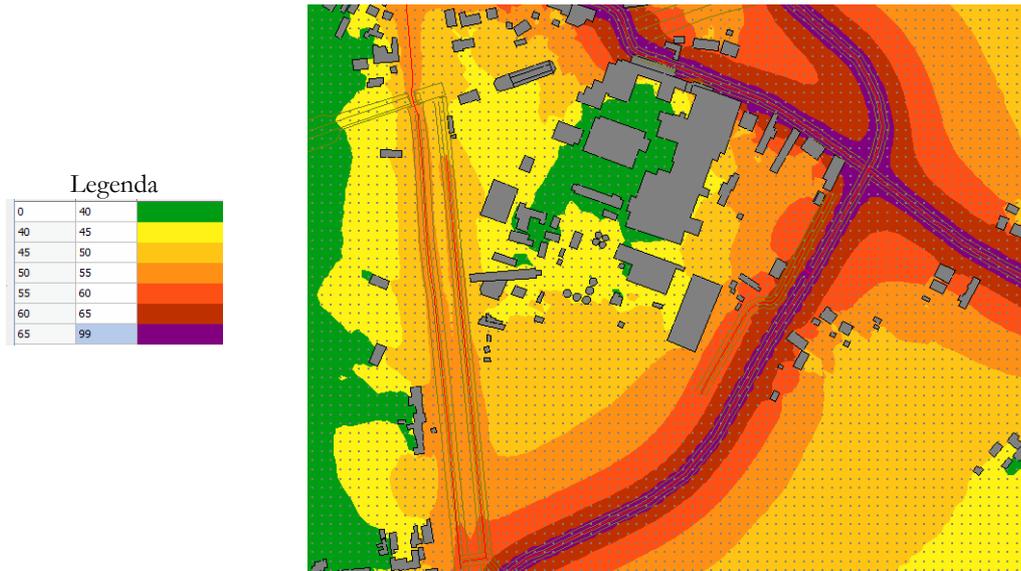


Figura 7.8: Contributo stradale - Periodo Diurno - Predictor LimA Type 7810 v.8

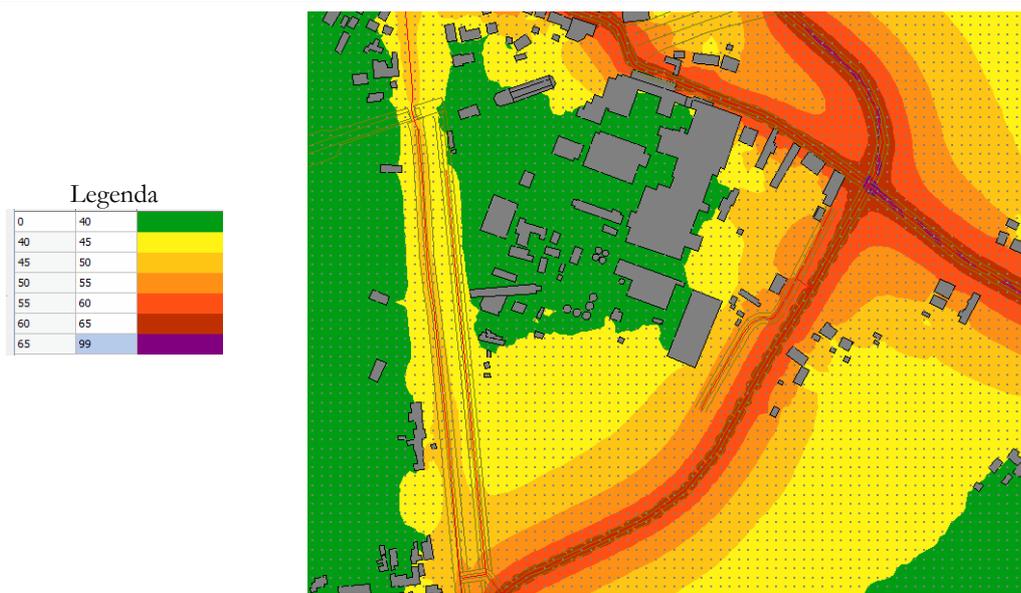


Figura 7.9: Contributo stradale - Periodo Notturno - Predictor LimA Type 7810 v.8

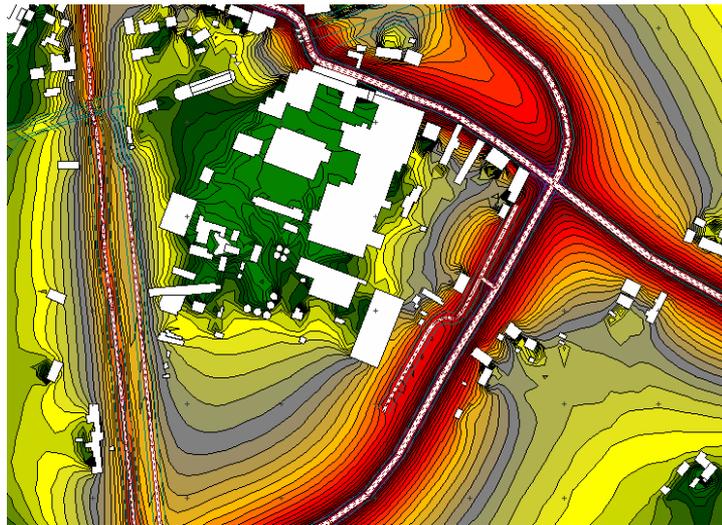
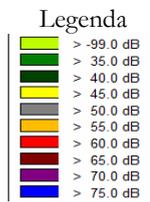


Figura 7.10: Contributo stradale - Periodo Diurno - Cadna

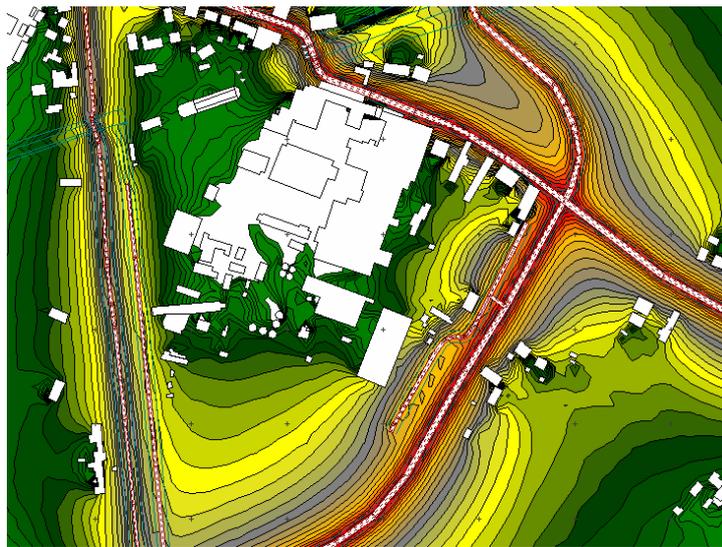
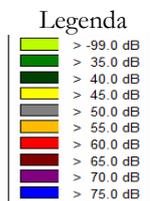


Figura 7.11: Contributo stradale - Periodo Notturno - Cadna

7.5.2. Possibili errori nella modellizzazione del rumore da traffico

Uno degli errori più frequenti risulta essere la scorretta attribuzione dei flussi di traffico e delle velocità soprattutto se legati a campioni rilevati in periodi errati della giornata. Non si riesce inoltre a stimare in modo corretto il rumore prodotto da autobus e motocicli e non sempre si tiene conto dei rallentamenti in prossimità di rotonde ed incroci. Non ultima la scorretta interpretazione dei parametri richiesti dal software per la simulazione di calcolo.

7.6. Il contributo della ferrovia

7.6.1. Introduzione

Il rumore del traffico ferroviario rispetto al rumore del traffico stradale presenta delle caratteristiche tali da recare minor disagio alle persone che vivono in prossimità delle infrastrutture. Gli elementi che intervengono sull'emissione e trasmissione del disturbo sono molteplici:

- *tipologia di treno* – peso, lunghezza, velocità di esercizio e stato di efficienza dei veicoli , in ordine di manutenzione delle sale montate e dei carrelli;
- *conformazione del tracciato* – presenza di curve di raggio ridotto, scambi, stazioni con fermate e partenze;
- *tipo di armamento* – massicciata o altra tipologia del piano di rotolamento;
- *tipologia dell'infrastruttura* – ponti o viadotti in ferro, gallerie ecc. ;
- *tipo di terreno attraversato* – i terreni più compatti e rigidi con un modulo di elasticità più elevata trasmettono le vibrazioni con ridotto smorzamento.

Le condizioni che causano rumore risultano perciò discontinue e fortemente legate alla capacità della linea, il problema sarà più rilevante nelle reti principali dove diminuisce il distanziamento tra i treni.

Nei paragrafi a seguire si procederà alla modellizzazione della sorgente secondo due criteri differenti, dapprima come *sorgente lineare*, utilizzando come input al modello gli spettri di sorgente sonora ricavati da uno studio di RFI e poi utilizzando la normativa olandese, così come previsto dalla direttiva 2002/49/CE.

7.6.2. I veicoli ferroviari

I veicoli ferroviari si possono sostanzialmente raggruppare in due categorie:

- veicoli destinati al *trasporto viaggiatori* (carrozze e bagagliai);
- veicoli destinati al *trasporto delle merci* (carr).

Si definisce “*treno*” o “*convoglio*” un qualunque complesso di veicoli e mezzi di trazione in grado di circolare da stazione a stazione.

Le principali norme di esercizio e classificazione dei treni sono contenute nella pubblicazione PGOS (Prefazione Generale all'Orario di Servizio) del Gestore dell'Infrastruttura nazionale RFI (rete Ferroviaria Italiana).

I *treni viaggiatori* possono essere formati con:

- Materiale ETR (elettrotreno a potenza concentrata o distribuita);
- Altro materiale leggero – Automotrici elettriche (ALe), Automotrici diesel (ALn) e relative unità rimorchiabili (Le, Ln)
- Materiale ordinario, carrozze e bagagliai.

I *treni merci* possono invece essere:

- Treni per il servizio internazionale – EUC (Europe Unit Cargo), TEC (treni per Trasporti Europei Combinati), MRI (Rapidi in servizio Internazionale);
- Treni per il servizio interno – treni straordinari con categoria, treni straordinari senza categoria e treni straordinari il cui orario non è compreso nell'orario di servizio.

7.6.3. Lo studio della Rete Ferroviaria Italiana.

Per la realizzazione dello studio del traffico ferroviario si fa riferimento alla relazione tecnica “*Mappatura acustica degli assi ferroviari principali con più di 60.000 convogli all'anno negli agglomerati con più di 250.000 abitanti*” svolto dalla Rete Ferroviaria Italiana nell'anno 2006 e avente come oggetto dello studio la situazione relativa all'anno 2005.

La società di gestione RFI ha fornito i dati relativi al numero di transiti ed alle velocità di transito per diverse tipologie di convogli, su tutte le tratte della rete ferroviaria presenti sul

territorio del Comune in oggetto. La società RFI ha fornito anche i dati relativi all'emissione sonora dei diversi tipi di treni.

Questi dati sono i medesimi che la stessa RFI ha utilizzato per il calcolo dei livelli sonori ai fini della mappatura acustica prevista dal D.Lgs 194/05 relativamente alle linee ferroviarie principali.

I treni sono stati suddivisi in 12 categorie e per ognuna di esse è stato attribuito un livello di emissione ponderato "A", sia globale che in frequenza per banda d'ottava.

I valori di $L_{w/m}$ riportati in tabella sono validi per il periodo diurno (06-22) per quanto riguarda il periodo notturno occorre aggiungere 3 dB(A) ai citati livelli.

L'emissione per unità di lunghezza di linea per banda di ottava e categoria di treno è stata calcolata attraverso l'equazione

$$(6.1) \quad L_{w_{ic}} = a_{ic} + 20\log(v_c/100) + 10\log(N_c)$$

Dove " a_{ic} " è il valore di emissione del singolo treno per banda di ottava, " v_c " è la velocità media per categoria di treno nella tratta e " N_c " è il numero di treni per categoria nel tempo di riferimento.

La sorgente di rumore lineare è posizionata a 0.8 m dal piano del ferro per tutte le categorie di treni considerate. Ai fini del calcolo di propagazione la sorgente lineare è suddivisa in segmenti di lunghezza non superiore a 10 m. Ciascun segmento è trattato come una sorgente puntiforme su cui è concentrata l'emissione dell'intero segmento.

Classi Acustiche dei treni	Livelli globali	Livelli in bande d'ottava							
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1K Hz	2K Hz	4K Hz	8K Hz
Aln 668	62,7	30,0	37,6	47,2	57,3	58,7	55,0	51,5	42,5
Dir/IR	66,3	33,4	39,1	51,2	55,5	60,3	62,6	57,1	47,8
E/EN	70,1	37,0	49,3	58,3	63,9	64,2	64,4	61,0	52,0
ETR 450/460/480	61,5	28,4	32,7	41,4	45,1	49,9	59,2	55,0	44,0
ETR 500	62,5	29,7	33,7	44,2	48,6	53,7	60,3	54,3	43,7
IC/EC	66,9	33,3	37,6	48,5	52,7	59,4	64,4	58,2	48,1
Merci	75,6	40,2	50,2	60,3	68,5	70,5	69,6	65,6	56,0
Reg-Met	60,2	28,4	37,0	46,4	52,3	54,6	54,2	52,0	45,8
Reg	64,4	33,5	39,7	51,0	55,5	58,0	59,9	55,8	47,7
D445	69,6	35,5	47,9	58,7	63,6	65,4	62,1	57,7	47,2
Alc 724	66,5	35,3	44,5	54,5	58,8	61,6	60,3	57,6	49,4

Tabella 1

7.6.4. Calcolo della tratta in oggetto come un'unica sorgente lineare

I veicoli per la loro lunghezza costituiscono una superficie riflettente ampia e continua, i treni emettono perciò rumore come una sorgente lineare di lunghezza finita.

Il primo ostacolo alla diffusione è rappresentato dalla loro cassa, l'angolo di propagazione ha un'apertura di circa 60°.

Con il software IMMI 6.3 la tratta è stata modellata attraverso un'unica *sorgente lineare* continua posta a 0.8 m dal terreno a cui è stato attribuito un livello di emissione calcolato secondo la formula adottata dallo studio della Rete Ferroviaria Italiana.

Le tipologie di treni adottate per il modello rispetto a tale studio sono state ridotte a 7.

In particolare si sono accorpate in un'unica classe le 3 categorie dei treni a trazione *diesel*, (avendo a disposizione un dato unico) scegliendo tra i livelli di emissione a titolo cautelativo

quello più rumoroso, e le 2 tipologie di *treno regionale a lunga percorrenza e ad alta frequentazione* (avendo a disposizione anche in questo caso un dato unico) in questo caso si è ottenuto un livello di emissione mediato tra i dati forniti dallo studio di RFI.

Si riportano le classi acustiche dei treni e i relativi livelli globali nella tabella sottostante.

Classi Acustiche dei treni	Livelli globali	Livelli in bande d'ottava							
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1K Hz	2K Hz	4K Hz	8K Hz
D/IR	66,3	33,4	39,1	51,2	55,5	60,3	62,6	57,1	47,8
E/EN	70,1	37,0	49,3	58,3	63,9	64,2	64,4	61,0	52,0
ETR 500	62,5	29,7	33,7	44,2	48,6	53,7	60,3	54,3	43,7
IC/EC	66,9	33,3	37,6	48,5	52,7	59,4	64,4	58,2	48,1
Merci	75,6	40,2	50,2	60,3	68,5	70,5	69,6	65,6	56,0
Diesel	69,6	35,5	47,9	58,7	63,6	65,4	62,1	57,7	47,2
R	62,8	31,7	38,6	49,3	54,2	56,6	57,9	54,3	46,9

Tabella 12

La sigla “D/IR” raggruppa i treni *Diretti* e gli *Interregionali*, la sigla “E/EN” indica i treni *Espresso* e gli *EuroNight*, la sigla “ETR 500” indica gli *Eurostar*, la sigla “IC/EC” indica gli *InterCity* ed *EuroCity*, con il termine “Diesel” si indicano tutti i treni a trazione Diesel ed infine la sigla “R” indica i *regionali*

	E/EN	ETR500	IC/EC	Merci	Reg	Diesel	D/IR
Tratta considerata	1.867	7.995	11.868	2.969	16.272	365	10580

Tabella 13 - Periodo Diurno

	E/EN	ETR500	IC/EC	Merci	Reg	Diesel	D/IR
Tratta considerata	1.466	413	2.216	1.467	2.319	0	1088

Tabella 14 - Periodo Notturno

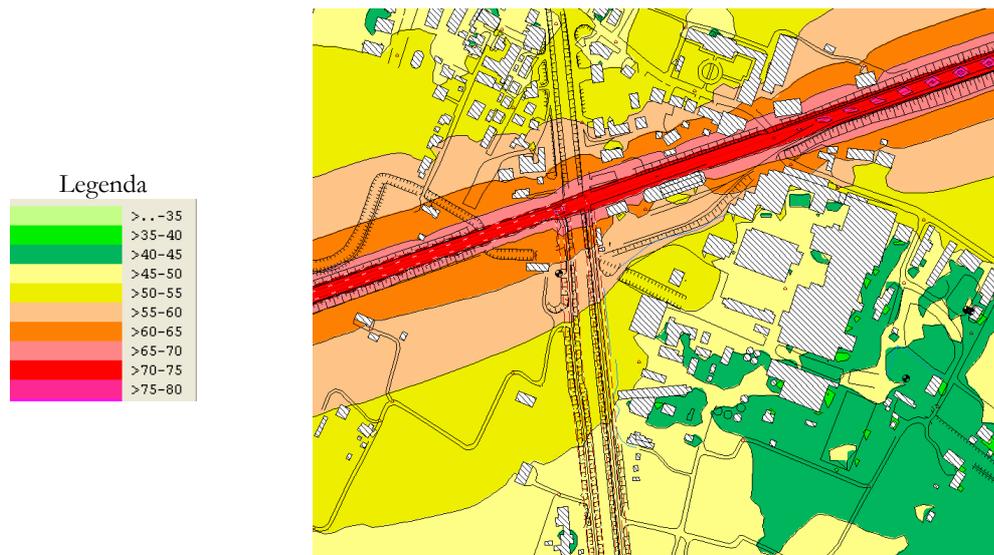


Figura 7.12: Contributo della Ferrovia - Periodo Diurno - IMMI 6.3.1



Figura 7.13: Contributo della Ferrovia - Periodo Notturmo- IMMI 6.3.1

7.6.5. Calcolo secondo il metodo olandese

Lo studio è poi stato effettuato nei tre ambienti software, utilizzando il metodo olandese “*Reken-en Meetvoorbijf Railverkeerslawii - 1996*” in attuazione della direttiva 2002/49/CE.

Il modello prevede l’inserimento dei treni suddivisi per le rispettive categorie, merci e passeggeri, unitamente alla tipologia di trazione (elettrica, diesel o altro sistema) e del sistema frenante (freni a ganasce o freni a disco).

Per il calcolo dei valori di emissione tutti i treni vengono classificati sulla base del sistema trainante e sul tipo di sistema frenante nelle rispettive 9 categorie.(vedi tab. 21)

Sui veicoli viaggiatori attualmente in esercizio in Italia vi sono due sistemi di frenatura:

- *frenatura a ceppi* (o ganasce)– ad uno oppure a due stadi di pressione, presente sui veicoli merci e sui veicoli per viaggiatori costruiti prima del 1968;
- *frenatura a dischi* – per i veicoli viaggiatori costruiti dopo il 1968.

La frenatura a ceppi avviene a mezzo di zoccoli, soles e suolette che spinti dal sistema di leve della timoneria, azionata dal cilindro freno, agiscono direttamente sulla superficie del cerchione di ogni ruota.

La frenatura a dischi avviene invece tramite pasticche che azionate dal cilindro tramite le leve della timoneria agiscono sulle facce dei dischi calettati su ogni sala.

Categorie
1. Treni passeggeri con freni a pattini
2. Treni passeggeri con freni a disco o freni a pattino
3. Treni passeggeri con freni a disco
4. Treni da trasporto con freni a pattini
5. Treni diesel con freni a pattini
6. Treni Diesel con freni a disco
7. Metropolitana con freni a disco e metropolitana di superficie
8. Intercity con freni a disco e treni lenti
9. Treni ad alta velocità con freni a disco o a pattini

Tabella 21

I modelli prevedono inoltre l'inserimento dei seguenti parametri.

- Q_c/h , numero di treni non frenanti nella categoria di veicoli ferroviari considerata, specificata in unità per ora;
- $Q_{r,c}$, numero medio di treni frenanti nella categoria di veicoli ferroviari considerata, specificata in unità per ora;
- $v_c/km/h$, la velocità media di treni non frenanti nella categoria corrispondente;
- $v_{r,c}/km/h$, la velocità media di treni frenanti nella categoria corrispondente;

Si riportano di seguito le simulazioni di calcolo effettuate con i programmi di simulazione Cadna-A e IMMI 6.3

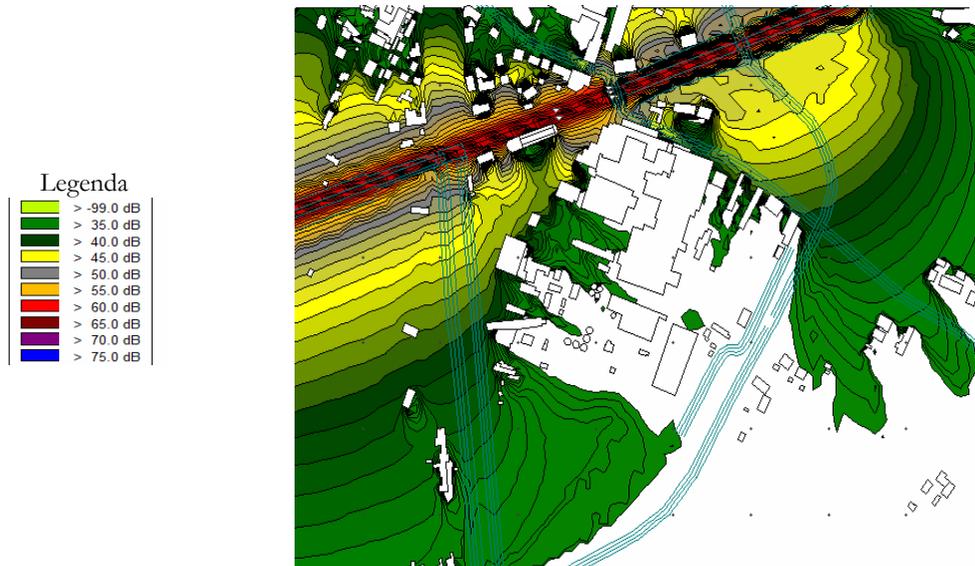


Figura 7.15: Contributo ferrovia - Periodo Diurno - Cadna

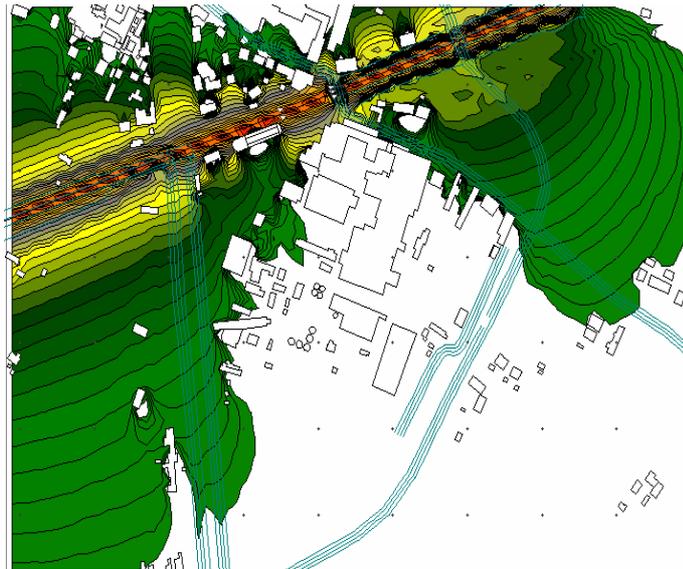
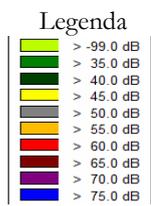


Figura 7.15: Contributo ferrovia - Periodo Notturno - Cadna



Figura 7.16: Contributo della Ferrovia - Periodo Diurno- IMMI 6.3.1



Figura 7.17: Contributo della Ferrovia - Periodo Notturmo- IMMI 6.3.1

7.6.6. Calcolo secondo il metodo francese

Con il software LimA si è inoltre calcolato il rumore ferroviario con la normativa francese XPS-Rail. “Méthode et donne d’émission sonore pour la réalisation des études previsionelles du bruit des infrastructures de tran sport ferroviaire dans l’environnement (30 Januari 2006)”.

Per poter effettuare la simulazione si è dovuto procedere ad un nuovo raggruppamento delle categorie dei treni (sono state ridotte a 4). Al suo interno Predictor possiede un ricco database di treni. Per ogni categoria di treno vengono riportate le principali caratteristiche tecniche ovvero lo spettro di potenza, la velocità massima, la lunghezza del convoglio ecc.

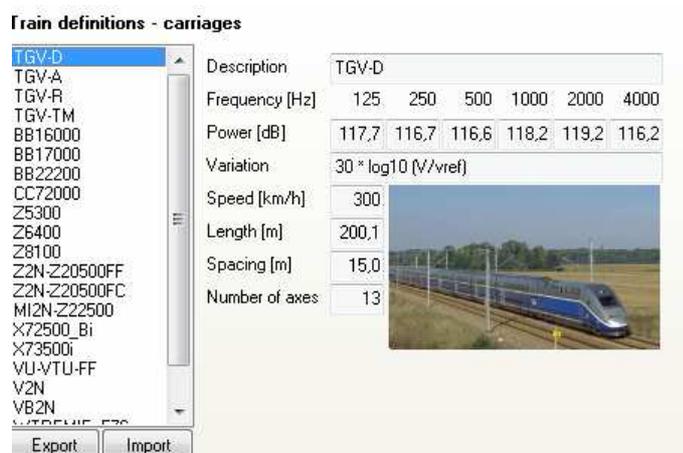


Figura 7.18: Esempio di scheda tecnica dal database dei treni – Predictor LimA

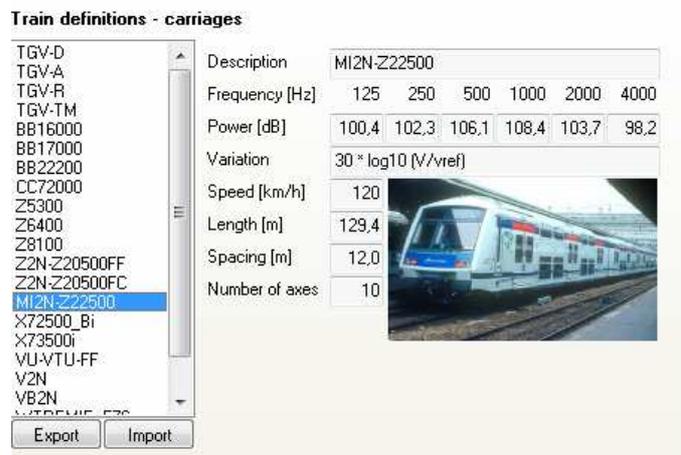


Figura 7.19: Esempio di scheda tecnica dal database dei treni – Predictor LimA

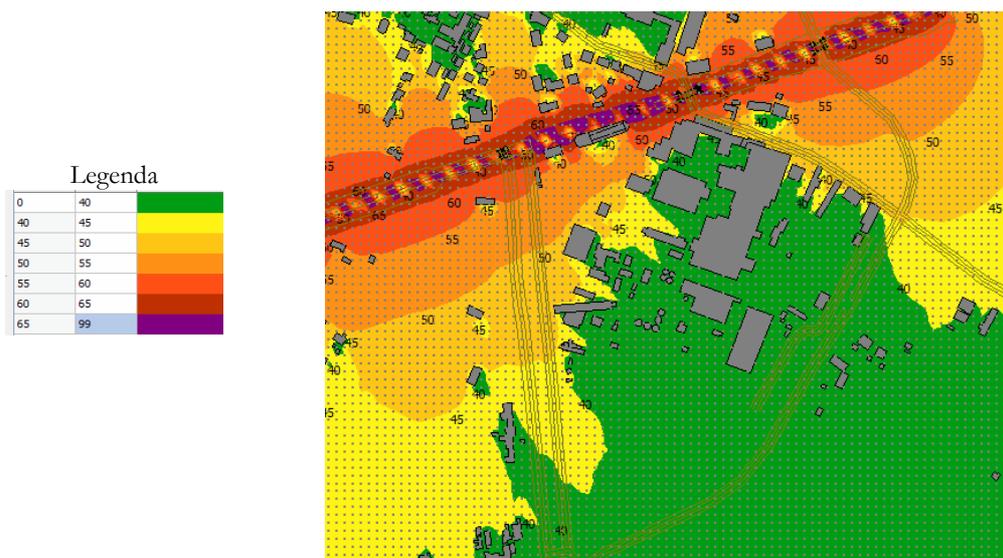


Figura 7.20: Contributo ferrovia - Periodo Diurno- Predictor LimA Type 7810 v.8

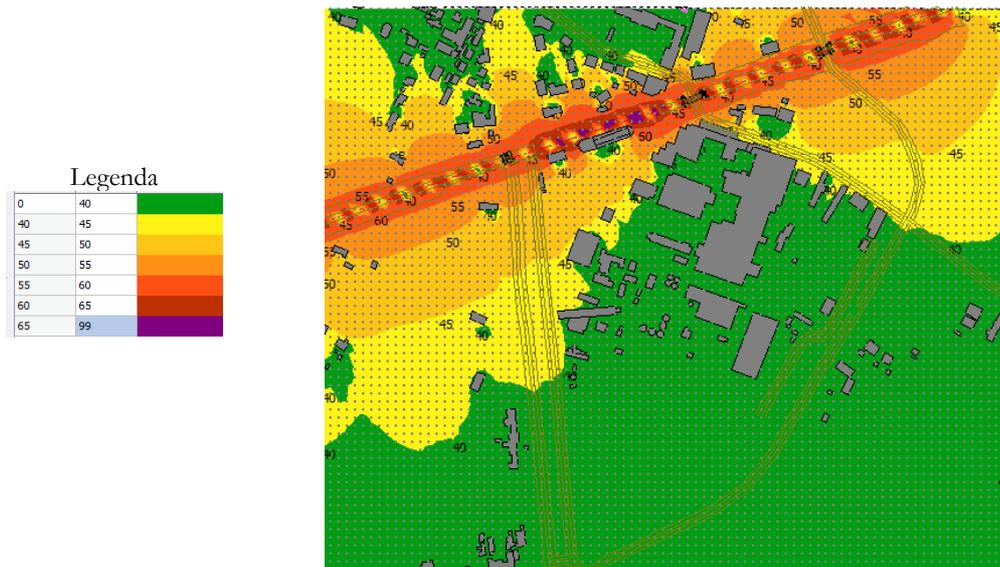


Figura 7.21: Contributo ferrovia - Periodo Notturmo - Predictor LimA Type 7810 v.8

7.6.7. Possibili errori nella modellizzazione del rumore ferroviario

C'è una oggettiva difficoltà nel reperire numero di passaggi convogli e la loro composizione. E' difficile in particolare reperire informazioni riguardo il passaggio dei treni merci che possono influenzare notevolmente quello che è il clima acustico. Oltre alla composizione risulta di particolare importanza assegnare le giuste velocità alle varie tratte, prestando attenzione all'ubicazione delle stazioni nel territorio. Inoltre sia la direttiva olandese che quella francese risultano di difficile applicazione (a causa delle diverse tipologie di treni e per il diverso tipo di alloggiamento dei binari). Nel caso in cui si decida di modellizzare la ferrovia come sorgente lineare, risulta difficile attribuire alle varie tipologie di treno il giusto spettro non riuscendo a reperire dati sufficienti in letteratura. L'utilizzo di database risulta sempre essere rischioso.

7.7. Contributo meteorologico

Nello studio dei livelli sonori calcolati a grande distanza dalle sorgenti che li hanno generati le condizioni meteorologiche e le loro fluttuazioni nel tempo rivestono una notevole importanza. L'effetto delle condizioni meteo comincia ad essere rilevante quando la distanza sorgente-ricettore supera il centinaio di metri soprattutto se sorgente e ricettore sono prossimi al suolo³.

Spesso nei modelli di calcolo si tiene conto dell'attenuazione acustica dovuta all'assorbimento acustico atmosferico, in funzione dei parametri di temperatura e umidità, mentre si ignorano gli effetti dovuti alla presenza di disomogeneità atmosferiche causate dai gradienti di temperatura e di vento.

Trascurare questi effetti può comportare delle variazioni importanti (anche superiori ai 3 dB) soprattutto in zone più distanti rispetto alle sorgenti di rumore.

³ Cfr. Cap. 4

I programmi di calcolo utilizzati per le simulazioni prevedono al loro interno database meteorologici che si riferiscono alla “NMPB-Routes -96” relativa a specifiche regioni del territorio francese non esistono database a cui ricondurre il territorio italiano.

Avere dei dati significativi per quanto concerne i gradienti termici e di vento appare molto problematico, essendo inoltre le condizioni del clima molto variabili nel tempo, le norme di riferimento richiedono che la valutazione sia effettuata nelle condizioni climatiche prevalenti nell’area in esame.

Per la realizzazione del modello di calcolo in oggetto, nello studio delle condizioni meteorologiche si è voluto tener conto anche di questi due parametri.

7.7.1. Acquisizione ed analisi dei dati meteorologici.

Le variabili che influenzano la propagazione del suolo sono il gradiente verticale della temperatura e la direzione e la velocità del vento. Questi fattori riescono ad influenzare maggiormente un valore che ricopra un arco spaziale di breve durata, tuttavia la conformazione naturale della zona in cui sorge il comune, in particolare la presenza del mare e di rilievi montuosi, induce delle situazioni tipiche come le brezze o la rotazione dei venti che vedono la prevalenza di talune direzioni a discapito di altre.

Per lo studio dei dati relativi al gradiente termico e il vento si è fatto riferimento alla Rete di monitoraggio dell’Ente Zona Industriale di Porto Marghera – si è analizzata una serie temporale di dati relativa ad un periodo di 10 anni.

Si sono prese in considerazione due stazioni di rilevamento dati.

Sulla prima si è fatto riferimento alla temperatura dell’aria (alle quote di 10, 70 e 140 m), sulla seconda si sono considerati invece i dati relativi alla velocità e alla direzione del vento.

Si è costruita una macro di excel, “*Meteo Routine*”, per poter sommare settore per settore, le condizioni positive, neutre e negative per ogni periodo del giorno (diurno, serale e notturno) e si è ottenuta una percentuale sul totale dei dati a disposizione.

La rosa dei venti varia da 0° a 360° girando in senso orario (90° est, 180° sud, 270° est). Per la divisione della rosa dei venti in settori di 20°, si è fatto riferimento ad un angolo centrale che ha dato il nome al settore a cui sommare o sottrarre 10°, ad esempio il settore 20° andrà da 10° a 30°.

L’indice di propagazione dipende dalla combinazione del gradiente di temperatura e del vento. Il dato gradiente è stato fornito suddiviso in 5 categorie:

1. A = “*forte instabilità*”;
2. B = “*instabilità moderata*”;
3. C = “*neutralità*”;
4. D = “*stabilità moderata*”;
5. E = “*forte stabilità*”.

La stessa norma “NMPB-96”, presa come riferimento per lo studio in oggetto, individua 5 categorie o classi, con i dati a disposizione si è normalizzato a 100 m il gradiente dei dati rilevati a 10 e 140 m considerando la variazione lineare e si sono così suddivisi i valori:

1. $T_1: grad < -1.9$
2. $T_2: -1.9 \leq grad < -1.5$
3. $T_3: -1.5 \leq grad \leq -0.5$
4. $T_4: -0.5 < grad \leq 4$
5. $T_5: grad > 4$

Anche per il vento si devono ottenere 5 categorie:

1. U_1 : vento forte, $v_{vento} \geq 3 \text{ m/s}$, contrario alla direzione sorgente-ricevitore
2. U_2 : vento medio/debole, da 1 a 3 m/s, contrario o vento forte poco contrario

3. U_3 : vento debole, $\leq 1\text{m/s}$, da qualsiasi direzione o nullo o medio/debole da settori poco favorevoli o poco contrari
4. U_4 : vento medio/debole favorevole o vento forte poco favorevole
5. U_5 : vento forte favorevole alla direzione sorgente-ricevitore

Essendo in tal caso la norma meno vincolante, si è scelto di suddividere la rosa dei venti in settori di 20° prendendo come riferimento l'angolo centrale (φ) si è così ottenuto:

1. U_1 : $\varphi \pm 10^\circ$ con velocità del vento, $v_{\text{vento}} > 3\text{m/s}$;
2. U_2 : $\varphi \pm 10^\circ$ con $1 < v_{\text{vento}} < 3\text{ m/s}$, $\varphi \pm 45^\circ$ e $v_{\text{vento}} > 3\text{m/s}$;
3. U_4 : $\varphi + 180^\circ \pm 10^\circ$ con $1 < v_{\text{vento}} < 3\text{ m/s}$, $\varphi + 180^\circ \pm 45^\circ$ e $v_{\text{vento}} > 3\text{m/s}$;
4. U_5 : $\varphi + 180^\circ \pm 10^\circ$ con $v_{\text{vento}} > 3\text{m/s}$;
5. U_3 : per tutti i casi rimanenti.

E' inoltre stato effettuato lo studio del parametro C_0 .

**Percentuale delle condizioni favorevoli
alla propagazione del rumore**
Periodo Diurno

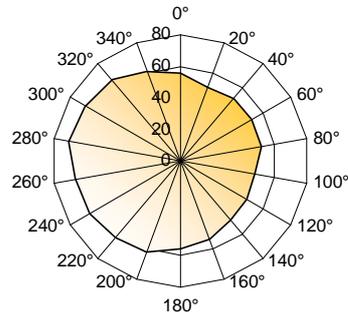


Grafico 4

**Percentuale delle condizioni favorevoli
alla propagazione del rumore**
Periodo Serale

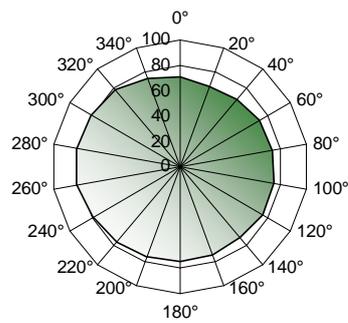


Grafico 5

**Percentuale delle condizioni favorevoli
alla propagazione del rumore**
Periodo Notturno

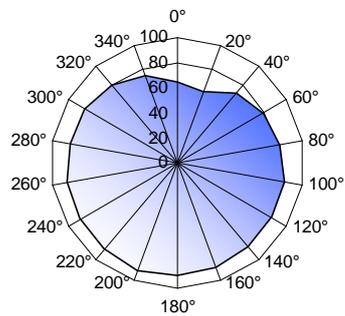


Grafico 6

Per lo studio della temperatura e dell'umidità relativa si è presa in esame la stazione di Arpa Veneto, dipartimento di Venezia, situata in via Fratelli Bandiera.

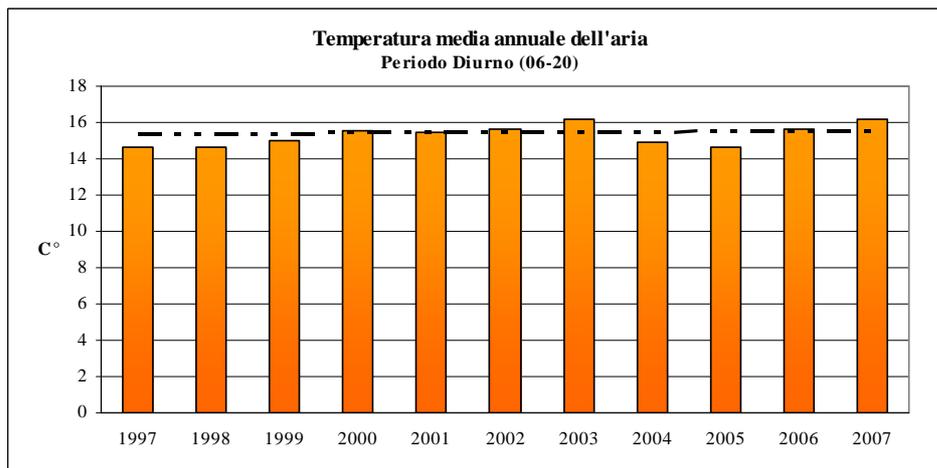


Grafico 7

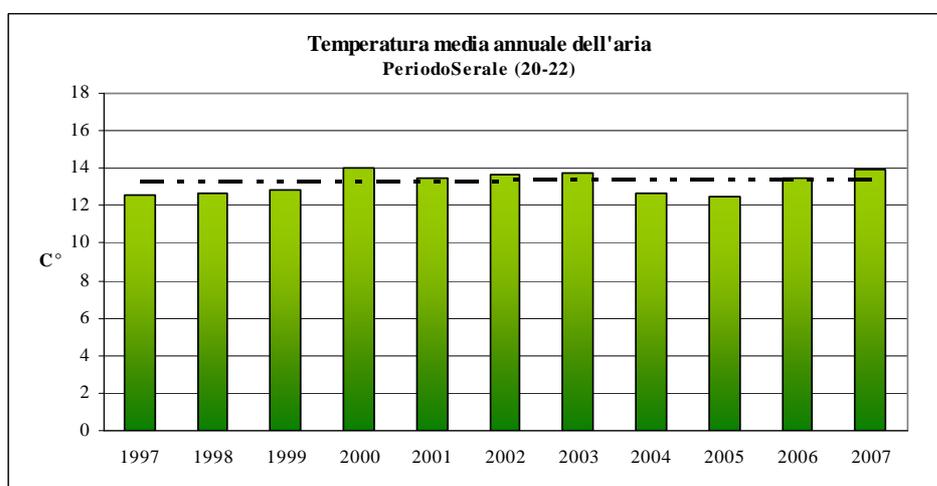


Grafico 8

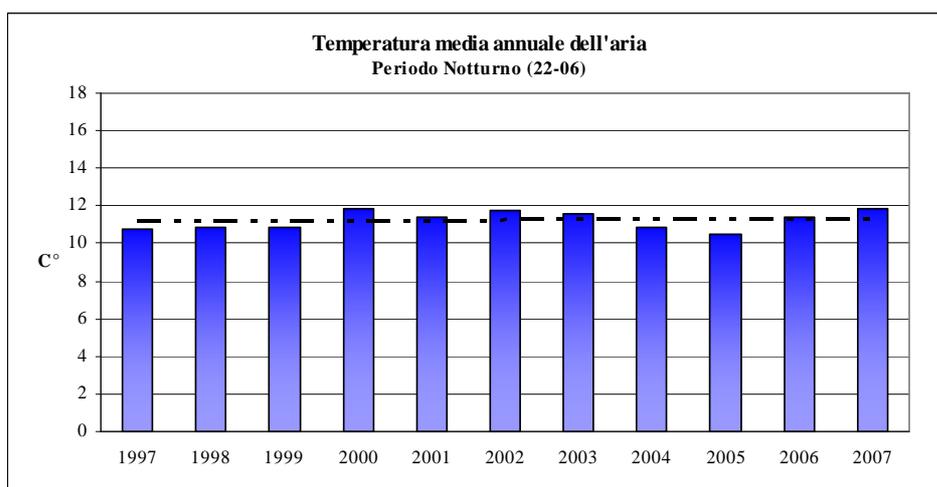


Grafico 9

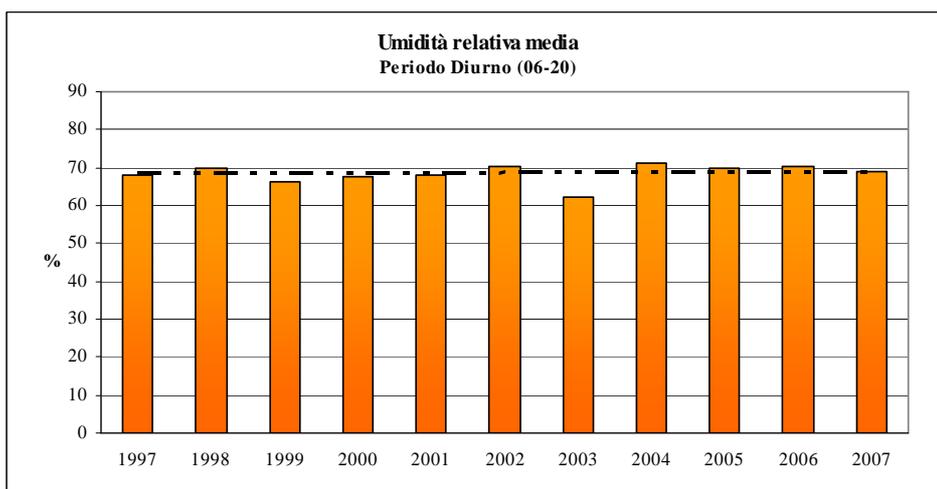


Grafico 10

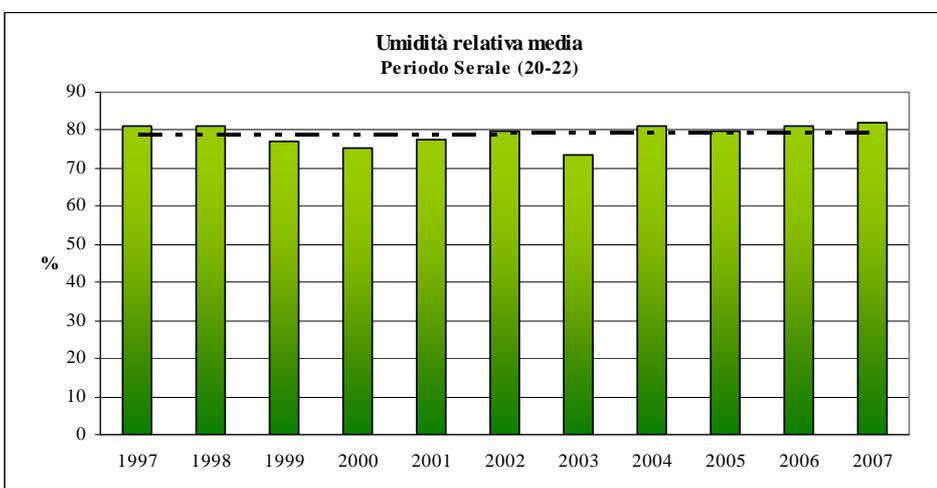


Grafico 11

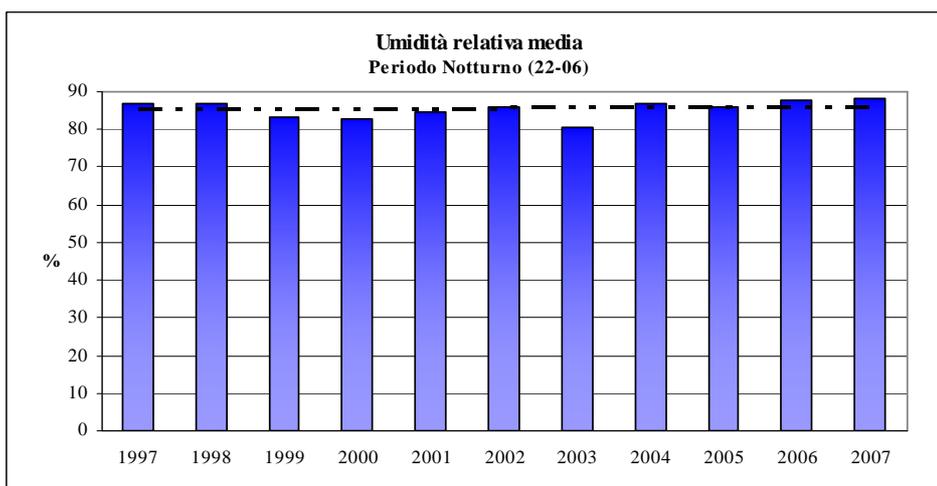


Grafico 12

I modelli di calcolo esaminati permettono di effettuare i calcoli secondo le seguenti opzioni:

- Condizioni al “*toolkit 17*” della Linea Guida WG-AN se in assenza di dati meteo in grado di fornire informazioni sulle condizioni meteorologiche favorevoli alla propagazione del rumore, vedi figura 7.21;
- Condizioni meteo sempre favorevoli alla propagazione del suono, vedi figura 7.22;
- Condizioni meteo sempre sfavorevoli alla propagazione del suono, vedi figura 7.23;
- Implementando il database esistente.

Identification: INTERIM
Description: Interim default (D=50%, E=75%, N=100%)

directi	Day	Evening	Night
20	50	75	100
40	50	75	100
60	50	75	100
80	50	75	100
100	50	75	100
120	50	75	100
140	50	75	100
160	50	75	100
180	50	75	100

directio	Day	Evening	Night
200	50	75	100
220	50	75	100
240	50	75	100
260	50	75	100
280	50	75	100
300	50	75	100
320	50	75	100
340	50	75	100
360	50	75	100

Figura 7.21: Scelta dei parametri meteo – Predictor V.8.00

Identification: FAVOURABLE
Description: Favourable meteo conditions

directi	Day	Evening	Night
20	100	100	100
40	100	100	100
60	100	100	100
80	100	100	100
100	100	100	100
120	100	100	100
140	100	100	100
160	100	100	100
180	100	100	100

directio	Day	Evening	Night
200	100	100	100
220	100	100	100
240	100	100	100
260	100	100	100
280	100	100	100
300	100	100	100
320	100	100	100
340	100	100	100
360	100	100	100

Figura 7.22: Scelta dei parametri meteo – Predictor V.8.00

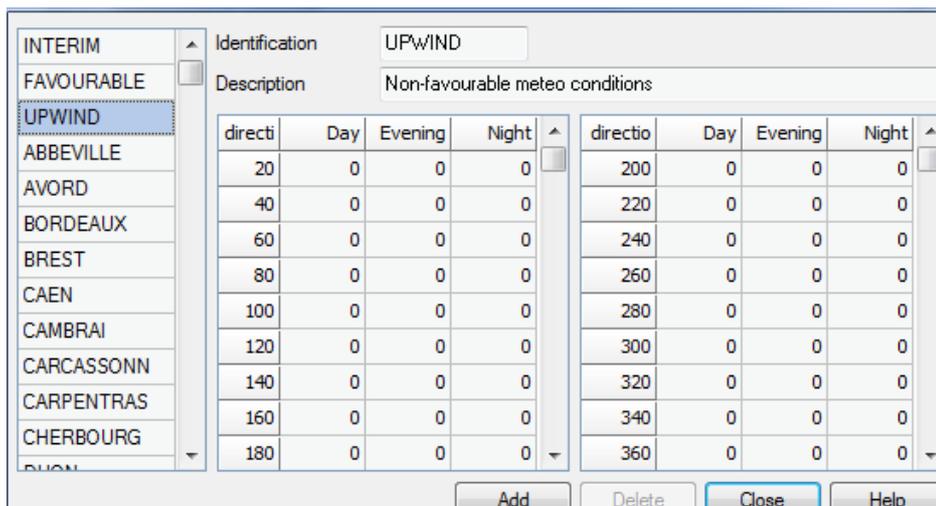


Figura 7.23: Scelta dei parametri meteo – Predictor V.8.00

7.8. Sovrapposizione degli effetti

Le mappe così ottenute possono essere sommate energeticamente tra loro ottenendo i valori totali. Questo tipo di operazione risulta essere molto utile soprattutto se si devono valutare gli effetti di nuove sorgenti sull'area esistente.



Figura 7.24: Somma energetica del contributo stradale e ferroviario - Periodo Diurno IMMI 6.3.1

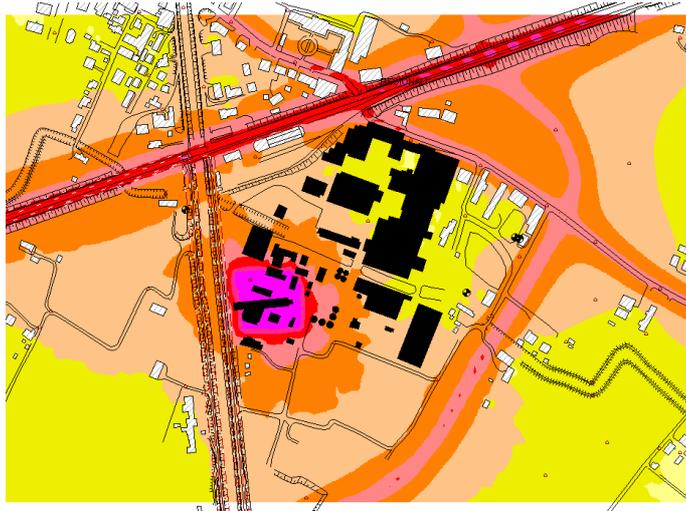
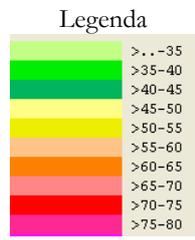


Figura 7.25: Rumore complessivo nell'area di studio- Periodo Diurno IMMI 6.3.1

8. CONFRONTO TRA LIVELLI MISURATI E LIVELLI STIMATI

8.1. Comparazione dei risultati ottenuti

Al termine delle attività di modellazione si è eseguito un confronto di tipo numerico sui risultati ottenuti dalle implementazioni svolte con i tre diversi software. E' tuttavia opportuno sottolineare che il margine di errore accettabile per questo tipo di simulazioni è di circa 3 dB e che i risultati ottenuti hanno una forte dipendenza dalle operazioni eseguite in fase di validazione.

Per l'impianto industriale l'attività comparativa è stata eseguita in riferimento alle sorgenti presenti sul lato Ovest dello stabilimento la scelta di basare l'analisi sui dati relativi a questo lato dello stabilimento è stata eseguita in considerazione del fatto che vi è localizzata la maggioranza delle sorgenti.

8.1.1. Livelli di emissione globale

Si riportano di seguito i valori di emissione globale ottenuti presso i ricettori mediante il modello di calcolo ed il confronto con i valori di emissione globale ottenuti da misurazione.

IMMI 6.3			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R1	60,0	57,6	2,2
Ricettore R2	54,7	53,0	1,7
Ricettore R3	55,5	55,2	0,3

Tabella 14 – IMMi 6.3 livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e ferroviario (sorgente lineare) – periodo diurno

IMMI 6.3			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R1	56,9	54,6	2,3
Ricettore R2	52,6	52,1	0,5
Ricettore R3	51,5	53,4	-1,5

Tabella 15 – IMMi 6.3 livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e ferroviario (sorgente lineare) – periodo notturno

IMMI 6.3			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R1	58,2	57,6	0,6
Ricettore R2	54,6	53,0	1,6
Ricettore R3	55,0	55,2	-0,2

Tabella 16 – IMMi 6.3 livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e ferroviario (modello olandese) – periodo diurno

IMMI 6.3			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R1	56,9	57,6	1,0
Ricettore R2	55,2	53,0	-2,2
Ricettore R3	51,3	55,2	-3,9

Tabella 17 – IMMi 6.3 livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e ferroviario (modello olandese) – periodo notturno

IMMI 6.3			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R2	54,1	52,8	1,4
Ricettore R3	53,9	54,2	-0,3

Tabella 18 – IMMI 6.3 livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e azienda periodo diurno

IMMI 6.3			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R2	52,2	51,2	1,0
Ricettore R3	51,0	51,5	0,5

Tabella 19 – IMMI 6.3 livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e azienda periodo notturno

Predictor-LimA v.8			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R1	56,4	57,6	1,4
Ricettore R2	53,6	53,0	0,6
Ricettore R3	52,5	55,2	-2,7

Tabella 20 – Predictor-LimA livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e ferroviario – periodo diurno

Predictor-LimA v.8			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R1	57,0	54,6	2,4
Ricettore R2	52,4	52,1	0,3
Ricettore R3	47,4	53,4	-6,0

Tabella 21 – Predictor-LimA livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e ferroviario – periodo notturno

Predictor-LimA v.8			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R2	54,6	52,8	2,0
Ricettore R3	54,5	54,2	0,2

Tabella 22 – Predictor-LimA livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e azienda periodo diurno

Predictor-LimA v.8			
	Leq calcolato dB(A)	Leq misurato dB(A)	Δ dB(A)
Ricettore R2	52,0	51,2	0,8
Ricettore R3	46,9	51,5	-4,55

Tabella 23 – Predictor-LimA livelli di emissione globale comprensivi di traffico stradale e azienda periodo notturno

8.1.2. Confronto tra software

Si riportano di seguito le tabelle contenenti gli scarti ottenuti con i vari modelli.

	IMMI 6.3		PREDICTOR 8		Δ dB(A)
	Leq calcolato	dB(A)	Leq calcolato	dB(A)	
Ricettore R1	48,0		49,0		-1,0
Ricettore R2	52,2		51,2		1,0
Ricettore R3	53,6		53,4		0,2

Tabella 24- Traffico stradale differenze tra i valori calcolati con IMMI 6.3 e Predictor-Lima – periodo diurno

	IMMI 6.3		PREDICTOR 8		Δ dB(A)
	Leq calcolato	dB(A)	Leq calcolato	dB(A)	
Ricettore R1	42,2		43,0		-0,8
Ricettore R2	46,4		45,6		0,8
Ricettore R3	48,2		47,7		0,5

Tabella 25 – Traffico stradale differenze tra i valori calcolati con IMMI e Predictor-Lima – periodo notturno

	IMMI 6.3		Cadna		Δ dB(A)
	Leq calcolato	dB(A)	Leq calcolato	dB(A)	
Ricettore R1	58,2		57,6		0,6
Ricettore R2	53,0		53,0		0
Ricettore R3	54,7		55,2		-0.5

Tabella 26- Traffico stradale differenze tra i valori calcolati con IMMI e CadnA – periodo diurno

	IMMI 6.3		Cadna		Δ dB(A)
	Leq calcolato	dB(A)	Leq calcolato	dB(A)	
Ricettore R1	53,0		52,0		1,0
Ricettore R2	47,1		49,0		-2,
Ricettore R3	49,2		49,4		-0,4

Tabella 27 - Traffico Stradale differenze tra i valori calcolati con IMMI e CadnA – periodo notturno

9. CONCLUSIONI

Le analisi e le simulazioni effettuate e le correlazioni con le misure ed i monitoraggi disponibili sui casi di studio analizzati hanno evidenziato che nel caso in cui ci sia la necessità di valutare il livello sonoro in un limitato numero di punti si giustifica la preferenza verso le misurazioni, sia perché consente di rilevare direttamente il contributo delle reali sorgenti sonore, sia perché è indispensabile per effettuare la taratura del modello. Ove il sistema sorgenti ambiente ricettori sia complesso i modelli di calcolo più strutturati risultano una valida integrazione alle campagne di misura.

L'uso dei modelli di calcolo trova inoltre importanti applicazioni negli adempimenti previsti dalla normativa in particolare per i piani di risanamento e le mappature acustiche del territorio.

Come si è potuto vedere la caratterizzazione delle sorgenti sonore richiede un'attenta analisi dell'ambiente di propagazione sonora e delle specifiche sorgenti, esso si articola principalmente attraverso le seguenti fasi:

- determinazione del livello di potenza sonora delle sorgenti indagate mediante le opportune procedure standardizzate;
- verifica dell'adeguatezza dei valori calcolati nella fase precedente attraverso misure in opportune posizioni di controllo;
- calcolo mediante l'utilizzo di modelli matematici per caratterizzare acusticamente l'area.

La struttura generale del modello prevede una caratterizzazione delle emissioni che devono dipendere quanto più possibile dalle caratteristiche tecniche e funzionali della sorgente e una caratterizzazione delle attenuazioni che subiscono i livelli sonori durante la propagazione.

Nella fase di analisi deve essere perciò prevista una fase di individuazione delle principali fonti sonore pertinenti all'attività andando a considerare le emissioni/immissioni provenienti dalle sorgenti esterne, interne, dal traffico veicolare. Ogni sorgente deve essere caratterizzata in ragione del tempo di funzionamento portando ragionevolmente alla definizione di uno o due scenari funzionamento medio o normale e/o funzionamento più gravoso. Come è emerso dalla tesi se si considera la fase di assegnazione dei dati in ingresso al modello di calcolo non c'è dubbio che una delle fasi più delicate e complesse consiste nella determinazione della potenza sonora delle sorgenti individuate.

Nei casi in cui ci si trovi a considerare le industrie di processo le fonti più rilevanti di rumore si trovano all'aperto e lavorano 24 h al giorno. Dato che queste aziende non possono fermare la loro attività al fine di misurare ogni fonte singolarmente occorre adottare un metodo specifico per ottenere le potenze acustiche con la fabbrica in condizioni operative normali.

Come si è visto però non sempre le normative sono applicabili e introdurre delle semplificazioni può portare ad errori grossolani. La cosa si complica ulteriormente quando per motivi di controllo non è possibile entrare nel sito di indagine per effettuare misure più dettagliate che consentirebbero di caratterizzare adeguatamente la sorgente.

Nel caso in oggetto l'aver assegnato il medesimo spettro di potenza sonora alla sorgente industriale sia per il periodo diurno che per il notturno ha portato, come era prevedibile, a degli scarti significativi nell'analisi del periodo notturno.

Nell'effettuazione di campagne fonometriche di caratterizzazione di specifiche sorgenti sonore industriali di rilevanza ambientale è inoltre opportuno monitorare in simultanea le

emissioni/immissioni di infrastrutture di trasporto presenti nell'area aumentando con ciò notevolmente la complessità delle attività di monitoraggio e di successiva elaborazione e valutazione dei dati raccolti.

L'uso dei modelli di calcolo nell'ambito del rumore ambientale richiede perciò una grande attenzione perché, se da un lato rende possibile la gestione di situazioni anche molto articolate, si deve tenere sempre presente che non è una modalità semplificata di studio di una realtà, né tanto meno automatica. Le conoscenze in merito alle caratteristiche delle sorgenti sonore e dell'ambiente, delle leggi di generazione, trasmissione e propagazione del suono, insieme con la consapevolezza dei limiti rappresentati da tali modelli, rimangono fondamentali per garantire una sicura gestione dei dati cui si perviene.

Se correttamente sviluppato il modello, permette di ottenere un reale controllo del rumore e del sistema di gestione, da cui è possibile classificare le fonti di rumore, estrarre i singoli contributi di ogni fonte di rumore a qualsiasi ricevitore dato, aggiornato ogni volta che le informazioni modificate vengono introdotte nell'azienda, e di stabilire piani d'azione dettagliati rumore di controllo e prevedere i risultati. Si possono ottenere mappe utili su una vasta gamma di situazioni: valutazione di impatto ambientale per l'installazione di una nuova fabbrica o per modificare una esistente licenze ambientali quali ai sensi della normativa IPPC, proteste dei vicini, certificazioni secondo le norme ISO 14000 o EMAS, dove una dimostrazione completa di conformità alle norme del rumore è necessario. Nel caso di grosse aree industriali, l'obiettivo può essere quello di avere il controllo del rumore durante l'installazione successiva di nuove attività nell'area che può essere fatto attraverso la definizione di quota di rumore per ciascun lotto nel parco. L'applicazione delle tecniche di calcolo previsionale consente di estendere i livelli di rumore rilevati in specifiche posizioni a tutta l'area di indagine ottenendo un'informazione di tipo areale a partire da dati di tipo puntuale.

A seconda di quale sia la ragione il solo ed unico scopo di produrre una mappa del rumore e soprattutto il modello acustico su cui si basa dovrebbe essere quello di ottenere un utile strumento che permette di valutare correttamente una situazione rumorosa, sia esso esistente o prevista per il futuro.

Nella modellizzazione delle sorgenti si è inoltre molto condizionati dal programma di calcolo che viene utilizzato (si dovrebbe tenerne conto anche nella fase di determinazione della potenza delle sorgenti sonore).

Come si è potuto vedere non è indifferente l'utilizzo di differenti linee guida. Inoltre se nella calibrazione può essere accettabile uno scarto fino ai 3dB tra valori misurati e calcolati, una tale differenza risulta consistente se si sta valutando un possibile superamento di limiti previsti dalla normativa. Si dovrebbe inoltre tener conto dell'effetto globale che ogni semplificazione introduce nel intero modello.

Il metodo impiegato per la stima della potenza sonora, presenta dei limiti soprattutto per quanto riguarda la stima della direttività delle sorgenti presenti.

Sarebbe stato d'aiuto eseguire delle misurazioni all'interno dello stabilimento.

Nella tesi è stata inoltre affrontata la problematica dell'effetto meteorologico, andando a calcolare la percentuale di tempo con condizioni favorevoli alla propagazione sonora, si è tenuto conto della direzione e della velocità del vento, del profilo verticale della temperatura, si è effettuato un calcolo della temperatura media e della umidità relativa media. Lo studio è stato effettuato su dieci anni di dati a scadenza oraria. Per il calcolo del fattore C_0 si è determinato per ogni settore di 20° di direzione sorgente ricevitore la percentuale di casi

(in termini di media oraria di velocità e di direzione prevalente su base oraria) di condizioni favorevoli alla propagazione sonora in quella direzione o di condizioni neutre o sfavorevoli dalle quali di sono potute ricavare le rispettive probabilità).

Uno sviluppo interessante sarebbe quello di analizzare anche i possibili effetti sulla propagazione sonora introdotti dalla presenza delle *isole di calore*.

BIBLIOGRAFIA

Normativa nazionale

D.P.C.M 1 marzo 1991, *Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno*.

Legge 26 ottobre 1995, n. 447, *Legge quadro sull'inquinamento acustico*.

D.P.C.M 14 novembre 1997, *Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore*.

D.M.A. 16 marzo 1998, *Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico*.

D.P.R. 18 novembre 1998, n.459, *Regolamento recante norme di esecuzione dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n.447, in materia di inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario*.

D.P.R. 30 marzo 2004, n.142, *Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell'inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare, a norma dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n. 447*

Circolare Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio 6 settembre 2004-*Interpretazione in materia di inquinamento acustico sul criterio differenziale e applicabilità dei valori limite differenziali*.

Normativa internazionale

CERTU, SETRA, LPC, CSTB, *Nouvelle méthode de prévision du bruit*, Routes 96, 1997.

Ministère de L'environnement et du cadre de vie, *Guide du bruit des transports terrestres – prévision des niveaux sonores*, 1980.

Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 gennaio 2008 "sulla prevenzione e la riduzione integrale dell'inquinamento", GUGE L 24 del 29 gennaio 2008.

Testi consultati

Alton Everest F., *Manuale di acustica*, Hoepli editore, Milano 2006.

Beranek L.L., Ver I.L., *Noise and Vibration Control Engineering - Principles and applications*, Second Edition, Copyright by John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.

Bertoni D., Franchini A., Magnoni, *Il rumore urbano e l'organizzazione del territorio*, Pitagora editrice, Bologna, 1988.

Bertoni D., Franchini A., Lambert J., Magnoni M., Tartoni P.L., Vallet M., *Gli effetti del rumore dei sistemi di trasporto sulla popolazione*, Pitagora editrice, Bologna, 1994.

Brüel & Kjør sound and vibrations measurement, *Predictor Type 7810 Version 8.0 User manual*, Nærum, 2010.

Butti L., Lageard G., *Manuale di ambiente e sicurezza*, Il sole 24 ore, Milano, 2003.

Cocchi A.&C., *Inquinamento da rumore*, Maggioli, 1998.

Cosa M., *L'inquinamento da rumore*, La nuova Italia scientifica, Roma, 1992.

Curcuruto S., Nataletti P., Nicolini O., *Il rumore negli ambienti di vita e di lavoro*, EPC Libri, Roma, 2001.

Demozzi A., *La progettazione delle barriere antirumore*, Il sole 24 ore, Milano, 2002.

Felli M., Simoncini C., *Linee guida per il contenimento dell'inquinamento acustico prodotto dalle infrastrutture di trasporto*, Collana tecnico scientifica, Perugia 1999.

- Fracchia F., *L'inquinamento acustico*, Cedam, Padova, 2001.
- Gabrieli T., Fuga F., *Impatto acustico - accertamenti e documentazione*, Maggioli Editore, 2009.
- I.S.T.A.T., *Statistiche ambientali*, 2005.
- Lazzarin R., Strada M., *Elementi di acustica tecnica*, CLEUP, Padova, 2001.
- Moncada Lo Giudice G., *Tecniche di misura ed abbattimento del rumore*, «Tutela dell'ambiente dall'inquinamento acustico», Ministero dell'ambiente, Roma, 2000.
- Principe E., *Il veicolo ferroviario- Carri*, CIFI Editore, Roma, 2010.
- Principe E., *Il veicolo ferroviario- Carrozze e Carri*, CIFI Editore, Roma, 2010.
- Romani M., Grillo N., *Inquinamento da rumore*, Geva edizioni, 2005
- Sharland I., *L'attenuazione del Rumore*, Ed. Woods Italiana, 1994.
- Spagnolo R. (a cura di), *Manuale di acustica applicata*, UTET, Torino, 2001.
- Strippoli V., *Tutela dal rumore*, Maggioli Editore, 2008.
- Rossing T., *Handbook of Acoustics*, Springer, New York, 2007.

Publicazioni

- Seminario AIA I piani di risanamento acustico delle aree urbane, *Atti del Seminario*, Modena 1999.
- Seminario AIA Noise Mapping, *Atti del Seminario*, Bologna 2001.
- Seminario AIA Impatto e clima acustico: metodologie di elaborazione e procedure di valutazione, *Atti del Seminario*, Modena 2007.
- Seminario AIA Riflessioni e Proposte per l'evoluzione della legislazione sul rumore ambientale, *Atti del Seminario*, Siracusa 2010.
- Poggi A., Fagotti C., Casini D., Mancioti T., Gabrieli T., *Linee guida per la progettazione di reti di monitoraggio e per il disegno di stazioni di rilevamento relativamente all'inquinamento acustico*, Quaderni ISPRA CTN_AGF 3/2001.
- Poggi A., Fagotti C., Casini D., Brambilla G., Gabrieli T., *Linee guida per la rilevazione di dati utili per la stesura della relazione biennale sullo stato acustico del comune*, Quaderni ISPRA CTN_AGF 2/2001.
- Dispense tratte dal corso per tecnici competenti in acustica dell'Università di Ferrara*, 2005
- European Commission Working Group, Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN) "Good practise guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure", Version 2 January 2006.
- Rapporto sulle attività di ricerca "Messa a punto di nuove metodologie di misura, valutazione e divulgazione dei risultati sull'inquinamento acustico". Seconda Università di Napoli – APAT, 2008.

Articoli

- Di Bella A., Pasetto M., Manganaro A., *Le fasce marginali protettive per la mitigazione acustica del rumore da traffico stradale*, 32° Convegno Nazionale dell'AIA, *Atti del convegno*, Ancona 2005.
- Moran L., Casini D., Poggi A., *Fattori correttivi per i dati di emissione da utilizzare nei modelli previsionali di rumore stradale in ambito urbano*, 32° Convegno Nazionale dell'AIA, *Atti del convegno*, Ancona 2005.

- Seung Cho D., Hyeong Kim J., Muk Choi T., Hee Kim B., Manvell D., *Highway Traffic noise prediction using method fully compliant with ISO 9613: comparison with measurements* Applied Acoustic vol.65, 2004.
- Makarewicz R., *A Simple Model of Outdoor Noise Propagation*, Applied Acoustic vol.54, 1998.
- Makarewicz R., *Attenuation of Outdoor Noise Due to the Air Absorption and Ground Effects* Applied Acoustic vol.53, 1998.
- Gabillet, Bonfil Y., L'Esperance F., Colard J., *Traffic noise propagation under the influence of wind and temperature gradients*. INTER-NOISE 93. Leuven 1993.
- Sepulcri D., Remigi F., Buoso A., Piovesan M., *Mappatura del rumore ambientale e piano di risanamento acustico: il caso di Venezia*, 1° Convegno Nazionale sulla Governance del Rumore Ambientale, *Atti del convegno*, Ischia 2009.
- Sepulcri D., Remigi F., Zulato F., *Rappresentazione della situazione acustica del territorio mediante indici sintetici di criticità*, 10° Congresso Nazionale CIRIAF, *Atti del convegno*, Perugia 2010.
- Sepulcri D., Mufato R., Remigi F., *Interconfronto su misure di rumore ferroviario e incertezza di campionamento*, 37° Convegno Nazionale dell'AIA, *Atti del convegno*, Siracusa 2010.
- Remigi F., *La classificazione acustica del territorio mediante procedura automatica*, 37° Convegno Nazionale dell'AIA, *Atti del convegno*, Siracusa 2010.
- Taherzadeh S., Li K., Attenborough K., *Some Practical Considerations For Predicting Outdoor Sound Propagation in the Presence of Wind and Temperature Gradients*, Applied Acoustics vol.54 , 1998.
- Masoero M., Bertetti C., Mattiuzzo L., *Effetti meteorologici e descrittori acustici della Direttiva 2002/49/CE: verifica in contesti geograficamente complessi*, 33° Convegno Nazionale dell'AIA, *Atti del convegno*, Ischia 2006.
- Masoero M., *Economic aspects of noise control strategies: an overview of the situation in Italy and in Europe*, Atti dell'EURO-NOISE, Napoli 2003.
- Garai M. Berengier M., *Propagazione del rumore in ambiente esterno*, Atti del Noise Mapping, Bologna 2001.
- Oshino Y., Roovers K., Blokland G., Tachibana H., *Possibility of International Standardization of Road traffic Noise Prediction Model*, Atti dell'INTER-NOISE 2004, Praga 22-25/8/2004.
- Allais, Bosio C., Colombo A., Mimmi G., Pennacchi P., *Metodologie per la realizzazione di mappe del rumore da traffico veicolare urbano: il caso della città di Pavia*, dalla Rivista Italiana di Acustica vol. 24 n. 3-4/2000.
- De Sortis A., Sanò T., *Spettri di risposta del traffico stradale*. Rivista "Le Strade" n. 6, 1999.
- Lincesso M., Chirici B., Luzzi S., Bellomini R., *Impatto acustico dei cantieri ferroviari per trazione elettrica e lavori di armamento – le linee guida di RFI*, 34° Convegno Nazionale AIA, *Atti del convegno*, Firenze 2007.
- Licitra G., Brambilla G., Bruno G., Carati G., Tombolato A., Maffei L., Palazzuoli D., Nollì M., *Dal recepimento della direttiva 2002/49/CE all'armonizzazione dell'apparato normativo per la tutela dall'inquinamento acustico: un cammino complesso, ricco di opportunità*, Seminario Aia, *Atti del seminario*, Siracusa 2010.
- Elia G., *Ruolo dell'UNI nella definizione di procedure tecniche per la redazione delle documentazioni di impatto e clima acustico*, Seminario Impatto e clima acustico: metodologie di elaborazione e procedure di valutazione, *Atti del seminario*, Modena 2007.

Fogola J., Masera S., Di Bella A., Romano R., *Clima acustico per gli insediamenti residenziali*, Seminario Impatto e clima acustico: metodologie di elaborazione e procedure di valutazione, *Atti del seminario*, Modena 2007.

Normativa tecnica

Norma UNI ISO 9613-1:1993, *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.*

Norma UNI ISO 9613-2:2006, *Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto: metodo generale di calcolo.*

Norma UNI ISO 3744:1994, *Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane.*

Norma UNI ISO 3746:1995, *Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane.*

Norma UNI ISO 10855-1999, *Misura e valutazione del contributo acustico di singole sorgenti.*

Norma UNI 11143-1-2005, *Metodo per la stima dell'impatto di clima acustico per tipologia di sorgenti: parte generale.*

Norma UNI 11143-2-2005, *Metodo per la stima dell'impatto di clima acustico per tipologia di sorgenti: rumore stradale.*

Norma UNI 11143-3-2005, *Metodo per la stima dell'impatto di clima acustico per tipologia di sorgenti: rumore ferroviario.*

Norma UNI 11143-5-2005, *Metodo per la stima dell'impatto di clima acustico per tipologia di sorgenti: rumore da insediamenti produttivi industriali e artigianali.*

APPENDICE FOTOGRAFICA



Vista della linea ferroviaria



Vista della stazione dei treni



Vista dal ricettore R3 dello stabilimento



Vista della provinciale dal ricettore R3



Vista ovest dello stabilimento



Stabilimento durante l'attività di manutenzione



Posizione di misura M1



Posizione misura R1a



Vista dell'impianto dalla strada provinciale



Posizione di misura M3



Giardino presso il ricevitore R3



Posizione di misura M1



Posizione misura R1a



Posizione di misura M2

ALLEGATO I – Sorgenti puntiformi a grande distanza –Studio effettuato sul Porto Di Venezia.

Si riporta come esempio metodologico il seguente studio svolto presso Arpav Veneto all'interno del Piano di Risanamento Acustico della città di Venezia con l'utilizzo del software di Calcolo IMMI 6.3.

DATI DI ORIGINE

L'analisi del rumore portuale, mediante la mappatura acustica delle navi all'ormeggio nel Porto di Venezia e della Zona Industriale, è stata oggetto di studio nell'ambito del Piano di Risanamento Comunale della città.

Per la costruzione del modello di calcolo dell'ambiente di analisi si è fatto riferimento ai seguenti dati di partenza:

1. la cartografia digitale per l'elaborazione del modello del terreno e degli edifici, il numero di residenti e delle abitazioni - forniti da Settore Urbanistica del Comune di Venezia;
2. la dislocazione di tutti gli ormeggi e di tutti i movimenti di navi relativi ad un anno, il 2005, forniti dall'Autorità Portuale di Venezia;
3. le informazioni utili ad individuare le specifiche emissive delle navi, in parte fornite dalla stessa Autorità Portuale, in parte ricavate da banche dati consultabili in rete.(più precisamente: database Sorse Db versione 1.1 scaricabile all'indirizzo <http://www.dgmr.nl/en/software-and-it/standard-products/downloads/>);
4. l'acquisizione dei dati meteorologici relativi a 10 anni dei parametri di temperatura, umidità, velocità e direzione del vento, rilevati da centraline di proprietà dell'ARPAV dislocate nel territorio del Comune di Venezia; è stato inoltre possibile utilizzare i dati storici messi a disposizione dall'Ente Zona Industriale di Porto Marghera relativi al profilo verticale del vento e della temperatura.

GEOGRAFIA DEL SITO

Il porto è situato al centro della laguna di Venezia, separata dal mare da una striscia di terra interrotta in tre punti, corrispondenti alle bocche portuali di Lido, Malamocco, Chioggia.

L'area portuale non è concentrata ma , al contrario, si presenta come diffusa in più zone. I moli e le banchine sono dislocati su un'ampia porzione di territorio e ripartiti per funzione (vedi figura n.1):

- sulla terraferma, a *Porto Marghera*, si concentra il traffico commerciale, specialmente con le navi porta container e le petroliere che alimentano l'interporto e la zona industriale. Da luglio 2007 possono accedervi navi da 260 metri di lunghezza.
- nel centro storico, al margine ovest del centro insulare in prossimità dello scalo ferroviario, alla zona Marittima , nonché le aree di San Basilio e Santa Marta fa capo quasi tutto il traffico passeggeri. In particolare alla Marittima attraccano le navi traghetto per la Grecia e la Turchia e le grandi navi da crociera, (sono presenti 4 approdi per navi traghetto e 6 approdi per navi da crociera) possono approdare navi lunghe non oltre i 304 metri. Nella zona di *San Basilio* invece, sono ormeggiati aliscafi e navi da crociera di piccole e medie dimensioni.
- lungo la riva dei Sette Martiri trovano ormeggio i battelli fluviali e i grandi yacht privati e occasionalmente navi da crociera e unità militari di fronte all'arsenale.

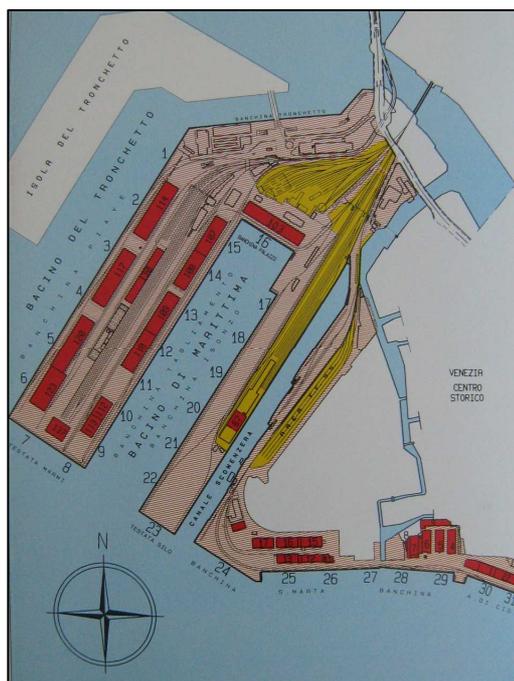


Figura 4- Marittima

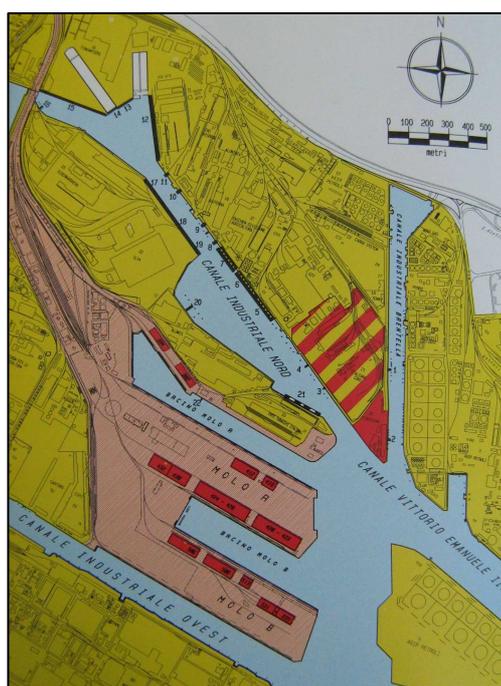


Figura 2 - Porto Marghera

INDIVIDUAZIONE DEI PUNTI DI ORMEGGIO

Sulla base delle informazioni disponibili è stato costruito lo shape file georeferenziato di tutti i punti di ormeggio.

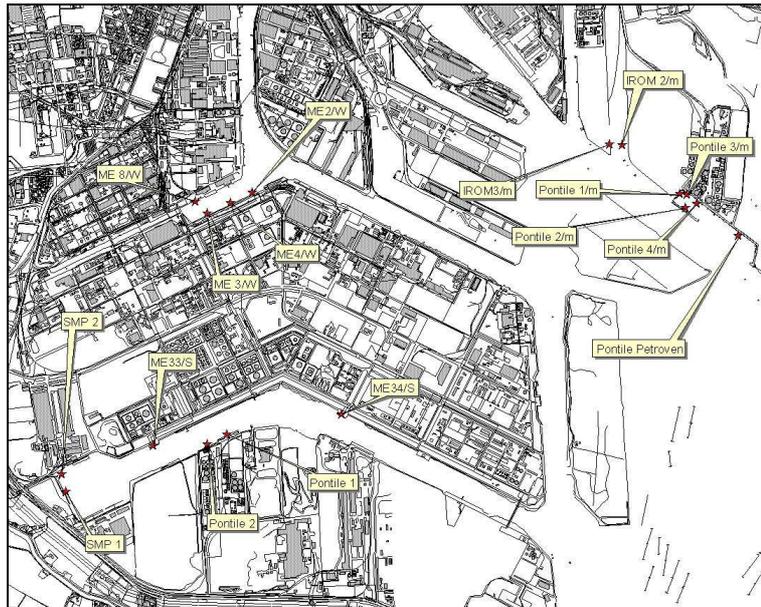


Figura 4 - Ormezzi del settore industriale

elenco degli ormeggi presenti a Porto Marghera:

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A11	A12	A13	A14	A15	B16	B17	B18	B19	B20
B21	B27	B26	B25	B24	B23	B22	ENEL1	ENEL2	ME01
ME02	ME03	ME04	ME08	ME09	ME06	C.I.A 1 W	C.I.A 2 W	C.I.A 3 W	C.I.A.4 W
ILVA1	ILVA2	ILVA3	ME10	ME021	DECAL 2	ME034	ME033	ME013	ENEL 3-4
ME036	ITALC	ITCEM	ENEL 5	ALUMS	CEREOL	IDROM	FINCP	FINBC	FINTI
ESSO	IROMD	IROMS	DECAL 1	SMPE1	SALI 1-2	PETRO	SPAG1	SPAG2	SILOG
GRMU1	SILOV	FINA1	IROM4	SIRMA	ENELF	BUNGE	VKE01		

elenco degli ormeggi presenti a Venezia:

VE028	VE029	VE018	VE020	VE021	VE024	VE025	VE027	VE030	VE031
ARBA2	ARBA3	ARPMA	BACGR						

TIPOLOGIA E CARATTERIZZAZIONE DELLE SORGENTI SONORE

Ai fini del calcolo dei livelli sonori ciascun punto di ormeggio è stato considerato come una *sorgente sonora di tipo puntuale*. Avendo a disposizione i valori di potenza sonora forniti dall'Autorità Portuale valutati per tre navi di diversa categoria di stazza lorda, per attribuire un valore di potenza sonora a ciascuna di queste sorgenti utilizzando i dati disponibili, tutte le navi sono state suddivise in base alla loro stazza e successivamente raggruppate per ormeggio.

Più precisamente le tre tipologie di natanti rappresentative dell'ambito portuale veneziano sono state così individuate: si sono raggruppate nella prima categoria le navi con una stazza lorda inferiore alle 10000 ton (ad esempio ricadono in tale categoria i battelli fluviali con una stazza lorda di circa 1700 ton e le navi da crociera di piccole dimensioni stazza lorda di circa 1400 ton), nella seconda le navi con una stazza lorda tra le 10000 e le 60000 ton (ricadono in tale categoria i traghetti con una stazza lorda di circa 30000 ton), nella terza categoria le navi con una stazza lorda maggiore di 60000 ton (ricadono in tale categoria le navi da crociera di grande dimensione si può arrivare a una stazza lorda di circa 109000 ton)



Foto 1 –Battello fluviale



Foto 4 - Traghetto



Foto 3- Yacht



Foto 4 – Nave da crociera di grandi dimensioni

Il valore complessivo di potenza sonora da attribuire al singolo punto di ormeggio è stato determinato in base ai tempi di permanenza di navi di ciascuna delle tre categorie nello specifico ormeggio.

Per quanto riguarda gli spettri di emissione, per le navi commerciali (Porto Marghera) si è fatto riferimento al *database olandese Sorse Db*, mentre per gli spettri relativi al Porto di Venezia si è fatto riferimento agli spettri forniti dall'Autorità Portuale.

I relativi spettri di emissione sono stati inseriti nel modello di calcolo in terzi d'ottava ponderato A.

25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
83,7	78,1	79,9	74,8	83,1	87,9	75,5	83	91,8	86,1
250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz
87,3	89,3	86,2	84,5	83,6	83,5	81,6	80	77,7	76,3
2,5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
73,6	71,2	69,1	66,6	64,7	62,1	60,0	58,3	56,1	52,4

Tabella 18 - Spettro di potenza sonora in banda di terzi d'ottava, ponderazione lineare per navi di categoria 1 - Porto di Venezia

25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
98,8	95,3	98,1	104	113,3	104,8	99,1	96,9	95,4	91,3
250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz
90,3	89,2	86,3	85,1	83,9	84,9	84,2	82,1	79,6	78,5
2,5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
77,7	75,7	72,7	69,1	65,8	62,6	58	55,1	51,3	45,9

Tabella 19 - Spettro di potenza sonora in banda di terzi d'ottava, ponderazione lineare per navi di categoria 2 - Porto di Venezia

25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
122,2	126,7	123,4	122,4	121,2	123,6	121,8	119,4	121,9	117,2
250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz
116,4	116,8	115,4	114,4	113,0	112,6	111,3	109,8	107,4	105,7
2,5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
102,0	97,2	91,9	86,7	81,0	76,4	74,2	71,9	70,8	70,6

Tabella 20 - Spettro di potenza sonora in banda di terzi d'ottava, ponderazione lineare per navi di categoria 3 - Porto di Venezia

25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
67,4	67,4	67,4	81,1	81,1	81,1	89,3	89,3	89,3	93,2
250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz
93,2	93,2	95,7	95,7	95,7	95,4	95,4	95,4	90,8	90,8
2,5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
90,8	85	85	85	75	75	75	-	-	-

Tabella 21 - Spettro di potenza sonora in banda di terzi d'ottava, ponderazione lineare per navi di categoria 1 - Porto Marghera

25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
55,3	55,3	55,3	63,3	63,3	63,3	75,4	75,4	75,4	82,7
250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz
82,7	82,7	84,7	84,7	84,7	85,6	85,6	85,6	82,6	82,6
2,5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
82,6	77	77	77	69,4	69,4	69,4	-	-	-

Tabella 22 - Spettro di potenza sonora in banda di terzi d'ottava, ponderazione lineare per navi di categoria 2 - Porto Marghera

25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
53,3	53,3	53,3	63,6	63,6	63,6	77,9	77,9	77,9	83,2
250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz
83,2	83,2	85	85	85	84,5	84,5	84,5	79,7	79,7
2,5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz	12.5kHz	16kHz	20kHz
79,7	73	73	73	65,1	65,1	65,1	-	-	-

Tabella 23 - Spettro di potenza sonora in banda di terzi d'ottava, ponderazione lineare per navi di categoria 3 - Porto Marghera

Nella simulazione di calcolo le sorgenti sonore sono state posizionate a differenti altezze a seconda della loro stazza ovvero 15, 25 e 35 m.

Nel calcolo si è tenuto conto della condizioni meteorologiche facendo riferimento a valori medi caratteristici del territorio di Venezia e dei relativi indici rappresentativi della propagazione del suono nelle diverse direzioni.

Il calcolo è stato effettuato ad una altezza relativa di 4 m con una griglia di calcolo con un passo di 2m x 2m.

Si deve precisare che la stima dei livelli sonori generati dalle attività portuali essendo basata su un campione estremamente limitato di misure, e sulla modellizzazione di ciascuna nave come una sorgente puntuale, risente di un notevole grado di approssimazione.

PERMANENZA DELLE NAVI PRESSO GLI ORMEGGI

Per ogni ormeggio è stata calcolata la permanenza di ogni nave, avendo a disposizione l'identificativo univoco del mezzo, la stazza, la data e l'ora di arrivo e la data e l'ora di partenza. Si è ricavata così la permanenza espressa in ore e suddivisa per categoria di stazza relativa al singolo ormeggio.

Per effettuare la simulazione la giornata è stata suddivisa in tre periodi, *periodo diurno* dalle 06:00 alle 20:00, *periodo serale* dalle 20:00 alle 22:00 e *periodo notturno* dalle 22:00 alle 06:00.

Si riportano di seguito alcune delle mappe relative alle aree indagate:

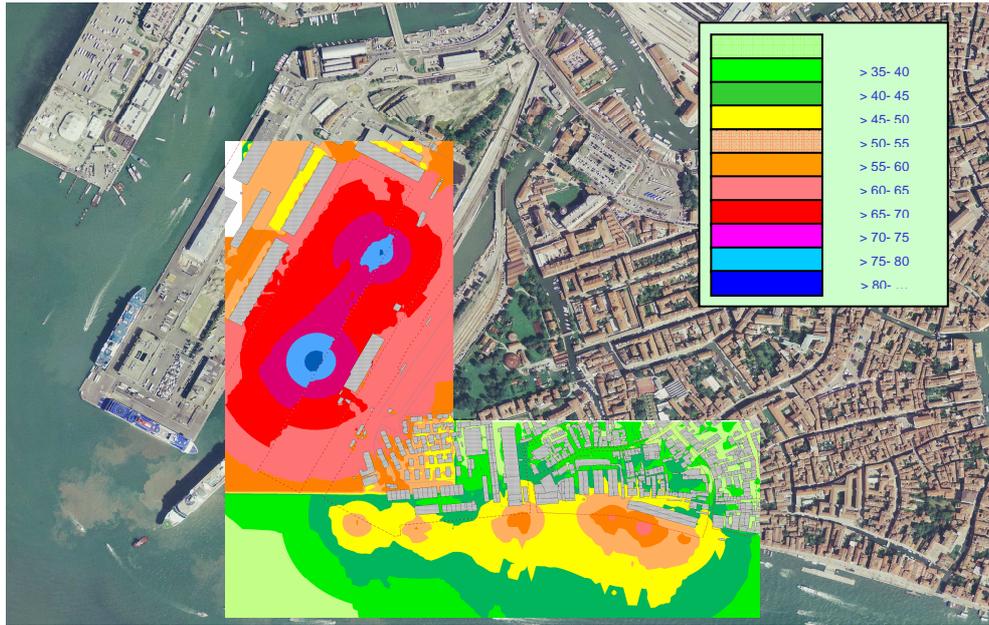


Figura 5: Mappa di rumore zona Marittima periodo diurno

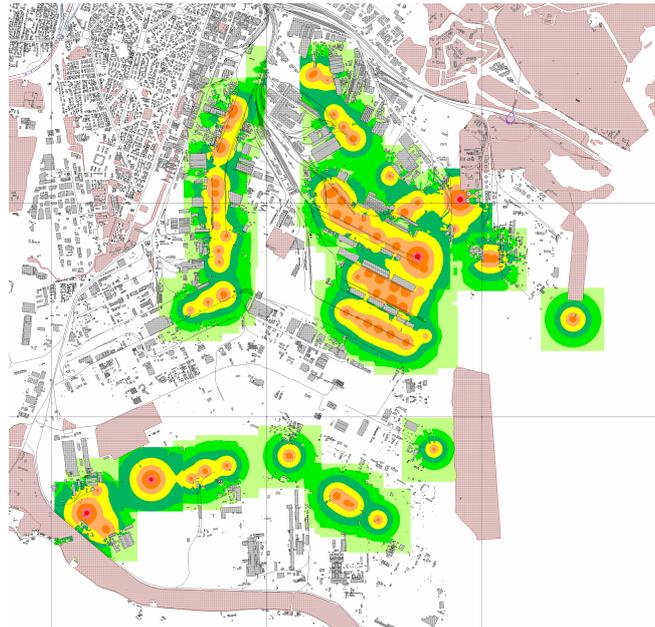


Figura 6: Mappa di rumore porto industriale periodo diurno

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare al prof. Antonino Di Bella.

Ringrazio i colleghi ed amici dell'Arpav.

Ringrazio infine la mia famiglia che mi è sempre rimasta accanto con infinita pazienza.