

Il rilevamento delle zone di influenza acustica connesse al traffico aereo sul territorio in prossimità degli aeroporti

A. Farina *, L. Rocco **, S. Sauro **

* Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma

** Dipartimento di Processi e Metodi della Produzione Edilizia, Università di Firenze

1. INTRODUZIONE

L'inquinamento acustico sul territorio in prossimità degli aeroporti prodotto dalle operazioni di volo connesse con il traffico aereo può condurre in certi casi a degli stati di conflittualità tra il sistema del trasporto aereo e le comunità ivi residenti costrette a sopportarne il rumore; da un lato si ha infatti lo sviluppo sempre più massiccio del traffico aereo e dall'altro il diritto dei singoli e delle comunità di vivere in condizioni ambientali soddisfacenti.

Al manifestarsi di tali stati di conflittualità l'accertamento in campo della situazione acustica in atto dovuta al traffico aereo costituisce il primo fondamentale passo per determinare i possibili interventi di controllo della rumorosità sul territorio.

Tale accertamento può essere svolto a diversi gradi di approssimazione, in dipendenza dei metodi di rilevamento fonometrico con conseguente variabilità dei costi operativi. Il grado più elevato di precisione si può ottenere solo disponendo di un sistema di rilevamento dotato di un grande numero di postazioni fisse di misura, almeno una dozzina per ogni testata pista, le quali effettuino nell'arco delle 24 ore il rilevamento in continuo di tutti gli eventi di rumore connessi al traffico aereo.

Tale metodo peraltro comporta un dispiegamento di apparecchiature e di operatori economicamente insostenibile in una indagine che abbia per scopo un apprezzamento della situazione acustica sul territorio da svol-

SOMMARIO

Il presente lavoro illustra un metodo di rilevamento del rumore per l'accertamento della situazione acustica sul territorio dovuta al traffico aereo, metodo già sperimentato e dimostrato affidabile per geometrie aeroportuali semplici, ma adattabile a qualunque disposizione aeroportuale.

Nell'articolo vengono indicati le grandezze acustiche da rilevare per la descrizione del rumore prodotto dagli aerei in volo e nelle fasi di decollo e di atterraggio, le modalità di misura, le tecniche e le strumentazioni da adottare, nonché tutti i dati sperimentali da acquisire e in particolare il modello di traffico da elaborare al fine di determinare la situazione acustica globale derivante dall'insieme delle operazioni di decollo e di atterraggio di diversi tipi di velivoli operanti nell'aeroporto considerato.

Vengono inoltre descritte le procedure di calcolo dei valori della rumorosità indotta sul territorio da un insieme giornaliero di operazioni di volo, dai quali valori è possibile redarre una mappatura spaziale dell'inquinamento acustico in atto.

gere in tempi brevi con una approssimazione di 1-2 dBA.

Dai dati rilevati sulla rumorosità delle aree in prossimità degli aeroporti si notano anche a parità di traffico giornaliero e di tipo di velivoli impiegati delle differenze nell'esposizione giornaliera al rumore di 2-3 dBA in conseguenza della grande variabilità dei parametri che interessano la situazione acustica, quali ad esempio le condizioni meteorologiche, le condizioni di carico degli aeromobili al decollo e quindi i profili della traiettoria adottati, nonché eventuali operazioni di volo impreviste, ecc. .

Pertanto una elaborazione delle curve isofone sul territorio conseguenti al traffico aeroportuale giornaliero con una approssimazione nel medio termine non superiore ai 2 dBA risulta ampiamente giustificata per una rappresentazione oggettiva dell'inquinamento acustico in atto.

Il metodo qui descritto è stato sperimentato in alcune situazioni aeroportuali in seguito al manifestarsi di conflittualità fra popolazioni esposte al rumore e il sistema del traffico aereo: esso si è dimostrato affidabile per geometrie aeroportuali semplici, quali quelle costituite da una sola pista con decolli ed atterraggi da entrambe le testate o da due piste parallele, abilitate come sopra, e per distanze longitudinali dalla testata pista più prossima fino a 1800 m e per distanze laterali rispetto all'asse della

pista fino a 500 m. Esso comunque può essere adattato a qualunque disposizione aeroportuale. Il metodo è pertanto applicabile alla maggior parte degli aeroporti con insediamenti urbani posti all'interno di tali distanze.

Il metodo è basato sulla constatazione che nell'intorno spaziale come sopra definito assai prossimo alla pista gli aeromobili in decollo ed atterraggio seguono delle traiettorie che si diversificano nelle distanze reciproche in misura relativamente contenuta e tale da poter considerare per qualunque tipo di velivolo un'unica traiettoria fissa di decollo ed una di atterraggio; questa assunzione alla base del metodo qui descritto, consente una grandissima semplificazione dei rilievi e dei calcoli ed è applicabile alla maggior parte delle situazioni critiche sotto l'aspetto dell'inquinamento acustico, dato che esse si manifestano nella maggioranza dei casi a distanze dalla pista non superiori ai 1500+1800 m.

Il metodo comprende un sistema di impiego temporaneo per l'acquisizione di grandezze fonometriche costituito da due stazioni di misura una per ogni testata pista, operanti simultaneamente o anche in successione poste ad una distanza fissa di 1000 metri dalla testata, da un sistema di identificazione del tipo di aereo e della operazione di volo e da un sistema di elaborazione dati al computer.

La semplicità dei rilevamenti e delle successive elaborazioni consente di operare in tempi relativamente brevi e con costi contenuti, comunque di gran lunga inferiori a quelli di un metodo basato su un sistema costituito da un gran numero di stazioni di misura.

2. RIFERIMENTI NORMATIVI INTERNAZIONALI

Per la determinazione quantitativa del rumore del traffico aereo esistono due importanti documenti internazionali: l'Annesso 16 "Aircraft Noise" dell'ICAO (International Civil Aviation Organization) e la Norma ISO 3891 "Procedure for describing aircraft noise heard on the ground", 1978 della ISO (International Organization of Standardisation). Si tratta di due documenti di grande importanza che stabiliscono le grandezze acustiche da rilevare, le modalità di misura e la rappresentazione dei risultati in relazione alla descrizione del rumore prodotto dagli aerei in volo e nelle fasi di decollo e atterraggio [1] [2].

L'assunto comune alla base di entrambe queste due procedure di valutazione del rumore degli aerei, è che la risposta delle persone, sia come individui che come comunità, al loro intorno di rumore è correlata alla energia acustica totale ricevuta in un certo periodo

di tempo; inoltre poiché le persone reagiscono al loro intorno ripetitivo di rumore e tendono a classificarlo sulla base di un giorno solare l'integrazione dell'energia ricevuta viene effettuata su un periodo di tempo di 24 ore.

A causa inoltre della maggiore insofferenza delle persone verso i rumori notturni la procedura ICAO distingue gli eventi di rumore che si verificano nelle ore diurne da quelli nelle ore notturne, penalizzando i livelli di queste ultime con una maggiorazione di 10 dB.

Annesso 16 dell'ICAO

Il metodo ICAO assume come grandezza psicoacustica istantanea base il Livello di Rumore Percepito PNL, corretto per irregolarità spettrali (presenza di toni puri), che si ottiene col calcolo pesando i livelli istantanei in bande di terzi di ottava secondo particolari curve di ponderazione appositamente elaborate per il rumore degli aerei

Dall'andamento nel tempo dei valori istantanei che si verificano in una certa posizione al suolo, connesso con una certa operazione di volo, viene derivato sempre col calcolo un unico valore del rumore prodotto da una tale operazione detto Livello Effettivo di Rumore Percepito EPNL relativo alla posizione considerata; l'EPNL rappresenta in sostanza un livello costante della durata di 10 secondi che produce lo stesso disturbo del rumore variabile di un evento costituito da una operazione di volo e rappresentato dai Livelli Istantanei di Rumore Percepito PNL nella posizione al suolo considerata durante il sorvolo di un aereo in decollo o in atterraggio; esso esprime pertanto la rumorosità complessiva o "impronta di rumore" prodotta da una singola operazione di volo.

L'espressione analitica dell'EPNL è la seguente:

$$EPNL = \log \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\text{PNL}/10} dt \quad (1)$$

dove $T_0 = 10$ s è una costante di normalizzazione nella durata di riferimento di 10 secondi e $t_2 - t_1$ è il tempo in cui il PNL è di 10 dB inferiore al suo valore massimo.

La durata di riferimento di 10 secondi sulla quale l'evento di rumore è normalizzato consente la somma di molteplici eventi di rumore di differente durata.

In accordo con l'assunto base della validità del principio dell'energia totale ricevuta, l'effetto cumulativo delle varie operazioni di volo viene espresso dalla somma degli apporti di energia dovuti ai singoli eventi operativi per cui, essendo questi ultimi espressi in forma logaritmica, occorre sommare i singoli eventi di uguale livello di rumore EPNL sulla base di $10 \log N$ dove N è il numero giornaliero di tali eventi

nel periodo diurno o nel periodo notturno.

Per descrivere la situazione acustica globale derivante da un insieme di operazioni di decollo e di atterraggio di diversi tipi di velivoli, gli EPNL devono essere combinati insieme su base energetica in funzione dei dati sul movimento del traffico aeroportuale.

Dalla combinazione degli EPNL si ricava una grandezza che esprime con un singolo numero il livello di esposizione totale al rumore in una certa posizione al suolo, il Livello Equivalente Continuo Pesato di Rumore Percepito WECPNL. Il WECPNL rappresenta dunque il livello di un rumore costante che durante tutto l'arco delle 24 ore produrrebbe lo stesso disturbo nella posizione considerata del rumore variabile indotto dal traffico aeroportuale.

Per il calcolo del WECPNL occorrono dunque stime e generalizzazioni delle categorie dei velivoli, delle combinazioni di vari tipi di velivoli, del numero di operazioni, della utilizzazione delle piste, dei profili di decollo e di atterraggio, delle procedure operative e infine della distribuzione delle operazioni durante le varie ore del giorno e della notte.

Peraltro la descrizione del rumore di una operazione di volo mediante l'EPNL è allo stato attuale principalmente finalizzata alla certificazione acustica dei diversi tipi di aereo, per la quale è opportuna una valutazione il più possibile accurata, da cui l'impiego di questa grandezza anche se richiede l'uso di strumenti di rilevazione oggettiva piuttosto complessi.

Il WECPNL non ha incontrato dunque una generalizzata adozione come indice per valutare ed esprimere in termini numerici il disturbo cumulativo al quale sono soggette per un certo insieme di operazioni di volo le comunità insediate nelle vicinanze dell'aeroporto. Questo indice pertanto non è stato quello adottato nel metodo qui descritto per accertare la situazione acustica globale in prossimità di un aeroporto.

Norma Internazionale ISO 3891

Questa norma internazionale è finalizzata alla definizione delle procedure e del metodo di calcolo per descrivere il rumore a terra prodotto dalle operazioni di volo degli aerei. Essa prevede, oltre ad un metodo basato sulla grandezza psicoacustica istantanea base Livello di Rumore Percepito PNL, come quello dell'Annesso 16 dell'ICAO, anche un metodo basato sulla grandezza psicoacustica istantanea base Livello di Pressione Sonora Ponderata A L_{pA} , che si ottiene pesando i livelli istantanei alle varie frequenze secondo la curva di ponderazione A del fonometro.

Dall'andamento nel tempo dei valori istantanei del Livello di Pressione Sonora Ponderata A che si verificano in una certa posizione al suolo, connesso con una certa operazione di volo, viene derivato col

calcolo un unico valore di una grandezza detta Livello di Esposizione a Singolo Evento SEL (o L_{AX}) che esprime l'esposizione su base energetica del rumore prodotto da quella operazione di volo relativo alla posizione considerata.

L'espressione analitica del SEL è la seguente:

$$SEL = 10 \log \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt \quad (\text{dBA}) \quad (2)$$

dove $t_0 = 1s$ è la costante di normalizzazione dell'evento di rumore sulla durata di riferimento di 1 secondo e $t_2 - t_1$ è il tempo in cui il L_{pA} è inferiore di 10 dB al suo valore massimo.

Il SEL è pertanto una grandezza analoga all'EPNL atta a rappresentare con un solo valore la rumorosità complessiva prodotta da una singola operazione di volo.

Per descrivere la situazione acustica globale derivante da una successione di operazioni di decollo o di atterraggio di diversi tipi di velivoli che si verificano in un certo periodo di tempo occorre per ciascuna posizione al suolo sommare insieme su base energetica i SEL prodotti in quella posizione delle singole operazioni di volo definite in base ai dati sul movimento del traffico aeroportuale e riferire tale somma al periodo di tempo considerato.

Si ottiene così il Livello Sonoro Equivalente Continuo che esprime una successione di rumori di livelli fluttuanti delle varie operazioni di volo con un rumore di livello costante avente per il medesimo tempo preso in considerazione, la medesima energia pesata con la curva di ponderazione "A" del rumore fluttuante.

Il Livello Equivalente Continuo L_{AeqT} , nel periodo di tempo T che dunque caratterizza una successione di eventi nel tempo T si ottiene col calcolo dalla seguente espressione:

$$L_{AeqT} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{\frac{SEL(i)}{10}} \cdot N(i) \right] - 10 \log \frac{T}{t_0} \quad (\text{dBA}) \quad (3)$$

dove SEL (i) è il Livello di Esposizione a Singolo Evento dell'evento i-esimo, N(i) è il numero di eventi i-esimi che si verificano nel tempo T considerato espresso in secondi e t_0 è il tempo di riferimento di 1 secondo.

Nella formulazione del Livello Sonoro Equivalente Continuo nel tempo di un giorno solare (24 ore) è necessario che gli eventi di rumore compresi fra le 22.00 e le 07.00 siano penalizzati di 10 dB per tener conto della maggiore insofferenza delle persone verso i rumori notturni. Questa penalizzazione non è prevista nella attuale stesura della ISO 3891-1978, ma nel metodo qui proposto deve essere adottata in quanto è

estesamente applicata nella maggior parte delle procedure normalizzate di valutazione del rumore degli aerei oltre che nell'Annesso 16 dell'ICAO. Combinando insieme il Livello Equivalente Continuo del periodo diurno con quello del periodo notturno si ottiene il Livello Sonoro Giorno Notte L_{DN} che con un singolo numero esprime il livello di esposizione totale in una certa posizione al suolo dovuta ad una successione di eventi di rumore nell'arco delle 24 ore; tale grandezza è espressa dalla seguente formula:

$$L_{AeqT} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{\frac{SEL(i)}{10}} \cdot N_{(i)} \right] - 10 \log \frac{T}{t_0} \quad (\text{dBA}) \quad (4)$$

dove L_D è il Livello Equivalente Continuo nelle ore diurne dalle 07.00 alle 22.00 e L_N è il Livello Equivalente Continuo nelle ore notturne dalle 22.00 alle 07.00.

Il metodo basato sul Livello Sonoro Giorno Notte che assume come grandezza psicoacustica base il Livello di Pressione Sonora Pesata A è quello più adatto per la determinazione quantitativa del rumore del traffico aereo, infatti tale grandezza a seguito di vaste inchieste a carattere sociale e da esami di casi di comunità esposte al rumore, si è rivelata quella che meglio esprime l'entità degli effetti del rumore sulle persone, in particolare degli effetti indiretti riassunti nella generica accezione di "disturbo", tanto che tale metodo è attualmente quello raccomandato dalla FAA (Federal Aviation Administration) degli Stati Uniti.

A ciò si aggiunge il vantaggio dovuto alla minore complessità del calcolo del SEL rispetto al calcolo dell'EPNL, previsto nel metodo ICAO, e quindi alla maggiore semplicità delle relative apparecchiature di misura, per cui il metodo dell'ISO 3891 basato sulla curva di ponderazione A è quello che si è ritenuto più opportuno adottare per le finalità della valutazione delle zone di influenza acustica sul territorio connesse al traffico aereo.

Comunque, data la correlazione approssimata esistente tra il Livello Sonoro Giorno Notte L_{DN} ed il Livello Continuo Equivalente Pesato di Rumore Percipito WECPNL, espressa dalla

$$L_{DN} + 13 = \text{WECPNL} \quad (5)$$

dai valori dell' L_{DN} si può passare agevolmente ai valori approssimati ma comunque sufficientemente indicativi del WECPNL [3].

3. TECNICHE E STRUMENTAZIONI DI RILEVAMENTO FONOMETRICO

In relazione alla scelta del metodo per descrivere il rumore degli aeromobili basato su misurazioni

effettuate con la curva di ponderazione "A" e di cui alla norma ISO 3891 - 1978 le tecniche di rilevamento fonometrico sono le seguenti:

- Campionamenti nel tempo dei Livelli di Pressione Sonora Ponderata "A" (L_{pA}) istantanei di singole operazioni di volo.

Lo scopo di tali campionamenti è quello di determinare in una successiva elaborazione al PC per il punto al suolo costituito dalla postazione fissa sotto la traiettoria di sorvolo un congruo numero di valori del SEL (sono sufficienti 4-6 valori) per ciascun tipo di aereo in decollo o in atterraggio in modo da poter derivare un valore medio su base energetica atto a rappresentare significativamente l'evento di rumore nel punto considerato.

- Rilevamenti diretti sul fonometro dei SEL di operazioni di volo per controllo nella successiva elaborazione al PC dei campionamenti degli L_{pA} istantanei di operazioni di volo.

Per quanto riguarda gli aeromobili dell'Aviazione Generale sia per il grandissimo numero di tipi esistenti sia per la loro modesta influenza sulla situazione acustica, nel metodo qui proposto per semplicità viene considerato per tutti i tipi un solo valore medio del SEL per i decolli ed uno per gli atterraggi, media derivata su base energetica dei rilevamenti effettuati nella postazione fissa.

- Campionamenti nel tempo dei Livelli di Pressione Sonora Ponderata "A" (L_{pA}) istantanei in dBA del rumore residuo in assenza di operazioni di volo; questi campionamenti sono necessari per controllare l'eventuale influenza del rumore residuo sul rumore degli aeromobili.

I rilevamenti suddetti devono essere effettuati da postazioni fisse una per ciascuna testata pista; ciascuna postazione al livello del terreno deve essere sistemata ad una distanza sul prolungamento dell'asse della pista compresa fra 900 e 1200 metri dalla testata più prossima; la distanza di 1000 m sarebbe comunque quella più opportuna. In tal modo la postazione viene a trovarsi esattamente sotto la traiettoria dei velivoli sia in decollo che in atterraggio. La postazione inoltre deve essere sufficientemente distante da ostacoli di grande estensione ed altezza in modo da essere esente da riflessioni importanti e non deve essere soggetta ad un rumore residuo superiore a 60 dBA.

A titolo di controllo delle misure effettuate nelle postazioni fisse relative a ciascuna testata pista può essere opportuna l'installazione di altre due postazioni poste lateralmente circa alla stessa distanza dalla testata in posizione simmetrica ai due lati della proiezione al suolo della traiettoria di sorvolo dei velivoli.

Nelle postazioni fisse è opportuno per scopi di controllo dei campionamenti effettuare anche una

registrazione fonometrica in continuo nel tempo, almeno durante tutto il periodo diurno.

Le postazioni di misura, ovviamente presenziate in continuità, sono costituite da un fonometro integratore di precisione di classe 1 dotato anche di rilevamento diretto del SEL e da registratore digitale collegato al fonometro sul quale vengono registrati i valori istantanei dei Livelli di Pressione Sonora Ponderata "A".

Poiché per ogni evento registrato di rumore connesso ad una operazione di volo devono essere esattamente individuati sia la sorgente sia il momento in cui l'evento si verifica, è indispensabile che la postazione fissa sia in tempo reale collegata con telefono cellulare o con radiotelefono con la torre di controllo dell'aeroporto per l'identificazione simultanea al rilievo fonometrico del tipo di aereo e della relativa operazione di volo.

Durante il rilievo è opportuno pertanto annotare in una apposita scheda l'ora esatta dell'evento di rumore, il tempo segnato sul registratore, il tipo di aereo ed il tipo di operazione di volo; nella stessa scheda per controllo nella elaborazione successiva al computer dei dati registrati occorre anche annotare il valore del SEL letto al fonometro e la durata in secondi dell'evento in questione.

I rilievi vanno effettuati in favorevoli condizioni meteorologiche, cioè in calma di vento ed in assenza di pioggia, neve e nebbia e possibilmente con temperatura dell'aria compresa tra i 10 e i 25° C.

4. MODELLO DEI MOVIMENTI DEGLI AEROMOBILI E RELATIVI SEL

Al fine di determinare la situazione acustica globale sul territorio prossimo ad un aeroporto deve essere elaborato un modello medio del traffico giornaliero riferito all'intero anno, o eventualmente due, uno per il periodo estivo, l'altro per il periodo invernale se gli orari dei voli sono diversi, come generalmente accade, nei due periodi.

Occorre individuare anche il numero medio giornaliero di atterraggi ed il numero medio giornaliero di decolli che interessano ciascuna testata pista nonché le ore in cui i movimenti avvengono.

I modelli devono essere elaborati considerando tutto il traffico di aeromobili che fanno capo all'aeroporto in esame, cioè sia quelli da trasporto passeggeri, merci e posta dell'aviazione commerciale, sia quelli dell'aviazione generale, sia infine, se presenti, quelli dell'aviazione militare.

Per quanto riguarda l'aviazione commerciale, avendo a disposizione gli orari ufficiali della Società di gestione dell'Aeroporto è generalmente possibile elab-

borare un modello medio di orario giornaliero per i voli di linea ed i voli postali, con l'indicazione del tipo di velivoli impiegati. La Società di gestione è di norma in grado di fornire anche i dati sui movimenti degli aeromobili per merci essendo anche questi sotto la sua giurisdizione.

Per quanto riguarda i movimenti dell'Aviazione Generale e dell'Aeronautica militare, poiché essi sono registrati dall'Azienda Autonoma di Assistenza al Volo presente nell'aeroporto, la stessa può fornire i dati circa i movimenti di tutti i tipi di aeromobili che si sono verificati nei due o tre anni immediatamente precedenti, in modo da poter fare una stima dei movimenti giornalieri.

Il modello infine comprende l'attribuzione ad ogni movimento di volo del corrispondente valore del Livello di Esposizione a Singolo Evento SEL determinato con i rilievi fonometrici nelle postazioni fisse.

Pertanto il modello di traffico complessivo giornaliero nell'arco sia delle ore diurne (07.00 - 22.00) che delle ore notturne (22.00 - 07.00) è costituito dai seguenti elementi:

- a) Orari atterraggi e decolli dei voli di linea
Tipo di velivolo operante in ciascun movimento
SEL medio calcolato per movimento di ciascun tipo di velivolo.
- b) Orari atterraggi e decolli dei voli postali
Tipo di velivolo operante in ciascun movimento
SEL medio calcolato per movimento in ciascun tipo di velivolo.
- c) Numero atterraggi e decolli giornalieri dell'aviazione generale
SEL medio calcolato per movimento
- d) Numero di atterraggi e decolli giornalieri dell'aviazione militare
Tipo di velivolo operante in ciascun movimento
SEL medio calcolato per movimento di ciascun tipo di velivolo.
- e) Numero di atterraggi e decolli giornalieri voli charter
Tipo di velivolo operante in ciascun movimento
SEL medio calcolato per movimento di ciascun tipo di velivolo.
- f) Numero di atterraggi e decolli giornalieri per voli addestramento aviazione generale
SEL medio calcolato per movimento.

Occorre precisare che il modello di traffico annuale o estivo e invernale da adottare è quello che più frequentemente si verifica nel periodo considerato e quindi non rappresenta una semplice media aritmetica dei movimenti giornalieri.

5. IL CALCOLO DEI VALORI DELLA RUMOROSITÀ INDOTTA SUL TERRITORIO DI CIASCUNA OPERAZIONE DI VOLO

Il metodo semplificato per il calcolo dei valori della rumorosità indotta sul territorio qui proposto si avvale di due distinti sistemi di dati [4]:

- *dati sperimentali* sulla rumorosità indotta al suolo rilevati in un'unica stazione fissa di rilevamento per ogni testata pista collegati al modello di traffico dell'aeroporto;

dati teorici e procedure di calcolo ricavati dal metodo SAE AIR 1114 "Procedure for Developing Aircraft Noise Exposure contours Around Airport", adattato per le grandezze acustiche qui considerate [5].

I dati sperimentali assunti come base di ingresso del metodo di calcolo qui descritto sono pertanto i seguenti:

- modello giornaliero delle operazioni di volo degli aeromobili
- SEL delle operazioni di volo per ogni tipo di aeromobile nella postazione fissa di rilievo fonometrico sotto le traiettorie di atterraggio e decollo.

Partendo da tali dati mediante la procedura di calcolo proposta nel documento SAE AIR 1114 opportunamente modificata per tener conto delle diverse grandezze acustiche considerate si determinano i valori SEL al suolo in ogni altro punto sotto ed a lato della traiettoria durante il volo, ciascuno individuato sul piano da un opportuno sistema di coordinate di riferimento, tenendo conto dei seguenti parametri:

- traiettoria di decollo o atterraggio;
- distanza minima dalla traiettoria alla posizione al suolo;
- tipo di velivolo;
- tipo di operazione, decollo o atterraggio;
- attenuazione atmosferica sul percorso di propagazione del suono;
- attenuazione superficiale quando l'aereo è in prossimità del suolo;
- schermatura della fusoliera.

Coordinate di riferimento

Le coordinate dei punti sul piano orizzontale costituito dal terreno sono riferite per ogni testata pista presa in considerazione a due sistemi di assi coordinati ortogonali X e Y aventi diversa origine uno per gli atterraggi ed uno per i decolli.

Per gli atterraggi l'origine è in un punto posto sull'asse della pista a distanza di 350 m dalla testata considerata, punto corrispondente al touch down di

quella testata degli aeromobili in fase di atterraggio, e l'asse X coincide con la proiezione sul piano orizzontale della traiettoria di atterraggio. Sull'asse X a 1350 metri dall'origine si trova la postazione di rilevamento fonometrico dalla quale vengono attinti i dati sperimentali del metodo relativi agli atterraggi.

Per i decolli, l'origine si trova a 800 m dalla testata considerata e l'asse X coincide con la proiezione sul piano orizzontale della traiettoria di atterraggio; la postazione fissa viene pertanto a trovarsi per i decolli a 1800 metri dall'origine.

Distanza minima

La distanza "minima" del punto al suolo dalla traiettoria di volo viene definita come la lunghezza dell'immaginario segmento di retta compreso tra il punto considerato al suolo e la traiettoria del velivolo e che forma l'ipotenusa di un triangolo i cui cateti sono normali alla proiezione sul piano orizzontale della traiettoria nel loro punto di contatto con la medesima.

Tale distanza è definita dalle relazioni geometriche di cui alla Fig. 1 ed è data dalla seguente equazione dove z rappresenta la quota in altezza:

$$d_{\min} = (Y^2 + Z^2)^{1/2} \quad (6)$$

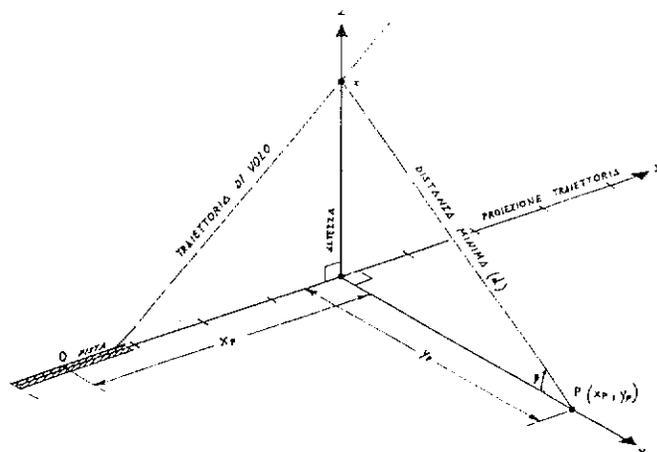


Fig. 1 - Relazioni geometriche sulla "distanza minima" dalla traiettoria

Traiettorie di decollo

Il decollo e le prestazioni di salita di un velivolo dipendono da numerosi fattori quali il peso al decollo, l'elevazione della pista, la spinta dei motori e le condizioni metereologiche.

Agli effetti della valutazione dei livelli di rumore sul territorio la maggior parte dei suddetti fattori possono peraltro essere considerati in maniera abbastanza semplice.

Le spinte di decollo assunte sono quelle massime e si considerano costanti fino alla quota di 5.000 piedi.

Il peso al decollo è costituito dal peso del velivolo, dal peso del carico pagante (merci e passeggeri) e dal peso del combustibile; quest'ultimo, preponderante rispetto al secondo, dipende dalla lunghezza di tratta cioè dalla distanza che il velivolo deve percorrere per giungere a destinazione. A parità di carico pagante è dunque il peso del combustibile e quindi la lunghezza di tratta che determina il profilo di decollo e la lunghezza del rullaggio sulla pista necessaria a raggiungere la velocità di decollo.

Tali profili per i grandi velivoli da trasporto dell'Aviazione Civile hanno pendenze variabili dal 8,8% al 17% ed iniziano alla quota zero, alla distanza dalla testata di rilascio freni rispettivamente di 1900 m e di 3500 m in dipendenza delle diverse corse di rullaggio necessarie all'involo.

Poiché la maggior parte dei decolli dei grandi velivoli da trasporto avviene su profili intermedi interessando la maggior parte dei collegamenti aerei tratte di media distanza, a scopo di semplificazione dei calcoli nel metodo qui descritto si è assunto per tutti i velivoli un unico profilo di decollo, quello avente una pendenza media compresa fra la massima e la minima, pari al 13% cui corrisponde a quota zero una distanza dalla testata di rilascio freni di 2500 m (con rullaggio pari a circa 2200 m) come rappresentato nella Fig. 2.

L'equazione del profilo unico di decollo assunto è la seguente assumendo come origine delle coordinate il punto posto a 2500 m dalla testata di rilascio freni:

$$Z = 0.13 X + 104 \quad (7)$$

Assumendo un tale profilo fisso per tutti i decolli le differenze che si possono verificare nei singoli SEL dei decolli in corrispondenza del punto di rilevamento sono di circa 7 dB in meno rispetto ai SEL relativi ai profili con pendenza minima del 8,8% e di circa 4 dB in più rispetto ai SEL relativi ai profili con pendenza massima del 17%, come risulta dai dati disponibili in letteratura (curve generalizzate del SEL in funzione della "distanza minima" dalla traiettoria).

Queste differenze nei SEL in un modello in cui il 10% dei decolli avvenga sul profilo meno ripido ed il 10% sul profilo più ripido comporta una differenza in meno nei valori calcolati di rumorosità al suolo espressi in Livello Continuo Equivalente di 2,01 dB, quindi nei limiti di approssimazione assunti per il metodo semplificato.

Traiettorie di atterraggio

Le traiettorie di atterraggio sia in avvicinamento strumentale (ILS) che in avvicinamento visivo (VLS) sono tutte della medesima pendenza. Il profilo di atterraggio è dunque una traiettoria di planata costituita da una linea retta facente un angolo di 3°

con il piano orizzontale con una pendenza quindi di circa il 5,2% fino ad un punto di contatto sulla pista (touch down) posto a 350 metri oltre la testata pista.

L'equazione del profilo di atterraggio è allora la seguente, assumendo il punto touch down come origine delle coordinate:

$$Z = 0,0492 X + 17,23 \quad (8)$$

Caratteristiche acustiche degli aeromobili

La procedura di calcolo del documento SAE AIR 1114 cui si fa qui riferimento riporta i livelli generalizzati di rumore EPNL dei grandi velivoli da trasporto con motori turbogetto e turbofan (sia a basso che ad alto rapporto di diluizione) in funzione della cosiddetta distanza minima includendo gli effetti dell'assorbimento dell'atmosfera nelle condizioni di riferimento (livello del mare, 15°C, u.r. 70%, vento 0 m/s); tali livelli sono stati derivati da misure condotte su un esteso numero di operazioni di sorvolo sia durante prove controllate che durante normali operazioni di voli commerciali e sono rappresentati per ciascuna operazione di volo (decollo o atterraggio) da due curve in assi cartesiani in funzione della distanza minima una per i quadrimotori e una per i trimotori e bimotori con opportune correzioni per i diversi tipi di motori.

Dai valori dei livelli EPNL si può passare immediatamente ai corrispondenti valori SEL mediante la relazione approssimata

$$SEL = EPNL - 3 \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

di conseguenza le variazioni dell'EPNL con la distanza sono uguali alle corrispondenti variazioni del SEL.

Disponendo di dati sperimentali ricavati sul posto dei valori SEL nella postazione fissa e relativi quindi ad una certa distanza minima fissa dalla traiettoria, nel calcolo semplificato qui proposto non interessano tanto i valori assoluti generalizzati del SEL in funzione della distanza quanto le variazioni del SEL in funzione della stessa distanza minima.

Pertanto in base dalle curve EPNL vs/distanza minima del suddetto documento SAE sono stati calcolati per gli atterraggi e per i decolli i valori della variazione del Livello di Esposizione a Singolo Evento $\Delta_1(\text{SEL})$ mediati fra le due categorie di aeromobili (turbogetto e turbofan) sopra indicate in funzione della distanza minima prendendo come distanza minima di riferimento quella dalla postazione fissa di misura alla traiettoria [6].

Si sono pertanto individuate le curve che rappresentano la variazione di Livello $\Delta_1(\text{SEL})$ in funzione della distanza minima dalla traiettoria per i decolli e per gli atterraggi assumendo come detto $\Delta_1(\text{SEL}) = 0$ alla distanza minima presa come riferimento (Fig. 3 e Fig. 4).

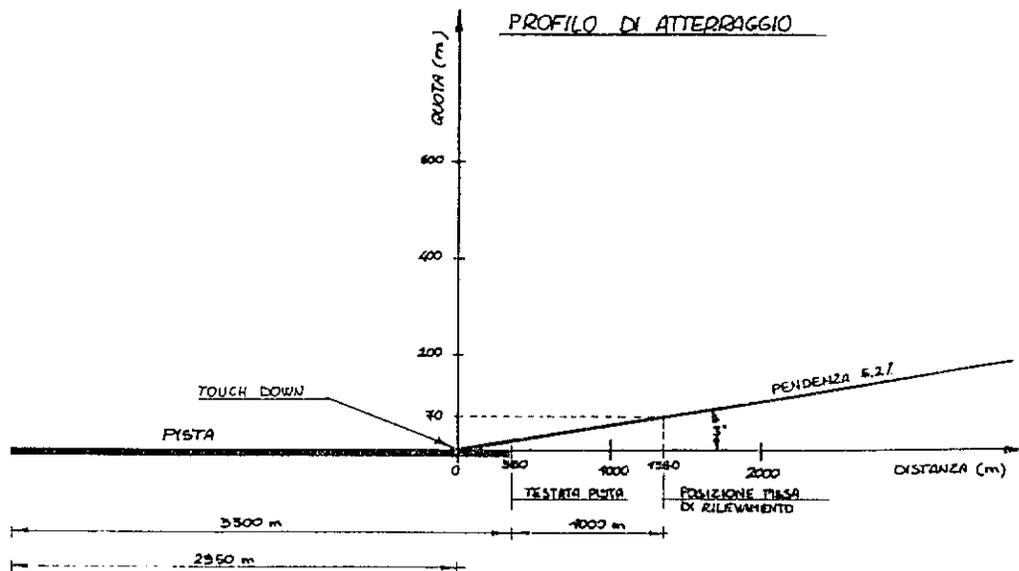
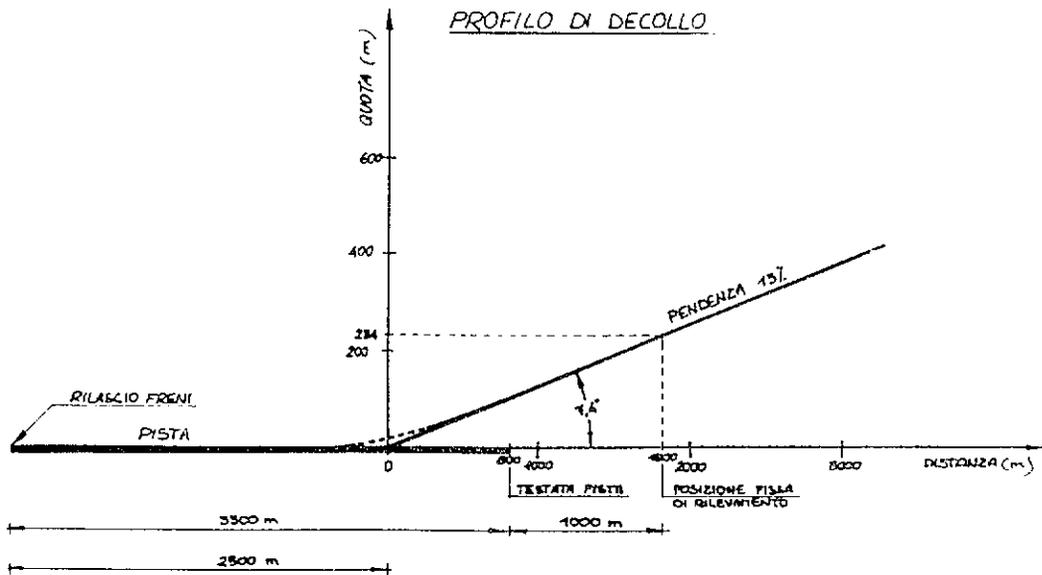
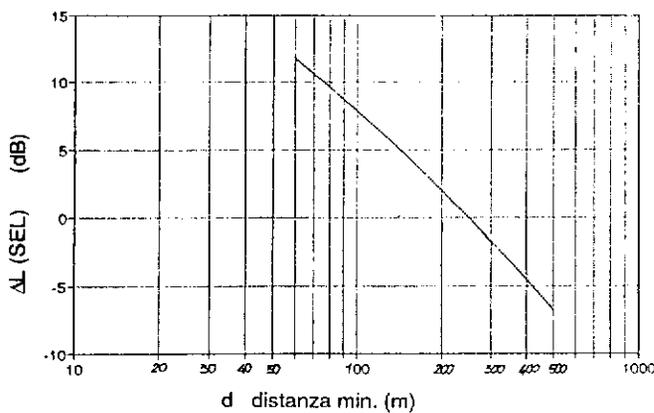
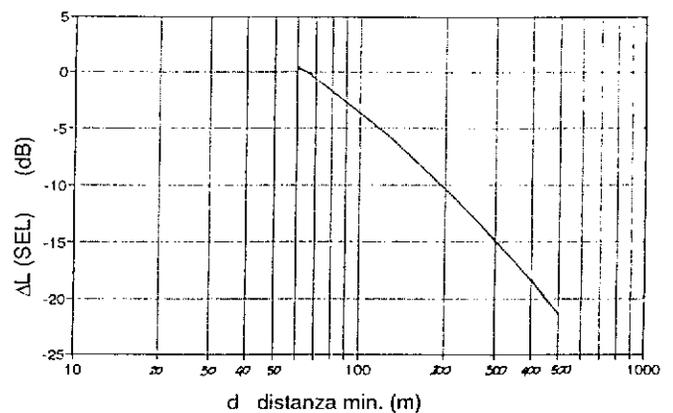


Fig. 2 - Profili di decollo e di atterraggio assunti nel metodo



$$\Delta L = -3,92 [\log(d)]^2 - 2,54[\log(d)] + 28,66$$

$\Delta L = 0$ alla distanza minima di riferimento pari a 234 m dalla traiettoria



$$\Delta L = -7,227 [\log(d)]^2 + 8,5907[\log(d)] + 8,1297$$

$\Delta L = 0$ alla distanza minima di riferimento pari a 70 m dalla traiettoria con angolo di discesa di 3°

Fig. 3 - Variazioni del livello SEL in funzione della distanza minima per i decolli

Fig. 4 - Variazioni del livello SEL in funzione della distanza minima per gli atterraggi

Tali curve sono espresse dalle seguenti equazioni polinomiali:

Atterraggi:

$$\Delta_1(\text{SEL})_{\text{RIF}} = -7,227 [\log(d)]^2 + 8,5907 [\log(d)] + 8,1297 \quad (\text{dB}) \quad (10)$$

Decolli:

$$\Delta_1(\text{SEL})_{\text{RIF}} = -3,92 [\log(d)]^2 + 2,54 [\log(d)] + 28,66 \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

Da tali variazioni si desume il valore del SEL in qualunque punto al suolo, con coordinate X ed Y, dal SEL della postazione fissa mediante la correzione per diversa distanza minima dalla traiettoria come sopra definita con le seguenti espressioni:

Atterraggi:

$$\text{SEL}(X,Y) = \text{SEL}_{\text{RIF}} - \Delta_1(\text{SEL})_{\text{RIF}} \quad (12)$$

Decolli:

$$\text{SEL}(X,Y) = \text{SEL}_{\text{RIF}} - \Delta_1(\text{SEL})_{\text{RIF}} \quad (13)$$

Attenuazione superficiale

Quando il velivolo è al suolo o vicino al suolo oltre alla attenuazione atmosferica si verifica un'altra attenuazione, detta attenuazione superficiale, nella propagazione del rumore agli altri punti al suolo a causa della rifrazione risultante dal gradiente di temperatura e dalle correnti d'aria, dell'assorbimento del terreno e di altri effetti.

Tale attenuazione dipende dall'angolo di elevazione β fra la retta della "distanza minima" e la sua proiezione al suolo (vedi Fig. 1).

L'attenuazione superficiale $\Delta_2(\text{SEL})$ per incidenza radente da prendere in considerazione quando l'aereo è al suolo è stata espressa in base ai dati contenuti nel documento SAE AIR 1114 ed è in funzione della distanza minima d in metri valevole fino a 500 m che è quella massima considerata nel metodo qui descritto secondo la seguente equazione polinomiale:

Atterraggio:

$$\delta = 10,18 (\log d)^2 - 36,05 (\log d) + 33,68 \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

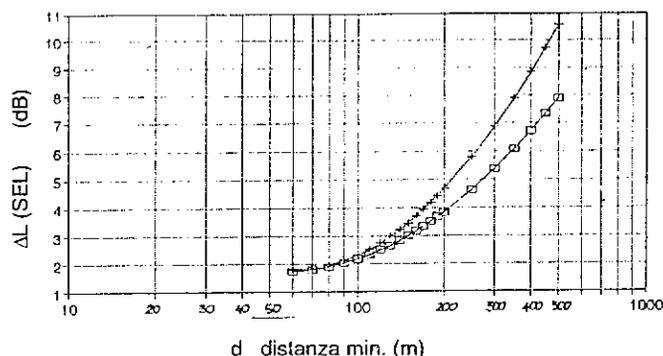
Decollo:

$$\delta = 6,67 (\log d)^2 - 23,14 (\log d) + 21,8 \quad (\text{dB}) \quad (15)$$

Tali funzioni sono rappresentate dal diagramma di Fig. 5.

Quando l'aereo è in volo vicino al suolo ad un angolo di elevazione $\beta < 30^\circ$, l'attenuazione è allora data dalla relazione:

$$\Delta_2(\text{SEL}) = \delta \cdot \exp(-\text{tg } 3 \beta)^{1/2} \quad (\text{dB}) \quad (16)$$



ATERRAGGIO	$\delta = 10,18 [\log(d)]^2 - 36,05[\log(d)] + 33,68$
DECOLLO	$\delta = 6,67 [\log(d)]^2 - 23,14[\log(d)] + 21,8$

Fig. 5 - Correzione per incidenza radente

Schermatura dei motori

Quando il velivolo si trova sulla pista o in aria ma vicino al suolo la fusoliera "schermata" i punti sul terreno situati a lato della traiettoria dal rumore dei motori che si trovano sul lato opposto.

La correzione, di segno negativo, che occorre apportare ai valori del SEL al suolo, solo per valori di β inferiori a 50° , è data dalla seguente relazione in funzione dell'angolo di elevazione β :

$$\Delta_3(\text{SEL}) = 3 [1 - (\text{sen } \beta)^{1/2}] \quad (\text{dB}) \quad (17)$$

Valori SEL

I valori del SEL su ogni punto del piano orizzontale che rappresenta il terreno definito dalle coordinate X, Y sono pertanto calcolati, per ogni operazione di volo, derivandoli dal valore SEL di riferimento determinato con i rilevamenti fonometrici effettuati nella postazione fissa mediante la seguente equazione:

$$\text{SEL}(X, Y) = \text{SEL}_{\text{RIF}} - \Delta_1(\text{SEL})_{\text{RIF}} - \Delta_2(\text{SEL})_{\text{RIF}} - \Delta_3(\text{SEL})_{\text{RIF}}$$

in cui Δ_1 rappresenta la correzione per la distanza, Δ_2 quella per l'incidenza radente e Δ_3 quella per la schermatura motori.

6. CALCOLO DEI VALORI DELLA RUMOROSITÀ INDOTTA SUL TERRITORIO DA UN INSIEME GIORNALIERO DI OPERAZIONI DI VOLO

Combinando i SEL relativi alle diverse operazioni di volo ed ai diversi tipi di velivoli con il modello di traffico giornaliero come sopra definito, si può calcolare il Livello Sonoro Giorno Notte al suolo nei vari punti del reticolo prefigurato sul piano orizzontale con maglie di 50 m di lunghezza con la formula:

$$L_{DN} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{\frac{SEL(i)}{10}} \cdot N_{D(i)} + \sum_{i=1}^n 10^{\frac{SEL(i)+10}{10}} \cdot N_{N(i)} \right] - 10 \log 84600 \quad (19)$$

dove $SEL_{(i)}$ rappresenta il Livello Sonoro di Esposizione a Singolo Evento dell'evento (i) di operazione di volo (decollo o atterraggio) di un certo tipo di velivolo, $N_{D(i)}$ è il numero degli eventi diurni della categoria (i)esima ed $N_{N(i)}$ il numero degli eventi notturni della categoria (i)esima.

Dai valori discreti dei livelli L_{DN} sui vari punti del reticolo è possibile redarre quindi la mappatura spaziale dell'inquinamento acustico prodotto dal traffico aereo dell'aeroporto. Tale mappatura rappresenta graficamente l'esposizione al rumore mediante curve isolivello L_{DN} tracciate sulla planimetria della zona, cioè curve luogo dei punti di uguale livello di esposizione giorno-notte L_{DN} ; il tracciato di questi contorni definisce la distribuzione spaziale su tutto il territorio della rumorosità indotta dall'attività aeroportuale [7].

Nella Fig. 6 sono state riportate le mappature delle curve isolivello calcolate con il metodo qui descritto per una testata pista di un aeroporto italiano nella quale prevalgono gli atterraggi.

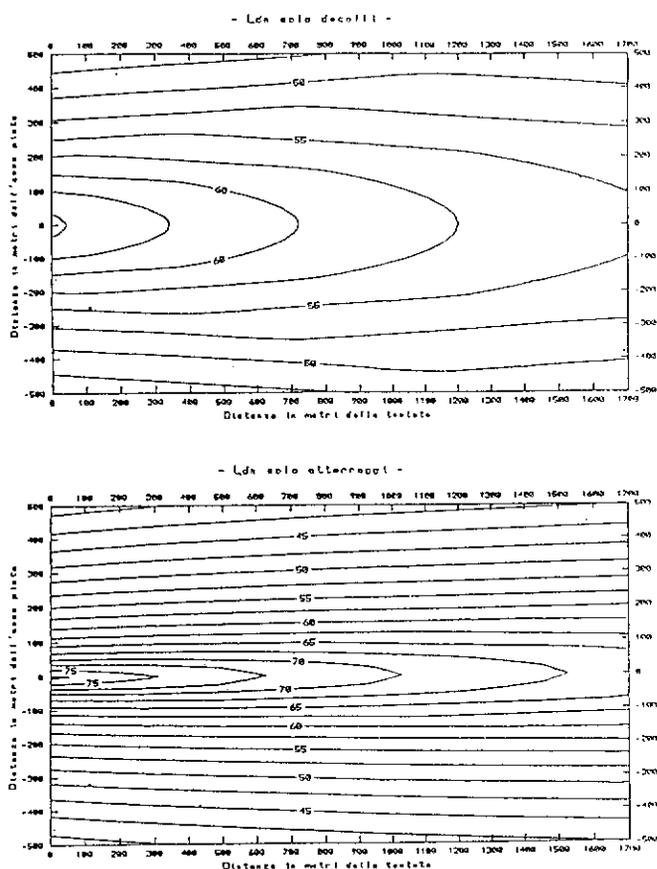


Fig. 6 - Mappature delle curve isolivello

Il metodo qui descritto può essere utilizzato per valutare il contributo singolo delle varie Aviazioni (commerciale, generale e militare), nonché le possibili riduzioni di rumore ottenibili con varie ipotesi di bonifica acustica quali ad esempio la sostituzione dei vecchi modelli di aerei con i nuovi meno rumorosi, il divieto di operazioni di volo nelle ore notturne e l'effetto combinato delle due ipotesi suddette.

SIMBOLI

d	Distanza minima
dB	Decibel
EPNL	Livello Effettivo di Rumore Percepito (Effective Perceived Noise Level)
L_{AeqT}	Livello Sonoro Equivalente Continuo nel periodo di tempo T
L_D	Livello Equivalente Continuo nelle ore diurne
L_{DN}	Livello Sonoro Giorno Notte
L_N	Livello Equivalente Continuo nelle ore notturne
L_{pA}	Livello di Pressione Sonora Ponderata A
N	Numero di eventi di rumore
N_D	Numero di eventi diurni
N_N	Numero di eventi notturni
PNL	Livello di Rumore Percepito (Perceived Noise Level)
SEL	Livello di Esposizione a Singolo Evento (Sound Exposure Level)
t	Tempo in secondi
T	Periodo di tempo in secondi
t_0	Tempo di riferimento pari a 1 s
T_0	Tempo di riferimento pari a 10 s
WECPNL	Livello Equivalente Continuo Pesato di Rumore Percepito (Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level)
β	Angolo di elevazione
δ	Variazione dell'attenuazione superficiale
Δ	Variazione di livello

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Annex 16. International standards and recommended practices Environmental Protection, Aircraft Noise, Aircraft Engine Emissions*, ICAO, Montreal, Canada, 1981.
- [2] *ISO 3891 Acoustics procedure for describing aircraft noise heard on the ground*, International Standard Organization, 1978.

- [3] L. Rocco, *Esposizione al rumore degli aerei: tecniche di valutazione*. L'Aereotecnica Missili e Spazio, n. 3, 1977.
- [4] W.J. Galloway, *Community noise exposure resulting from aircraft operations: technical review*, BBN Report AMRL - TR - 73 - 106, November 1974.
- [5] SAE AIR 1114, *Procedure for developing aircraft noise exposure contours around airport.*, 1974.
- [6] L. Rocco, *L'evoluzione della tecnologia aeronautica nel contenimento del rumore sul territorio*, Rivista Italiana di Acustica, Vol. XII, n. 2, Giugno 1988.
- [7] L. Rocco, A. Mercanti, *Monitoraggio dell'inquinamento acustico sulle aree aeroportuali*, Bollettino Ingegneri n. 11, Novembre 1992.

ABSTRACT

The present article describes a method for measuring noise which enables the role that air traffic plays in the acoustic situation of a given territory to be ascertained. This method has already been experimented

and has proved reliable for air-ports with simple shapes and can be adapted to any type of air-port lay-out.

The article indicates which acoustic parameters should be measured to describe the noise produced by planes in flight and during take-off and landing. It also describes how these measurements should be taken, which techniques and instruments should be used, indicates the experimental data to acquire and the traffic model to elaborate.

The over-all acoustic situation created by the various take-offs and landings of the different types of air-craft operating from the air-port considered can be determined using this traffic model.

The article also describes methods for calculating the noise levels induced in a given area by daily flights operations. These noise levels can be used to chart a map of the acoustic pollution present in the area under survey.