



COMMISSIONE  
EUROPEA

Bruxelles, **XXX**  
D034332/03  
[...] (2014) **XXX** draft

**DIRETTIVA ../.../UE DELLA COMMISSIONE**

**del **XXX****

**che stabilisce metodi comuni per la determinazione del rumore a norma della direttiva  
2002/49/CE**

(Testo rilevante ai fini del SEE)

## DIRETTIVA ../.../UE DELLA COMMISSIONE

del **XXX**

**che stabilisce metodi comuni per la determinazione del rumore a norma della direttiva 2002/49/CE**

(Testo rilevante ai fini del SEE)

LA COMMISSIONE EUROPEA,

visto il trattato sul funzionamento dell'Unione europea,

vista la direttiva 2002/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 giugno 2002, relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale<sup>1</sup>, in particolare l'articolo 6, paragrafo 2,

considerando quanto segue:

- (1) La direttiva 2002/49/CE, ai sensi del suo articolo 1, mira a definire un approccio comune volto ad evitare, prevenire o ridurre, secondo le rispettive priorità, gli effetti nocivi, compreso il fastidio, dell'esposizione al rumore ambientale. A tal fine gli Stati membri determinano l'esposizione al rumore ambientale mediante la mappatura acustica realizzata sulla base di metodi di determinazione comuni agli Stati membri, garantiscono l'informazione del pubblico in merito al rumore ambientale e ai relativi effetti e adottano piani d'azione in base ai risultati della mappatura acustica, allo scopo di evitare e ridurre il rumore ambientale laddove necessario, in particolare, quando i livelli di esposizione possono avere effetti nocivi per la salute umana, nonché di conservare la qualità acustica dell'ambiente quando questa è buona.
- (2) Ai sensi dell'articolo 5 della direttiva 2002/49/CE, gli Stati membri utilizzano i descrittori acustici ( $L_{den}$  e  $L_{night}$ ) di cui all'allegato I di tale direttiva per l'elaborazione e la revisione della mappatura acustica strategica a norma dell'articolo 7.
- (3) A norma dell'articolo 6 della direttiva 2002/49/CE, i valori dei descrittori acustici ( $L_{den}$  e  $L_{night}$ ) sono stabiliti secondo i metodi di determinazione definiti nell'allegato II di tale direttiva.
- (4) A norma dell'articolo 6 della direttiva 2002/49/CE, la Commissione definisce metodi comuni per la determinazione degli indicatori acustici  $L_{den}$  e  $L_{night}$  mediante revisione dell'allegato II.
- (5) A norma dell'articolo 7 della direttiva 2002/49/CE, gli Stati membri provvedono affinché le mappe acustiche strategiche siano elaborate entro il 30 giugno 2007 e il 30

---

<sup>1</sup> GUL 189 del 18.7.2002, pag. 12.

giugno 2012, e successivamente riesaminate e, se necessario, modificate almeno ogni cinque anni.

- (6) La direttiva 2002/49/CE stabilisce che i piani d'azione devono basarsi su mappe acustiche strategiche. Le mappe acustiche strategiche sono elaborate avvalendosi dei metodi comuni di determinazione se tali metodi sono stati adottati dagli Stati membri. Tuttavia, gli Stati membri possono usare altri metodi per elaborare le misure volte ad affrontare le priorità individuate utilizzando i metodi comuni, nonché per valutare altre misure nazionali volte a prevenire e ridurre il rumore ambientale.
- (7) Nel 2008 la Commissione ha avviato lo sviluppo del quadro metodologico comune per la determinazione del rumore nell'ambito del progetto "Metodi comuni per la valutazione del rumore nell'UE" ("CNOSSOS-EU") sotto la guida del Centro comune di ricerca (JRC). Il progetto è stato realizzato in stretta consultazione con il comitato istituito a norma dell'articolo 18 della direttiva 2000/14/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'8 maggio 2000, sul ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri concernenti l'emissione acustica ambientale delle macchine ed attrezzature destinate a funzionare all'aperto, e in collaborazione con altri esperti provenienti dagli Stati membri. I risultati sono stati pubblicati nella relazione di riferimento relativa a CNOSSOS-EU<sup>2</sup> del JRC.
- (8) L'allegato della presente direttiva della Commissione stabilisce i metodi di determinazione comuni. Gli Stati membri sono tenuti a utilizzare questi metodi a partire dal 31 dicembre 2018.
- (9) I metodi di determinazione previsti nell'allegato di tale direttiva devono, ai sensi del suo articolo 2, punto 1, essere adottati entro il 31 dicembre 2018 e fino a tale data gli Stati membri, ai sensi dell'articolo 6, paragrafo 2, della direttiva 2002/49/CE, possono continuare a utilizzare i metodi di determinazione esistenti che hanno precedentemente adottato a livello nazionale.
- (10) Ai sensi dell'articolo 12 della direttiva 2002/49/CE, la Commissione adatta l'allegato II al progresso tecnico e scientifico.
- (11) A parte l'adeguamento al progresso tecnico e scientifico in conformità dell'articolo 12 della direttiva 2002/49/CE, la Commissione si impegna a modificare l'allegato in base all'esperienza maturata dagli Stati membri.
- (12) I metodi di determinazione comuni devono anche essere utilizzati ai fini di altri atti legislativi dell'UE, laddove tali atti facciano riferimento all'allegato II della direttiva 2002/49/CE.
- (13) Le misure previste dalla presente direttiva sono conformi al parere del comitato istituito dall'articolo 13 della direttiva 2002/49/CE,

---

<sup>2</sup> Metodi comuni la valutazione del rumore in Europa (CNOSSOS-EU) — relazione di riferimento del JRC, EUR 25379 EN. Lussemburgo: Ufficio delle pubblicazioni ufficiali delle Comunità europee, 2012 - ISBN 978-92-79-25281-5

HA ADOTTATO LA PRESENTE DIRETTIVA:

*Articolo 1*

L'allegato II della direttiva 2002/49/CE è sostituito dal testo dell'allegato della presente direttiva.

*Articolo 2*

1. Gli Stati membri mettono in vigore le disposizioni legislative, regolamentari e amministrative necessarie per conformarsi alla presente direttiva entro il 31 dicembre 2018. Essi comunicano immediatamente alla Commissione il testo di tali disposizioni.

Quando gli Stati membri adottano tali disposizioni, queste contengono un riferimento alla presente direttiva o sono corredate di un siffatto riferimento all'atto della pubblicazione ufficiale. Le modalità del riferimento sono decise dagli Stati membri.

2. Gli Stati membri comunicano alla Commissione il testo delle disposizioni essenziali di diritto interno adottate nella materia disciplinata dalla presente direttiva.

*Articolo 3*

La presente direttiva entra in vigore il giorno successivo alla pubblicazione nella *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*.

*Articolo 4*

Gli Stati membri sono destinatari della presente direttiva.

Fatto a Bruxelles, il

*Per la Commissione  
A nome del presidente  
Karmenu VELLA  
Membro della Commissione*

**IT**  
**ALLEGATO**

**METODI DI DETERMINAZIONE DEI DESCRITTORI ACUSTICI**

di cui all'articolo 6 della direttiva 2002/49/CE

**1. INTRODUZIONE**

I valori di  $L_{den}$  e  $L_{night}$  devono essere determinati mediante calcolo nei punti di misurazione, utilizzando il metodo di cui al capitolo 2 e i dati di cui al capitolo 3. Le misurazioni possono essere eseguite secondo la procedura descritta nel capitolo 4.

**2. METODI COMUNI DI DETERMINAZIONE DEL RUMORE**

**2.1. Disposizioni generali - Rumore del traffico veicolare e ferroviario e dell'attività industriale**

*2.1.1. Definizioni degli indicatori, della banda e della gamma di frequenza*

Il calcolo del rumore deve essere definito nella gamma di frequenza tra 63 Hz e 8 kHz. I risultati della banda di frequenza devono essere forniti nel corrispondente intervallo di frequenze.

I calcoli sono effettuati in bande d'ottava per il rumore generato dal traffico veicolare, dal traffico ferroviario e dall'attività industriale, ad eccezione della potenza sonora delle sorgenti di rumore ferroviario, che viene calcolata in bande in terzi d'ottava. Sulla base dei risultati in bande d'ottava, per il rumore generato dal traffico veicolare, dal traffico ferroviario e dall'attività industriale, il livello di pressione sonora media a lungo termine ponderata A per il periodo diurno, serale e notturno, di cui all'allegato I e all'articolo 5 della direttiva 2002/49/CE, viene calcolato effettuando la sommatoria su tutte le frequenze:

$$L_{Aeq,T} = 10 \times \lg \sum_{i=1} 10^{(L_{eq,T,i} + A_i)/10} \quad (2.1.1)$$

dove

$A_i$  è la correzione mediante la ponderazione A secondo la norma CEI 61672-1

$i$  è l'indice della banda di frequenza

e  $T$  è il periodo, che può essere diurno, serale o notturno.

Parametri del rumore:

$L_p$	Livello di pressione sonora istantanea	[dB] (re. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
$L_{Aeq,LT}$	Livello sonoro a lungo termine globale $L_{Aeq}$ dovuto a tutte le sorgenti e le sorgenti immagine nel punto R	[dB] (re. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
$L_W$	Livello di potenza sonora "in situ" di una sorgente	[dB]

	puntiforme (in movimento o stazionaria)	(re. $10^{-12}$ W)
$L_{W,i,dir}$	Livello di potenza sonora "in situ" direzionale per la banda di frequenza $i$ -esima	[dB] (re. $10^{-12}$ W)
$L_{W'}$	Livello medio di potenza sonora "in situ" per metro di linea sorgente	[dB/m] (re. $10^{-12}$ W)

Altri parametri fisici:

$p$	Valore quadratico medio (r.m.s.) della pressione sonora istantanea	[Pa]
$p_0$	Pressione sonora di riferimento = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa	[Pa]
$W_0$	Potenza sonora di riferimento = $10^{-12}$ W	[watt]

### 2.1.2. Qualità

#### *Precisione dei valori di immissione*

Tutti i valori di immissione che incidono sul livello di emissione di una sorgente devono essere determinati con almeno una precisione corrispondente a un'incertezza pari a  $\pm 2$ dB(A) nel livello di emissione della sorgente (lasciando invariati tutti gli altri parametri).

#### *Utilizzo dei valori predefiniti*

Nell'applicazione del metodo, i dati immessi devono riflettere l'utilizzo effettivo. In generale, non bisogna ricorrere a ipotesi o valori di immissione predefiniti. È consentito ricorrere a ipotesi e valori di immissione predefiniti se la raccolta di dati reali comporta costi sproporzionatamente elevati.

#### *Qualità del software utilizzato per i calcoli*

Il software utilizzato per eseguire i calcoli deve essere conforme ai metodi descritti nel presente documento e tale conformità va dimostrata mediante la certificazione dei risultati con procedure di collaudo.

## 2.2. Rumore del traffico veicolare

### 2.2.1. Descrizione della sorgente

#### *Classificazione dei veicoli*

Per determinare la sorgente di rumore del traffico veicolare è necessario combinare l'emissione di rumore di ogni singolo veicolo che forma il flusso di traffico. Tali veicoli sono raggruppati in cinque categorie distinte in base alle loro caratteristiche di emissione di rumore:

Categoria 1: veicoli a motore leggeri

Categoria 2: veicoli medio-pesanti

Categoria 3: veicoli pesanti

Categoria 4: veicoli a motore a due ruote

Categoria 5: Categoria aperta

La categoria dei veicoli a motore a due ruote è suddivisa in due sottoclassi distinte, una per i ciclomotori e una per i motocicli più potenti. Tale suddivisione è dovuta alle differenze significative che questi veicoli presentano in termini di modalità di guida e numero di unità circolanti.

Le prime quattro categorie sono obbligatorie, la quinta invece è facoltativa. È stata prevista per gli eventuali nuovi veicoli che saranno sviluppati in futuro e che potrebbero presentare differenze tali in termini di emissione di rumore da giustificare la definizione di una categoria supplementare. In tale categoria potrebbero rientrare ad esempio i veicoli elettrici o ibridi o qualsiasi veicolo futuro sostanzialmente diverso da quelli delle categorie da 1 a 4.

I dettagli delle diverse classi di veicoli figurano nella tabella [2.2.a].

Tabella [2.2.a]: Classi di veicoli

<b>Categoria</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Categoria di veicoli nel sistema CE Omologazione dei veicoli completi<sup>1</sup></b>	
1	Veicoli a motore leggeri	Autovetture, furgoni $\leq 3,5$ tonnellate, SUV <sup>2</sup> , MPV <sup>3</sup> , inclusi rimorchi e roulotte	M1 e N1	
2	Veicoli medio-pesanti	Veicoli medio-pesanti, furgoni $> 3,5$ tonnellate, autobus, camper, ecc. a due assi e con pneumatici accoppiati sull'asse posteriore	M2, M3 e N2, N3	
3	Veicoli pesanti	Veicoli commerciali pesanti, vetture da turismo, autobus, con tre o più assi	M2 e N2 con rimorchio, M3 e N3	
4	Veicoli a motore a due ruote	4a	Ciclomotori a due, tre e quattro ruote	L1, L2, L6
		4b	Motocicli con e senza sidecar, tricicli e quadricicli	L3, L4, L5, L7
5	Categoria aperta	Da definire in base alle esigenze future	n.d.	

#### *Numero e posizione delle sorgenti sonore equivalenti*

In questo metodo ogni veicolo (categoria 1, 2, 3, 4 e 5) è rappresentato da una singola sorgente puntiforme con irraggiamento uniforme nel semispazio  $2-\pi$  al di sopra del suolo. La prima riflessione sulla superficie stradale è trattata in modo implicito. Come illustrato nella figura [2.2.a], questa sorgente puntiforme si trova a 0,05 m al di sopra della superficie stradale.

<sup>1</sup> Direttiva 2007/46/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 5 settembre 2007 (GU L 263 del 9.10.2007, p. 1), che istituisce un quadro per l'omologazione dei veicoli a motore e dei loro rimorchi, nonché dei sistemi, componenti ed entità tecniche destinati a tali veicoli

<sup>2</sup> Acronimo di Sport Utility Vehicle (veicolo utilitario sportivo)

<sup>3</sup> Acronimo di Multi-Purpose Vehicle (veicolo multifunzionale)

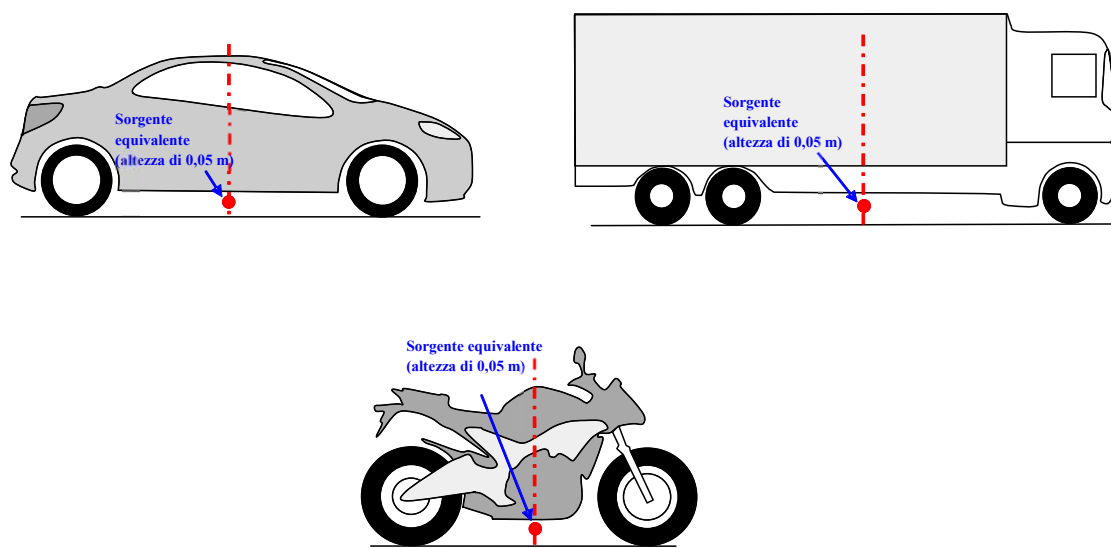


Figura [2.2.a]: Posizione della sorgente puntiforme equivalente sui veicoli leggeri (categoria 1), sui veicoli pesanti (categorie 2 e 3) e sui veicoli a due ruote (categoria 4)

Il flusso del traffico è rappresentato da una linea sorgente. Nella modellizzazione di una strada a più corsie, idealmente ogni corsia dovrebbe essere rappresentata da una linea sorgente posta al centro di ciascuna corsia. Tuttavia è accettabile anche modellizzare una linea sorgente al centro di una strada a doppio senso di marcia o una linea sorgente per carreggiata nella corsia esterna delle strade a più corsie.

#### *Emissione di potenza sonora*

##### *Osservazioni generali*

La potenza sonora della sorgente è definita in "campo semilibero"; essa comprende pertanto l'effetto della riflessione del suolo immediatamente al di sotto della sorgente modellizzata ove non siano presenti ostacoli nelle immediate vicinanze, ad eccezione della riflessione sulla superficie stradale che non si trova immediatamente al di sotto della sorgente modellizzata.

##### *Flusso di traffico*

L'emissione di rumore di un flusso di traffico è rappresentata da una linea sorgente caratterizzata dalla sua potenza sonora direzionale per metro e per frequenza. Essa corrisponde alla somma delle emissioni sonore dei singoli veicoli nel flusso di traffico, tenendo conto del tempo passato dai veicoli nel tratto stradale considerato. L'inserimento del singolo veicolo nel flusso richiede l'applicazione di un modello di flusso di traffico.

Presupponendo un flusso di traffico costante di  $Q_m$  veicoli della categoria  $m$  per ora, con una velocità media  $v_m$  (in km/h), la potenza sonora direzionale per metro nella banda di frequenza  $i$  della linea sorgente  $L_{W', eq, line, i, m}$  è definita con la seguente formula:



$$L_{W',eq,line,i,m} = L_{W,i,m} + 10 \times \lg \left( \frac{Q_m}{1000 \times v_m} \right) \quad (2.2.1)$$

dove  $L_{W,i,m}$  è la potenza sonora direzionale di un singolo veicolo.  $L_{W',m}$  è espresso in dB (re.  $10^{-12}$  W/m). Questi livelli di potenza sonora sono calcolati per ogni banda d'ottava i da 125 Hz a 4 kHz.

I dati del flusso di traffico  $Q_m$  sono espressi come media annuale per ora, per periodo (diurno-serale-notturno), per classe di veicoli e per linea sorgente. Bisogna utilizzare per tutte le categorie i dati di immissione del flusso di traffico risultanti dalla rilevazione del traffico o dai modelli di traffico.

La velocità  $v_m$  è una velocità rappresentativa per categoria di veicoli, che nella maggior parte dei casi corrisponde alla più bassa tra due velocità: la velocità massima consentita per il tratto stradale e la velocità massima consentita per la categoria di veicoli. Se non si dispone di dati acquisiti mediante misurazioni locali, occorre utilizzare la velocità massima consentita per la categoria di veicoli.

#### *Singolo veicolo*

Si presuppone che tutti i veicoli della categoria m nel flusso di traffico circolino alla stessa velocità, ossia  $v_m$ , la velocità media del flusso di veicoli della categoria.

Un veicolo stradale è modellizzato mediante una serie di equazioni matematiche che rappresentano le due principali sorgenti di rumore:

1. il rumore di rotolamento dovuto all'interazione tra pneumatico e strada;
2. il rumore da propulsione generato dalla trasmissione (motore, scappamento, ecc.) del veicolo.

Il rumore aerodinamico è compreso nella sorgente del rumore di rotolamento.

Per i veicoli a motore leggeri, medi e pesanti (categorie 1, 2 e 3), la potenza sonora totale corrisponde alla somma energetica del rumore di rotolamento e del rumore da propulsione. Pertanto il livello di potenza sonora totale delle linee sorgente  $m=1, 2$  o  $3$  è definito nel seguente modo:

$$L_{W,i,m}(v_m) = 10 \times \lg \left( 10^{L_{WR,i,m}(v_m)/10} + 10^{L_{WP,i,m}(v_m)/10} \right) \quad (2.2.2)$$

dove  $L_{WR,i,m}$  è il livello di potenza sonora per il rumore di rotolamento e  $L_{WP,i,m}$  è il livello di potenza sonora per il rumore da propulsione. Ciò vale per tutte le fasce di velocità. Per le velocità inferiori a 20km/h, il livello di potenza sonora è quello risultante dall'applicazione della formula per  $v_m=20$ km/h.

Nel caso dei veicoli a due ruote (categoria 4), viene preso in considerazione soltanto il rumore da propulsione per la sorgente:

$$L_{W,i,m=4}(v_{m=4}) = L_{WP,i,m=4}(v_{m=4}) \quad (2.2.3)$$

Ciò vale per tutte le fasce di velocità. Per le velocità inferiori a 20km/h, il livello di potenza sonora è quello risultante dall'applicazione della formula per  $v_m=20\text{km/h}$ .

### 2.2.2. Condizioni di riferimento

Le equazioni e i coefficienti della sorgente sono validi per le seguenti condizioni di riferimento:

- velocità costante del veicolo
- rettilineo
- temperatura dell'aria  $\tau_{ref} = 20 \text{ °C}$
- manto stradale di riferimento virtuale, costituito da una media di conglomerato bituminoso denso 0/11 e di asfalto splittmastix 0/11, di 2-7 anni, in uno stato di manutenzione rappresentativo
- fondo stradale asciutto
- pneumatici non chiodati.

### 2.2.3. Rumore di rotolamento

#### Equazione generale

Il livello di potenza sonora del rumore di rotolamento nella banda di frequenza  $i$  per un veicolo della classe  $m=1, 2$  o  $3$  è definito nel seguente modo:

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,i,m} \quad (2.2.4)$$

I coefficienti  $A_{R,i,m}$  e  $B_{R,i,m}$  sono indicati in bande d'ottava per ciascuna categoria di veicoli e per una velocità di riferimento  $v_{ref} = 70 \text{ km/h}$ .  $\Delta L_{WR,i,m}$  corrisponde alla somma dei coefficienti di correzione da applicare all'emissione del rumore di rotolamento per condizioni specifiche della strada o del veicolo che si discostano dalle condizioni di riferimento:

$$\Delta L_{WR,i,m} = \Delta L_{WR,road,i,m} + \Delta L_{studdedtyres,i,m} + \Delta L_{WR,acc,i,m} + \Delta L_{W,temp} \quad (2.2.5)$$

$\Delta L_{WR,road,i,m}$  tiene conto dell'effetto sul rumore di rotolamento di un manto stradale con proprietà acustiche diverse da quelle della superficie di riferimento virtuale di cui al capitolo 2.2.2. Esso comprende l'effetto sia sulla propagazione che sulla generazione.

$\Delta L_{studded tyres,i,m}$  è un coefficiente di correzione che tiene conto del rumore di rotolamento più elevato dei veicoli leggeri con pneumatici chiodati.

$\Delta L_{WR,acc,i,m}$  tiene conto dell'effetto di un incrocio con semafori o di una rotonda sul rumore di rotolamento. Comprende l'effetto della variazione della velocità sul rumore.

$\Delta L_{W,temp}$  è un termine di correzione per una temperatura media  $\tau$  diversa dalla temperatura di riferimento  $\tau_{ref} = 20 \text{ °C}$ .

*Correzione per l'utilizzo di pneumatici chiodati*

Nei casi in cui un numero significativo di veicoli leggeri del flusso di traffico utilizzi ogni anno pneumatici chiodati per diversi mesi, è necessario tenere conto dell'effetto indotto sul rumore di rotolamento. Per ogni veicolo della categoria  $m=1$  su cui sono montati pneumatici chiodati si utilizza la seguente equazione per calcolare l'aumento del rumore di rotolamento dipendente dalla velocità:

$$\Delta_{stud,i}(v) = \begin{cases} a_i + b_i \times \lg(50/70) & \text{per } v < 50 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \lg(v/70) & \text{per } 50 \leq v \leq 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \lg(90/70) & \text{per } v > 90 \text{ km/h} \end{cases} \quad (2.2.6)$$

dove i coefficienti  $a_i$  e  $b_i$  sono indicati per ogni banda d'ottava.

L'aumento del rumore di rotolamento deve essere attribuito unicamente in base alla proporzione di veicoli leggeri con pneumatici chiodati e durante un periodo limitato  $T_s$  (in mesi) nel corso dell'anno. Se  $Q_{stud, ratio}$  è la proporzione media del volume totale di veicoli leggeri per ora dotati di pneumatici chiodati durante il periodo  $T_s$  (in mesi), la proporzione media annuale di veicoli dotati di pneumatici chiodati  $p_s$  è espressa nel seguente modo:

$$p_s = Q_{stud, ratio} \times \frac{T_s}{12} \quad (2.2.7)$$

La correzione risultante da applicare all'emissione di potenza sonora del rumore di rotolamento a causa dell'utilizzo di pneumatici chiodati per i veicoli della categoria  $m=1$  nella banda di frequenza  $i$  deve essere la seguente:

$$\Delta L_{studdedtyres,i,m=1} = 10 \times \lg \left[ (1 - p_s) + p_s 10^{\frac{\Delta_{stud,i,m=1}}{10}} \right] \quad (2.2.8)$$

Per i veicoli di tutte le altre categorie non bisogna applicare alcuna correzione:

$$\Delta L_{studdedtyres,i,m \neq 1} = 0 \quad (2.2.9)$$

*Correzione dovuta all'effetto della temperatura dell'aria sul rumore di rotolamento*

La temperatura dell'aria influisce sull'emissione del rumore di rotolamento; il livello della potenza sonora del rotolamento diminuisce con l'aumentare della temperatura dell'aria. La correzione dovuta al manto stradale tiene conto di questo effetto. Le correzioni dovute al manto stradale sono generalmente valutate a una temperatura dell'aria di  $\tau_{ref} = 20$  °C. Se la temperatura media annuale dell'aria è diversa, il rumore associato al manto stradale deve essere corretto applicando la seguente formula:

$$\Delta L_{W,temp,m}(\tau) = K_m \times (\tau_{ref} - \tau) \quad (2.2.10)$$

Il termine di correzione è positivo (ossia, il rumore aumenta) per le temperature inferiori a 20 °C e negativo (ossia, il rumore diminuisce) per le temperature più alte. Il coefficiente K dipende dal manto stradale e dalle caratteristiche degli pneumatici e in genere presenta una certa dipendenza dalla frequenza. Per tutti i manti stradali bisogna applicare un coefficiente generico  $K_{m=1} = 0,08 \text{ dB/}^\circ\text{C}$  per i veicoli leggeri (categoria 1) e  $K_{m=2}=K_{m=3}=0,04 \text{ dB/}^\circ\text{C}$  per i veicoli pesanti (categorie 2 e 3). Il coefficiente di correzione deve essere applicato allo stesso modo su tutte le bande d'ottava da 63 a 8000 Hz.

#### 2.2.4. Rumore da propulsione

##### Equazione generale

Al rumore da propulsione contribuiscono tutte le emissioni generate da motore, scappamento, cambio, presa d'aria, ecc. Il livello di potenza sonora del rumore da propulsione nella banda di frequenza  $i$  per un veicolo della classe  $m$  è definito nel seguente modo:

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \times \frac{(v_m - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m} \quad (2.2.11)$$

I coefficienti  $A_{P,i,m}$  e  $B_{P,i,m}$  sono indicati in bande d'ottava per ciascuna categoria di veicoli e per una velocità di riferimento  $v_{ref} = 70 \text{ km/h}$ .

$\Delta L_{WP,i,m}$  corrisponde alla somma dei coefficienti di correzione da applicare all'emissione del rumore da propulsione per condizioni di guida o regionali specifiche che si discostano dalle condizioni di riferimento:

$$\Delta L_{WP,i,m} = \Delta L_{WP,road,i,m} + \Delta L_{WP,grad,i,m} + \Delta L_{WP,acc,i,m} \quad (2.2.12)$$

$\Delta L_{WP,road,i,m}$  rappresenta l'effetto del manto stradale dovuto all'assorbimento sul rumore da propulsione. Il calcolo deve essere eseguito come indicato al punto 2.2.6.

$\Delta L_{WP,acc,i,m}$  e  $\Delta L_{WP,grad,i,m}$  rappresentano l'effetto della pendenza della strada e dell'accelerazione e della decelerazione dei veicoli agli incroci. Devono essere calcolati come descritto rispettivamente ai punti 2.2.4 e 2.2.5.

##### Effetto della pendenza della strada

La pendenza della strada ha due effetti sull'emissione di rumore del veicolo: in primo luogo, incide sulla velocità del veicolo e, di conseguenza, sul suo rumore di rotolamento e da propulsione; in secondo luogo, incide sul carico del motore e sul regime del motore attraverso la scelta della marcia e quindi sul rumore da propulsione emesso dal veicolo. In questa sezione viene preso in considerazione solo l'effetto sul rumore da propulsione, ipotizzando una velocità costante.

L'effetto della pendenza della strada sul rumore da propulsione è preso in considerazione mediante un termine di correzione  $\Delta L_{WP,grad,m}$  che è una funzione dell'inclinazione  $s$  (in %),

della velocità del veicolo  $v_m$  (in km/h) e della classe del veicolo  $m$ . Nel caso di un flusso di traffico bidirezionale, è necessario dividere il flusso in due componenti e correggerne una metà per la salita e l'altra metà per la discesa. Il termine di correzione è attribuito allo stesso modo a tutte le bande d'ottava:

Per  $m=1$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=1}(v_m) = \begin{cases} \frac{Min(12\%;-s) - 6\%}{1\%} & \text{per } s < -6\% \\ 0 & \text{per } -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{Min(12\%;s) - 2\%}{1,5\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{per } s > 2\% \end{cases} \quad (2.2.13)$$

Per  $m=2$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=2}(v_m) = \begin{cases} \frac{Min(12\%;-s) - 4\%}{0,7\%} \times \frac{v_m - 20}{100} & \text{per } s < -4\% \\ 0 & \text{per } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{Min(12\%;s)}{1\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{per } s > 0\% \end{cases} \quad (2.2.14)$$

Per  $m=3$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=3}(v_m) = \begin{cases} \frac{Min(12\%;-s) - 4\%}{0,5\%} \times \frac{v_m - 10}{100} & \text{per } s < -4\% \\ 0 & \text{per } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{Min(12\%;s)}{0,8\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{per } s > 0\% \end{cases} \quad (2.2.15)$$

Per  $m=4$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=4} = 0 \quad (2.2.16)$$

La correzione  $\Delta L_{WP,grad,m}$  comprende implicitamente l'effetto dell'inclinazione sulla velocità.

### 2.2.5. Effetto dell'accelerazione e della decelerazione dei veicoli

Prima e dopo gli incroci con semafori e le rotonde è necessario tenere conto dell'effetto dell'accelerazione e della decelerazione applicando la correzione descritta di seguito.

Il termine di correzione per il rumore di rotolamento,  $\Delta L_{WR,acc,m,k}$ , e quello per il rumore da propulsione,  $\Delta L_{WP,acc,m,k}$ , sono funzioni lineari della distanza  $x$  (in m) della sorgente puntiforme dall'intersezione più vicina della corrispondente linea sorgente con un'altra linea sorgente. Essi sono attribuiti allo stesso modo a tutte le bande d'ottava:

$$\Delta L_{WR,acc,m,k} = C_{R,m,k} \times \text{Max}\left(1 - \frac{|x|}{100}; 0\right) \quad (2.2.17)$$

$$\Delta L_{WP,acc,m,k} = C_{P,m,k} \times \text{Max}\left(1 - \frac{|x|}{100}; 0\right) \quad (2.2.18)$$

I coefficienti  $C_{R,m,k}$  e  $C_{P,m,k}$  dipendono dal tipo di incrocio  $k$  ( $k = 1$  per un incrocio con semafori;  $k = 2$  per una rotonda) e sono indicati per ogni categoria di veicoli. La correzione comprende l'effetto della variazione di velocità quando il veicolo si avvicina a un incrocio o a una rotonda o quando se ne allontana.

Si noti che a una distanza  $|x| \geq 100$  m,  $\Delta L_{WR,acc,m,k} = \Delta L_{WP,acc,m,k} = 0$ .

### 2.2.6. Effetto del tipo di manto stradale

#### Principi generali

Per i manti stradali con proprietà acustiche diverse da quelle del manto di riferimento, è necessario applicare un termine di correzione spettrale sia per il rumore di rotolamento sia per il rumore da propulsione.

Il termine di correzione per l'effetto del manto stradale da applicare al rumore di rotolamento è il seguente:

$$\Delta L_{WR,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) \quad (2.2.19)$$

dove

$\alpha_{i,m}$  è la correzione spettrale in dB alla velocità di riferimento  $v_{ref}$  per la categoria  $m$  (1, 2 o 3) e la banda spettrale  $i$ .

$\beta_m$  è l'effetto della velocità sulla riduzione del rumore di rotolamento per la categoria  $m$  (1, 2 o 3) ed è identico per tutte le bande di frequenza.

Il termine di correzione per l'effetto del manto stradale da applicare al rumore da propulsione è il seguente:

$$\Delta L_{WP,road,i,m} = \min\{\alpha_{i,m}; 0\} \quad (2.2.20)$$

I manti stradali assorbenti riducono il rumore da propulsione e quelli non assorbenti non lo aumentano.

#### *Effetto dell'età sulle proprietà acustiche del manto stradale*

Le proprietà acustiche dei manti stradali variano in base all'età e al livello di manutenzione e il rumore tende a diventare più forte con il passare del tempo. Nel presente metodo, i parametri relativi al manto stradale sono stabiliti in modo da essere rappresentativi delle prestazioni acustiche del tipo di manto stradale, considerando valori medi calcolati in base al suo ciclo di vita rappresentativo e ipotizzando una manutenzione adeguata.

## **2.3. Rumore ferroviario**

### *2.3.1. Descrizione della sorgente*

#### *Classificazione dei veicoli*

##### Definizione di veicolo e treno

Ai fini del presente metodo di calcolo del rumore, un veicolo è inteso come ogni singola sottounità ferroviaria di un treno (in genere una locomotiva, una carrozza semovente, una carrozza rimorchiata o un carro merci) che può essere spostata in modo indipendente e separata dal resto del treno. In alcune circostanze specifiche è possibile che le sottounità di un treno facciano parte di un insieme non separabile, ad esempio quando condividono un carrello ferroviario. Ai fini del presente metodo di calcolo, tutte queste sottounità sono raggruppate in un unico veicolo.

Ai fini del presente metodo di calcolo, un treno è costituito da una serie di veicoli agganciati.

La tabella [2.3.a] definisce un linguaggio comune per descrivere i tipi di veicoli che figurano nella banca dati delle sorgenti. Nella tabella sono indicati i descrittori pertinenti da utilizzare per classificare i veicoli in modo esaustivo. Questi descrittori corrispondono alle proprietà del veicolo, che influiscono sulla potenza sonora direzionale per metro di lunghezza della linea sorgente equivalente utilizzata come modello.

È necessario determinare il numero di veicoli di ciascun tipo per ogni tratto di binario per ognuno dei periodi presi in considerazione nel calcolo del rumore. Per ottenere tale valore,

espresso come numero medio di veicoli per ora, bisogna dividere il numero totale di veicoli in circolazione in un dato intervallo di tempo per la durata in ore di tale intervallo (ad esempio, 24 veicoli in 4 ore corrispondono a 6 veicoli all'ora). È necessario considerare tutti i tipi di veicoli che transitano su ciascun tratto di binario.

Tabella [2.3.a]: Classificazione e descrittori per i veicoli ferroviari

Cifra	1	2	3	4
Descrittore	Tipo di veicolo	Numero di assi per veicolo	Tipo di freno	Misura a livello di ruota
Spiegazione del descrittore	Una lettera che descrive il tipo di veicolo	Il numero effettivo di assi	Una lettera che descrive il tipo di freno	Una lettera che descrive il tipo di misura di riduzione del rumore
<b>Possibili descrittori</b>	<b>h</b> veicolo ad alta velocità (> 200 km/h)	<b>1</b>	<b>c</b> a ceppi in ghisa	<b>n</b> nessuna misura
	<b>m</b> carrozze passeggeri semoventi	<b>2</b>	<b>k</b> a ceppi in materiali compositi o in metallo agglomerato	<b>d</b> ammortizzatori
	<b>p</b> carrozze passeggeri rimorchiate	<b>3</b>	<b>n</b> freni non a ceppi, come i freni a disco, a tamburo e magnetici	<b>s</b> schermi
	<b>c</b> tram o metropolitana leggera carrozza semovente e non semovente	<b>4</b>		<b>o</b> altro
	<b>d</b> locomotiva diesel	ecc.		
	<b>e</b> locomotiva elettrica			
	<b>a</b> qualsiasi veicolo per il trasporto merci generico			
	<b>o</b> altro (veicoli per la manutenzione, ecc.)			

*Classificazione de binari e della struttura di supporto*



I binari esistenti possono differire a causa di numerosi elementi che contribuiscono a determinare le loro proprietà acustiche. I tipi di binari utilizzati nel presente metodo sono elencati nella tabella [2.3.b] qui di seguito. Alcuni elementi incidono in larga misura sulle proprietà acustiche, mentre altri hanno solo effetti secondari. In generale, gli elementi che influiscono maggiormente sul rumore ferroviario sono i seguenti: rugosità del fungo della rotaia, rigidità delle solette, base del binario, giunti di rotaia e raggio di curvatura del binario. In alternativa, è possibile definire le proprietà generali del binario, nel qual caso i due parametri acustici essenziali sono la rugosità del fungo della rotaia e il *track decay rate* (tasso di decadimento) secondo la norma ISO 3095, oltre al raggio di curvatura del binario.

Un tratto di binario è definito come una parte di un singolo binario, su una linea ferroviaria, in una stazione o in un deposito ferroviario, sul quale le proprietà fisiche e i componenti di base non cambiano.

La tabella [2.3.b] definisce un linguaggio comune per descrivere i tipi di binario che figurano nella banca dati delle sorgenti.

Cifra	1	2	3	4	5	6
Descrittore	Base del binario	Rugosità del fungo della rotaia	Tipo di solette	Misure supplementari	Giunti di rotaia	Curvatura
Spiegazione del descrittore	Tipo di base del binario	Indicatore di rugosità	Rappresenta un'indicazione della rigidità "acustica"	Una lettera che descrive il dispositivo acustico	Presenza di giunti e spaziature	Indicare il raggio di curvatura in m
<b>Codici ammessi</b>	<b>B</b> Ballast	<b>E</b> In buono stato di manutenzione e molto liscio	<b>S</b> Debole (150-250 MN/m)	<b>N</b> Nessuna	<b>N</b> Nessuno	<b>N</b> Binario rettilineo
	<b>S</b> Binario posato su traversa di cemento	<b>M</b> Manutenzione normale	<b>M</b> Media (da 250 a 800 MN/m)	<b>D</b> Ammortizzatore ferroviario	<b>S</b> Singolo giunto o singolo scambio	<b>L</b> Ridotta (1 000-500 m)
	<b>L</b> Ponte con massiciata	<b>N</b> Cattiva manutenzione	<b>H</b> Elevata (800-1 000 MN/m)	<b>B</b> Barriera bassa	<b>D</b> Due giunti o scambi ogni 100 m	<b>M</b> Media (inferiore a 500 m e superiore a 300 m)
	<b>N</b> Ponte senza massiciata	<b>B</b> Assenza di manutenzione e cattivo stato		<b>A</b> Piastra assorbente su binario posato su traversa in cemento	<b>M</b> Più di due giunti o scambi ogni 100 m	<b>H</b> Elevata (inferiore a 300 m)
	<b>T</b> Binario annegato			<b>E</b> Rotaia annegata		
	<b>O</b> Altro			<b>O</b> Altro		

*Numero e posizione delle sorgenti di rumore equivalenti*

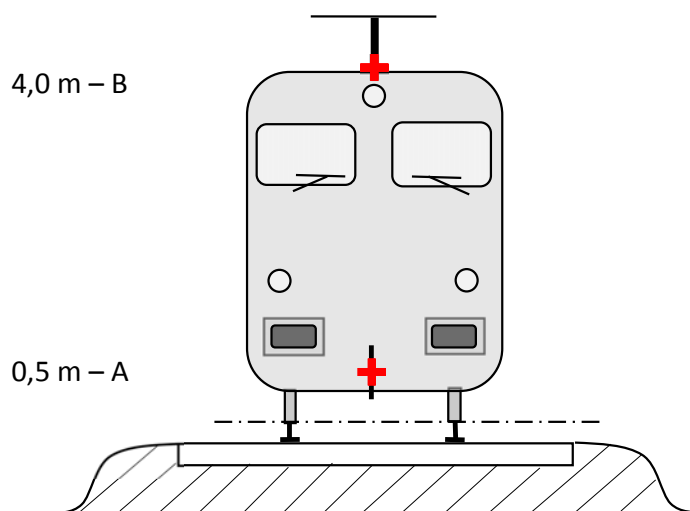


Figura [2.3.a]: Posizione delle sorgenti di rumore equivalenti

Le differenti sorgenti di rumore lineari equivalenti sono poste a diverse altezze e al centro del binario. Tutte le altezze si riferiscono al piano tangente alle due superfici superiori delle due rotaie.

Le sorgenti equivalenti comprendono diverse sorgenti fisiche (indice p). Tali sorgenti fisiche, divise in categorie differenti a seconda del meccanismo di generazione, sono: 1) il rumore di rotolamento (che comprende non soltanto la vibrazione delle rotaie e della base del binario ma anche, ove presente, il rumore della sovrastruttura dei veicoli per il trasporto merci); 2) il rumore di trazione; 3) il rumore aerodinamico; 4) il rumore d'impatto (dovuto a incroci, scambi e giunti); 5) il rumore da stridio e 6) il rumore dovuto a ulteriori effetti come ponti e viadotti.

1) Il rumore di rotolamento è causato dalla rugosità delle ruote e dei funghi della rotaia, attraverso tre vie di trasmissione alle superfici emittenti (rotaie, ruote e sovrastruttura). A tale rumore è attribuito il valore  $h = 0,5$  m (superfici emittenti A) per rappresentare il contributo al rumore apportato dal binario, compresi gli effetti della superficie dei binari, soprattutto di quelli posati su traversa in cemento (conformemente alla parte di propagazione), dalle ruote e dalla sovrastruttura del veicolo (nei treni merci).

2) Le altezze delle sorgenti equivalenti per il rumore di trazione vanno da 0,5 m (sorgente A) a 4,0 m (sorgente B), in base alla posizione fisica del componente interessato. Le sorgenti quali le trasmissioni a ingranaggi e i motori elettrici si trovano spesso a un'altezza all'asse di 0,5 m (sorgente A). Le feritoie di ventilazione e le uscite dell'aria di raffreddamento possono trovarsi a varie altezze; gli scappamenti dei motori sui veicoli a diesel si trovano spesso a un'altezza del tetto di 4,0 m (sorgente B). Le altre sorgenti di rumore di trazione come i ventilatori o i blocchi motore diesel possono trovarsi a un'altezza di 0,5 m (sorgente A) o di 4,0 m (sorgente B). Se l'altezza esatta della sorgente è intermedia rispetto alle altezze prese come modello, l'energia sonora è distribuita in modo proporzionale sulle altezze delle sorgenti adiacenti più vicine.

Per questa ragione, il metodo prevede due altezze per le sorgenti: 0,5 m (sorgente A) e 4,0 m (sorgente B); la potenza sonora equivalente associata a ciascuna di esse è distribuita tra le due altezze in base alla configurazione specifica delle sorgenti sul tipo di unità.

3) Gli effetti del rumore aerodinamico sono associati alla sorgente a 0,5 m (che rappresenta le protezioni e gli schermi, sorgente A) e alla sorgente a 4,0 m (che include nella modellizzazione tutte le attrezzature presenti sul tetto e il pantografo, sorgente B). La scelta di un'altezza di 4,0 m per gli effetti associati al pantografo rappresenta notoriamente un modello semplice e deve essere valutata con cautela se ci si prefigge l'obiettivo di scegliere un'altezza appropriata per la barriera antirumore.

4) Il rumore d'impatto è associato alla sorgente a 0,5 m (sorgente A).

5) Il rumore da stridio è associato alla sorgente a 0,5 m (sorgente A).

6) Il rumore dei ponti è associato alla sorgente a 0,5 m (sorgente A).

### 2.3.2. *Emissione di potenza sonora*

#### *Equazioni generali*

##### Singolo veicolo

Il modello utilizzato per il rumore del traffico ferroviario, analogamente a quello utilizzato per il rumore del traffico veicolare, descrive l'emissione di potenza sonora del rumore prodotto da una specifica combinazione di tipo di veicolo e tipo di binario che soddisfa una serie di requisiti descritti nella classificazione dei veicoli e dei binari, in funzione delle potenze sonore per ciascun veicolo ( $L_{w,0}$ ).

##### Flusso di traffico

L'emissione di rumore di un flusso di traffico su ciascun binario deve essere rappresentata da una serie di 2 linee sorgenti caratterizzata dalla sua potenza sonora direzionale per metro e per banda di frequenza. Essa corrisponde alla somma delle emissioni sonore dei singoli veicoli che circolano nel flusso di traffico, tenendo conto, nel caso specifico dei veicoli fermi, del tempo passato dai veicoli nel tratto ferroviario considerato.

La potenza sonora direzionale per metro e per banda di frequenza, dovuta a tutti i veicoli che transitano in ciascun tratto di binario sul tipo di binario (j), è definita:

- per ogni banda di frequenza (i),
- per ciascuna altezza di sorgente considerata (h) (per le sorgenti a 0,5 m h=1 e a 4,0 m h=2),

ed è la somma dell'energia di tutti gli apporti di tutti i veicoli che transitano sul tratto di binario j-esimo considerato. Tali apporti:

- provengono da tutti i tipi di veicoli (t)

- sono calcolati in considerazione delle loro diverse velocità (s)
- sono considerati tenendo conto delle particolari condizioni di circolazione (velocità costante) (c)
- riguardano ciascun tipo di sorgente fisica (sorgenti di rumore di rotolamento, d’impatto, da stridio, di trazione, aerodinamico e sorgenti di ulteriori effetti, ad esempio il rumore causato dai ponti) (p).

Per calcolare la potenza sonora direzionale per metro (apporto alla parte di propagazione) dovuta alla combinazione media di traffico sul tratto di binario  $j$ -esimo, si utilizza la seguente formula:

$$L_{W',eq,T,dir,i} = 10 \cdot \lg \left( \sum_{x=1}^X 10^{L_{w',eq,line,x}/10} \right) \quad (2.3.1)$$

dove

$T_{ref}$  = periodo di riferimento per il quale è considerato il traffico medio

$x$  = numero totale di combinazioni esistente di  $i$ ,  $t$ ,  $s$ ,  $c$ ,  $p$  per ogni tratto di binario  $j$ -esimo

$t$  = indice per i tipi di veicoli sul tratto di binario  $j$ -esimo

$s$  = indice per la velocità del treno: il numero di indici è pari al numero delle diverse velocità medie dei treni sul tratto di binario  $j$ -esimo

$c$  = indice per le condizioni di circolazione: 1 (velocità costante), 2 (marcia al minimo)

$p$  = indice per il tipo di sorgente fisica: 1 (rumore di rotolamento e d’impatto), 2 (stridio in curva), 3 (rumore di trazione), 4 (rumore aerodinamico), 5 (effetti aggiuntivi)

$L_{w',eq,line,x}$  = potenza sonora direzionale  $x$ -esima per metro per una linea sorgente di una combinazione di  $t$ ,  $s$ ,  $r$ ,  $p$  su ciascun tratto di binario  $j$ -esimo

Ipotizzando un flusso costante di  $Q$  veicoli all’ora, a una velocità media  $v$ , il numero medio di veicoli per unità di lunghezza della tratta ferroviaria in ciascun momento sarà dato da  $Q/v$ . L’emissione di rumore del flusso di veicoli in termini di potenza sonora direzionale per metro  $L_{W',eq,line}$  (espressa in dB/m (re. 10-12 W)) è integrata nel seguente modo:

$$L_{W',eq,line,i}(\psi, \varphi) = L_{W',0,dir,i}(\psi, \varphi) + 10 \times \lg \left( \frac{Q}{1000v} \right) \quad (\text{per } c=1) \quad (2.3.2)$$

dove

- $Q$  è il numero medio di veicoli all’ora sul tratto di binario  $j$ -esimo per il tipo di veicolo  $t$ , con una velocità media del treno  $s$  e condizioni di circolazione  $c$
- $v$  è la loro velocità sul tratto di binario  $j$ -esimo per il tipo di veicolo  $t$  e una velocità media del treno  $s$

- $L_{W,0,dir}$  è il livello di potenza sonora direzionale del rumore specifico (rotolamento, impatto, stridio, frenata, trazione, rumore aerodinamico, altri effetti) di un singolo veicolo nelle direzioni  $\psi$ ,  $\varphi$  definite rispetto alla direzione in cui si muove il veicolo (cfr. figura [2.3.b]).

Nel caso di una sorgente fissa, ad esempio durante la marcia al minimo, si presuppone che il veicolo resti per un periodo complessivo  $T_{idle}$  in una posizione situata su un tratto di binario avente lunghezza  $L$ . Pertanto, considerando  $T_{ref}$  come periodo di riferimento per la determinazione del rumore (ad esempio 12 ore, 4 ore, 8 ore), la potenza sonora direzionale per unità di lunghezza su tale tratto di binario è data dalla seguente formula:

$$L_{W',eq,line,i}(\psi, \varphi) = L_{W,0,dir,i}(\psi, \varphi) + 10 \times \lg \left( \frac{T_{idle}}{T_{ref} L} \right) \quad (\text{per } c=2) \quad (2.3.4)$$

In generale, per ottenere la potenza sonora direzionale per ciascuna sorgente specifica si utilizza la seguente formula:

$$L_{W,0,dir,i}(\psi, \varphi) = L_{W,0,i} + \Delta L_{W,dir,vert,i} + \Delta L_{W,dir,hor,i} \quad (2.3.5)$$

dove

- $\Delta L_{W,dir,vert,i}$  è la funzione (adimensionale) di correzione verticale di  $\psi$  (figura [2.3.b])
- $\Delta L_{W,dir,hor,i}$  è la funzione (adimensionale) di correzione orizzontale di  $\varphi$  (figura [2.3.b]).

$L_{W,0,dir,i}(\psi, \varphi)$ , una volta ottenuto in bande in terzi d'ottava, deve essere espresso in bande d'ottava sommando, in termini energetici, le pertinenti bande in terzi d'ottava nella corrispondente banda d'ottava.

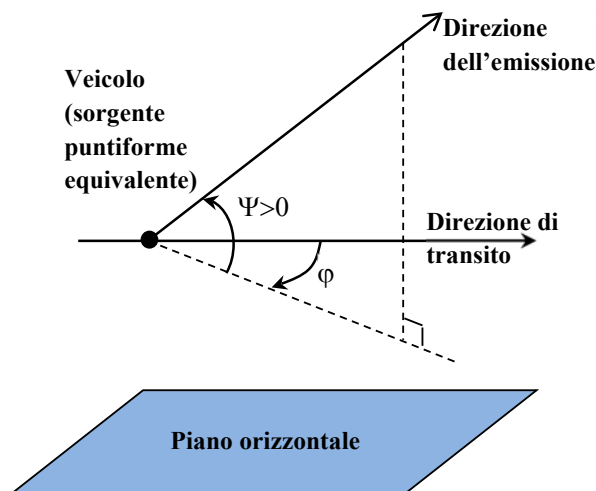


Figura [2.3.b]: Definizione geometrica

Ai fini dei calcoli, l'intensità della sorgente viene quindi espressa in termini di potenza sonora direzionale per 1 m di lunghezza del binario,  $L_{W',tot,dir,i}$ , per tenere conto della direttività delle sorgenti nelle corrispondenti direzioni verticale e orizzontale, mediante correzioni aggiuntive.

Sono presi in considerazione più  $L_{W,0,dir,i}$  per ogni combinazione veicolo-binario-velocità-condizioni di circolazione:

- per una banda di frequenza in terzi d'ottava ( $i$ )
- per ciascun tratto di binario ( $j$ )
- altezza della sorgente ( $h$ ) (per le sorgenti a 0,5 m  $h=1$  e a 4,0 m  $h=2$ )
- direttività ( $d$ ) della sorgente

Viene considerata una serie di  $L_{W,0,dir,i}$  per ogni combinazione veicolo-binario-velocità-condizioni di circolazione, ogni tratto di binario, le altezze corrispondenti a  $h=1$  e  $h=2$  e la direttività.

### *Rumore di rotolamento*

Il contributo del veicolo e il contributo del binario al rumore di rotolamento sono suddivisi in quattro elementi essenziali: rugosità della ruota, rugosità della rotaia, funzione di trasferimento del veicolo alle ruote e alla sovrastruttura (cassa del veicolo) e funzione di trasferimento del binario. La rugosità della ruota e la rugosità della rotaia sono la causa dell'eccitazione della vibrazione nel punto di contatto tra la rotaia e la ruota; le funzioni di trasferimento sono due funzioni empiriche o modellizzate che rappresentano l'intero fenomeno complesso della vibrazione meccanica e della generazione del suono sulle superfici della ruota, del binario, della traversa e della sottostruttura del binario. Tale suddivisione corrisponde a ciò che avviene nella realtà, ossia al fatto che la rugosità di un binario può provocare la vibrazione del binario ma anche quella della ruota e viceversa. L'esclusione di uno di questi quattro parametri impedirebbe di separare la classificazione dei binari da quella dei treni.

### *Rugosità della ruota e del binario*

Il rumore di rotolamento è provocato principalmente dalla rugosità del binario e della ruota nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 5 e 500 mm.

### *Definizione*

Il livello di rugosità  $L_r$  è definito come pari a 10 volte il logaritmo in base 10 del quadrato del valore quadratico medio  $r^2$  della rugosità della superficie di contatto di un binario o di una ruota nella direzione del movimento (livello longitudinale), con misurazione effettuata

in  $\mu\text{m}$  su una determinata lunghezza del binario o sull'intero diametro della ruota, diviso per il quadrato del valore di riferimento  $r_0^2$ :

$$L_r = 10 \times \lg \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \text{ dB} \quad (2.3.6)$$

dove

$$r_0 = 1 \mu\text{m}$$

$r$  = valore quadratico medio della differenza, in termini di spostamento verticale, tra la superficie di contatto e il livello medio

Il livello di rugosità  $L_r$  si ottiene in genere come spettro della lunghezza d'onda  $\lambda$  e deve essere convertito in uno spettro di frequenza  $f = v/\lambda$ , dove  $f$  è la frequenza di centro banda di una data banda in terzi d'ottava in Hz,  $\lambda$  è la lunghezza d'onda in m e  $v$  è la velocità del treno in km/h. Lo spettro di rugosità come funzione della frequenza si sposta lungo l'asse della frequenza per velocità differenti. Come regola generale, dopo la conversione nello spettro di frequenza per mezzo della velocità, è necessario ottenere nuovi valori spettrali per bande in terzi d'ottava calcolando la media tra due bande in terzi d'ottava corrispondenti nel dominio delle lunghezze d'onda. Per stimare lo spettro di frequenza della rugosità effettiva totale corrispondente alla velocità adeguata del treno, è necessario calcolare la media, in termini energetici e proporzionali, delle due bande in terzi d'ottava corrispondenti definite nel dominio delle lunghezze d'onda.

**Il livello di rugosità del binario** (rugosità lato binario) per la banda  $i$ -esima del numero d'onda è definito come  $L_{r,TR,i}$

Per analogia, **il livello di rugosità della ruota** (rugosità lato veicolo) per la banda  $i$ -esima del numero d'onda è definito come  $L_{r,VEH,i}$ .

**Il livello di rugosità effettiva totale**, espresso in dB, per la banda del numero d'onda  $i$  ( $L_{R,tot,i}$ ) è definito come la somma energetica dei livelli di rugosità del binario e della ruota, più il filtro di contatto  $A3(\lambda)$ , per tenere conto dell'effetto filtrante della zona di contatto tra il binario e la ruota:

$$L_{R,TOT,i} = 10 \cdot \lg \left( 10^{L_{r,TR,i}/10} + 10^{L_{r,VEH,i}/10} \right) + A_{3,i} \quad (2.3.7)$$

quando espresso come una funzione della banda  $i$ -esima del numero d'onda corrispondente alla lunghezza d'onda  $\lambda$ .

Il filtro di contatto dipende dal tipo di ruota e di rotaia e dal carico.

Con questo metodo è necessario utilizzare la rugosità effettiva totale per il tratto di binario  $j$ -esimo e ciascun tipo di veicolo  $t$ -esimo, alla rispettiva velocità  $v$ .

*Funzione di trasferimento del veicolo, del binario e della sovrastruttura*

Si definiscono tre funzioni di trasferimento indipendenti dalla velocità,  $L_{H,TR,i}$ ,  $L_{H,VEH,i}$  e  $L_{H,VEH,SUP,i}$ : la prima per ogni tratto di binario  $j$ -esimo e le altre due per ogni tipo di veicolo  $t$ -esimo. Tali funzioni mettono in relazione il livello di rugosità effettiva totale con la potenza sonora rispettivamente del binario, delle ruote e della sovrastruttura.

Si tiene conto del contributo della sovrastruttura solo per i carri merci e quindi unicamente per il tipo di veicolo "o".

Per quanto riguarda il rumore di rotolamento, pertanto, i contributi del binario e del veicolo sono descritti in modo completo da tali funzioni di trasferimento e dal livello di rugosità effettiva totale. Con la marcia al minimo è necessario escludere il rumore di rotolamento.

Per quanto riguarda la potenza sonora per veicolo, il rumore di rotolamento è calcolato all'altezza all'asse utilizzando come dati di immissione il livello di rugosità effettiva totale  $L_{R,TOT,i}$  come funzione della velocità del veicolo  $v$ , le funzioni di trasferimento del binario, del veicolo e della sovrastruttura  $L_{H,TR,i}$ ,  $L_{H,VEH,i}$  e  $L_{H,VEH,SUP,i}$  e il numero totale di assi  $N_a$ :

per  $h = 1$ :

$$L_{W,0,TR,i} = L_{R,TOT,i} + L_{H,TR,i} + 10 \times \lg(N_a) \quad \text{dB} \quad (2.3.8)$$

$$L_{W,0,VEH,i} = L_{R,TOT,i} + L_{H,VEH,i} + 10 \times \lg(N_a) \quad \text{dB} \quad (2.3.9)$$

$$L_{W,0,VEHSUP,i} = L_{R,TOT,i} + L_{H,VEHSUP,i} + 10 \times \lg(N_a) \quad \text{dB} \quad (2.3.10)$$

dove  $N_a$  è il numero di assi per veicolo per il tipo di veicolo  $t$ -esimo.

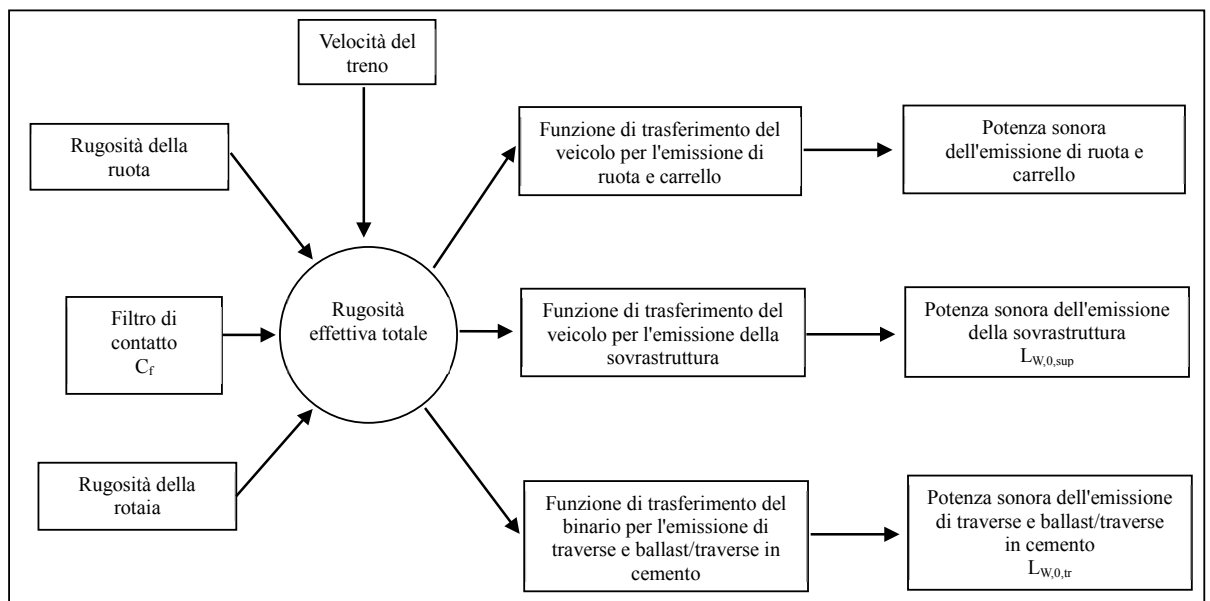


Figura [2.3.c]: Schema di utilizzo delle diverse definizioni della rugosità e delle funzioni di trasferimento



È necessario utilizzare una velocità minima di 50 km/h (30 km/h solo per i tram e la metropolitana leggera) per determinare la rugosità effettiva totale e quindi la potenza sonora dei veicoli (tale velocità non influisce sul calcolo del flusso di traffico) per compensare l'errore potenziale introdotto dalla semplificazione della definizione del rumore di rotolamento, dalla definizione del rumore di frenata e dalla definizione del rumore d'impatto dovuto a incroci e scambi.

*Rumore d'impatto (dovuto a incroci, scambi e giunti)*

Il rumore d'impatto può essere causato da incroci, scambi e giunti di rotaia o punti specifici. La sua intensità può variare ed essere superiore a quella del rumore di rotolamento. Il rumore d'impatto deve essere preso in considerazione per i binari giuntati. La modellizzazione va evitata per il rumore d'impatto dovuto a scambi, incroci e giunti nei tratti di binario con una velocità inferiore a 50 km/h (30 km/h solo per i tram e la metropolitana leggera), dato che si utilizza la velocità minima di 50 km/h (30 km/h solo per i tram e la metropolitana leggera) per includere ulteriori effetti secondo la descrizione fornita nel capitolo sul rumore di rotolamento. La modellizzazione del rumore d'impatto deve essere evitata anche nelle condizioni di circolazione  $c=2$  (marcia al minimo).

Il rumore d'impatto è incluso nel termine relativo al rumore di rotolamento aggiungendo (in termini energetici) un livello di rugosità d'impatto fittizio supplementare al livello di rugosità effettiva totale su ciascun tratto di binario  $j$ -esimo interessato da tale rumore. In tal caso è necessario utilizzare un nuovo  $L_{R,TOT+IMPACT,i}$  al posto di  $L_{R,TOT,i}$ , ottenendo quindi la seguente equazione:

$$L_{R,TOT+IMPACT,i} = 10 \times \lg \left( 10^{L_{R,TOT,i}/10} + 10^{L_{R,IMPACT,i}/10} \right) \text{ dB} \quad (2.3.11)$$

$L_{R,IMPACT,i}$  è uno spettro di bande in terzi d'ottava (una funzione della frequenza). Per ottenere questo spettro di frequenza, uno spettro è dato come funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$  e deve essere convertito nello spettro richiesto come funzione della frequenza utilizzando la relazione  $\lambda = v/f$ , dove  $f$  è la frequenza centrale delle bande in terzi d'ottava in Hz e  $v$  è la velocità  $s$ -esima del tipo di veicolo  $t$ -esimo in km/h.

Il rumore d'impatto dipende dall'intensità e dal numero di impatti per unità di lunghezza o dalla densità dei giunti. Di conseguenza, in caso di più impatti, il livello di rugosità dell'impatto da utilizzare nell'equazione di cui sopra sarà calcolato nel seguente modo:

$$L_{R,IMPACT,i} = L_{R,IMPACT-SINGLE,i} + 10 \times \lg \left( \frac{n_l}{0,01} \right) \text{ dB} \quad (2.3.12)$$

dove  $L_{R,IMPACT-SINGLE,i}$  è il livello di rugosità dell'impatto corrispondente a un singolo impatto e  $n_l$  è la densità dei giunti.

Il livello di rugosità dell'impatto predefinito corrisponde a una densità dei giunti  $n_l = 0,01 \text{ m}^{-1}$ , ossia un giunto ogni 100 m di binario. Nelle situazioni in cui il numero di giunti è diverso, è necessario procedere a un'approssimazione regolando la densità dei giunti

$n_l$ . Va notato che nella modellizzazione della disposizione e della segmentazione dei binari occorre tenere conto della densità dei giunti della rotaia; in altre parole, potrebbe essere necessario considerare un segmento sorgente distinto per un tratto ferroviario con più giunti. Il valore  $L_{W,0}$  del contributo di binario, ruota/carrello e sovrastruttura sono incrementati per mezzo di  $L_{R,IMPACT,i}$  in misura corrispondente a +/- 50 m prima e dopo il giunto della rotaia. In presenza di una serie di giunti, tale incremento è esteso a un valore compreso tra -50 m prima del primo giunto e +50 m dopo l'ultimo giunto.

L'applicabilità di questi spettri di potenza sonora generalmente deve essere verificata sul posto.

Per i binari giuntati bisogna utilizzare per  $n_l$  un valore predefinito pari a 0,01.

### *Stridio*

Lo stridio in curva è una sorgente di rumore speciale che riguarda unicamente le curve ed è pertanto circoscritto. Poiché può essere significativo, è necessaria una descrizione adeguata. Lo stridio in curva dipende generalmente dalla curvatura, dalle condizioni di attrito, dalla velocità del treno e dalla geometria e dalla dinamica binario-ruota. Il livello di emissione da utilizzare è determinato per le curve aventi un raggio inferiore o uguale a 500 m e per le curve più strette e le diramazioni dei punti con raggio inferiore a 300 m. L'emissione di rumore dovrebbe essere specifica per ogni tipo di materiale rotabile, dal momento che alcuni tipi di ruota e di carrello possono essere molto meno soggetti allo stridio rispetto ad altri.

L'applicabilità di questi spettri di potenza sonora generalmente deve essere verificata sul posto, soprattutto per i tram.

Secondo un approccio semplice, il rumore da stridio deve essere considerato aggiungendo 8 dB per  $R < 300$  m e 5 dB per  $300 \text{ m} < R < 500$  m agli spettri di potenza sonora del rumore di rotolamento per tutte le frequenze. Il contributo dello stridio deve essere applicato ai tratti ferroviari dove il raggio è compreso negli intervalli sopra citati per almeno 50 m di lunghezza del binario.

### **Rumore di trazione**

Sebbene il rumore di trazione sia generalmente specifico per ciascuna condizione di transito particolare (velocità costante, decelerazione, accelerazione e marcia al minimo), le uniche due condizioni modellizzate sono la velocità costante (valida anche quando il treno decelera o quando accelera) e la marcia al minimo. L'intensità della sorgente modellizzata corrisponde unicamente alle condizioni di carico massimo, il che fa sì che la quantità  $L_{W,0,const,i}$  sia uguale alla quantità  $L_{W,0,idling,i}$ . Inoltre,  $L_{W,0,idling,i}$  corrisponde al contributo di tutte le sorgenti fisiche di un dato veicolo attribuibili a una determinata altezza, come descritto al punto 2.3.1.

$L_{W,0,idling,i}$  è espresso come sorgente di rumore statica in posizione di "minimo", per la durata della marcia al minimo, e deve essere utilizzato nella modellizzazione come sorgente

puntiforme fissa, come spiegato nel capitolo successivo sul rumore industriale. Deve essere preso in considerazione solo se la durata della marcia al minimo è superiore a 0,5 ore.

Queste quantità possono essere ottenute effettuando misurazioni per tutte le sorgenti in ciascuna condizione di transito oppure è possibile caratterizzare individualmente le sorgenti parziali, determinando la loro dipendenza dai parametri e la loro forza relativa. A tal fine, si possono effettuare misurazioni su un veicolo fermo, variando la velocità dell'albero dell'equipaggiamento di trazione, conformemente alla norma ISO 3095:2005. Se necessario, bisogna caratterizzare più sorgenti di rumore di trazione che potrebbero non dipendere in tutti i casi direttamente dalla velocità del treno:

- rumore del gruppo propulsore, come i motori diesel (compresi aspirazione, scappamento e gruppo motore), la trasmissione a ingranaggi e i generatori elettrici, che dipende essenzialmente dal regime del motore in giri al minuto (giri/min), e rumore delle sorgenti di energia elettrica come i convertitori, che può dipendere soprattutto dal carico;
- rumore delle ventole e dei sistemi di raffreddamento, che dipende dalla velocità della ventola in giri al minuto; in alcuni casi le ventole possono essere direttamente accoppiate alla trasmissione;
- le sorgenti intermittenti come i compressori, le valvole e altri dispositivi con una durata di funzionamento caratteristica e una correzione corrispondente per il ciclo di funzionamento per l'emissione di rumore.

Dal momento che ognuna di queste sorgenti può avere un comportamento diverso a seconda della condizione di funzionamento, il rumore di trazione deve essere specificato di conseguenza. L'intensità della sorgente è ottenuta mediante misurazioni effettuate in condizioni controllate. In generale, le locomotive tendono a presentare maggiori variazioni del carico, dato che il numero di veicoli trainati e quindi la potenza generata possono variare in misura significativa, mentre i treni a composizione bloccata come le unità a motore elettrico (EMU), le unità a motore diesel (DMU) e i treni ad alta velocità hanno un carico meglio definito.

La potenza sonora della sorgente non è attribuita a priori in base all'altezza della fonte; la scelta dipende dal rumore specifico e dal veicolo valutato. La modellizzazione deve essere effettuata per la sorgente A ( $h=1$ ) e la sorgente B ( $h=2$ ).

### **Rumore aerodinamico**

Il rumore aerodinamico è pertinente solo a velocità elevate, superiori a 200 km/h, e pertanto è opportuno verificare in primo luogo se sia effettivamente necessario ai fini dell'applicazione. Se la rugosità del rumore di rotolamento e le funzioni di trasferimento sono noti, può essere estrapolato a velocità superiori ed è possibile effettuare un confronto con i dati relativi all'alta velocità disponibili al fine di verificare se il rumore aerodinamico produce livelli acustici più elevati. Se la velocità dei treni su una rete è superiore a 200 km/h, ma non va oltre i 250 km/h, in alcuni casi potrebbe non essere necessario includere il rumore aerodinamico, a seconda della progettazione del veicolo.

Il contributo del rumore aerodinamico è calcolato in funzione della velocità:

$$L_{W,0,i} = L_{W,0,1,i}(v_0) + \alpha_{1,i} \times \lg\left(\frac{v}{v_0}\right) \text{ dB Per } h=1 \quad (2.3.13)$$

$$L_{W,0,i} = L_{W,0,2,i}(v_0) + \alpha_{2,i} \times \lg\left(\frac{v}{v_0}\right) \text{ dB Per } h=2 \quad (2.3.14)$$

dove

$v_0$  è una velocità alla quale il rumore aerodinamico è dominante ed è fissata a 300 km/h

$L_{W,0,1,i}$  è una potenza sonora di riferimento determinata a partire da due o più punti di misurazione, per sorgenti situate a un'altezza nota, per esempio il primo carrello

$L_{W,0,2,i}$  è una potenza sonora di riferimento determinata a partire da due o più punti di misurazione, per sorgenti situate a un'altezza nota, per esempio le altezze del vano del pantografo

$\alpha_{1,i}$  è un coefficiente determinato a partire da due o più punti di misurazione, per sorgenti situate a un'altezza nota, per esempio il primo carrello

$\alpha_{2,i}$  è un coefficiente determinato a partire da due o più punti di misurazione, per sorgenti situate a un'altezza nota, per esempio le altezze del vano del pantografo.

### Direttività della sorgente

**La direttività orizzontale**  $\Delta L_{W,dir,hor,i}$ , espressa in dB, è data sul piano orizzontale e può essere considerata per impostazione predefinita un dipolo per il rotolamento, l'impatto (giunti di rotaia, ecc.), lo stridio, la frenata, le ventole e gli effetti aerodinamici, calcolato per ogni banda di frequenza  $i$ -esima con la seguente formula:

$$\Delta L_{W,dir,hor,i} = 10 \times \lg(0,01 + 0,99 \cdot \sin^2 \varphi) \quad (2.3.15)$$

**La direttività verticale**  $\Delta L_{W,dir,ver,i}$ , espressa in dB, è data sul piano verticale, per la sorgente A ( $h=1$ ), come funzione della frequenza di centro banda  $f_{c,i}$  di ogni banda di frequenza  $i$ -esima ed è calcolata per  $-\pi/2 < \psi < \pi/2$  con la seguente formula:

$$\Delta L_{W,dir,ver,i} = \left( \left[ \frac{40}{3} \times \left[ \frac{2}{3} \times \sin(2 \cdot \psi) - \sin \psi \right] \times \lg \left[ \frac{f_{c,i} + 600}{200} \right] \right] \right) \quad (2.3.16)$$

Per la sorgente B ( $h=2$ ) per l'effetto aerodinamico:

$$\Delta L_{W,dir,ver,i} = 10 \times \lg(\cos^2 \psi) \quad \text{Per } \psi < 0 \quad (2.3.17)$$

$$\Delta L_{W,dir,ver,i} = 0 \quad \text{per qualsiasi altro punto}$$

La direttività  $\Delta L_{dir,ver,i}$  non è considerata per la sorgente B (h=2) per gli altri effetti, in quanto per queste sorgenti in questa posizione è ipotizzata l'omnidirezionalità.

### 2.3.3. Effetti aggiuntivi

#### *Correzione per l'emissione strutturale (ponti e viadotti)*

Se il tratto di binario si trova su un ponte, è necessario prendere in considerazione il rumore aggiuntivo generato dalla vibrazione del ponte conseguente all'eccitazione causata dalla presenza del treno. Poiché non è semplice modellizzare l'emissione del ponte come sorgente aggiuntiva, a causa delle forme complesse dei ponti, si ricorre a un aumento del rumore di rotolamento per tenere conto del rumore provocato dal ponte. Tale aumento deve essere modellizzato esclusivamente aggiungendo un incremento fisso alla potenza sonora del rumore per ogni banda in terzi d'ottava. Nel considerare la correzione, si modifica la potenza sonora soltanto per il rumore di rotolamento e si utilizza il nuovo  $L_{W,0,rolling-and-bridge,i}$  al posto di  $L_{W,0,rolling-only,i}$ :

$$L_{W,0,rolling-and-bridge,i} = L_{W,0,rolling-only,i} + C_{bridge} \text{ dB} \quad (2.3.18)$$

dove  $C_{bridge}$  è una costante che dipende dal tipo di ponte e  $L_{W,0,rolling-only,i}$  è la potenza sonora del rumore di rotolamento sul ponte considerato che dipende unicamente dalle proprietà del veicolo e del binario.

#### *Correzione per altre sorgenti di rumore correlate alle ferrovie*

Possono essere presenti varie sorgenti di rumore associate al rumore ferroviario: depositi, zone di carico/scarico, stazioni, avvisi sonori, altoparlanti e così via. Tali sorgenti devono essere considerate sorgenti di rumore industriale (sorgenti di rumore fisse) e devono essere modellizzate, se necessario, seguendo le indicazioni fornite nel seguente capitolo sul rumore industriale.

## 2.4. Rumore industriale

### 2.4.1. Descrizione della sorgente

#### *Classificazione dei tipi di sorgente (puntiforme, lineare, areale)*

Le sorgenti di rumore industriale possono avere le dimensioni più varie. Possono essere grandi impianti industriali oppure piccole sorgenti concentrate come utensili o macchine di dimensioni ridotte utilizzati in fabbrica. È pertanto necessario utilizzare una tecnica di modellizzazione appropriata per la sorgente specifica valutata. A seconda delle dimensioni e del modo in cui più sorgenti singole, tutte appartenenti allo stesso sito industriale, si estendono su un'area, esse possono essere modellizzate come sorgenti puntiformi, lineari o areali. In pratica, per calcolare l'effetto del rumore si utilizzano sempre sorgenti puntiformi, ma è possibile utilizzare più sorgenti puntiformi per rappresentare una sorgente veramente complessa, che solitamente si estende lungo una linea o occupa una superficie.

### *Numero e posizione delle sorgenti sonore equivalenti*

Le sorgenti sonore reali sono modellizzate mediante sorgenti sonore equivalenti rappresentate da una o più sorgenti puntuali, in modo che la potenza sonora totale della sorgente reale corrisponda alla somma delle singole potenze sonore attribuite alle differenti sorgenti puntuali.

Le regole generali da applicare per definire il numero di sorgenti puntuali da utilizzare sono le seguenti:

- le sorgenti lineari o areali per le quali la dimensione maggiore è inferiore alla metà della distanza tra la sorgente e il ricettore possono essere modellizzate come singole sorgenti puntiformi;
- le sorgenti per le quali la dimensione maggiore è superiore alla metà della distanza tra la sorgente e il ricettore devono essere modellizzate come una serie di sorgenti puntiformi incoerenti su una linea oppure come una serie di sorgenti puntiformi incoerenti su un'area, in modo tale che per ognuna di tali sorgenti sia soddisfatta la condizione relativa alla metà della distanza. La distribuzione su un'area può includere la distribuzione verticale delle sorgenti puntiformi;
- per le sorgenti per le quali la dimensione maggiore in altezza è superiore a 2 m o in prossimità del suolo, occorre prestare particolare attenzione per quanto riguarda l'altezza della sorgente. Raddoppiare il numero di sorgenti, attraverso la ridistribuzione delle stesse unicamente nella componente z, potrebbe non portare a un risultato nettamente migliore;
- per qualsiasi sorgente, raddoppiare il numero di sorgenti sulla superficie occupata dalla sorgente (in tutte le dimensioni) potrebbe non portare a un risultato nettamente migliore.

La posizione delle sorgenti sonore equivalenti non può essere fissa, dato il numero elevato di configurazioni che un sito industriale può avere. Solitamente si applicano le migliori pratiche.

### *Emissione di potenza sonora*

#### *Aspetti generali*

Di seguito è riportata la serie completa di dati di immissione per il calcolo della propagazione sonora e sono descritti i metodi da utilizzare per la mappatura acustica:

- spettro, in bande d'ottava, del livello di potenza sonora emessa;
- ore di funzionamento (giorno, sera, notte, come media annuale);
- posizione (coordinate  $x, y$ ) e altitudine ( $z$ ) della sorgente di rumore;
- tipo di sorgente (puntiforme, lineare, areale);
- dimensioni e orientamento;
- condizioni di funzionamento della sorgente;
- direttività della sorgente.

La potenza sonora della sorgente puntiforme, lineare e areale deve essere definita nel seguente modo:

- per una sorgente puntiforme, attraverso la potenza sonora  $L_W$  e la direttività in funzione delle tre coordinate ortogonali  $(x, y, z)$ ;
- per i due tipi di linee sorgente che è possibile definire:
- per le linee sorgente che rappresentano nastri trasportatori, condutture, ecc., attraverso la potenza sonora per metro di lunghezza  $L_{W'}$  e la direttività in funzione delle due coordinate ortogonali rispetto all'asse della linea sorgente;
- per le linee sorgente che rappresentano veicoli in movimento, associando ciascuna di esse alla potenza sonora  $L_W$  e alla direttività in funzione delle due coordinate ortogonali rispetto all'asse della linea sorgente e alla potenza sonora per metro  $L_{W'}$ , ottenuta a partire dalla velocità e dal numero di veicoli che transitano sulla linea durante il giorno, la sera e la notte. La correzione per le ore di funzionamento ( $C_W$ , espressa in dB), da aggiungere alla potenza sonora della sorgente per definire la potenza sonora corretta da utilizzare nei calcoli per ogni periodo di tempo, è calcolata nel seguente modo:

$$C_W = -10 \lg \left( \frac{l \times n}{1000 \times V \times T_0} \right) \quad (2.4.1)$$

dove:

V Velocità del veicolo [km/h];

n Numero di passaggi di veicoli per ciascun periodo [-];

l Lunghezza totale della sorgente [m];

- per una sorgente areale, attraverso la potenza sonora per metro quadrato  $L_{W/m^2}$  e senza la direttività (orizzontale o verticale).

Le ore di funzionamento sono un dato essenziale per il calcolo dei livelli di rumore. È necessario disporre delle ore di funzionamento per il periodo diurno, serale e notturno; se per la propagazione si utilizzano classi meteorologiche differenti definite per ognuno dei periodi diurno, serale e notturno, bisogna disporre di una distribuzione più precisa delle ore di funzionamento in sottoperiodi corrispondenti alla distribuzione delle classi meteorologiche. Tali informazioni devono essere basate su una media annuale.

La correzione per le ore di funzionamento ( $C_W$ , espressa in dB), da aggiungere alla potenza sonora della sorgente per definire la potenza sonora corretta da utilizzare nei calcoli per ogni periodo di tempo, è calcolata nel seguente modo:

$$C_W = 10 \times \lg \left( \frac{T}{T_{ref}} \right) \quad (2.4.2)$$

dove

$T$  è il tempo di funzionamento della sorgente, espresso in ore, per periodo in termini di media annuale;

$T_{ref}$  è il periodo di riferimento, espresso in ore (ad esempio, il periodo diurno corrisponde a 12 ore, il periodo serale a 4 ore, il periodo notturno a 8 ore).

Per le sorgenti predominanti, la correzione dovuta alla media annuale delle ore di funzionamento deve essere stimata almeno con una tolleranza di 0,5 dB per ottenere una precisione accettabile (equivalente a un'incertezza pari a meno del 10% nella definizione del periodo di funzionamento della sorgente).

#### *Direttività della sorgente*

La direttività della sorgente dipende fortemente dalla posizione della sorgente sonora equivalente in relazione alle superfici vicine. Poiché il metodo di propagazione tiene conto della riflessione della superficie vicina e del suo assorbimento acustico, è necessario considerare attentamente la posizione delle superfici vicine. In generale, si effettua sempre una distinzione tra i due casi riportati di seguito:

- la potenza sonora e la direttività di una sorgente sono determinate ed espresse in relazione a una data sorgente reale quando questa si trova in campo libero (escludendo l'effetto del terreno). Tutto ciò corrisponde alle definizioni che riguardano la propagazione, se si presuppone l'assenza di superfici vicine a meno di 0,01 m dalla sorgente e si includono nel calcolo della propagazione le superfici che si trovano a una distanza dalla sorgente di 0,01 m o superiore;
- la potenza sonora e la direttività di una sorgente sono determinate ed espresse in relazione a una data sorgente reale quando questa si trova in una posizione specifica; di conseguenza, la potenza sonora e la direttività della sorgente sono di fatto di tipo "equivalente" poiché includono la modellizzazione dell'effetto delle superfici vicine. Questa definizione è effettuata in "campo semilibero", secondo le definizioni relative alla propagazione. In questo caso, le superfici vicine modellizzate devono essere escluse dal calcolo della propagazione.

La direttività deve essere espressa nel calcolo come un fattore  $\Delta L_{W,dir,xyz}(x, y, z)$  da aggiungere alla potenza sonora per ottenere la giusta potenza sonora direzionale di una sorgente sonora di riferimento, quale osservata dalla propagazione sonora nella direzione data. Tale fattore può essere dato in funzione del vettore di direzione definito da  $(x,y,z)$  con  $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = 1$ . Questa direttività può essere espressa anche mediante altri sistemi di coordinate, come i sistemi di coordinate angolari.

## **2.5. Calcolo della propagazione del rumore per le sorgenti veicolari, ferroviarie e industriali.**

### *2.5.1. Ambito di applicazione e applicabilità del metodo*

Nel presente documento viene descritto un metodo per calcolare l'attenuazione del rumore durante la sua propagazione in ambiente esterno. Se si conoscono le caratteristiche della sorgente, questo metodo consente di prevedere il livello continuo equivalente di pressione sonora in un punto ricettore corrispondente a due tipi particolari di condizioni atmosferiche:

- condizioni di propagazione per rifrazione verso il basso (gradiente verticale positivo della velocità effettiva del suono) dalla sorgente al ricettore;



- condizioni atmosferiche omogenee (gradiente verticale nullo della velocità effettiva del suono) su tutta l'area di propagazione.

Il metodo di calcolo descritto nel presente documento si applica alle infrastrutture industriali e alle infrastrutture di trasporto terrestre. Esso si applica pertanto in modo particolare alle infrastrutture stradali e ferroviarie. Il trasporto aereo rientra nell'ambito di applicazione del metodo unicamente per il rumore generato durante le operazioni a terra, non per quello generato in fase di decollo e atterraggio.

Le infrastrutture industriali che emettono un forte rumore impulsivo o un forte rumore con componenti tonali, quali descritti nella norma ISO 1996-2:2007, non rientrano nell'ambito di applicazione di questo metodo.

Questo metodo di calcolo non fornisce risultati in condizioni di propagazione per rifrazione verso l'alto (gradiente verticale negativo della velocità effettiva del suono), ma tali condizioni sono approssimate per mezzo di condizioni omogenee quando si calcola  $L_{den}$ .

Per calcolare l'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico nel caso delle infrastrutture di trasporto, le condizioni relative alla temperatura e all'umidità sono calcolate secondo le prescrizioni della norma ISO 9613-1:1996.

Il metodo fornisce i risultati per banda d'ottava, da 63 Hz a 8 000 Hz. I calcoli sono effettuati per ognuna delle frequenze centrali.

Non rientrano nell'ambito di applicazione di questo metodo di calcolo le coperture parziali e gli ostacoli che, una volta modellizzati, presentano un'inclinazione di oltre 15° in relazione alla linea verticale.

Uno schermo unico è calcolato come singola diffrazione; per due o più schermi lungo una singola traiettoria, considerati come una serie di singole diffrazioni successive, si applica la procedura descritta di seguito.

### 2.5.2. Definizioni utilizzate

Tutte le distanze, le altezze, le dimensioni e le altitudini utilizzate nel presente documento sono espresse in metri (m).

La notazione  $MN$  indica la distanza tridimensionale (3D) tra i punti  $M$  e  $N$ , misurata considerando la linea retta che li unisce.

La notazione  $M\hat{N}$  indica la lunghezza del percorso curvilineo tra i punti  $M$  e  $N$ , in condizioni favorevoli.

Per consuetudine, le altezze reali vengono misurate verticalmente in direzione perpendicolare rispetto al piano orizzontale. Le altezze dei punti al di sopra del suolo locale sono indicate con  $h$ , le altezze assolute dei punti e l'altezza assoluta del suolo devono essere indicate con la lettera  $H$ .

Per tenere conto del rilievo reale della superficie terrestre lungo un percorso di propagazione è introdotta la nozione di "altezza equivalente", indicata con la lettera  $z$ . Essa sostituisce le altezze reali nelle equazioni dell'effetto suolo.

I livelli sonori, indicati con la lettera maiuscola  $L$ , sono espressi in decibel (dB) per banda di frequenza quando l'indice  $A$  è omissso. Ai livelli sonori in decibel dB(A) è attribuito l'indice  $A$ .

La somma dei livelli sonori dovuti a sorgenti tra loro incoerenti è indicata con il simbolo  $\oplus$ , conformemente alla seguente definizione:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \lg \left[ 10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right] \quad (2.5.1)$$

### 2.5.3. Considerazioni geometriche

#### *Segmentazione delle sorgenti*

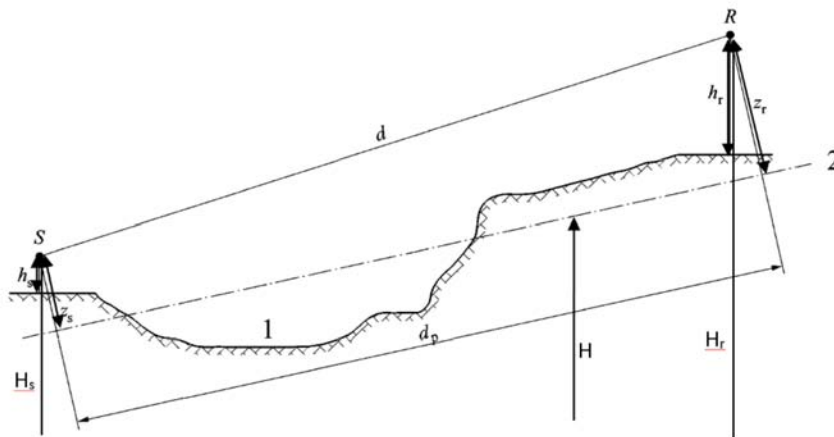
Le sorgenti reali sono descritte attraverso una serie di sorgenti puntiformi o, nel caso del traffico ferroviario o veicolare, attraverso linee sorgente incoerenti. Il metodo di propagazione presuppone che le sorgenti lineari o areali siano state in precedenza scomposte per essere rappresentate come una serie di sorgenti puntiformi equivalenti. Tale scomposizione può aver luogo al momento della preelaborazione dei dati relativi alle sorgenti o nel componente di individuazione del percorso (*pathfinder*) del software di calcolo. Il modo in cui tale operazione viene eseguita non rientra nell'ambito di applicazione della metodologia descritta nel presente allegato.

#### *Percorsi di propagazione*

Il metodo utilizza un modello geometrico costituito da una serie di superfici del suolo e degli ostacoli collegate. Viene definito un percorso di propagazione verticale su uno o più piani verticali rispetto al piano orizzontale. Per le traiettorie che includono riflessioni su superfici verticali non ortogonali al piano di incidenza, viene successivamente considerato un altro piano di incidenza che include la parte riflessa del percorso di propagazione. In questi casi, quando si utilizzano più piani verticali per descrivere l'intera traiettoria dalla sorgente al ricevitore, i piani verticali vengono appiattiti, come un paravento cinese pieghevole.

#### *Altezze significative rispetto al suolo*

Le altezze equivalenti sono ottenute a partire dal piano medio del suolo tra la sorgente e il ricevitore. Il suolo reale è sostituito da un piano fittizio che rappresenta il profilo medio del terreno.



1: rilievo reale

2: piano medio

Figura 2.5.a: Altezze equivalenti in relazione al suolo

L'altezza equivalente di un punto è la sua altezza ortogonale in relazione al piano medio del suolo. È possibile quindi definire l'altezza equivalente della sorgente  $z_s$  e l'altezza equivalente del ricettore  $z_r$ . La distanza tra la sorgente e il ricettore in proiezione al di sopra del piano medio del suolo è indicata con  $d_p$ .

Se l'altezza equivalente di un punto diventa negativa, ossia se il punto si trova al di sotto del piano medio del suolo, l'altezza viene considerata nulla e il punto equivalente è quindi identico alla sua eventuale immagine.

#### Calcolo del piano medio

Sul piano del percorso, la topografia (compresi il terreno, le collinette, i terrapieni e altri ostacoli artificiali, gli edifici, ecc.) può essere descritta mediante una serie ordinata di punti discreti  $(x_k, H_k)$ ;  $k \in \{1, \dots, n\}$ . Questa serie di punti definisce una polilinea o, il che è lo stesso, una sequenza di segmenti diritti  $H_k = a_k x + b_k$ ,  $x \in [x_k, x_{k+1}]$ ;  $k \in \{1, \dots, n\}$ , dove:

$$\begin{cases} a_k = (H_{k+1} - H_k) / (x_{k+1} - x_k) \\ b_k = (H_k \cdot x_{k+1} - H_{k+1} \cdot x_k) / (x_{k+1} - x_k) \end{cases} \quad (2.5.2)$$

Il piano medio è rappresentato dalla linea retta  $Z = ax + b$ ;  $x \in [x_1, x_n]$ , che è adattata alla polilinea mediante l'approssimazione dei minimi quadrati. L'equazione della linea mediana può essere risolta in modo analitico.

Utilizzando:

$$\begin{cases} A = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^3 - x_k^3) + \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) \\ B = \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1} - x_k) \end{cases} \quad (2.5.3)$$

I coefficienti della linea retta sono dati da:

$$\begin{cases} a = \frac{3(2A - B(x_n + x_1))}{(x_n - x_1)^3} \\ b = \frac{2(x_n^3 - x_1^3)}{(x_n - x_1)^4} B - \frac{3(x_n + x_1)}{(x_n - x_1)^3} A \end{cases} \quad (2.5.4)$$

Dove i segmenti con  $x_{k+1} = x_k$  sono ignorati al momento della valutazione dell'equazione 2.5.3.

#### *Riflessioni dovute alle facciate degli edifici e ad altri ostacoli verticali*

Il contributo delle riflessioni è preso in considerazione introducendo sorgenti immagine nel modo indicato di seguito.

#### 2.5.4. *Modello di propagazione sonora*

Per un ricevitore  $R$  i calcoli sono effettuati in base ai seguenti passaggi:

1) su ciascun percorso di propagazione:

- calcolo dell'attenuazione in condizioni favorevoli;
- calcolo dell'attenuazione in condizioni omogenee;
- calcolo del livello sonoro a lungo termine per ciascun percorso;

2) accumulo dei livelli sonori a lungo termine per tutti i percorsi che interessano un ricevitore specifico, che permette di calcolare il livello sonoro totale nel punto ricevitore.

Occorre notare che solo le attenuazioni dovute all'effetto suolo ( $A_{ground}$ ) e alla diffrazione ( $A_{dif}$ ) sono interessate dalle condizioni meteorologiche.

#### 2.5.5. *Processo di calcolo*

Per una sorgente puntiforme  $S$  avente una potenza sonora direzionale  $L_{w,0,dir}$  e per una data banda di frequenza, il livello continuo equivalente di pressione sonora nel punto ricevitore  $R$  in determinate condizioni atmosferiche è ottenuto utilizzando le equazioni qui di seguito.

*Livello sonoro in condizioni favorevoli (LF) per un percorso (S,R)*

$$L_F = L_{w,0,dir} - A_F \quad (2.5.5)$$

Il termine  $A_F$  rappresenta l'attenuazione totale lungo il percorso di propagazione in condizioni favorevoli ed è dato da:

$$A_F = A_{div} + A_{atm} + A_{boundary,F} \quad (2.5.6)$$

dove

$A_{div}$  è l'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica;

$A_{atm}$  è l'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico;

$A_{boundary,F}$  è l'attenuazione dovuta ai confini del mezzo di propagazione in condizioni favorevoli. Può contenere i seguenti termini:

$A_{ground,F}$  ossia l'attenuazione dovuta al suolo in condizioni favorevoli;

$A_{dif,F}$  ossia l'attenuazione dovuta alla diffrazione in condizioni favorevoli.

Per un dato percorso e una data banda di frequenza, sono possibili i due scenari seguenti:

- viene calcolato il valore  $A_{ground,F}$  senza alcuna diffrazione ( $A_{dif,F} = 0$  dB) e  $A_{boundary,F} = A_{ground,F}$ ;

- oppure viene calcolato il valore  $A_{dif,F}$ . L'effetto suolo è preso in considerazione nell'equazione relativa a  $A_{dif,F}$  ( $A_{ground,F} = 0$  dB). Di conseguenza  $A_{boundary,F} = A_{dif,F}$ .

*Livello sonoro in condizioni omogenee ( $L_H$ ) per un percorso ( $S,R$ )*

La procedura è esattamente identica a quella descritta per le condizioni favorevoli nella sezione precedente.

$$L_H = L_{W,0,dir} - A_H \quad (2.5.7)$$

Il termine  $A_H$  rappresenta l'attenuazione totale lungo il percorso di propagazione in condizioni omogenee ed è dato da:

$$A_H = A_{div} + A_{atm} + A_{boundary,H} \quad (2.5.8)$$

dove

$A_{div}$  è l'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica;

$A_{atm}$  è l'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico;

$A_{boundary,H}$  è l'attenuazione dovuta ai confini del mezzo di propagazione in condizioni omogenee. Può contenere i seguenti termini:

$A_{ground,H}$  ossia l'attenuazione dovuta al suolo in condizioni omogenee;

$A_{dif,H}$  ossia l'attenuazione dovuta alla diffrazione in condizioni omogenee.

Per un dato percorso e una data banda di frequenza, sono possibili i due scenari seguenti:

- viene calcolato il valore  $A_{ground,H}$  ( $A_{dif,H} = 0$  dB) senza alcuna diffrazione e

$A_{boundary,H} = A_{ground,H}$ ;

- oppure viene calcolato il valore  $A_{dif,H}$  ( $A_{ground,H} = 0$  dB). L'effetto suolo è preso in considerazione nell'equazione relativa a  $A_{dif,H}$ . Di conseguenza  $A_{boundary,H} = A_{dif,H}$

*Approccio statistico nelle aree urbane per un percorso ( $S,R$ )*

Nelle aree urbane è consentito anche un approccio statistico al calcolo della propagazione sonora dietro la prima fila di edifici, a condizione che il metodo utilizzato sia debitamente documentato, anche con informazioni pertinenti sulla qualità del metodo. Tale metodo può sostituire il calcolo di  $A_{boundary,H}$  e  $A_{boundary,F}$  con un'approssimazione dell'attenuazione totale per il percorso diretto e tutte le riflessioni. Il calcolo si basa sulla densità media degli edifici e l'altezza media di tutti gli edifici presenti nell'area.

*Livello sonoro a lungo termine per un percorso ( $S,R$ )*

Il livello sonoro "a lungo termine" lungo un percorso che inizia da una data sorgente puntiforme è ottenuto dalla somma logaritmica dell'energia sonora ponderata in condizioni omogenee e dell'energia sonora in condizioni favorevoli.

Questi livelli sonori sono ponderati in base all'occorrenza media  $p$  delle condizioni favorevoli nella direzione del percorso ( $S,R$ ):

$$L_{LT} = 10 \times \lg \left( p \cdot 10^{\frac{L_F}{10}} + (1-p) \cdot 10^{\frac{L_H}{10}} \right) \quad (2.5.9)$$

NB: i valori dell'occorrenza per  $p$  sono espressi in percentuale. Di conseguenza, se il valore dell'occorrenza è pari all'82%, nell'equazione (2.5.9)  $p$  sarà uguale a 0,82.

*Livello sonoro a lungo termine nel punto R per tutti i percorsi*

Il livello sonoro a lungo termine totale presso il ricettore per una banda di frequenza si ottiene sommando, in termini energetici, i contributi di tutti i percorsi  $N$ , tutti i tipi inclusi:

$$L_{tot,LT} = 10 \times \lg \left( \sum_n 10^{\frac{L_{n,LT}}{10}} \right) \quad (2.5.10)$$

dove

$n$  è l'indice dei percorsi tra  $S$  e  $R$ .

Di seguito viene descritto come tenere conto delle riflessioni mediante il ricorso a sorgenti immagine. La percentuale di occorrenze delle condizioni favorevoli nel caso di un percorso riflesso su un ostacolo verticale è ritenuta identica all'occorrenza del percorso diretto.

Se  $S'$  è la sorgente immagine di  $S$ , l'occorrenza  $p'$  del percorso ( $S',R$ ) è ritenuta uguale all'occorrenza  $p$  del percorso ( $S_i,R$ ).

*Livello sonoro a lungo termine nel punto R in decibel A (dBA)*

Il livello sonoro totale in decibel A (dBA) si ottiene sommando i livelli in ciascuna banda di frequenza:

$$L_{Aeq,LT} = 10 \times \lg \sum_i 10^{\frac{(L_{tot,LT,i} + AWC_{f,i})}{10}} \quad (2.5.11)$$

dove  $i$  è l'indice della banda di frequenza.  $AWC$  è la correzione secondo la curva di ponderazione A conformemente alla norma internazionale CEI 61672-1:2003.

Questo livello  $L_{Aeq,LT}$  è il risultato finale, ossia il livello di pressione sonora ponderata A a lungo termine nel punto ricettore in un determinato intervallo di tempo di riferimento (ad esempio, giorno, sera o notte o un periodo più breve del giorno, della sera o della notte).

## 2.5.6. Calcolo della propagazione del rumore per le sorgenti veicolari, ferroviarie e industriali.

### *Divergenza geometrica*

L'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica,  $A_{div}$ , corrisponde a una riduzione del livello sonoro imputabile alla distanza di propagazione. Per una sorgente sonora puntiforme in campo libero, l'attenuazione in dB è data da:

$$A_{div} = 20 \times \lg(d) + 11 \quad (2.5.12)$$

dove  $d$  è la distanza inclinata diretta in 3D tra la sorgente e il ricettore.

### *Assorbimento atmosferico*

L'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico  $A_{atm}$ , espressa in dB, durante la propagazione su una distanza  $d$  è data dalla seguente equazione:

$$A_{atm} = \alpha_{atm} \cdot d / 1000 \quad (2.5.13)$$

dove

$d$  è la distanza inclinata diretta in 3D, espressa in metri (m), tra la sorgente e il ricettore.

$\alpha_{atm}$  è il coefficiente di attenuazione atmosferica, in dB/km, alla frequenza centrale nominale per ciascuna banda di frequenza, conformemente alla norma ISO 9613-1.

I valori del coefficiente  $\alpha_{atm}$  sono dati per una temperatura di 15 °C, un'umidità relativa del 70% e una pressione atmosferica di 101 325 Pa. Essi sono calcolati con le frequenze centrali esatte della banda di frequenza e sono conformi alla norma ISO 9613-1. Se sono disponibili i dati meteorologici, è necessario utilizzare la media meteorologica a lungo termine.

### *Effetto suolo*

L'attenuazione dovuta all'effetto suolo è principalmente il risultato dell'interferenza tra il suono riflesso e il suono propagato direttamente dalla sorgente al ricettore. Essa è collegata direttamente all'assorbimento acustico del suolo al di sopra del quale si propaga l'onda sonora. Tuttavia, dipende anche in larga misura dalle condizioni atmosferiche presenti durante la propagazione, poiché la curvatura dei raggi modifica l'altezza del percorso al di sopra del suolo, rendendo più o meno significativi l'effetto suolo e la zona situata in prossimità della sorgente.

Se la propagazione tra la sorgente e il ricettore è influenzata dalla presenza di ostacoli nel piano di propagazione, l'effetto suolo va calcolato separatamente per la sorgente e il ricettore. In questo caso,  $z_s$  e  $z_r$  fanno riferimento alla posizione della sorgente equivalente e/o del ricettore, come indicato più avanti nella descrizione del calcolo della diffrazione  $A_{dif}$ .

*Caratterizzazione acustica del suolo*

Le proprietà di assorbimento acustico del suolo sono legate soprattutto alla sua porosità. Un suolo compatto è generalmente riflettente, mentre un suolo poroso è assorbente.

Per esigenze operative di calcolo, l'assorbimento acustico di un suolo è rappresentato da un coefficiente adimensionale  $G$ , compreso tra 0 e 1.  $G$  è indipendente dalla frequenza. Nella tabella 2.5.a sono riportati i valori di  $G$  per il suolo in ambiente esterno. In generale, la media del coefficiente  $G$  su un percorso varia da 0 a 1.

Tabella 2.5.a: *Valori di  $G$  per i diversi tipi di suolo*

Descrizione	Tipo	(kPa·s/m <sup>2</sup> )	Valore G
Molto soffice (come la neve o la schiuma)	A	12,5	1
Suolo forestale soffice (come un tappeto fitto e basso di erica o uno spesso tappeto di muschio)	B	31,5	1
Suolo instabile, non compatto (terreno erboso e instabile)	C	80	1
Suolo normale non compatto (suolo forestale, terreni da pascolo)	D	200	1
Campi e strade sterrate compatti (prato rasato compatto, aree di parco)	E	500	0,7
Suolo denso compatto (strada ghiaiosa, parcheggio per automobili)	F	2 000	0,3
Superfici dure (la maggior parte delle superfici asfaltate e cementificate)	G	20 000	0
Superfici molto dure e dense (asfalto denso, calcestruzzo, acqua)	H	200 000	0

$G_{path}$  è definito come frazione del suolo assorbente presente sull'intero percorso coperto.

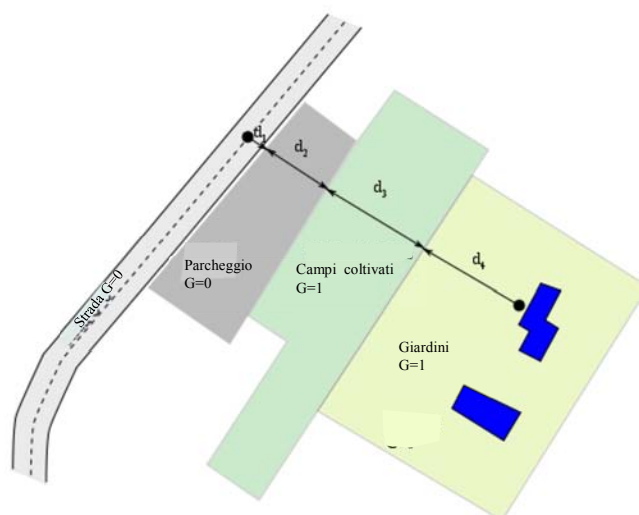
Quando la sorgente e il ricettore sono vicini in modo tale che  $d_p \leq 30(z_s + z_r)$ , la differenza tra il tipo di suolo prossimo alla sorgente e il tipo di suolo prossimo al ricettore è trascurabile. Per tenere conto di questa osservazione, il fattore suolo  $G_{path}$  è pertanto corretto alla fine nel seguente modo:

$$G'_{path} = \begin{cases} G_{path} \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} + G_s \left( 1 - \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} \right) & \text{se } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ G_{path} & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.5.14)$$



dove  $G_s$  è il fattore suolo dell'area della sorgente.  $G_s=0$  per le piattaforme stradali<sup>4</sup> e i binari posati su traversa in cemento.  $G_s=1$  per i binari ferroviari su ballast. Non c'è una risposta generale per le sorgenti di rumore industriale e per gli impianti industriali.

$G$  può essere collegato alla resistività al flusso d'aria.



$$d_p = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$$

$$G_{path} = \frac{(0 \cdot d_1 + 0 \cdot d_2 + 1 \cdot d_3 + 1 \cdot d_4)}{d_p} = \frac{(d_3 + d_4)}{d_p}$$

Figura 2.5.b: Determinazione del coefficiente del suolo  $G_{path}$  su un percorso di propagazione

Le due sottosezioni riportate di seguito sui calcoli nelle condizioni omogenee e favorevoli introducono le notazioni generiche  $\bar{G}_w$  e  $\bar{G}_m$  per l'assorbimento del suolo. Nella tabella 2.5.b è indicata la corrispondenza tra queste notazioni e le variabili  $G_{path}$  e  $G'_{path}$ .

Tabella 2.5.b: Corrispondenza tra  $\bar{G}_w$  e  $\bar{G}_m$  e ( $G_{path}$ ,  $G'_{path}$ )

	Condizioni omogenee			Condizioni favorevoli		
	$A_{ground}$	$\Delta_{ground(S,O)}$	$\Delta_{ground(O,R)}$	$A_{ground}$	$\Delta_{ground(S,O)}$	$\Delta_{ground(O,R)}$
$\bar{G}_w$	$G'_{path}$		$G_{path}$			
$\bar{G}_m$	$G'_{path}$		$G_{path}$	$G'_{path}$		$G_{path}$

<sup>4</sup> Il modello di emissione tiene conto dell'assorbimento della pavimentazione stradale porosa.

*Calcoli in condizioni omogenee*

L'attenuazione dovuta all'effetto suolo in condizioni omogenee è calcolato con le seguenti equazioni:

se  $G_{path} \neq 0$

$$A_{ground,H} = \max \left( -10 \times \lg \left[ 4 \frac{k^2}{d_p^2} \left( z_s^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}} z_s + \frac{C_f}{k} \right) \left( z_r^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}} z_r + \frac{C_f}{k} \right) \right], A_{ground,H,\min} \right) \quad (2.5.15)$$

dove

$$k = \frac{2\pi f_m}{c}$$

$f_m$  è la frequenza centrale nominale della banda di frequenza considerata, in Hz,  $c$  è la velocità del suono nell'aria, considerata pari a 340 m/s, e  $C_f$  è definito nel seguente modo:

$$C_f = d_p \frac{1 + 3wd_p e^{-\sqrt{wd_p}}}{1 + wd_p} \quad (2.5.16)$$

dove i valori di  $w$  sono dati dalla seguente equazione:

$$w = 0,0185 \frac{f_m^{2.5} \bar{G}_w^{-2.6}}{f_m^{1.5} \bar{G}_w^{-2.6} + 1,3 \cdot 10^3 f_m^{0.75} \bar{G}_w^{-1.3} + 1,16 \cdot 10^6} \quad (2.5.17)$$

$\bar{G}_w$  può essere uguale a  $G_{path}$  oppure a  $G'_{path}$  a seconda che l'effetto suolo venga calcolato con o senza diffrazione, e in relazione alla natura del suolo sottostante la sorgente (sorgente reale o diffratta). Le sottosezioni che seguono chiariscono questo punto, sintetizzato nella tabella 2.5.b.

$$A_{ground,H,\min} = -3(1 - \bar{G}_m) \quad (2.5.18)$$

è il limite inferiore di  $A_{ground,H}$ .

Per un percorso ( $S_i, R$ ) in condizioni omogenee senza diffrazione:

$$\bar{G}_w = G'_{path}$$

$$\bar{G}_m = G'_{path}$$

In presenza di diffrazione, fare riferimento alla sezione sulla diffrazione per le definizioni di  $\bar{G}_w$  e  $\bar{G}_m$ .

$$\text{se } G_{path} = 0: A_{ground,H} = -3 \text{ dB}$$

Il termine  $-3(1-\overline{G}_m)$  tiene conto del fatto che, quando la sorgente e il ricettore sono lontani, la prima riflessione sul lato della sorgente non è più sulla piattaforma ma sul terreno naturale.

*Calcolo in condizioni favorevoli*

L'effetto suolo in condizioni favorevoli è calcolato con l'equazione  $A_{ground,H}$ , a patto che vengano apportate le seguenti modifiche:

Se  $G_{path} \neq 0$

a) nell'equazione  $A_{ground,H}$ , le altezze  $z_s$  e  $z_r$  sono sostituite rispettivamente da  $z_s + \delta z_s + \delta z_T$  e  $z_r + \delta z_r + \delta z_T$  dove

$$\begin{cases} \delta z_s = a_0 \left( \frac{z_s}{z_s + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2} \\ \delta z_r = a_0 \left( \frac{z_r}{z_s + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2} \end{cases} \quad (2.5.19)$$

$a_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  è l'inverso del raggio di curvatura

$$\delta z_T = 6 \cdot 10^{-3} \frac{d_p}{z_s + z_r}$$

b) il limite inferiore di  $A_{ground,F}$  dipende dalla geometria del percorso:

$$A_{ground,F,\min} = \begin{cases} -3(1-\overline{G}_m) & \text{se } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ -3(1-\overline{G}_m) \cdot \left( 1 + 2 \left( 1 - 30(z_s + z_r)/d_p \right) \right) & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.5.20)$$

se  $G_{path} = 0$ :

$$A_{ground,F} = A_{ground,F,\min}$$

Le correzioni delle altezze  $\delta z_s$  e  $\delta z_r$  traducono l'effetto della curvatura del raggio sonoro.  $\delta z_T$  contabilizza l'effetto della turbolenza.

$\overline{G}_m$  può anche essere uguale a  $G_{path}$  oppure  $G'_{path}$  a seconda che l'effetto suolo venga calcolato con o senza diffrazione, e in relazione alla natura del suolo sottostante la sorgente (sorgente reale o diffratta). Ciò è spiegato nelle sottosezioni seguenti.

Per un percorso  $(S_i, R)$  in condizioni favorevoli senza diffrazione:

$$\overline{G}_w = G_{path} \text{ nell'Equazione (2.5.17);}$$

$$\overline{G}_m = G'_{path}.$$

In presenza di diffrazione, vedere le definizioni riportate nella sezione successiva per  $\overline{G}_w$  e  $\overline{G}_m$ .

### *Diffrazione*

Come regola generale, è necessario studiare la diffrazione nella parte superiore di ogni ostacolo situato sul percorso di propagazione. Se il percorso passa "sufficientemente in alto" al di sopra dello spigolo di diffrazione, è possibile porre  $A_{dif} = 0$  e calcolare una vista diretta, in particolare determinando  $A_{ground}$ .

In pratica, per ogni frequenza centrale della banda di frequenza, la differenza di percorso,  $\delta$ , va comparata con la quantità  $-\lambda / 20$ . Se un ostacolo non produce diffrazione, dopo averlo determinato ad esempio in base al criterio di Rayleigh, non è necessario calcolare  $A_{dif}$  per la banda di frequenza in questione. In altre parole, in questo caso  $A_{dif} = 0$ . In caso contrario,  $A_{dif}$  viene calcolato come descritto nel resto della presente sezione. Questa regola si applica sia in condizioni favorevoli che omogenee, per diffrazione singola e multipla.

Se, per una determinata banda di frequenza, viene effettuato un calcolo secondo il procedimento di cui alla presente sezione, si pone  $A_{ground}$  pari a 0 dB nel calcolo dell'attenuazione totale. L'effetto suolo è preso in considerazione direttamente nell'equazione generale per il calcolo della diffrazione.

Le equazioni proposte nel presente documento sono utilizzate per trattare la diffrazione su schermi sottili, schermi spessi, edifici, rilevati sia naturali che artificiali e anche sugli spigoli di banchine, trincee e viadotti.

In presenza di vari ostacoli che generano diffrazione sul percorso di propagazione, essi sono trattati come una diffrazione multipla applicando il procedimento descritto nella sezione sottostante dedicata al calcolo della differenza di percorso.

Le procedure qui illustrate sono utilizzate per calcolare le attenuazioni sia in condizioni omogenee che favorevoli. L'effetto della curvatura dei raggi è preso in considerazione ai fini del calcolo della differenza di percorso e per calcolare gli effetti del suolo prima e dopo la diffrazione.

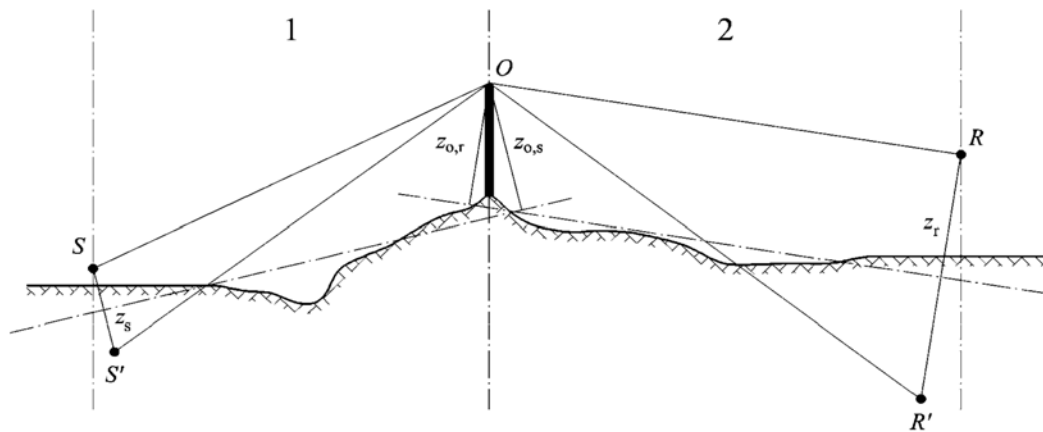
### *Principi generali*

La figura 2.5.c illustra il metodo generale di calcolo dell'attenuazione dovuta a diffrazione. Il metodo si basa sulla scomposizione del percorso di propagazione in due parti: il percorso "lato sorgente", tra la sorgente e il punto di diffrazione, e il percorso "lato ricettore" tra il punto di diffrazione e il ricettore.

Si calcolano i seguenti:

- l'effetto suolo, lato sorgente,  $\Delta_{ground(S,O)}$
- l'effetto suolo, lato ricettore,  $\Delta_{ground(O,R)}$

- e tre diffrazioni:
- tra la sorgente  $S$  e il ricettore  $R$ :  $\Delta_{diff(S,R)}$
- tra la sorgente immagine  $S'$  e  $R$ :  $\Delta_{diff(S',R)}$
- tra  $S$  e il ricettore immagine  $R'$ :  $\Delta_{diff(S,R')}$ .



1: lato sorgente

2: lato ricettore

Figura 2.5.c: Geometria di un calcolo dell'attenuazione dovuta a diffrazione

dove

$S$  è la sorgente;

$R$  è il ricettore;

$S'$  è la sorgente immagine in rapporto al piano medio del suolo, lato sorgente;

$R'$  è il ricettore immagine in relazione al piano medio del suolo, lato ricettore;

$O$  è il punto di diffrazione;

$z_s$  è l'altezza equivalente della sorgente  $S$  in rapporto al piano medio del suolo, lato sorgente;

$z_{o,s}$  è l'altezza equivalente del punto di diffrazione  $O$  in rapporto al piano medio del suolo, lato sorgente;

$z_r$  è l'altezza equivalente del ricettore  $R$  in rapporto al piano medio del suolo, lato ricettore;

$z_{o,r}$  è l'altezza equivalente del punto di diffrazione  $O$  in rapporto al piano medio del suolo, lato ricevitore.

L'irregolarità del suolo tra la sorgente e il punto di diffrazione, e fra il punto di diffrazione e il ricevitore, è presa in considerazione mediante altezze equivalenti calcolate in relazione al piano medio del suolo, lato sorgente in primis e poi lato ricevitore (due piani medi del suolo), secondo il metodo descritto nella sottosezione concernente le altezze notevoli al di sopra del suolo.

### Diffrazione pura

Per la diffrazione pura, senza alcun effetto suolo, l'attenuazione è data da:

$$\Delta_{dif} = \begin{cases} 10C_h \cdot \lg\left(3 + \frac{40}{\lambda} C'' \delta\right) & \text{se } \frac{40}{\lambda} C'' \delta \geq -2 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.5.21)$$

dove

$$C_h = 1 \quad (2.5.22)$$

$\lambda$  è la lunghezza d'onda della frequenza centrale nominale della banda di frequenze considerata;

$\delta$  è la differenza di percorso tra il percorso diffratto e il percorso diretto (vedere la sottosezione successiva sul calcolo della differenza di percorso);

$C''$  è il coefficiente utilizzato per prendere in considerazione diffrazioni multiple;

$C'' = 1$  per diffrazione singola.

In caso di diffrazione multipla, essendo  $e$  la distanza totale lungo il percorso, da  $O_1$  a  $O_2$  + da  $O_2$  a  $O_3$  + da  $O_3$  a  $O_4$  da «metodo dell'elastico» (vedi figure 2.5.d e 2.5.f), e se  $e$  supera i 0,3 m (altrimenti  $C'' = 1$ ), questo coefficiente è così definito:

$$C'' = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2} \quad (2.5.23)$$

I valori di  $\Delta_{dif}$  sono così limitati:

- se  $\Delta_{dif} < 0$ :  $\Delta_{dif} = 0$  dB
- se  $\Delta_{dif} > 25$ :  $\Delta_{dif} = 25$  dB in caso di diffrazione sullo spigolo orizzontale e solo sul termine  $\Delta_{dif}$  figurante nel calcolo di  $A_{dif}$ . Questo limite superiore non può essere applicato nei termini  $\Delta_{dif}$  che intervengono nel calcolo di  $\Delta_{ground}$ , né per la diffrazione su uno spigolo verticale (diffrazione laterale) nel caso di mappatura di rumore generato da attività industriale.

*Calcolo della differenza di percorso*

La differenza di percorso,  $\delta$ , è calcolata su un piano verticale contenente la sorgente e il ricettore. Si tratta di un'approssimazione in relazione al principio di Fermat. L'approssimazione è applicabile nei casi in appresso (linee sorgente). La differenza di percorso,  $\delta$ , è calcolata come indicato nelle figure seguenti, che si basano sulle situazioni incontrate.

*Condizioni omogenee*

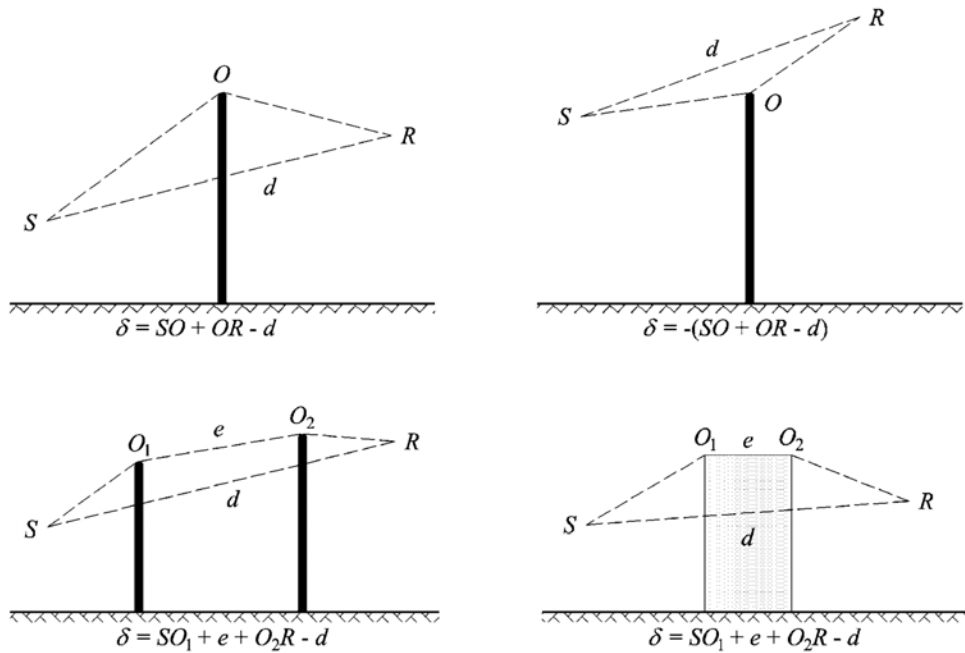


Figura 2.5.d: *Calcolo della differenza di percorso in condizioni omogenee.*  $O$ ,  $O_1$  e  $O_2$  sono i punti di diffrazione.

Nota: Per ciascuna configurazione, è posta l'espressione di  $\delta$ .

*Condizioni favorevoli*

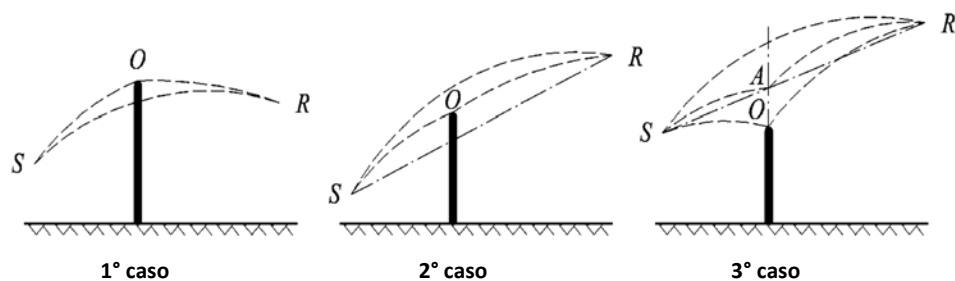


Figura 2.5.e: *Calcolo della differenza di percorso in condizioni favorevoli (diffrazione semplice)*

In condizioni favorevoli, si ritiene che i tre raggi sonori curvi  $SO$ ,  $OR$ , e  $SR$ , abbiano lo stesso raggio di curvatura  $\Gamma$ , definito da:

$$\Gamma = \max(1000, 8d) \quad (2.5.24)$$

In condizioni favorevoli, la lunghezza della curvatura del raggio sonoro  $MN$  è espressa come  $\hat{MN}$ . Tale lunghezza è pari a:

$$\hat{MN} = 2\Gamma \arcsin\left(\frac{MN}{2\Gamma}\right) \quad (2.5.25)$$

In linea di principio, andrebbero presi in considerazione tre scenari nel calcolo della differenza di percorso in condizioni favorevoli,  $\delta_F$  (cfr. figura 2.5.e). In pratica, sono sufficienti due equazioni:

- se la propagazione del raggio sonoro rettilineo,  $SR$ , è impedita da un ostacolo (primo e secondo caso, figura 2.5.e):

$$\delta_F = \hat{SO} + \hat{OR} - \hat{SR} \quad (2.5.26)$$

- se la propagazione del raggio sonoro rettilineo,  $SR$ , non è impedita da un ostacolo (terzo caso, figura 2.5.e):

$$\delta_F = 2\hat{SA} + 2\hat{AR} - \hat{SO} - \hat{OR} - \hat{SR} \quad (2.5.27)$$

dove  $A$  è l'intersezione tra il raggio sonoro rettilineo  $SR$  con il prolungamento dell'ostacolo che genera la diffrazione.

In caso di diffrazioni multiple in condizioni favorevoli:

- determinare l'involuppo convesso definito dai vari spigoli di diffrazione potenziali;
- eliminare gli spigoli di diffrazione che non si trovano lungo il margine dell'involuppo convesso;
- calcolare  $\delta_F$  basandosi sulla lunghezza del raggio sonoro curvo, suddividendo il percorso diffratto nei segmenti curvi necessari (cfr. figura 2.5.f)

$$\delta_F = \hat{SO}_1 + \sum_{i=1}^{i=n-1} O_i \hat{O}_{i+1} + \hat{O}_n R - \hat{SR} \quad (2.5.28)$$

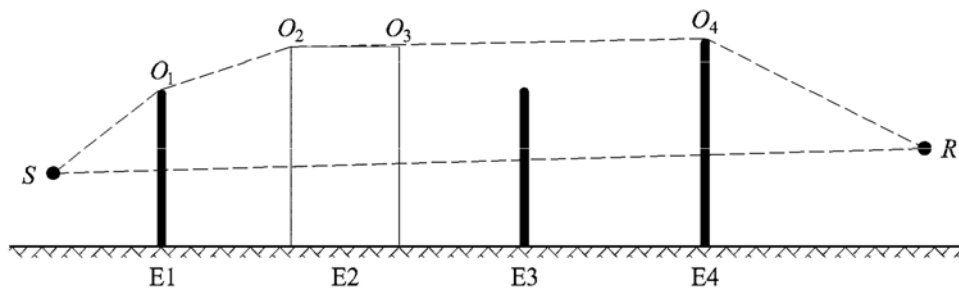


Figura 2.5.f: Esempio di calcolo della differenza di percorso in condizioni favorevoli, in caso di diffrazioni multiple

Nello scenario presentato in figura 2.5.f, la differenza di percorso è la seguente:



$$\delta_F = \hat{S}O_1 + O_1\hat{O}_2 + O_2\hat{O}_3 + O_3\hat{O}_4 + \hat{O}_4R - \hat{S}R \quad (2.5.29)$$

Calcolo dell'attenuazione  $A_{dif}$

Per calcolare l'attenuazione dovuta a diffrazione, tenendo conto degli effetti del suolo sul lato sorgente e sul lato ricettore, vengono utilizzate le seguenti formule:

$$A_{dif} = \Delta_{dif(S,R)} + \Delta_{ground(S,O)} + \Delta_{ground(O_n,R)} \quad (2.5.30)$$

dove

- $\Delta_{dif(S,R)}$  è l'attenuazione dovuta alla diffrazione tra la sorgente  $S$  e il ricettore  $R$ ;
- $\Delta_{ground(S,O)}$  è l'attenuazione dovuta all'effetto del suolo lato sorgente, ponderata dalla diffrazione lato sorgente; si intende che, in caso di diffrazioni multiple come nella figura 2.5.f,  $O=O_1$ ;
- $\Delta_{ground(O,R)}$  è l'attenuazione dovuta all'effetto del suolo lato ricettore, ponderata dalla diffrazione lato ricettore (cfr. il calcolo del termine  $\Delta_{ground(O,R)}$ , nella sottosezione seguente).

Calcolo del termine  $\Delta_{ground(S,O)}$

$$\Delta_{ground(S,O)} = -20 \times \lg \left( 1 + \left( 10^{\frac{-A_{ground(S,O)}}{20}} - 1 \right) \cdot 10^{\frac{-(\Delta_{dif(S',R)} - \Delta_{dif(S,R)})}{20}} \right) \quad (2.5.31)$$

dove

- $A_{ground(S,O)}$  è l'attenuazione dovuta all'effetto del suolo tra la sorgente  $S$  e il punto di diffrazione  $O$ . Questo termine si calcola come indicato nella precedente sottosezione sui calcoli in condizioni omogenee e nella precedente sottosezione sui calcoli in condizioni favorevoli, ponendo le seguenti ipotesi:
- $z_r = z_{o,s}$ ;
- $G_{path}$  viene calcolato tra  $S$  e  $O$ ;
- In condizioni omogenee:  $\bar{G}_w = G'_{path}$  nell'equazione (2.5.17),  $\bar{G}_m = G'_{path}$  nell'equazione (2.5.18);
- In condizioni favorevoli:  $\bar{G}_w = G_{path}$  nell'equazione (2.5.17),  $\bar{G}_m = G'_{path}$  nell'equazione (2.5.20);
- $\Delta_{dif(S',R)}$  è l'attenuazione dovuta alla diffrazione tra la sorgente immagine  $S'$  e  $R$ , calcolata come descritto nella sottosezione precedente sulla diffrazione pura;

- $\Delta_{dif(S,R)}$  è l'attenuazione dovuta alla diffrazione tra  $S$  e  $R$ , calcolata come descritto nella sottosezione VI.4.4.b.

Calcolo del termine  $\Delta_{ground(O,R)}$

$$\Delta_{ground(O,R)} = -20 \times \lg \left( 1 + \left( 10^{-A_{ground(O,R)}/20} - 1 \right) \cdot 10^{-\left( \Delta_{dif(S,R')} - \Delta_{dif(S,R)} \right) / 20} \right) \quad (2.5.32)$$

dove

- $A_{ground(O,R)}$  è l'attenuazione dovuta all'effetto del suolo tra il punto di diffrazione  $O$  e il ricevitore  $R$ . Questo termine si calcola come indicato nella precedente sottosezione sui calcoli in condizioni omogenee e nella precedente sottosezione sui calcoli in condizioni favorevoli, ponendo le seguenti ipotesi:
- $z_s = z_{o,r}$
- $G_{path}$  viene calcolato tra  $O$  e  $R$ .

Dato che la sorgente considerata è il punto di diffrazione, non è necessario prendere in conto la correzione  $G_{path}$ . Pertanto, si utilizzerà  $G_{path}$  nel calcolo degli effetti del suolo, incluso per il termine del limite inferiore dell'equazione, che diventa  $-3(1 - G_{path})$ .

- In condizioni omogenee:  $\overline{G_w} = G_{path}$  nell'equazione (2.5.17) e  $\overline{G_m} = G_{path}$  nell'equazione (2.5.18);
- In condizioni favorevoli,  $\overline{G_w} = G_{path}$  nell'equazione (2.5.17) e  $\overline{G_m} = G_{path}$  nell'equazione (2.5.20);
- $\Delta_{dif(S,R')}$  è l'attenuazione dovuta alla diffrazione tra  $S$  e il ricevitore immagine,  $R'$ , calcolata come descritto alla sezione precedente sulla diffrazione pura;
- $\Delta_{dif(S,R)}$  è l'attenuazione dovuta alla diffrazione tra  $S$  e  $R$ , calcolata come descritto nella sottosezione precedente sulla diffrazione pura.

Scenari di spigoli verticali

È possibile utilizzare l'equazione (2.5.21) per calcolare le diffrazioni sugli spigoli verticali (diffrazioni laterali) in caso di rumori generati da attività industriali. Per fare ciò, si pone  $A_{dif} = \Delta_{dif(S,R)}$  e si mantiene il termine  $A_{ground}$ . Inoltre,  $A_{atm}$  e  $A_{ground}$  saranno calcolati a partire dalla lunghezza totale del percorso di propagazione.  $A_{div}$  continua a essere calcolato a partire dalla distanza diretta  $d$ . Le equazioni (2.5.8) e (2.5.6) diventano, rispettivamente:

$$A_H = A_{div} + A_{atm}^{path} + A_{ground,H}^{path} + \Delta_{dif,H(S,R)} \quad (2.5.33)$$

$$A_F = A_{dv} + A_{atm}^{path} + A_{ground,F}^{path} + \Delta_{dif,H(S,R)} \quad (2.5.34)$$

$\Delta_{dif}$  è effettivamente utilizzato in condizioni omogenee nell'equazione (2.5.34).

### Riflessioni sugli ostacoli verticali

#### Attenuazione attraverso assorbimento

Le riflessioni sugli ostacoli verticali sono trattate mediante sorgenti immagine. Le riflessioni sulle facciate di edifici e sulle barriere antirumore sono quindi trattate in questo modo.

Un ostacolo è considerato verticale qualora la sua inclinazione rispetto alla verticale sia inferiore a  $15^\circ$ .

Per le riflessioni su oggetti, non si considerano quelli per i quali l'inclinazione rispetto alla verticale sia superiore o pari a  $15^\circ$ .

Eccetto in caso di configurazioni speciali, nel calcolo delle riflessioni vengono ignorati gli ostacoli per i quali almeno una delle dimensioni sia inferiore a 0,5 m.<sup>5</sup>

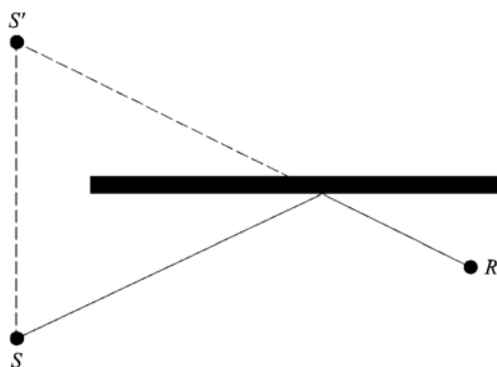
Si segnala che le riflessioni sul suolo non vengono esaminate in questa sottosezione, ma sono prese in considerazione nei calcoli dell'attenuazione dovuta al margine (suolo, diffrazione).

Se  $L_{WS}$  è il livello di potenza della fonte  $S$  e  $\alpha_r$  è il coefficiente di assorbimento della superficie dell'ostacolo, come definito dalla norma EN 1793-1:2013, il livello di potenza della sorgente immagine  $S'$  è il seguente:

$$L_{WS'} = L_{WS} + 10 \cdot \lg(1 - \alpha_r) = L_{WS} + A_{refl} \quad (2.5.35)$$

dove  $0 \leq \alpha_r < 1$

A questo percorso (sorgente immagine, ricettore) si applicano le attenuazioni della propagazione descritte sopra, come per un percorso diretto.



<sup>5</sup> Una rete di ostacoli di piccole dimensioni a intervalli regolari su un piano, costituisce un esempio di configurazione speciale.

Figura 2.5.g: Riflessione speculare su un ostacolo trattata con il metodo della sorgente immagine ( $S$ : sorgente,  $S'$ : sorgente immagine,  $R$ : ricettore)

*Attenuazione attraverso retrodiffrazione*

Nello studio geometrico dei percorsi sonori che si riflettono su un ostacolo verticale (barriera, edificio), la posizione dell'impatto del raggio in relazione allo spigolo superiore dell'ostacolo in questione determina quale proporzione, più o meno significativa, di energia viene effettivamente riflessa. Questa perdita di energia acustica, che avviene quando il raggio viene riflesso, è detta attenuazione mediante retrodiffrazione.

In caso di potenziali riflessioni multiple tra due pareti verticali, occorre prendere in considerazione almeno la prima riflessione.

Nel caso di una trincea (cfr., per esempio, la figura 2.5.h), l'attenuazione mediante retrodiffrazione si applica a ogni riflessione sui muri di sostegno.

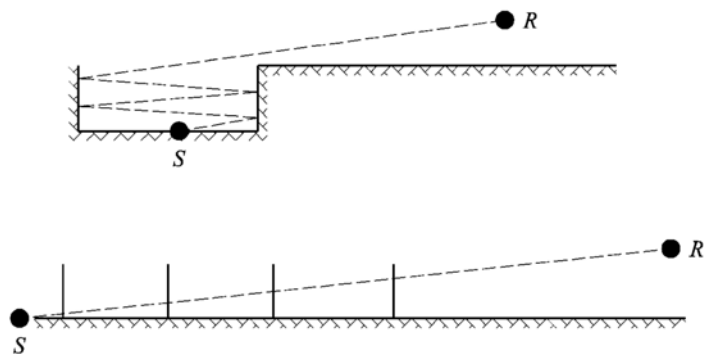


Figura 2.5.h: Raggio sonoro riflesso al quarto ordine in un percorso in trincea: sezione trasversale effettiva (in alto), sezione trasversale allineata (in basso)

Nell'illustrazione, il raggio sonoro raggiunge il ricettore "attraversando successivamente" i muri di sostegno della trincea, che possono quindi essere equiparati ad aperture.

Quando si calcola la propagazione attraverso un'apertura, il campo sonoro del ricettore risulta dalla somma del campo diretto e del campo diffratto dagli spigoli dell'apertura. Questo campo diffratto assicura la continuità di transizione tra la zona chiara e quella in ombra. Quando il raggio si approssima allo spigolo dell'apertura, il campo diretto viene attenuato. Il calcolo è identico a quello dell'attenuazione tramite barriera nella zona chiara.

La differenza di percorso  $\delta'$  associata a ogni retrodiffrazione costituisce l'opposto della differenza di percorso tra  $S$  e  $R$  relativamente a ciascuno spigolo superiore  $O$ , in una vista a sezione trasversale allineata (vedere Figura 2.5.i).

$$\delta' = -(SO + OR - SR) \quad (2.5.36)$$

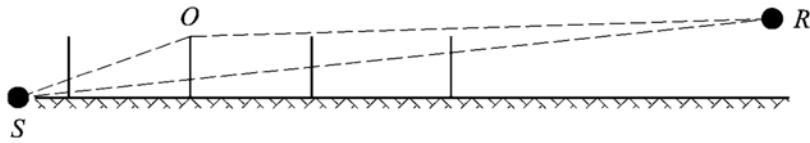


Figura 2.5.i: Differenza di percorso per la seconda riflessione

Il segno ‘meno’ nell’equazione (2.5.36) significa che si pone il ricevitore nella zona chiara.

L’attenuazione mediante retrodiffrazione,  $\Delta_{retrodif}$ , si ottiene attraverso l’equazione (2.5.37), che è simile all’equazione (2.5.21), con notazioni adattate.

$$\Delta_{retrodif} = \begin{cases} 10C_h \cdot \lg\left(3 + \frac{40}{\lambda} \delta'\right) & \text{se } \frac{40}{\lambda} \delta' \geq -2 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.5.37)$$

Questa attenuazione viene applicata al raggio diretto ogni volta che "attraversa" (è riflesso da) una parete o edificio. Il livello di potenza della sorgente immagine,  $S'$ , diventa pertanto:

$$L_{W'} = L_W + 10 \times \lg(1 - \alpha_r) - \Delta_{retrodif} \quad (2.5.38)$$

In configurazioni di propagazioni complesse, possono esistere diffrazioni tra riflessioni, o tra il ricevitore e le riflessioni. In questo caso, la retrodiffrazione dovuta alle pareti viene stimata tenendo conto del percorso tra la sorgente e il primo punto di diffrazione,  $R'$  (pertanto considerato il ricevitore nell’equazione (2.5.36)). Questo principio è illustrato nella figura 2.5.j.

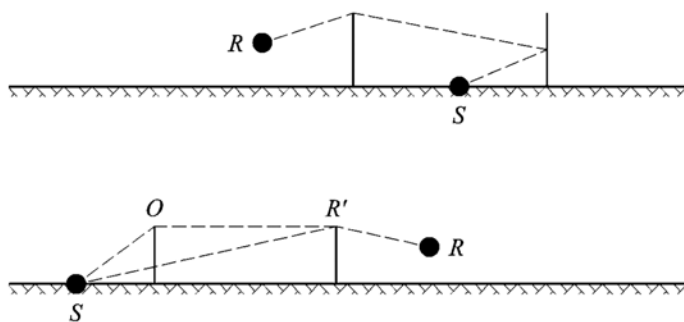


Figura 2.5.j: Differenza di percorso in presenza di diffrazione: sezione trasversale effettiva (in alto), sezione trasversale sviluppata (in basso)

In caso di riflessioni multiple, si sommano le riflessioni corrispondenti a ciascuna riflessione.

## 2.6. Disposizioni generali - Rumore prodotto da aeromobili

### 2.6.1. Definizioni e simboli

In questa sede vengono definiti alcuni *termini* importanti sulla base del significato generale loro attribuito nel presente documento. L'elenco non è esaustivo; sono stati inclusi solo gli acronimi e le espressioni ricorrenti. Altri termini vengono definiti alla loro prima occorrenza nel testo.

I *simboli* matematici (elencati dopo i termini) sono i più importanti tra quelli utilizzati nelle equazioni contenute nel testo principale. Altri simboli, usati localmente sia nel testo che nelle appendici, vengono definiti là dove si presentano.

Si ricorda periodicamente al lettore l'intercambiabilità, nel presente documento, delle parole *suono* e *rumore*. Sebbene la parola *rumore* abbia connotazioni soggettive (i tecnici competenti in acustica definiscono solitamente il *rumore* come "suono non desiderato") nel campo del controllo del rumore prodotto da aeromobili è comunemente inteso semplicemente come "suono" - energia trasmessa dal movimento delle onde acustiche nell'aria. Il simbolo → rimanda ad altri termini presenti nell'elenco.

#### Termini

AIP	Pubblicazioni di informazione aeronautica
Altezza	Distanza verticale tra l'aeromobile e il → <i>piano del suolo</i>
Altitudine	Altezza sopra il livello medio del mare.
Atmosfera di riferimento	Classificazione dei tassi di assorbimento del suono utilizzati per normalizzare i dati NPD (cfr. <b>appendice D</b> ).
Attenuazione del suono	La diminuzione dell'intensità del suono in funzione della distanza, lungo un percorso di propagazione. Per il rumore degli aeromobili, l'attenuazione è dovuta, tra l'altro, alla propagazione sferica delle onde, all'assorbimento atmosferico e → <i>all'attenuazione laterale</i> .
Attenuazione laterale	Attenuazione eccessiva del suono con la distanza, riconducibile, direttamente o indirettamente, alla presenza della superficie del suolo. È significativa a bassi angoli di elevazione (dell'aeromobile al di sopra del piano del suolo).
Banca dati ANP	Banca dati <i>Aircraft Noise and Performance</i> , sul rumore e sulle prestazioni degli aeromobili, di cui all'appendice I.
Configurazione dell'aeromobile	Posizione di <i>slat</i> (alule), <i>flap</i> (ipersostentatori) e carrello di atterraggio.
Configurazione di volo	= → <i>Configurazione dell'aeromobile</i> + → <i>Parametri di volo</i>

Curva isolivello	Linea che unisce i punti in cui il livello o l'indice di rumore cumulativo di un aeromobile intorno a un aeroporto è costante.
Dati sul rumore e sulle prestazioni dell'aeromobile	Dati descrittivi delle caratteristiche acustiche e delle prestazioni dei diversi tipi di velivoli necessari al processo di modellizzazione. Comprendono le → <i>relazioni NPD (Noise Power Distance, Rumore Potenza Distanza)</i> e le informazioni che permettono di calcolare la spinta/potenza del motore in funzione della → <i>configurazione di volo</i> . I dati sono abitualmente forniti dai costruttori di aeromobili sebbene, quando ciò non sia possibile, possono essere ottenuti da altre fonti. Se non è disponibile alcun dato, è normale rappresentare l'aeromobile in questione adeguando i dati di un aeromobile sufficientemente simile — secondo un processo detto di <i>sostituzione</i> .
Dati/relazioni di rumore-potenza-distanza (NPD, <i>Noise-Power-Distance</i> )	Livelli degli eventi di rumore, specificati per diversi → <i>regimi del motore</i> , e repertoriati in funzione delle distanze sottostanti un velivolo per un volo stabilizzato, a velocità di riferimento, in atmosfera di riferimento. I dati tengono conto degli effetti di attenuazione del suono dovuti alla propagazione sferica delle onde (legge dell'inverso del quadrato della distanza) e all'assorbimento atmosferico. La distanza è stabilita in perpendicolare alla traiettoria di volo degli aeromobili e all'asse delle ali (ossia, misurazione verticale al di sotto dell'aeromobile per un volo non in virata).
Distanza di scalo	Distanza fino alla prima destinazione di un aeromobile in fase di decollo; costituisce un indicatore del peso dell'aeromobile.
Durata di riferimento	Un intervallo di tempo nominale utilizzato per normalizzare le misurazioni del livello di esposizione sonora di un singolo evento; pari a 1 secondo nel caso di → <i>SEL</i> .
Esposizione sonora	Misura dell'immissione dell'energia sonora totale in un determinato arco di tempo.
Fasi della procedura	Prescrizioni di volo per un dato profilo, che includono variazioni della velocità e/o dell'altitudine.
Frazione di energia, <i>F</i>	Rapporto tra energia sonora ricevuta in provenienza dal segmento ed energia in provenienza da un'infinita traiettoria di volo.
Giorno di riferimento	Una serie di condizioni atmosferiche sulla base delle quali vengono normalizzati i dati ANP.

Impatto del rumore	L'effetto o gli effetti indesiderati del rumore sugli individui che lo percepiscono; è importante notare che le metodologie di misura del rumore sono, implicitamente, indicatori dell'impatto del rumore.
Indice del rumore	Misura il suono cumulativo o a lungo termine e lo mette in relazione con gli effetti prodotti sugli individui (la misura è considerata un predittore di tali effetti). Può tenere parzialmente conto di fattori che vanno al di là dell'entità del suono (in particolare l'ora del giorno). Un esempio è il livello giorno-sera-notte $L_{DEN}$ .
Inizio del rullaggio, SOR ( <i>Start of roll</i> )	Punto sulla pista a partire dal quale un aeromobile in partenza inizia la corsa di decollo. Denominato anche "Rilascio freni".
Intensità sonora	Intensità di un'immissione sonora in un determinato punto — è in relazione all'energia acustica ed è indicata dai livelli sonori misurati.
ISA	Atmosfera standard internazionale ( <i>International Standard Atmosphere</i> ) — definita dall'ICAO. Definisce le variazioni di temperatura, pressione e densità dell'aria ad altezza situata sopra il livello medio del mare. Utilizzata per normalizzare i risultati dei calcoli di progettazione degli aeromobili e per l'analisi dei dati dei controlli.
Livello base di un evento di rumore	Livello dell'evento di rumore, letto a partire da una banca dati NPD.
Livello di esposizione al rumore (SEL), $L_{AE}$	Un parametro metrologico normalizzato nella norma ISO 1996-1 o ISO 3891; corrisponde al livello di esposizione sonora di un singolo evento ponderato A, riferito a 1 secondo.
Livello di esposizione sonora per un singolo evento.	Il livello sonoro prodotto da un evento se tutta la sua energia sonora fosse compressa in modo uniforme in un determinato intervallo di tempo denominato → <i>durata di riferimento</i> .
Livello di rumore	Misura del suono in decibel, su una scala che ne indica l'intensità o il grado di rumore. Per il rumore ambientale degli aeromobili, vengono generalmente utilizzate due scale: livello sonoro ponderato A e livello di rumore percepito (PNL). Le scale applicano ponderazioni diverse a suoni di frequenza diversa - per simulare la percezione umana.
Livello medio del mare	Elevazione standard della superficie terrestre alla quale fa riferimento → l' <i>atmosfera standard internazionale</i> (ISA).



Livello sonoro	Misura, in unità decibel, dell'energia sonora. Il suono ricevuto viene misurato con o senza "ponderazione in funzione della frequenza"; i livelli misurati con ponderazione vengono spesso definiti → <i>livelli di rumore</i>
Livello sonoro (continuo) equivalente, $L_{eq}$	Misurazione sonora a lungo termine. Livello di un ipotetico rumore costante che, in un determinato periodo di tempo, contiene la stessa energia totale del suono variabile reale.
Livello sonoro equivalente ponderato, $L_{eq,W}$	Versione modificata di $L_{eq}$ in cui ponderazioni diverse sono assegnate al rumore generato in periodi diversi della giornata (generalmente: giorno-sera-notte)
Livello sonoro integrato	Indicato anche come → <i>livello di esposizione sonora per singolo evento</i> .
Livello sonoro ponderato A, $L_A$	Scala del livello di suono/rumore principale, utilizzata per la misurazione del rumore ambientale, incluso quello generato da aeromobili, e sulla quale si basa la maggior parte delle metodologie di misura delle curve isolivello.
Livello sonoro/del rumore massimo	Livello sonoro massimo raggiunto nel corso di un evento.
Livello sonoro/di rumore cumulativo	Misura, in decibel, del rumore ricevuto nell'arco di un determinato periodo di tempo, in un determinato punto in prossimità di un aeroporto, proveniente dal traffico di aeromobili in condizioni di esercizio e con traiettorie di volo normali. Viene calcolata cumulando i livelli sonori/di rumore degli eventi che si verificano in quel punto.
Livello sonoro/di rumore di un evento	Misura, in decibel, della quantità finita di suono (o di rumore) ricevuta al passaggio di un velivolo → <i>livello di esposizione al suono</i>
Metodologia di misura del rumore	Espressione utilizzata per descrivere qualsiasi misura di quantità di rumore in posizione ricevente, sia che si tratti di un evento unico sia che si tratti di un accumulo di rumore nel lungo periodo. Sono due le misure usate più comunemente per un singolo evento di rumore: il <i>livello massimo</i> raggiunto durante l'evento, oppure il <i>livello di esposizione a un suono</i> associato all'evento, che misura l'energia sonora totale dell'evento determinata dall'integrazione del tempo.
Movimento dell'aeromobile	Arrivo, partenza o qualunque altra azione dell'aeromobile che incide sull'esposizione al rumore nell'intorno di un aeroporto.

Osservatore	→ <i>Ricettore</i>
Parametri di volo	Regime del motore, velocità, angolo di inclinazione laterale e peso.
Parametro di potenza legato al rumore	Parametro che descrive o indica lo sforzo propulsivo generato dal motore di un aeromobile, al quale può essere logicamente associata un'emissione di potenza acustica; considerato normalmente come la → <i>spinta netta corretta</i> . Liberamente denominato "potenza" o "regime del motore" nel testo.
Piano del suolo	(o piano nominale del suolo) Superficie orizzontale del suolo, al punto di riferimento dell'aeroporto, a partire dal quale vengono abitualmente calcolate le curve isolivello.
Procedura di volo	La sequenza delle fasi operative seguite dall'equipaggio dell'aeromobile o dal sistema di gestione del volo: esprime le variazioni della configurazione di volo in funzione della distanza lungo la traccia al suolo.
Profilo di volo	Variazione dell'altezza del velivolo lungo la traccia al suolo (a volte include anche modifiche della → <i>configurazione di volo</i> ) - è descritta da una serie di → <i>punti del profilo</i>
Punto di profilo	Altezza dell'estremità di un segmento della traiettoria di volo — nel piano verticale al di sopra della traccia al suolo.
Regime del motore	Valore del → <i>parametro di potenza legato al rumore</i> utilizzato per determinare l'emissione di rumore a partire dalla banca dati NPD.
Ricettore	Ricettore di un rumore proveniente da una sorgente; primariamente in un punto sulla superficie del suolo o in prossimità di quest'ultima.
Rilascio freni	→ <i>Inizio del rullaggio</i>
Rumore	Il rumore è definito come un suono non desiderato. Tuttavia, metodologie di misura quali il <i>livello sonoro ponderato A (L<sub>A</sub>)</i> e il <i>livello effettivo di rumore percepito (EPNL, effective perceived noise level)</i> convertono efficacemente i livelli sonori in livelli di rumore. Nonostante la mancanza di rigore che ne deriva, i termini suono e rumore sono talvolta utilizzati in maniera intercambiabile nel presente documento, come altrove, in particolare quando associati alla parola <i>livello</i> .

Segmento di traiettoria di volo	Parte di una traiettoria di volo di un aeromobile rappresentata, a fini di modellizzazione del rumore, da una retta di lunghezza finita.
<i>SEL</i>	→ <i>Sound Exposure Level</i> (livello di esposizione sonora)
Significatività del rumore	Il contributo di un segmento di traiettoria di volo è "significativo del rumore" se incide considerevolmente sul livello dell'evento di rumore. Il fatto di non tener conto dei segmenti non caratterizzati da significatività del rumore consente considerevoli risparmi nell'elaborazione informatica.
Somma, o media, dei decibel	Definite altrove, a volte, come valori "di energia" o "logaritmici" (al contrario, cioè, di aritmetici). Viene utilizzata quando è necessario sommare o calcolare la media delle quantità soggiacenti correlate all'energia; ad esempio $somma\ dei\ decibel = 10 \cdot \lg \sum 10^{L_i/10}$
Spinta netta	Forza propulsiva esercitata da un motore sulla cellula dell'aeromobile.
Spinta netta corretta	A un dato regime del motore (es. <i>EPR</i> o <i>N<sub>1</sub></i> ) la spinta netta diminuisce in funzione della densità dell'aria e, quindi, della maggior altitudine dell'aeromobile; la spinta netta corretta è il valore al livello del mare.
Suolo soffice	Suolo "soffice" dal punto di vista acustico (in genere un suolo erboso) che circonda la maggior parte degli aeroporti. Le superfici "dure" dal punto di vista acustico, cioè altamente riflettenti, comprendono il cemento e l'acqua. La metodologia delle curve isolivello qui descritta si applica ai suoli soffici.
Suono	Energia trasmessa nell'aria tramite moto ondulatorio (longitudinale) e percepita dall'orecchio.
Traccia al suolo	Proiezione verticale della traiettoria di volo sul piano del suolo.
Traccia centrale al suolo	Traccia al suolo, rappresentativa o nominale, che definisce il centro di una fascia di tracce.
Traiettoria di volo	La traiettoria tridimensionale di un velivolo attraverso lo spazio, solitamente riferita a un'origine che coincide con l'inizio del rullaggio al decollo o della soglia pista.
Velocità al suolo	Velocità dell'aeromobile rispetto a un punto fisso sul suolo.

Velocità di riferimento	Velocità al suolo del velivolo sulla base della quale vengono normalizzati i dati <i>NPD</i> → <i>SEL</i> .
Velocità vera rispetto all'aria	Velocità effettiva dell'aeromobile rispetto all'aria (= velocità al suolo in aria calma).

**Simboli:**

$d$	Distanza minima tra un punto di osservazione e un segmento di traiettoria di volo
$d_p$	Distanza perpendicolare tra un punto di osservazione e la traiettoria di volo (distanza obliqua)
$d_\lambda$	Distanza normalizzata
$F_n$	Spinta netta effettiva per motore
$F_n/\delta$	Spinta netta corretta per motore
$h$	Altitudine dell'aeromobile (sopra il livello medio del mare)
$L$	Livello dell'evento di rumore (scala non definita)
$L(t)$	Livello sonoro al tempo $t$ (scala non definita)
$L_A, L_A(t)$	Livello di pressione sonora ponderata A (al tempo $t$ ) — misurata sulla scala <i>slow</i> del fonometro
$L_{AE}$	Livello di esposizione sonora (SEL, <i>Sound Exposure Level</i> )
$L_{Amax}$	Valore massimo di $L_A(t)$ durante un evento
$L_E$	Livello di esposizione sonora per un singolo evento
$L_{E\infty}$	Livello di esposizione sonora per un singolo evento determinato a partire da una banca dati <i>NPD</i>
$L_{EPN}$	Livello effettivo di rumore percepito
$L_{eq}$	Livello sonoro (continuo) equivalente
$L_{max}$	Valore massimo di $L(t)$ durante un evento
$L_{max,seg}$	Livello massimo generato da un segmento
$\ell$	Distanza perpendicolare tra un punto di osservazione e la traccia al suolo
$\lg$	Logaritmo in base 10

$N$	Numero di segmenti o sottosegmenti
$NAT$	Numero di eventi in cui $L_{max}$ eccede una determinata soglia
$P$	Parametro di potenza nella variabile $L(P,d)$ dell'NPD
$P_{seg}$	Parametro di potenza rilevante per un determinato segmento
$q$	Distanza dall'inizio del segmento al più vicino punto di approccio
$R$	Raggio di virata
$S$	Deviazione standard
$s$	Distanza lungo la traccia al suolo
$s_{RWY}$	Lunghezza della pista
$t$	Tempo
$t_e$	Durata effettiva del singolo evento sonoro
$t_0$	Tempo di riferimento per un livello sonoro integrato
$V$	Velocità al suolo
$V_{seg}$	Segmento di velocità al suolo equivalente
$V_{ref}$	Velocità di riferimento al suolo, attraverso la quale vengono definiti i dati NPD
$x,y,z$	Coordinate locali
$x',y',z'$	Coordinate dell'aeromobile
$X_{ARP}, Y_{ARP}, Z_{ARP}$	Posizione del punto di riferimento dell'aeroporto secondo le coordinate geografiche
$z$	Altezza dell'aeromobile al di sopra del piano del suolo / del punto di riferimento dell'aeroporto
$\alpha$	Parametro utilizzato per il calcolo della correzione del segmento finito $\Delta_F$
$\beta$	Angolo di elevazione dell'aeromobile rispetto al piano del suolo
$\varepsilon$	Angolo di inclinazione laterale dell'aeromobile
$\gamma$	Angolo di salita/discesa
$\varphi$	Angolo di depressione (parametro di direttività laterale)

$\lambda$	Lunghezza totale del segmento
$\psi$	Angolo tra la direzione del movimento dell'aeromobile e la direzione verso l'osservatore
$\xi$	Rotta dell'aeromobile, misurata in senso orario dal nord magnetico
$\Lambda(\beta, \ell)$	Attenuazione laterale aria-terra
$\Lambda(\beta)$	Attenuazione laterale aria-terra a lungo raggio
$\Gamma(\ell)$	Fattore di distanza dell'attenuazione laterale
$\Delta$	Modifica del valore di una quantità. o correzione (come indicato nel testo)
$\Delta_F$	Correzione del segmento finito
$\Delta_I$	Correzione relativa all'installazione del motore
$\Delta_i$	Ponderazione per il tempo $i$ -esimo di una giornata, in dB
$\Delta_{rev}$	Inversione di spinta
$\Delta_{SOR}$	Correzione a inizio rullaggio
$\Delta_V$	Correzione della durata (velocità)

## **Indici**

1, 2	Indici indicativi dei valori iniziale e finale di un intervallo o segmento
$E$	Esposizione
$i$	Indice della sommatoria del tipo/categoria di aeromobili
$j$	Indice della sommatoria del tipo di traccia/sottotraccia al suolo
$k$	Indice della sommatoria dei segmenti
$max$	Massimo
$ref$	Valore di riferimento
$seg$	Valore specifico del segmento
$SOR$	Riferito all'inizio del rullaggio

TO                    Decollo

### 2.6.2. *Qualità*

#### *Precisione dei valori in entrata*

Tutti i valori in entrata che incidono sul livello di emissione di una sorgente, compresa la posizione della sorgente stessa, devono essere determinati con una precisione corrispondente almeno a un'incertezza pari a  $\pm 2\text{dB(A)}$  nel livello di emissione della sorgente (lasciando invariati tutti gli altri parametri).

#### *Utilizzo di valori predefiniti*

Nell'applicazione del metodo, i dati in entrata devono riflettere l'utilizzo effettivo. In generale, non bisogna ricorrere a ipotesi o valori in entrata predefiniti. In particolare, per derivare le traiettorie di volo si devono usare i dati radar ogniqualvolta esistano e siano di sufficiente qualità. Per modellizzare le rotte sono ad esempio accettabili ipotesi e valori in entrata predefiniti invece di traiettorie di volo definite a partire da dati radar, se la raccolta di dati reali implica costi eccessivamente elevati.

#### *Qualità del software utilizzato per i calcoli*

Il software utilizzato per eseguire i calcoli deve essere conforme ai metodi descritti nel presente documento e tale conformità va dimostrata mediante la certificazione dei risultati con procedure di collaudo.

## 2.7. Rumore dell'aeromobile

### 2.7.1. Scopo e ambito di applicazione del documento

Per indicare la portata e l'entità dell'impatto del rumore prodotto dagli aeromobili nell'intorno degli aeroporti vengono utilizzate carte delle curve isolivello; l'impatto viene rappresentato da valori appartenenti a un determinato indice o metodologia di misura del rumore. Una curva isolivello è una linea lungo la quale il valore dell'indice è costante. Il valore dell'indice aggrega, in qualche modo, tutti i singoli eventi di rumore prodotti dagli aeromobili che si verificano durante un determinato periodo di tempo, normalmente giorni o mesi.

La percezione, nei punti al suolo, del rumore proveniente da aeromobili in fase di decollo o atterraggio in un aeroporto in prossimità dipende da molti fattori; i principali sono i tipi di velivolo e di motopropulsore; le procedure di gestione della potenza, dei flap e della velocità in aria dei velivoli; le distanze fra i punti interessati e le varie traiettorie di volo; la morfologia locale e le condizioni meteorologiche. Il traffico aeroportuale comprende generalmente vari tipi di velivoli, procedure di volo e carichi operativi.

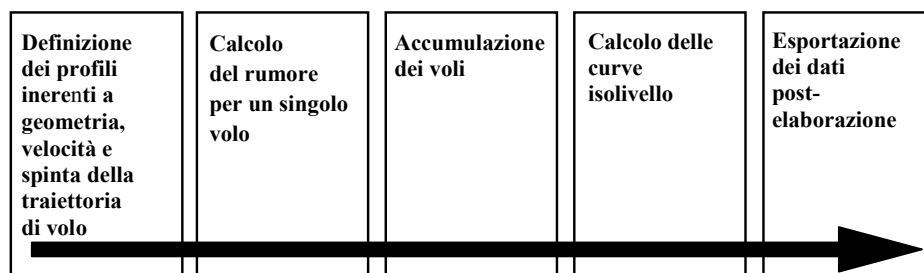
Le curve isolivello sono generate attraverso il calcolo matematico delle superfici dei valori locali degli indici di rumore. Il presente documento illustra in modo dettagliato le modalità di calcolo, in un punto di osservazione, dei livelli dei singoli eventi di rumore generati dai velivoli, per ciascun volo o tipo di volo corrispondente, per i quali viene successivamente calcolata, in qualche modo, una media o che vengono *cumulati* per ottenere i valori degli indici nel punto in causa. La superficie richiesta per i valori degli indici viene generata semplicemente ripetendo i calcoli per i vari movimenti degli aeromobili, finché necessario — massimizzando l'efficienza attraverso l'esclusione di eventi non caratterizzati da "significatività di rumore" (ossia, che non contribuiscono in modo significativo al totale).

Possono essere escluse le attività generatrici di rumore associate al traffico aereo se esse non contribuiscono materialmente all'esposizione complessiva della popolazione al rumore prodotto dai velivoli e alle curve isolivello associate. Tali attività includono: elicotteri, rullaggio, prove motore e utilizzo di gruppi motopropulsori ausiliari. Ciò non significa necessariamente che il loro impatto sia trascurabile e, se tali circostanze si verificano, è possibile procedere a una valutazione delle sorgenti ai sensi dei paragrafi 2.7.21 e 2.7.22.

### 2.7.2. Struttura del documento

Il processo di generazione della curva isolivello è illustrato nella **figura 2.7.a**. Le curve sono prodotte a diversi fini, che normalmente incidono sugli obblighi applicabili alle fonti e alla preelaborazione dei dati in entrata. È possibile generare le curve descrittive dell'impatto storico del rumore a partire da registrazioni reali del traffico aereo - movimenti, pesi, traiettorie di volo misurate da radar, ecc.. Inevitabilmente, le curve isolivello utilizzate per la pianificazione futura devono invece fare maggiore affidamento sulle previsioni circa traffico e tracce di volo, e circa prestazioni e rumore degli aeromobili di prossima generazione.





**Figura 2.7.a: Processo di generazione delle curve isolivello**

A prescindere dalla fonte dei dati di volo, ogni diverso movimento dell'aeromobile, in arrivo o in partenza, è definito dalla geometria della sua traiettoria di volo e dalle sue emissioni di rumore mentre percorre la traiettoria (i movimenti che sono sostanzialmente gli stessi in termini di rumore e traiettoria sono contabilizzati per semplice moltiplicazione). L'emissione di rumore dipende dalle caratteristiche dell'aeromobile — principalmente dalla potenza generata dai motori. La metodologia raccomandata comporta la divisione della traiettoria di volo in segmenti. Le **sezioni da 2.7.3 a 2.7.6** illustrano gli elementi della metodologia e spiegano il principio della segmentazione su cui essa si basa, vale a dire che il livello di rumore di un evento osservato risulta dall'insieme dei contributi di tutti i segmenti caratterizzati da "significatività di rumore" nella traiettoria di volo, ciascuno dei quali può essere calcolato indipendentemente. Le **sezioni da 2.7.3 a 2.7.6** illustrano inoltre i requisiti in materia di dati in entrata per la produzione di una serie di curve isolivello. L'**appendice A** contiene specifiche dettagliate relative ai dati operativi necessari.

Le **sezioni da 2.7.7 a 2.7.13** descrivono come procedere al calcolo dei segmenti di volo a partire da dati in entrata preelaborati. Il calcolo comprende il ricorso all'analisi delle prestazioni di volo di un aeromobile, le cui equazioni sono riportate nell'**appendice B**. Le traiettorie di volo sono soggette a grande variabilità: la rotta seguita da un aeromobile può essere dispersa su una fascia a causa degli effetti dovuti alle condizioni atmosferiche, al peso dell'aeromobile e alle procedure operative, alle restrizioni imposte dal traffico aereo, ecc.. La variabilità viene presa in conto descrivendo ciascuna traiettoria di volo in modo statistico, ossia una traiettoria di volo centrale ("*backbone*") e una serie di traiettorie disperse. Anche questo è spiegato nelle **sezioni da 2.7.7 a 2.7.13** che fanno riferimento a informazioni supplementari contenute nell'**appendice C**.

Le **sezioni da 2.7.14 a 2.7.19** stabiliscono le fasi da seguire per calcolare il livello di rumore di un unico evento, ossia il rumore generato in un punto al suolo da un movimento di un aeromobile. L'**appendice D** riguarda il ricalcolo dei dati NPD per condizioni diverse da quelle di riferimento. L'**appendice E** spiega la sorgente acustica a dipolo utilizzata nel modello per definire l'irradiazione sonora proveniente da segmenti di traiettoria di volo di lunghezza finita.

Le applicazioni delle relazioni di modellizzazione di cui ai capitoli 3 e 4 richiedono, oltre alle pertinenti traiettorie di volo, dati adeguati sul rumore e sulle prestazioni dell'aeromobile in questione.

Il calcolo fondamentale è incentrato sulla determinazione del livello dell'evento corrispondente a un singolo movimento di un aeromobile in un singolo punto di osservazione; occorre ripeterlo per tutti i movimenti dell'aeromobile in ciascuno dei punti di una definita matrice di punti che copre l'estensione stimata delle curve isolivello. In ogni punto, i livelli dell'evento vengono aggregati o se

ne calcola in qualche modo la media, per giungere ad un "livello cumulativo" o a un valore dell'indice di rumore. Questa parte del processo è descritta nelle **sezioni 2.7.20 e da 2.7.23 a 2.7.25**.

Le **sezioni da 2.7.26 a 2.7.28** espongono in sintesi le opzioni e i requisiti per adattare le curve isolivello alle matrici di valori di rumore indicizzati. Offrono inoltre indicazioni sulla generazione delle curve e sulla postelaborazione.

### 2.7.3. *Il concetto di segmentazione*

La banca dati contiene relazioni NPD di riferimento per qualunque aeromobile. Queste relazioni definiscono i livelli sonori, sia massimi sia integrati nel tempo, degli eventi sonori ricevuti direttamente al di sotto dell'aeromobile<sup>6</sup> in funzione della distanza, per un volo rettilineo costante a una *velocità di riferimento*, in *condizioni atmosferiche di riferimento* specifiche e in una configurazione di volo specifica. A fini della modellizzazione del rumore, la potenza propulsiva (o regime del motore, di fondamentale importanza) è rappresentata da un *parametro di potenza legato al rumore*; il parametro generalmente utilizzato è quello della *spinta netta corretta*. I livelli di riferimento degli eventi, determinati a partire dalla banca dati, vengono corretti in modo da prendere in considerazione prima di tutto le differenze tra le condizioni atmosferiche effettive (vale a dire modellate) e quelle di riferimento e (nel caso dei livelli di esposizione sonora) la velocità degli aeromobili, nonché, in secondo luogo e per i punti di ricezione che non si trovano direttamente al di sotto dell'aeromobile, le differenze tra rumore radiato lateralmente e verso il basso. Quest'ultima differenza è dovuta alla *direttività laterale* (effetti di installazione del motore) e all'*attenuazione laterale*. In ogni caso, i livelli così corretti si applicano solo al rumore totale proveniente dall'aeromobile in volo stabilizzato.

La *segmentazione* è il processo mediante il quale il modello di curva isolivello raccomandato adatta i dati NPD e laterali corrispondenti a una traiettoria infinita per calcolare il rumore che arriva a un ricettore da una traiettoria di volo non uniforme, vale a dire lungo la quale la configurazione di volo di un aeromobile varia. Ai fini del calcolo del livello sonoro di un evento associato a un movimento di un aeromobile, la traiettoria di volo è rappresentata da una serie di segmenti di retta contigui, ciascuno dei quali può essere considerato come una parte finita di una traiettoria infinita per la quale sono noti la relazione NPD e gli adeguamenti laterali. Il livello massimo dell'evento corrisponde semplicemente al maggiore dei valori dei singoli segmenti. Il livello integrato nel tempo dell'intero evento di rumore è calcolato sommando il rumore ricevuto emesso da un sufficiente numero di segmenti, ossia quelli il cui contributo al rumore totale degli eventi è significativo.

Il metodo di stima del contributo, in termini di rumore, di un segmento finito al livello integrato dell'evento è puramente empirico. La *frazione energetica F* — il rumore emesso dal segmento in quanto proporzione del rumore totale della traiettoria infinita — viene descritta da un'espressione relativamente semplice che tiene conto della direttività longitudinale del rumore degli aeromobili e della "vista" del segmento da parte del ricettore. Uno dei motivi per cui un semplice metodo empirico è generalmente adeguato è che, in linea di principio, la maggior parte del rumore proviene dal segmento più vicino, di solito adiacente: di conseguenza, il *punto più vicino di approccio* (CPA, *closest point of approach*) al ricettore si trova all'interno del segmento (e non a una delle estremità). Ciò significa che le stime del rumore emesso dai segmenti non adiacenti possono essere sempre più approssimative man mano che aumenta la distanza dal ricettore, senza per questo compromettere l'accuratezza in modo significativo.

---

<sup>6</sup> In realtà, al di sotto dell'aeromobile, perpendicolarmente all'asse delle ali e alla direzione di volo; corrisponde alla proiezione verticale al di sotto di un aeromobile in un volo non in virata.

#### 2.7.4. Traiettorie di volo: tracce e profili

Nel contesto della modellizzazione, la *traiettoria di volo* è una descrizione completa del movimento degli aeromobili nello spazio e nel tempo<sup>7</sup>. Insieme alla spinta propulsiva (o ad altro parametro di potenza legato al rumore) fornisce le informazioni necessarie al calcolo del rumore generato. La *traccia al suolo* è la proiezione verticale della traiettoria di volo sul piano del suolo; viene combinata con il *profilo di volo* verticale per elaborare una traiettoria di volo tridimensionale. Il modello di segmentazione esige la descrizione della traiettoria di volo di ciascun movimento di un aeromobile attraverso una serie di segmenti di retta contigui. Il modo in cui si effettua la segmentazione è dettato dalla necessità di conciliare accuratezza ed efficienza: è necessario ottenere un'approssimazione sufficientemente prossima della curva reale della traiettoria di volo minimizzando, nel contempo, l'onere di calcolo e i requisiti in materia di dati. Ogni segmento deve essere definito dalle coordinate geometriche delle sue estremità, dalla velocità associata e dai parametri del regime del motore dell'aeromobile (da cui dipendono le emissioni sonore). Le traiettorie di volo e il regime del motore possono essere determinati in vari modi: i principali implicano (a) la sintesi di una serie di fasi della procedura, e (b) l'analisi dei dati del profilo di volo misurati.

La *sintesi* della traiettoria di volo (a) richiede la conoscenza (o la stima) delle tracce al suolo e delle loro dispersioni laterali, del peso dell'aeromobile, della posizione dei flap e delle procedure di gestione della spinta, dell'elevazione dell'aeroporto, e della temperatura del vento e dell'aria. Le equazioni relative al calcolo del profilo di volo a partire dai parametri propulsivi e aerodinamici richiesti sono riportate nell'**appendice B**. Ogni equazione contiene dei coefficienti (e/o delle costanti) basate su dati empirici per ciascun tipo di aeromobile. Le equazioni sulle prestazioni aerodinamiche cui all'**appendice B** permettono di tener conto di qualunque combinazione ragionevole tra carico operativo dell'aeromobile e procedure di volo, comprese le operazioni per diversi pesi lordi al decollo.

L'*analisi* dei dati misurati (b), ad esempio dai registratori dei dati di volo, dai radar o da altre attrezzature di monitoraggio degli aerei, comporta un processo di "retroingegneria", vale a dire un processo inverso a quello di sintesi (a). Invece di stimare lo stato dell'aeromobile e del motopropulsore alle estremità dei segmenti di volo integrando gli effetti della spinta e delle forze aerodinamiche esercitate sulla cellula, le forze vengono stimate attraverso la differenziazione delle variazioni di altezza e velocità della cellula. Le procedure per l'elaborazione delle informazioni sulla traiettoria di volo sono descritte nella sezione 2.7.12.

Secondo una recente applicazione per la modellizzazione del rumore, ogni singolo volo potrebbe, in teoria, essere rappresentato in modo indipendente; questo garantirebbe una contabilizzazione rigorosa della dispersione spaziale delle traiettorie di volo, che può essere molto significativa. Tuttavia, per mantenere entro limiti ragionevoli la preparazione dei dati e il tempo di elaborazione informatica, è prassi consueta rappresentare le fasce delle traiettorie di volo attraverso un numero contenuto di "sottotracce" disperse lateralmente. (Solitamente la dispersione verticale è rappresentata in modo soddisfacente contabilizzando gli effetti delle variazioni del peso degli aeromobili sui profili verticali.)

---

<sup>7</sup> Il tempo è contabilizzato attraverso la velocità degli aeromobili.

#### 2.7.5. Rumore e prestazioni dell'aeromobile

La banca dati ANP di cui all'allegato I copre la maggior parte degli aeromobili esistenti. I tipi o le varianti di aeromobili i cui dati non sono attualmente contemplati possono essere rappresentati dai dati corrispondenti ad altri aeromobili, normalmente simili, che figurano invece nella banca dati.

La banca dati ANP comprende delle "fasi della procedura" predefinite che consentono di creare profili di volo per almeno una procedura comune per l'abbattimento del rumore alla partenza. I dati più recentemente immessi nella banca dati riguardano due diverse procedure per l'abbattimento del rumore alla partenza.

#### 2.7.6. Operazioni aeroportuali e aeree

I dati, relativi a casi concreti, in base ai quali calcolare le curve isolivello per un determinato scenario aeroportuale comprendono quelli indicati di seguito.

##### *Dati aeroportuali generali*

- Il punto di riferimento dell'aeroporto (necessario per localizzarlo con un sistema adeguato di coordinate geografiche). Costituisce l'origine del sistema locale delle coordinate cartesiane utilizzato nella procedura di calcolo.
- L'altitudine di riferimento dell'aeroporto (= altitudine del punto di riferimento dell'aeroporto). Corrisponde all'altitudine del piano del suolo nominale sul quale, in assenza di correzioni topografiche, vengono definite le curve isolivello.
- Parametri meteorologici medi a livello, o in prossimità, del punto di riferimento dell'aeroporto (temperatura, umidità relativa, velocità media e direzione del vento).

##### *Dati sulle piste*

Per ogni pista:

- Designazione della pista
- Punto di riferimento della pista (centro della pista, espresso in coordinate locali)
- Lunghezza, direzione e pendenza media della pista
- Localizzazione dell'inizio del rullaggio e della soglia pista<sup>8</sup>.

##### *Dati relativi alle tracce al suolo*

Le tracce al suolo degli aeromobili sono definite da una serie di coordinate a livello del piano del suolo (orizzontale). La fonte dei dati relativi alle tracce al suolo dipende dalla disponibilità di dati radar pertinenti. Qualora siano disponibili è possibile stabilire, attraverso la loro analisi statistica, una traccia centrale affidabile e sottotracce (disperse) associate e adattate. In caso contrario, le tracce centrali vengono generalmente stabilite a partire da informazioni procedurali appropriate, ricorrendo ad esempio a procedure strumentali standard di partenza contenute in pubblicazioni AIP. Tale descrizione convenzionale comprende le informazioni seguenti:

- denominazione della pista d'origine della traccia

---

<sup>8</sup> Le soglie spostate possono essere prese in considerazione stabilendo piste supplementari.

- descrizione dell'origine della traccia (inizio del rullaggio, soglia pista)
- lunghezza dei segmenti (per virate, raggio e cambiamento di direzione)

Si tratta delle informazioni minime necessarie per definire la traccia (centrale) principale. Tuttavia, i livelli di rumore medio calcolati a partire dal presupposto che gli aeromobili seguano esattamente le rotte nominali possono dar luogo a errori localizzati di svariati decibel. Occorre quindi rappresentare la dispersione laterale, e sono necessarie le informazioni supplementari elencate di seguito:

- larghezza della fascia (o altra statistica di dispersione) all'estremità di ogni segmento.
- numero di sottotracce
- distribuzione dei movimenti perpendicolarmente alla traccia centrale

#### *Dati sul traffico aereo*

I dati sul traffico aereo comprendono

- il periodo di tempo coperto dai dati
- il numero di movimenti (arrivi o partenze) di ciascun tipo di aeromobile su ciascuna traccia di volo, suddiviso per (1) l'ora del giorno che meglio risponde ai descrittori di rumore specificati, (2) i carichi operativi o le lunghezze delle tappe, per le partenze, e (3) le procedure operative, se del caso.

La maggior parte dei descrittori di rumore richiedono che gli eventi (cioè i movimenti degli aeromobili) siano definiti come valori medi giornalieri durante determinati periodi della giornata (per esempio: periodo diurno, serale e notturno) — cfr. **sezioni da 2.7.23 a 2.7.25**.

#### *Dati topografici*

Il terreno intorno alla maggior parte degli aeroporti è relativamente piatto. Tuttavia, ciò non è sempre vero e a volte può essere necessario tener conto di variazioni nell'elevazione del terreno rispetto all'elevazione di riferimento dell'aeroporto. L'effetto dell'elevazione del terreno può essere particolarmente importante in prossimità delle tracce di avvicinamento, quando l'aeromobile opera ad altitudini relativamente basse.

Normalmente, i dati sull'elevazione del terreno sono forniti come un insieme di coordinate ( $x, y, z$ ) per una griglia rettangolare con maglie di una determinata dimensione. Tuttavia, i parametri della griglia relativa all'elevazione saranno con tutta probabilità diversi da quelli della griglia utilizzata per il calcolo del rumore; in tal caso, è possibile ricorrere a un'interpolazione lineare per stimare le coordinate  $z$  appropriate di quest'ultima.

Un'analisi esaustiva degli effetti di un suolo con nette variazioni di livello sulla propagazione del suono è materia complessa che trascende l'ambito di applicazione del presente metodo. Variazioni moderate del livello possono essere contabilizzate considerando il suolo come "pseudo-livellato", vale a dire innalzando o abbassando il livello del piano del suolo fino all'elevazione locale del suolo (rispetto al piano del suolo di riferimento) in ciascun punto ricettore (cfr. sezione 2.7.4).

### Condizioni di riferimento

I dati internazionali sul rumore e sulle prestazioni degli aeromobili (ANP, *aircraft noise and performance*) vengono normalizzati in funzione delle condizioni di riferimento ampiamente utilizzate per gli studi sul rumore negli aeroporti (cfr. **appendice D**).

#### Condizioni di riferimento per i dati NPD

- 1) Pressione atmosferica: 101,325 kPa (1 013,25 mb)
- 2) Assorbimento atmosferico: tassi di attenuazione elencati nella **tabella D-1** dell'**appendice D**
- 3) Precipitazioni: nessuna
- 4) Velocità del vento: inferiore a 8m/s (15 nodi)
- 5) Velocità al suolo: 160 nodi
- 6) Terreno locale: piatto, suolo soffice libero da strutture di grandi dimensioni o da altri oggetti riflettenti nel raggio di diversi chilometri dalle tracce al suolo degli aeromobili.

Le misurazioni standardizzate del livello sonoro degli aeromobili vengono effettuate 1,2 m al di sopra della superficie del suolo. Tuttavia, non è necessario tener conto di queste condizioni in quanto, a fini di modellizzazione, è possibile presumere che i livelli degli eventi siano relativamente insensibili all'altezza del ricettore<sup>9</sup>.

Il confronto tra livelli stimati e livelli misurati del rumore aeroportuale indica che i dati NPD possono essere considerati applicabili quando le condizioni medie vicine alla superficie corrispondono alla combinazione seguente:

- temperatura dell'aria inferiore a 30°C
- prodotto della temperatura dell'aria (°C) e dell'umidità relativa (%) superiore a 500
- velocità del vento inferiori a 8 metri al secondo (15 nodi)

Si ritiene che questa combinazione comprenda le condizioni incontrate nella maggior parte dei principali aeroporti di tutto il mondo. L'**appendice D** fornisce un metodo per convertire i dati NPD nelle condizioni medie locali che non vi rientrano; tuttavia, in casi estremi, è auspicabile contattare il fabbricante del velivolo.

#### Condizioni di riferimento dei dati aerodinamici e del motore dei velivoli

- 1) Elevazione della pista: livello medio del mare
- 2) Temperatura ambiente: 15 °C
- 3) Peso lordo al decollo: definito nella banca dati ANP come una funzione della distanza di scalo;
- 4) Peso lordo all'atterraggio: 90% del peso lordo massimo all'atterraggio
- 5) Motori che forniscono la spinta: tutti

---

<sup>9</sup> A volte è necessario calcolare i livelli a una altezza di 4 m o superiore. Il raffronto tra le misure a 1,2 m e a 10 m e il calcolo teorico degli effetti del suolo mostrano che il livello di esposizione sonora ponderato A è relativamente insensibile all'altezza del ricettore. Le variazioni riscontrate sono in generale inferiori a 1 decibel, salvo quando l'angolo massimo di incidenza sonora sia inferiore a 10° e lo spettro ponderato A al ricettore si situi, al suo massimo, nell'intervallo tra 200 e 500 Hz. Questi spettri dominati dalle basse frequenze possono verificarsi, ad esempio, sulle lunghe distanze, per motori a basso rapporto di diluizione o per motori ad elica caratterizzati da toni distinti in bassa frequenza.

Sebbene i dati ANP aerodinamici e propulsivi si basino su queste condizioni, è possibile utilizzarli così come sono contenuti nelle tabelle per le altitudini delle piste non referenziate e le temperature negli Stati ECAC, senza alterare in modo significativo l'esattezza del calcolo delle curve del livello sonoro medio cumulativo. (cfr. **appendice B**)

La banca dati ANP raccoglie in tabelle i dati aerodinamici per i pesi lordi al decollo e all'atterraggio indicati alle voci 3 e 4 supra. Sebbene, per i calcoli del rumore cumulativo, non sia necessario correggere i dati aerodinamici in funzione di altri pesi lordi, il calcolo dei profili di volo al decollo e alla salita iniziali, conformemente alle procedure descritte nell'**appendice B**, deve essere basato sugli appropriati pesi lordi operativi al decollo.

#### 2.7.7. *Descrizione della traiettoria di volo*

Il modello del rumore necessita che ogni singolo movimento dell'aeromobile venga descritto attraverso la sua traiettoria di volo in uno spazio tridimensionale, e attraverso la variazione del regime del motore e della velocità lungo la traiettoria. Di norma, un modello di circolazione rappresenta un sottoinsieme del traffico aeroportuale complessivo, ad esempio un numero di movimenti (presunti) identici, con lo stesso tipo di aeromobile, peso e procedura operativa, su una singola traccia suolo. La traccia può essere a sua volta una delle diverse "sottotracce" disperse utilizzate per modellizzare ciò che, in realtà, è una fascia di tracce che segue una determinata rotta. Le fasce delle tracce al suolo, i profili verticali e i parametri operativi dell'aeromobile vengono determinati a partire dai dati in entrata corrispondenti allo scenario preso in considerazione — congiuntamente ai dati degli aeromobili provenienti dalla banca dati ANP.

I dati rumore-potenza-distanza (nella banca dati ANP) definiscono il rumore prodotto da aeromobili che percorrono traiettorie di volo idealizzate di lunghezza infinita e a velocità e potenza costanti. Per adeguare questi dati alle traiettorie di volo in aree terminali, caratterizzate da frequenti cambiamenti di potenza e velocità, ogni percorso è suddiviso in segmenti di retta finiti; in seguito, si somma il contributo di rumore di ogni segmento, al punto di osservazione.

#### 2.7.8. *Rapporti tra la traiettoria di volo e la configurazione del volo*

La traiettoria di volo tridimensionale del movimento di un aeromobile determina gli aspetti geometrici dell'irradiazione sonora e della propagazione del suono tra aeromobile e punto di osservazione. Con un determinato peso dell'aeromobile e determinate condizioni atmosferiche, la traiettoria di volo è condizionata interamente dalla sequenza di variazioni di potenza, posizione dei flap e variazioni di altitudine applicate dal pilota (o dal sistema di pilotaggio automatico) al fine di seguire determinate rotte e mantenere le altezze e le velocità specificate dall'ATC — conformemente alle procedure operative standard dell'operatore aereo. Tali istruzioni e azioni dividono la traiettoria di volo in fasi distinte che formano segmenti naturali. Nel piano orizzontale comportano tratti rettilinei, definiti in termini di distanza dalla e dalle virate successive, definite dal raggio e dal cambiamento di rotta. Nel piano verticale, i segmenti sono definiti dal tempo e/o dalla distanza necessari a ottenere i cambiamenti di velocità e/o di altezza secondo parametri specifici in termini di regime del motore e configurazione dei flap. Le relative coordinate verticali sono spesso denominate *punti del profilo*.

Per la modellizzazione del rumore, le informazioni sulla traiettoria di volo vengono generate mediante *sintesi* a partire da una serie di fasi della procedura (vale a dire quelle seguite dal pilota) oppure attraverso l'*analisi* dei dati radar (misure fisiche delle traiettorie di volo realmente percorse). Indipendentemente dal procedimento utilizzato, i tracciati verticali e orizzontali della traiettoria di

volo vengono convertiti in una serie di segmenti. Il tracciato orizzontale (ossia la sua proiezione bidimensionale al suolo) è la traccia al suolo definita dalle rotte in entrata o in uscita. Il tracciato verticale (dato dai punti del profilo) e i parametri di volo associati (quali la velocità, l'angolo di inclinazione laterale e il regime del motore) contribuiscono entrambi a definire il *profilo di volo* che dipende dalla *procedura di volo* che viene normalmente prescritta dal costruttore dell'aeromobile e/o dall'operatore. La traiettoria di volo è ottenuta incorporando il profilo di volo e la traccia al suolo bidimensionali, per formare una sequenza di segmenti di volo tridimensionali.

Occorre ricordare che, per una data serie di fasi della procedura, il profilo dipende dalla traccia al suolo; ad esempio, a parità di spinta e velocità, il tasso di velocità ascensionale è inferiore nelle virate che non nel volo rettilineo. Sebbene i presenti orientamenti indichino come tenerne conto, è necessario riconoscere che ciò comporterebbe, in genere, oneri significativi in termini di calcoli informatici e gli utenti potrebbero privilegiare la possibilità di trattare il profilo di volo e la rotta come entità separate ai fini della modellizzazione del rumore, ovvero, considerare che le virate non incidono sul profilo di salita. È tuttavia importante determinare le variazioni dell'angolo di inclinazione laterale imposte dalle virate, perché ciò ha conseguenze rilevanti per la direzionalità dell'emissione sonora.

Il rumore ricevuto a partire da un segmento di una traiettoria di volo dipende dalla geometria del segmento in relazione al punto di osservazione e dalla configurazione di volo dell'aeromobile. Dato che questi parametri sono correlati - a un cambiamento dell'uno corrisponde un cambiamento dell'altro - è necessario garantire che, in ciascun punto della traiettoria, la configurazione dell'aeromobile sia coerente con il suo movimento lungo la stessa.

Per la sintesi della traiettoria di volo (vale a dire quando viene costruita una traiettoria di volo a partire da una serie di "fasi della procedura" che descrivono le scelte del pilota in relazione a regime del motore, angolo dei flap, accelerazione/velocità verticale) ciò che va calcolato è il movimento. Per l'analisi della traiettoria di volo, è vero il contrario: il regime motore deve essere stimato a partire dall'osservazione del movimento del velivolo, determinato a partire dai dati radar o, talvolta, in studi particolari, a partire dai dati del registratore di volo dell'aeromobile (benché, in quest'ultimo caso il regime del motore fa generalmente parte dei dati). In entrambi i casi, le coordinate e i parametri di volo a tutte le estremità dei segmenti devono essere inseriti nel calcolo del rumore.

L'**appendice B** contiene le equazioni che mettono in relazione le forze agenti su un aeromobile e il suo movimento, spiegando in che modo risolverle per definire le proprietà dei segmenti che compongono le traiettorie di volo. I diversi tipi di segmenti (e le sezioni dell'**appendice B** che li trattano) sono: *Rullaggio al suolo in fase di decollo (B5)*, *Salita a velocità costante (B6)*, *Riduzione della potenza (B7)*, *Salita di accelerazione e retrazione dei flap (B8)*, *Segmenti aggiuntivi di salita e accelerazione dopo la retrazione dei flap (B9)*, *Discesa e decelerazione (B10)* e *Avvicinamento per l'atterraggio (B11)*.

Inevitabilmente, la modellizzazione pratica comporta diversi gradi di semplificazione — che dipendono dalla natura dell'applicazione, dalla portata dei risultati e dalle risorse disponibili. Anche nelle applicazioni più complesse, un'ipotesi di semplificazione generale consiste nel presumere che, al momento della contabilizzazione della dispersione delle tracce di volo, i profili e le configurazioni di volo su tutte le sottotracce siano identici a quelli della traccia centrale: ciò riduce sensibilmente l'onere di calcolo senza quasi incidere sulla fedeltà, in quanto si raccomanda di utilizzare almeno sei sottotracce (cfr. sezione 2.7.11).



### 2.7.9. Fonti dei dati sui segmenti di volo

#### *Dati radar*

Sebbene i registratori dei dati di volo degli aeromobili possano fornire dati di qualità elevata, è difficile ottenerli a fini di modellizzazione del rumore; è quindi opportuno considerare i dati radar come la fonte più facilmente accessibile per derivare informazioni sulle effettive traiettorie di volo negli aeroporti<sup>10</sup>. Dato che questi dati sono normalmente disponibili grazie ai sistemi di monitoraggio delle traiettorie di volo e del rumore degli aeromobili, essi vengono ormai utilizzati sempre più spesso ai fini della modellizzazione del rumore.

I radar di sorveglianza secondari presentano la traiettoria di volo di un aeromobile sotto forma di sequenza di coordinate di punti a intervalli equivalenti al periodo di rotazione del radar, in genere circa 4 secondi. La posizione dell'aeromobile rispetto al suolo è determinata in coordinate polari — distanza angolare e azimuth — provenienti dal segnale radar riflesso (benché il sistema di monitoraggio le trasformi normalmente in coordinate cartesiane); la sua altezza<sup>11</sup> è misurata dall'altimetro del velivolo stesso e trasmessa al computer ATC (per il controllo del traffico aereo) mediante un trasponder attivato dal radar. Tuttavia, a causa di interferenze radioelettriche e di una risoluzione limitata dei dati, si registrano errori di posizione inerenti significativi (anche se privi di conseguenze per il controllo del traffico aereo). Pertanto, se è richiesta la traiettoria di volo di uno specifico movimento dell'aeromobile, è necessario affinare i dati ricorrendo a un'interpolazione appropriata della curva. Tuttavia, ai fini della modellizzazione del rumore, di solito viene richiesta una descrizione statistica di una fascia di traiettorie di volo; ad esempio, per tutti gli spostamenti su una rotta o soltanto per quelli di un tipo specifico di aeromobile. Qui, gli errori di misurazione associati alle statistiche corrispondenti possono essere resi minimi grazie ai processi di calcolo dei valori medi.

#### *Fasi della procedura*

In molti casi non è possibile modellizzare le traiettorie di volo sulla base dei dati radar, perché non sono disponibili le risorse necessarie oppure perché si tratta di uno scenario futuro per il quale non esistono dati radar pertinenti.

In assenza di dati radar, o quando il loro uso non è appropriato, è necessario stimare le traiettorie di volo sulla base degli orientamenti operativi, ad esempio le istruzioni impartite al personale di volo attraverso le AIP o i manuali operativi dell'aeromobile — denominati in questa sede *fasi della procedura*. Ove necessario, è opportuno chiedere consiglio sull'interpretazione di questi materiali alle autorità di controllo del traffico aereo e agli operatori aerei.

---

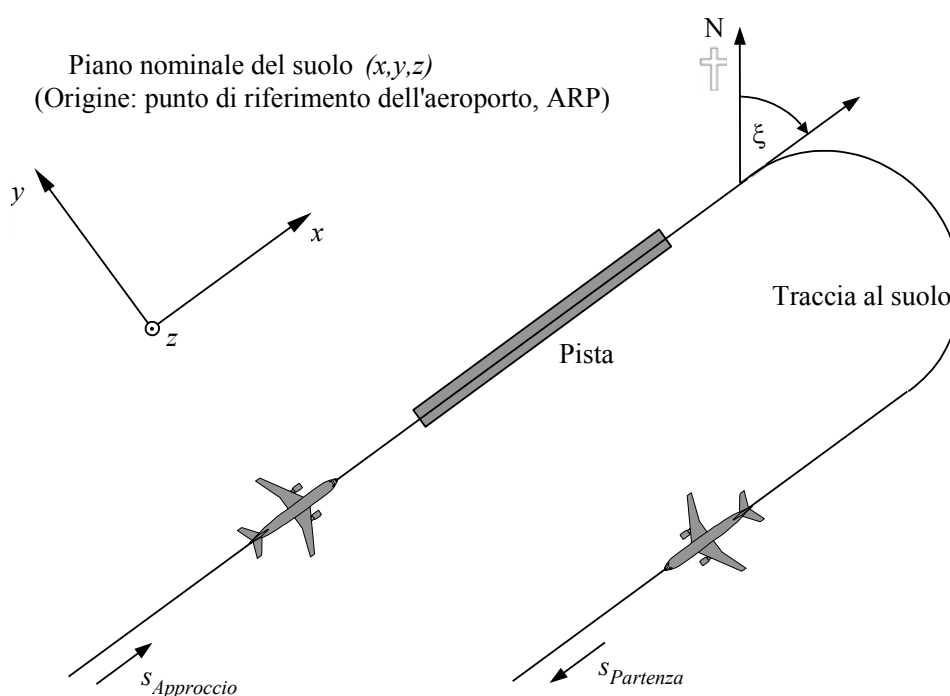
<sup>10</sup> I registratori dei dati di volo degli aeromobili forniscono dati operativi completi. Tuttavia i loro dati non sono facilmente accessibili e i costi per ottenerli sono elevati; di conseguenza, solitamente vi si ricorre a fini di modellizzazione solo per progetti speciali e per studi incentrati sullo sviluppo di modelli.

<sup>11</sup> Misurata di solito come altitudine sul livello medio del mare (cioè relativamente a 1013mB) e corretta dal sistema di monitoraggio dell'aeroporto in ragione dell'elevazione di quest'ultimo.

## 2.7.10. Sistemi di coordinate

### Il sistema locale delle coordinate

Il sistema locale delle coordinate  $(x,y,z)$  è un sistema cartesiano la cui origine  $(0,0,0)$  è il punto di riferimento dell'aeroporto  $(X_{ARP}, Y_{ARP}, Z_{ARP})$ , dove  $Z_{ARP}$  rappresenta l'altitudine di riferimento dell'aeroporto e  $z = 0$  definisce il piano nominale del suolo sul quale vengono generalmente calcolate le curve isolivello. La rotta dell'aeromobile,  $\xi$ , sull'asse  $xy$ , è misurata in senso orario dal nord magnetico (cfr. **figura 2.7.b**). Tutti i punti di osservazione, la griglia di calcolo di base e i punti delle curve isolivello sono espressi secondo le coordinate locali<sup>12</sup>.



**Figura 2.7.b: Sistema locale delle coordinate  $(x,y,z)$  e coordinata fissa  $s$  della traccia al suolo**

### Il sistema della coordinata fissa della traccia al suolo

Si tratta della coordinata specifica per ciascuna traccia al suolo e rappresenta la distanza  $s$  misurata lungo la traccia nella direzione di volo. Per le tracce in partenza,  $s$  viene misurata dall'inizio del rullaggio; per quelle in avvicinamento, viene misurata dalla soglia pista: per questa ragione,  $s$  ha valore negativo nelle zone

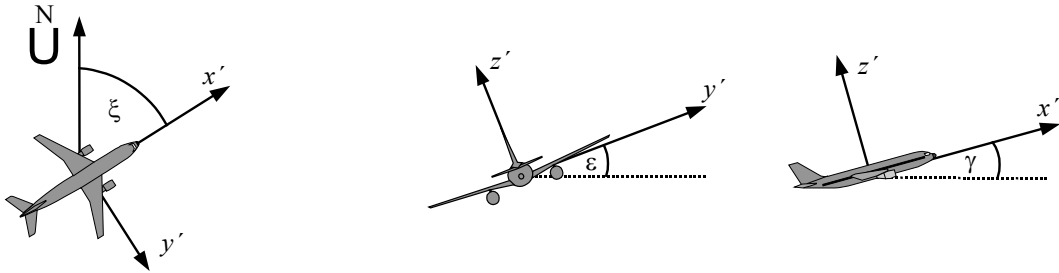
- antistanti l'inizio del rullaggio, per le partenze;
- antistanti l'attraversamento della soglia pista, per l'avvicinamento.

<sup>12</sup> Generalmente gli assi delle coordinate locali sono paralleli all'asse della carta sulla quale sono disegnate le curve isolivello. Tuttavia, è talvolta utile scegliere l'asse  $x$  parallelo alla pista al fine di ottenere curve simmetriche senza utilizzare una griglia informatica a maglia stretta (cfr. le sezioni da 2.7.26 a 2.7.28).

I parametri operativi di volo, quali l'altezza, la velocità e il regime del motore sono espressi come funzioni di  $s$ .

*Il sistema di coordinate dell'aeromobile*

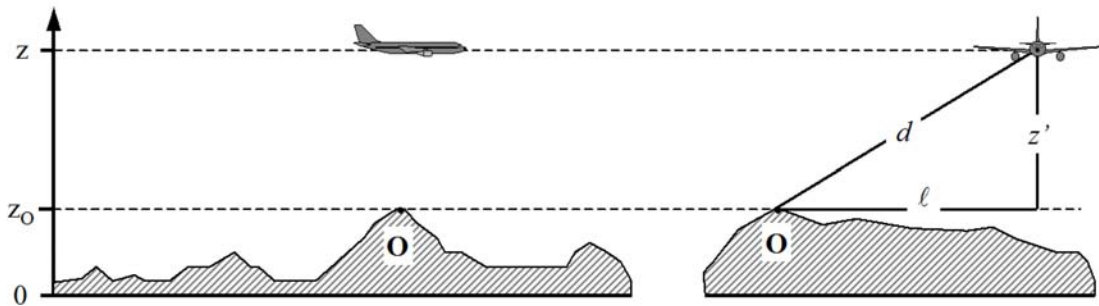
Il sistema di coordinate cartesiane fisse dell'aeromobile ( $x',y',z'$ ) trova origine nella posizione reale dell'aeromobile. Il sistema degli assi è definito dall'angolo di salita,  $\gamma$ , dalla direzione di volo,  $\xi$ , e dall'angolo di inclinazione laterale,  $\varepsilon$  (cfr. **figura 2.7.c**).



**Figura 2.7.c: Sistema di coordinate fisse dell'aeromobile ( $x',y',z'$ )**

*Prendere in considerazione la topografia*

Nei casi in cui è necessario prendere in considerazione la topografia (cfr. sezione 2.7.6), la coordinata dell'altezza dell'aeromobile,  $z$ , deve essere sostituita da  $z' = z - z_0$  (dove  $z_0$  è la coordinata  $z$  del punto di osservazione  $O$ ) nella stima della distanza di propagazione  $d$ . La **figura 2.7.d** illustra la geometria tra aeromobile e punto di osservazione. Andare alle sezioni da 2.7.14 a 2.7.19<sup>13</sup> per le definizioni di  $d$  e  $\ell$ .



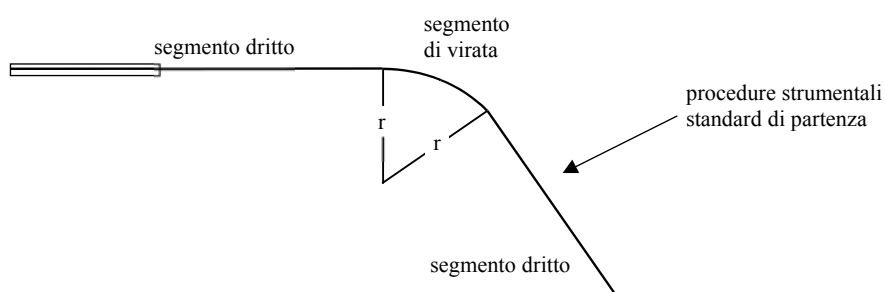
**Figura 2.7.d: Elevazione del suolo lungo la traccia al suolo (a sinistra) e lateralmente alla traccia (a destra). Il piano nominale del suolo  $z = 0$  passa attraverso il punto di riferimento dell'aeroporto.  $O$  è il punto di osservazione.**

<sup>13</sup> Se il suolo non è pianeggiante, è possibile che il punto di osservazione si situi sopra l'aeromobile, in qual caso, per calcolare la propagazione del suono, si considera  $z'$  (e l'angolo di elevazione corrispondente,  $\beta$ , cfr. capitolo 4) pari a zero.

### 2.7.11. Tracce al suolo

#### Tracce centrali

La traccia centrale definisce il centro della fascia di tracce seguite da un aeromobile che utilizza un particolare itinerario. Ai fini della modellizzazione del rumore degli aeromobili la traccia centrale è definita sulla base (i) dei dati operativi obbligatori quali le istruzioni date ai piloti nelle pubblicazioni AIP, oppure (ii) dell'analisi statistica dei dati radar come illustrato nella sezione 2.7.9 (quando essi siano disponibili e adeguati alle necessità dello studio di modellizzazione). È di solito abbastanza semplice definire la traccia a partire dalle istruzioni operative, tenendo conto che queste ultime raccomandano una sequenza di tratte che possono essere anche tratti rettilinei (definiti da lunghezza e rotta), oppure archi circolari (definiti da raggio di virata e cambio di rotta); cfr. illustrazione alla **figura 2.7.e**.



**Figura 2.7.e: Geometria della traccia al suolo in termini di virate e segmenti rettilinei**

Adattare una traccia centrale a partire dai dati radar è più complesso, in primo luogo perché le virate effettive vengono effettuate a ratei diversi e in secondo luogo perché la linea della traccia è dissimulata a causa della dispersione dei dati. Come già spiegato, non essendo ancora state sviluppate delle procedure formalizzate, è pratica comune far corrispondere i segmenti, rettilinei e curvi, alle posizioni medie calcolate a partire dalle sezioni trasversali delle tracce radar a determinati intervalli lungo la rotta. È probabile che in futuro vengano sviluppati algoritmi informatici per svolgere questo compito, ma per il momento, spetta a chi sviluppa il modello decidere come utilizzare i dati disponibili in modo ottimale. Un elemento importante è che la velocità dell'aeromobile e il raggio di virata impongono l'angolo d'inclinazione laterale e che, come si vedrà nella sezione 2.7.19, il rumore al suolo è condizionato non solo dalle asimmetrie della propagazione del suono rispetto alla traiettoria di volo ma anche dalla posizione della traiettoria di volo stessa.

In teoria, una transizione senza soluzione di continuità da volo rettilineo a virata con raggio fisso richiederebbe l'applicazione istantanea di un angolo di inclinazione laterale  $\epsilon$ , operazione fisicamente impossibile. Nella pratica, è necessario un tempo finito affinché l'angolo di inclinazione laterale raggiunga il valore necessario per il mantenimento di una determinata velocità e un determinato raggio di virata  $r$ , tempo durante in quale quest'ultimo diminuisce da un valore infinito a  $r$ . A fini di modellizzazione, non è necessario tener conto della transizione del raggio di virata e si può considerare che l'angolo di inclinazione laterale aumenti in maniera costante da zero (o da un altro

valore iniziale) fino a  $\varepsilon$ , all'inizio della virata, e fino al successivo valore di  $\varepsilon$ , al termine della stessa<sup>14</sup>.

### *Dispersione delle tracce*

Ove possibile, le definizioni della dispersione laterale e delle sottotracce rappresentative devono basarsi su dati storici rilevanti relativi all'aeroporto oggetto di studio, di norma attraverso l'analisi di campioni di dati radar. Il primo passo consiste nel raggruppare i dati per rotta. Le rotte di partenza sono caratterizzate da una notevole dispersione laterale che deve essere tenuta in considerazione per ottenere una modellizzazione accurata. Le rotte di arrivo si agglomerano normalmente in una fascia molto ristretta intorno alla traiettoria di avvicinamento finale: generalmente è sufficiente rappresentare tutti gli arrivi con un'unica traccia. Tuttavia, se all'interno della regione delle curve isolivello le fasce di avvicinamento sono ampie, potrebbe essere necessario rappresentarle attraverso sottotracce, allo stesso modo delle rotte di partenza.

È prassi comune trattare i dati inerenti a un'unica rotta come campioni di un'unica popolazione, vale a dire rappresentarli tramite un'unica traccia centrale e un insieme di sottotracce disperse. Tuttavia, qualora dall'esame risulti che i dati delle diverse categorie di aeromobili o di operazioni differiscono in modo sensibile (in caso vi sia, ad esempio, una differenza notevole di raggio di virata a seconda della dimensione dell'aeromobile) potrebbe essere opportuno suddividere i dati in ulteriori fasce. Per ciascuna fascia, le dispersioni laterali delle tracce sono determinate in funzione della distanza dall'origine; in seguito, sulla base della distribuzione statistica, i movimenti vengono suddivisi tra la traccia centrale e un adeguato numero di sottotracce disperse.

Dato che è generalmente sconsigliato non prendere in considerazione gli effetti della dispersione delle tracce, in assenza di dati di misurazione delle fasce occorre definire una dispersione laterale nominale, trasversalmente e perpendicolarmente alla traccia centrale, ricorrendo a una funzione di distribuzione convenzionale. I valori calcolati degli indici di rumore non sono particolarmente sensibili alla forma precisa della distribuzione laterale: la ripartizione normale (gaussiana) offre un'adeguata descrizione di molte fasce misurate da radar.

Di norma viene utilizzata un'approssimazione discreta di 7 punti (ossia, si rappresenta la dispersione laterale attraverso 6 sottotracce posizionate a intervalli regolari da un lato e dall'altro della traccia centrale). Gli intervalli tra una traccia e l'altra dipendono dalla deviazione standard della funzione della dispersione laterale.

Per tracce distribuite normalmente con una deviazione standard  $S$ , il 98,8% delle tracce si colloca all'interno di un corridoio i cui confini sono situati a  $\pm 2.5 \cdot S$ . La **tabella 2.7.a** riporta la spaziatura delle sei sottotracce e la percentuale del totale dei movimenti assegnati a ciascuna. L'**appendice C** fornisce valori per diverse altre sottotracce.

---

<sup>14</sup> Spetta all'utente determinare come meglio applicare questi principi, in quanto ciò dipende dal modo in cui vengono definiti i raggi di virata. Quando il punto di partenza corrisponde a una sequenza di tratti rettilinei o curvi, un'opzione relativamente semplice consiste nell'inserire i segmenti di transizione verso l'angolo di inclinazione laterale all'inizio e alla fine della virata, nella quale l'aeromobile si inclina a un tasso costante (espresso, per esempio, in °/m oppure °/s).

**Tabella 2.7.a: Percentuale dei movimenti corrispondenti a una funzione di distribuzione normale secondo una deviazione standard  $S$ , per 7 sottotracce (la traccia centrale corrisponde alla sottotraccia 1)**

Numero della sottotraccia	Posizione della sottotraccia	Percentuale di movimenti sulla sottotraccia
7	$-2,14 \cdot S$	3%
5	$-1,43 \cdot S$	11%
3	$-0,71 \cdot S$	22%
1	0	28%
2	$0,71 \cdot S$	22%
4	$1,43 \cdot S$	11%
6	$2,14 \cdot S$	3%

La deviazione standard  $S$  è funzione della coordinata  $s$  lungo la traccia centrale. Questo parametro può essere specificato (insieme alla descrizione della traccia centrale) nella scheda tecnica delle tracce di volo di cui all'**appendice A3**. In mancanza di qualsiasi indicatore della deviazione standard (ad es. dati radar che descrivono tracce di volo comparabili) si raccomandano i seguenti valori:

per tracce che comprendono virate inferiori a 45 gradi:

$$\begin{aligned} S(s) &= 0,055 \cdot s - 150 && \text{per } 2700 \text{ m} \leq s \leq 30000 \text{ m} \\ S(s) &= 1500 \text{ m} && \text{per } s > 30000 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.7.1)$$

per tracce che comprendono virate superiori a 45 gradi:

$$\begin{aligned} S(s) &= 0,128 \cdot s - 420 && \text{per } 3300 \text{ m} \leq s \leq 15000 \text{ m} \\ S(s) &= 1500 \text{ m} && \text{per } s > 15000 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.7.2)$$

Per motivi pratici, si pone  $S(s)$  pari a zero tra inizio rullaggio e  $s = 2700$  m oppure  $s = 3300$  m, a seconda dell'angolo di virata. Alle rotte che comportano più di una virata si deve applicare l'equazione (2.7.2). Per quanto riguarda gli arrivi, la dispersione laterale può essere trascurata entro 6000 m dal punto di contatto.

### 2.7.12. Profili di volo

Il profilo di volo è una descrizione del movimento dell'aeromobile sul piano verticale sopra la traccia al suolo, in termini di posizione, velocità, angolo di inclinazione laterale e regime del motore. Uno dei compiti più importanti da affrontare per chi utilizza il modello è quello di definire profili di volo di un aeromobile che rispondano in modo adeguato ai requisiti dell'applicazione di modellizzazione — in modo efficiente, senza un uso eccessivo di tempo e risorse. Naturalmente, per ottenere un'accuratezza elevata, i profili devono rispecchiare fedelmente le operazioni degli aeromobili che intendono rappresentare. Ciò richiede informazioni affidabili su condizioni atmosferiche, tipi e varianti degli aeromobili, carichi operativi e procedure operative (variazioni della spinta e del settaggio dei flap nonché interdipendenza tra variazioni in altezza e velocità); per tutti questi parametri occorre calcolare una media adeguata nel o nei periodi pertinenti. Spesso non sono disponibili informazioni così dettagliate, ma questo non è necessariamente un ostacolo; anche se le informazioni sono disponibili, chi si occupa della modellizzazione deve esercitare il proprio giudizio per conciliare l'accuratezza e i particolari delle informazioni con le esigenze e gli usi delle curve isolivello risultanti.

La sintesi dei profili di volo ottenuti sulla base delle "fasi della procedura" provenienti dalla banca dati ANP o dagli operatori di aeromobili è descritta nella sezione 2.7.13 e nell'**appendice B**. Si tratta di un processo, solitamente l'unico a disposizione di chi si occupa della modellizzazione in assenza di dati radar, che consente di ottenere sia la geometria della traiettoria di volo sia le relative variazioni nella velocità e nella spinta. Si può generalmente presupporre che tutti gli aeromobili (simili) all'interno di una fascia, sia quelli compresi nella traccia centrale che quelli nelle sottotracce disperse, seguano il profilo della traccia centrale.

Al di fuori della banca dati ANP, che fornisce informazioni standard sulle fasi della procedura, gli operatori degli aeromobili rappresentano la migliore fonte di informazioni affidabili, in merito, cioè, alle procedure da loro utilizzate e ai pesi tipici in volo. Per i voli individuali, lo standard di riferimento è il registratore dei dati di volo (FDR, *flight data recorder*) dell'aeromobile da cui è possibile ottenere tutte le informazioni rilevanti. Ma anche nel caso in cui tali dati siano disponibili, le operazioni di pretrattamento sono estremamente onerose. Pertanto, per consentire le necessarie economie in fase di modellizzazione, la soluzione pratica normalmente adottata è quella di utilizzare ipotesi ragionevoli su pesi medi e procedure operative.

Occorre procedere con cautela prima di adottare le fasi standard della procedura fornite dalla banca dati ANP (ciò che normalmente avviene quando le procedure reali non sono note). Si tratta di procedure standardizzate che sono ampiamente seguite ma che, in casi particolari, gli operatori possono utilizzare o non utilizzare. Un elemento importante è la definizione della spinta del motore al decollo (e talvolta nella salita), che può dipendere, in una certa misura, dalle circostanze del momento. In particolare, è prassi comune ridurre (rispetto al massimo disponibile) i livelli della spinta in fase di partenza, al fine di prolungare la vita utile del motore. L'**appendice B** fornisce orientamenti guida sulla rappresentazione delle pratiche abituali, ricorrendo ai quali, in generale, si otterranno curve isolivello più realistiche rispetto all'ipotesi di applicare il livello massimo di spinta. Tuttavia, se, per esempio, le piste sono brevi e/o le temperature medie dell'aria sono elevate, è probabile che l'applicazione del livello massimo di spinta sia l'ipotesi più realistica.

Nella modellizzazione degli scenari reali, è possibile ottenere maggiore precisione utilizzando dati radar a complemento o in sostituzione delle informazioni nominali a cui si è accennato. I profili di volo possono essere determinati a partire da dati radar, come per le sottotracce laterali della traccia centrale - ma solo dopo aver suddiviso gli aeromobili per tipo e varianti e a volte per peso o distanza

di scalo (ma non per dispersione) - in modo da ottenere, per ciascun sottogruppo, un profilo medio relativo all'altezza e alla velocità in funzione della distanza percorsa al suolo. Ancora una volta, quando, in seguito, viene combinato con le tracce al suolo, il profilo unico così ottenuto è associato solitamente sia alla traccia centrale sia alle sottotracce.

Conoscendo il peso dell'aeromobile è possibile calcolare la variazione di velocità e di spinta propulsiva attraverso la soluzione graduale delle equazioni di movimento. Prima di procedere in tal senso è utile preelaborare i dati per ridurre al minimo gli effetti degli errori radar che possono incidere sull'attendibilità delle stime dell'accelerazione. Per prima cosa occorre ridefinire il profilo adattando i segmenti di linea retta per rappresentare le fasi rilevanti del volo. Si tratta cioè di classificare in modo appropriato ciascun segmento in categorie quali, ad esempio, rullaggio, salita o discesa a velocità costante, riduzione della spinta, o accelerazione/decelerazione con o senza cambiamenti nel settaggio del flap. Anche il peso dell'aeromobile e le condizioni atmosferiche fanno parte dei dati di immissione richiesti.

La sezione 2.7.11 precisa che occorre tenere conto della dispersione laterale delle tracce di volo attorno alle rotte centrali o nominali. I campioni di dati radar sono caratterizzati da un'analogia dispersione delle traiettorie di volo sul piano verticale. Tuttavia non è prassi usuale modellizzare la dispersione verticale come una variabile indipendente; la dispersione è dovuta principalmente alle differenze nei pesi e nelle procedure operative degli aeromobili, fattori presi in considerazione al momento di preelaborare i dati in entrata sul traffico aereo.

### 2.7.13. Costruzione di segmenti di traiettoria di volo

Ciascuna traiettoria di volo deve essere definita da una serie di coordinate dei segmenti (nodi) e di parametri di volo. Il punto di partenza consiste nel determinare le coordinate dei segmenti della traccia al suolo. Quindi viene calcolato il profilo di volo, tenendo presente che per una data serie di fasi della procedura il profilo dipende dalla traccia al suolo; ad esempio, a parità di spinta e velocità, il tasso di velocità ascensionale di un aeromobile è inferiore nelle virate rispetto al volo rettilineo. Infine i segmenti di traiettoria di volo tridimensionali sono costruiti combinando il profilo di volo bidimensionale con la traccia al suolo bidimensionale<sup>15</sup>.

#### *Traccia al suolo*

Una traccia al suolo, sia essa una traccia centrale o una sottotraccia dispersa è definita da una serie di coordinate  $(x,y)$  sul piano del suolo (ottenute ad esempio dalle informazioni radar) o da una sequenza di comandi della guida vettoriale che descrivono segmenti rettilinei e archi circolari (virate di raggio  $r$  definito e cambio di rotta  $\Delta\xi$ ).

Ai fini di modellizzazione della segmentazione un arco è rappresentato da una sequenza di segmenti rettilinei fissati a sottoarchi. Benché tali segmenti non figurino esplicitamente nei segmenti di traccia al suolo, l'inclinazione laterale di un aeromobile durante le virate ne influenza la definizione. L'**appendice B4** illustra le modalità per calcolare gli angoli di inclinazione laterale durante una virata uniforme ma è ovvio che tali angoli non sono in realtà applicati o rimossi simultaneamente. Non vi è alcuna prescrizione su come gestire le transizioni tra volo rettilineo e virata e tra una virata e un'altra immediatamente sequenziale. Di norma i dettagli, la cui valutazione è lasciata all'utilizzatore (cfr. sezione 2.7.11), hanno con ogni probabilità un effetto trascurabile sulle curve isolivello finali; la cosa

---

<sup>15</sup> A tal fine la lunghezza totale della traccia al suolo dovrebbe essere sempre superiore a quella del profilo di volo. Se necessario, ciò può essere conseguito aggiungendo segmenti rettilinei di lunghezza adeguata all'ultimo segmento della traccia al suolo.



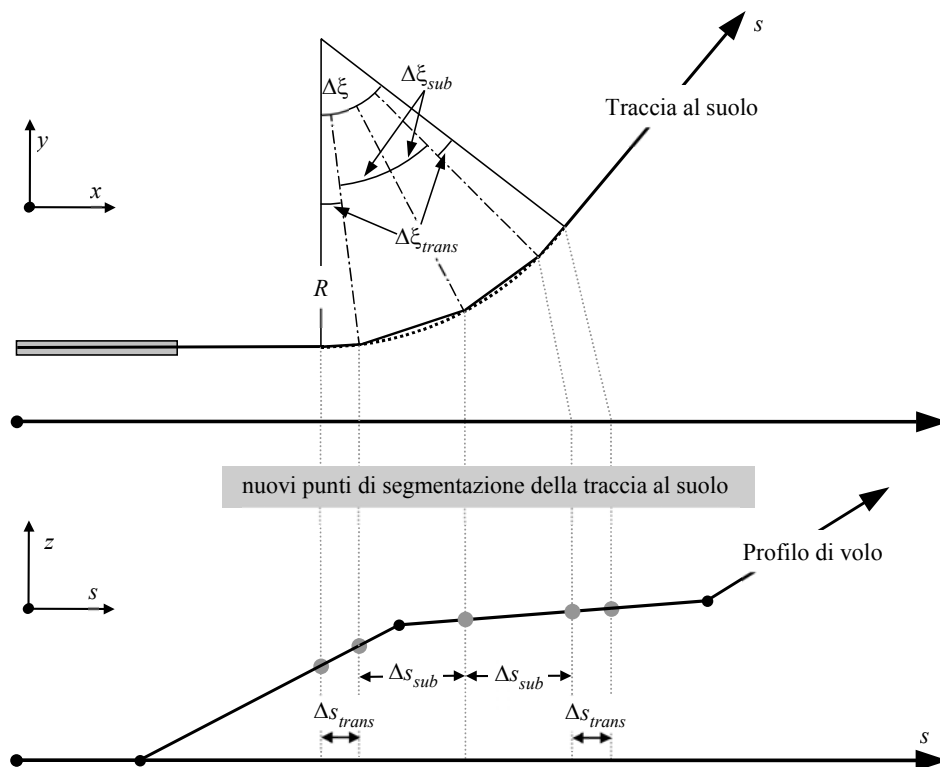
essenziale è invece evitare brusche discontinuità alla fine delle virate, cosa che può essere conseguita facilmente, ad esempio inserendo brevi segmenti di transizione durante i quali l'angolo di inclinazione laterale varia in modo lineare con la distanza. Solo nel caso particolare in cui è probabile che una virata specifica abbia un effetto dominante sulle curve isolivello finali sarà necessario definire in modo più realistico le dinamiche della transizione, mettere in relazione l'angolo di inclinazione laterale a un particolare tipo di aeromobile e adottare adeguate velocità di rollio. In questo contesto è sufficiente indicare che i sottoarchi finali  $\Delta\xi_{trans}$  di ogni virata sono conformi ai requisiti di variazione dell'angolo di inclinazione laterale. Il resto dell'arco con il cambiamento di traiettoria di  $\Delta\xi - 2 \cdot \Delta\xi_{trans}$  gradi è diviso in  $n_{sub}$  sottoarchi sulla base della seguente formula:

$$n_{sub} = \text{int}(1 + (\Delta\xi - 2 \cdot \Delta\xi_{trans}) / 30) \quad (2.7.3)$$

dove  $\text{int}(x)$  è una funzione che rinvia alla parte intera di  $x$ . Quindi il cambio di traiettoria  $\Delta\xi_{sub}$  di ciascun sottoarco è calcolato come:

$$\Delta\xi_{sub} = (\Delta\xi - 2 \cdot \Delta\xi_{trans}) / n_{sub} \quad (2.7.4)$$

dove  $n_{sub}$  deve essere sufficientemente grande per garantire che  $\Delta\xi_{sub} \leq 30$  gradi. La segmentazione di un arco (esclusi i sottosegmenti finali di transizione) è illustrata nella **figura 2.7.f**<sup>16</sup>.



**Figura 2.7.f: Costruzione di segmenti di traiettoria di volo dividendo le virate in segmenti di lunghezza  $\Delta s$  (il primo grafico indica il piano orizzontale e il secondo il piano verticale)**

<sup>16</sup> Definita in questo semplice modo, la lunghezza totale della traiettoria segmentata è leggermente inferiore a quella della traiettoria circolare. Tuttavia l'errore nella curva isolivello che ne consegue è irrilevante se gli incrementi di angolatura sono inferiori a  $30^\circ$ .

### *Profilo di volo*

I parametri che descrivono ciascun segmento di profilo di volo all'inizio (suffisso 1) e alla fine (suffisso 2) del segmento sono:

$s_1, s_2$	distanza lungo la traccia al suolo,
$z_1, z_2$	altezza del velivolo,
$V_1, V_2$	velocità al suolo,
$P_1, P_2$	parametro di potenza correlato al rumore (corrispondente a quello per il quale sono definite le curve NPD) e
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	angolo di inclinazione laterale.

Per costruire un profilo di volo da una serie di fasi della procedura (*sintesi della traiettoria di volo*), i segmenti sono costruiti in sequenza per conseguire le condizioni richieste alle estremità. I parametri alle estremità per ciascun segmento diventano i parametri del punto di inizio per il segmento successivo. In tutti i calcoli dei segmenti i parametri sono noti all'inizio; le condizioni richieste alle estremità sono specificate nella fase della procedura. Le fasi possono essere quelle predefinite, specificate nella banca dati ANP, o essere definite dall'utilizzatore (ad esempio, quelle specificate dai manuali di volo dell'aeromobile). Le condizioni alle estremità sono in genere l'altezza e la velocità; la costruzione del profilo di volo ha l'obiettivo di determinare la distanza di traiettoria percorsa fino al raggiungimento di tali condizioni. I parametri non definiti sono determinati applicando i calcoli sulle prestazioni di volo di cui all'**appendice B**.

Se la traccia al suolo è rettilinea, i punti del profilo e i parametri di volo associati possono essere determinati indipendentemente dalla traccia al suolo (l'angolo di inclinazione laterale è sempre zero). Le tracce al suolo sono tuttavia raramente rettilinee; esse infatti comportano in genere virate e, al fine di conseguire i migliori risultati, di tali virate si deve tener conto per determinare il profilo di volo bidimensionale, se necessario suddividendo i segmenti di profilo in corrispondenza dei nodi della traccia al suolo per inserirvi le variazioni dell'angolo di inclinazione laterale. Di norma, la lunghezza del segmento successivo non è conosciuta nella fase iniziale ed è calcolata in via provvisoria presupponendo che non vi siano variazioni dell'angolo di inclinazione laterale. Qualora risulti che il segmento provvisorio si estende su uno o più nodi di traccia al suolo, il primo dei quali è  $s$ , ovvero  $s_1 < s < s_2$ , il segmento è troncato in corrispondenza di  $s$  e i parametri in quel punto sono calcolati per interpolazione (cfr. di seguito). I parametri così calcolati diventano i parametri all'estremità del segmento attuale e i parametri iniziali di un nuovo segmento - che presenta le stesse condizioni finali obiettivo. In assenza di nodi della traccia al suolo il segmento provvisorio viene confermato.

Qualora non sia necessario prendere in considerazione gli effetti delle virate sul profilo di volo, viene adottata la soluzione del segmento unico; le informazioni relative all'angolo di inclinazione laterale sono, tuttavia, conservate per essere utilizzate successivamente.

Che sia effettuata o no una modellizzazione completa, ciascuna traiettoria di volo tridimensionale è generata incorporando il suo profilo di volo bidimensionale e la relativa traccia al suolo bidimensionale. Il risultato è una sequenza di serie di coordinate  $(x,y,z)$ , ciascuna delle quali corrisponde a un nodo della traccia al suolo segmentata o a un nodo del profilo di volo o a entrambi; i punti di profilo sono corredati dei corrispondenti valori dell'altezza  $z$ , della velocità al suolo  $V$ ,

dell'angolo di inclinazione laterale  $\varepsilon$ , del regime del motore  $P$ . Per un punto della traccia  $(x,y)$  che si trova tra le estremità di un segmento di profilo di volo, i parametri sono interpolati come segue:

$$z = z_1 + f \cdot (z_2 - z_1) \quad (2.7.5)$$

$$V = \sqrt{V_1^2 + f \cdot (V_2^2 - V_1^2)} \quad (2.7.6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + f \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (2.7.7)$$

$$P = \sqrt{P_1^2 + f \cdot (P_2^2 - P_1^2)} \quad (2.7.8)$$

dove

$$f = (s - s_1) / (s_2 - s_1) \quad (2.7.9)$$

NB: si presuppone che  $z$  e  $\varepsilon$  varino in modo lineare con la distanza e che  $V$  e  $P$  invece varino in modo lineare con il tempo (ovvero, accelerazione costante<sup>17</sup>).

Quando si mettono a confronto i segmenti di profilo di volo con i dati radar (*analisi della traiettoria di volo*), tutte le distanze alle estremità, le altezze, le velocità e gli angoli di inclinazione laterale sono ricavati direttamente dai dati; solo i regimi del motore devono essere calcolati utilizzando le equazioni relative alle prestazioni. Poiché anche le coordinate della traccia al suolo e del profilo di volo possono essere adeguatamente confrontate, si tratta in genere di un processo piuttosto semplice.

#### *Segmentazione del rullaggio a terra in fase di decollo*

In fase di decollo, quando un aeromobile accelera tra il punto di rilascio dei freni (altrimenti detto "inizio del rullaggio", *SOR*) e il punto di decollo, la velocità cambia in modo considerevole su una distanza compresa tra 1 500 e 2 500 metri, passando da 0 a circa 80 e 100 m/s.

Il rullaggio in fase di decollo è quindi suddiviso in segmenti di lunghezze variabili, durante ciascuna delle quali la velocità dell'aeromobile varia con un incremento specifico  $\Delta V$  non superiore a 10 m/s (circa 20kt). Benché durante il rullaggio in fase di decollo l'accelerazione subisca variazioni, in questo contesto è adeguato presupporre che essa rimanga costante. In questo caso, nella fase di decollo,  $V_1$  è la velocità iniziale,  $V_2$  è la velocità di decollo,  $n_{TO}$  è il numero di segmenti di decollo e  $s_{TO}$  è la distanza di decollo equivalente. Per una distanza di decollo equivalente  $s_{TO}$  (cfr. **appendice B**), una velocità iniziale  $V_1$  e una velocità di decollo  $V_2$ , il numero  $n_{TO}$  di segmenti per il rullaggio a terra è

$$n_{TO} = \text{int}(1 + (V_2 - V_1) / 10) \quad (2.7.10)$$

e quindi il cambio di velocità lungo un segmento è:

$$\Delta V = (V_2 - V_1) / n_{TO} \quad (2.7.11)$$

<sup>17</sup> Anche se il regime del motore rimane costante lungo un segmento, la forza propulsiva e l'accelerazione possono cambiare a seguito della variazione della densità dell'aria dovuta all'altezza. Tuttavia, ai fini della modellizzazione del rumore tali variazioni sono di solito ininfluenti.

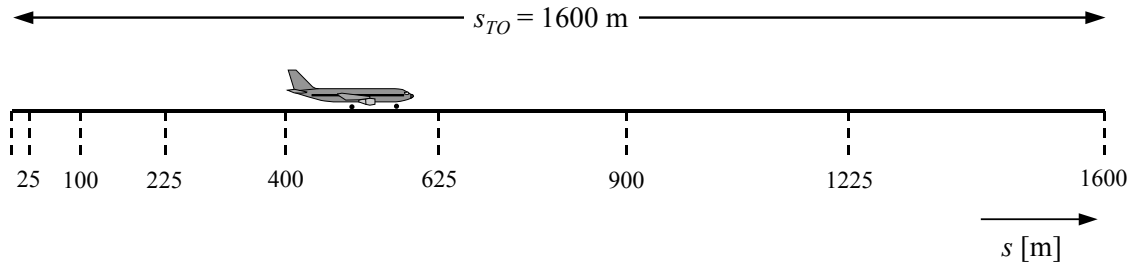
e il tempo  $\Delta t$  su ciascun segmento è (presupponendo un'accelerazione costante)

$$\Delta t = \frac{2 \cdot s_{TO}}{(V_2 + V_1) \cdot n_{TO}} \quad (2.7.12)$$

La lunghezza  $s_{TO,k}$  del segmento  $k$  ( $1 \leq k \leq n_{TO}$ ) del rullaggio di decollo è quindi:

$$s_{TO,k} = (k - 0.5) \cdot \Delta V \cdot \Delta t = \frac{(2k - 1) \cdot s_{TO}}{n_{TO}^2} \quad (2.7.13)$$

Esempio: Per una distanza di decollo  $s_{TO} = 1600$  m,  $V_1 = 0$  m/s e  $V_2 = 75$  m/s, risulta che  $n_{TO} = 8$  segmenti di lunghezza compresa tra 25 e 375 metri (cfr. **figura 2.7.g**):



**Figura 2.7.g: Segmentazione di un rullaggio in fase di decollo (esempio per 8 segmenti)**

Analogamente a quanto avviene per le variazioni di velocità, la spinta dell'aeromobile cambia in ciascun segmento con un incremento costante  $\Delta P$ , calcolato come

$$\Delta P = (P_{TO} - P_{ini}) / n_{TO} \quad (2.7.14)$$

dove  $P_{TO}$  e  $P_{ini}$  designano rispettivamente la spinta dell'aeromobile nel punto di decollo e la spinta dell'aeromobile all'inizio del rullaggio in fase di decollo.

L'uso di tale incremento costante della spinta (invece dell'equazione di secondo grado 2.7.8) è finalizzato a garantire la coerenza con la relazione lineare tra spinta e velocità negli aeromobili con propulsori a reazione (eq. B-1).

#### *Segmentazione del segmento iniziale di salita*

Durante il segmento iniziale di salita la geometria subisce rapidi cambiamenti, in particolare in relazione a un punto di osservazione al lato della traccia di volo, in cui l'angolo *beta* cambia rapidamente via via che l'aeromobile percorre questo segmento iniziale. I confronti con i calcoli relativi a segmenti molto piccoli indica che, prendendo in esame un singolo segmento di salita si ottiene per le metriche integrate un'approssimazione del rumore molto poco accurata sui lati della traccia di volo. La precisione dei calcoli migliora grazie a una sottosegmentazione del primo segmento di decollo. La lunghezza di ciascun segmento e il numero di segmenti sono fortemente

influenzati dall'attenuazione laterale. Registrando l'espressione dell'attenuazione laterale totale per gli aeromobili con propulsori montati nella fusoliera, si può constatare che per una variazione limitata dell'attenuazione laterale pari a 1,5 dB per sottosegmento, il segmento iniziale di salita deve essere diviso in sottosegmenti basati sull'insieme dei valori di altezza indicati di seguito:

$$z = \{18,9, 41,5, 68,3, 102,1, 147,5, 214,9, 334,9, 609,6, 1\ 289,6\} \text{ metri, o}$$

$$z = \{62, 136, 224, 335, 484, 705, 1\ 099, 2\ 000, 4\ 231\} \text{ piedi}$$

Le altezze di cui sopra sono applicate individuando quale altezza nella serie sia più vicina all'estremità originaria del segmento. Le effettive altezze del sottosegmento sono poi calcolate utilizzando:

$$z_i' = z [z_i / z_N] \quad (i = 1..N) \quad (2.7.15)$$

dove  $z$  è l'altezza finale del segmento originario,  $z_i$  è il valore  $i$ -esimo della serie di valori relativi all'altezza e  $z_N$  è il limite superiore più vicino all'altezza  $z$ . Grazie a questo processo la variazione dell'attenuazione laterale risulta costante in ciascun sottosegmento, garantendo curve isolivello più accurate, ma senza che sia necessario utilizzare segmenti molto brevi.

### **Esempio:**

Se l'altezza all'estremità del segmento originario è pari a  $z = 304,8$  m, allora sulla base della serie di valori per l'altezza  $214,9 < 304,8 < 334,9$  e il limite superiore più vicino a  $z = 304,8$  m è  $z_7 = 334,9$  m. Le altezze all'estremità del sottosegmento sono quindi calcolate applicando la formula seguente:

$$z_i' = 304,8 [z_i / 334,9] \quad (i = 1..N)$$

Quindi  $z_1'$  sarà pari a 17,2 m e  $z_2'$  sarà pari a 37,8 m, ecc.

I valori di velocità e regime del motore sui punti inseriti sono ricavati per interpolazione utilizzando rispettivamente le equazioni (2.7.11) e (2.7.13).

#### *Segmentazione dei segmenti corrispondenti a fasi di volo*

Una volta ricavata la traiettoria di volo segmentata conformemente alla procedura illustrata nella sezione 2.7.13 e applicata la sottosegmentazione descritta, possono essere necessari ulteriori adeguamenti della segmentazione. Tra questi rientrano:

- la rimozione di punti della traiettoria di volo tra loro troppo vicini e
- l'inserimento di punti aggiuntivi quando le variazioni di velocità lungo i segmenti sono troppo elevate.

Quando punti adiacenti si trovano a una distanza di 10 metri l'uno dall'altro, e non vi è variazione delle relative velocità e spinta, uno dei punti viene eliminato.

Nel caso dei segmenti corrispondenti a fasi di volo, laddove si registri una significativa variazione di velocità lungo un segmento, quest'ultimo viene suddiviso con le stesse modalità adottate nel caso del rullaggio a terra, ovvero:

$$n_{seg} = \text{int}(1 + |V_2 - V_1|/10) \quad (2.7.16)$$

dove  $V_1$  e  $V_2$  sono rispettivamente le velocità all'inizio e alla fine del segmento. I corrispondenti parametri del sottosegmento sono calcolati in modo analogo a quelli del rullaggio a terra in fase di decollo, utilizzando le equazioni da 2.7.11 a 2.7.13.

#### *Il rullaggio a terra dopo l'atterraggio*

Benché il rullaggio a terra dopo l'atterraggio costituisca il processo inverso rispetto al rullaggio a terra in fase di decollo, particolare attenzione deve essere prestata ai seguenti aspetti:

- l'*inversione di spinta* che è applicata talvolta per ridurre la velocità degli aeromobili
- e velivoli che lasciano la pista dopo la decelerazione (l'aeromobile che lascia la pista non contribuisce più al rumore nell'atmosfera in quanto il rumore prodotto in fase di rullaggio (taxiing) non è preso in considerazione)).

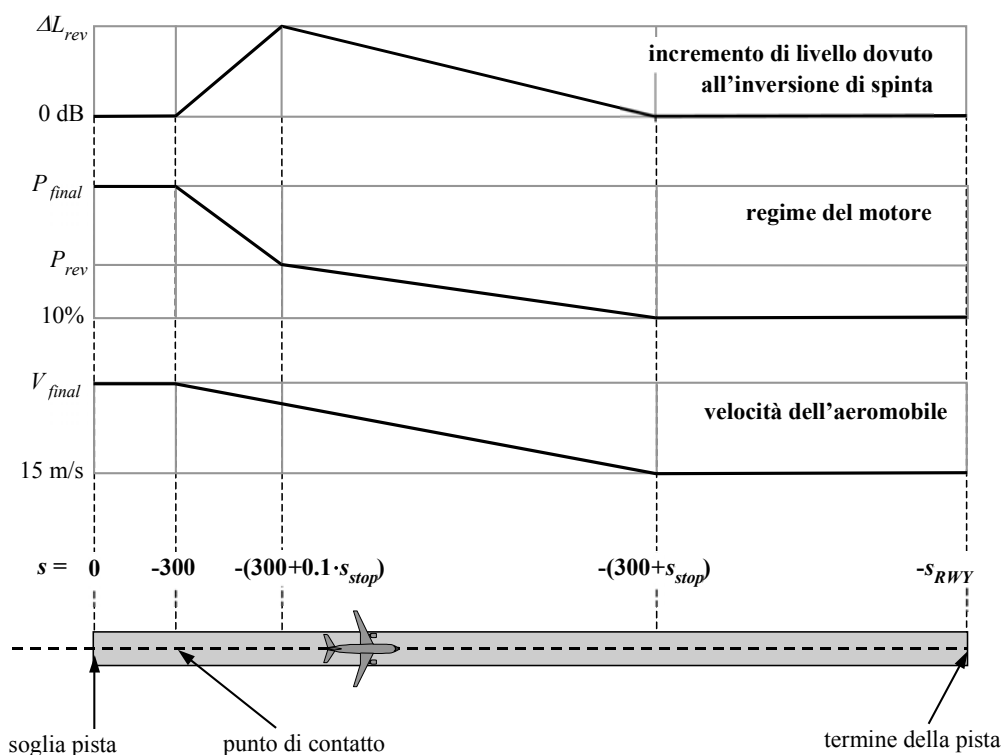
Diversamente dalla distanza di rullaggio in fase di decollo, che è ricavata dai parametri di prestazione dell'aeromobile, la distanza di arresto  $s_{stop}$  (ovvero la distanza dal punto di contatto con la pista al punto in cui l'aeromobile lascia la pista) non è esclusivamente specifica dell'aeromobile. Per quanto la distanza minima di arresto possa essere stimata sulla base della massa e delle prestazioni dell'aeromobile (e dell'inversione di spinta disponibile), la distanza di arresto effettiva dipende anche dall'ubicazione delle piste di rullaggio, dalla situazione del traffico e dai regolamenti specifici dell'aeroporto in materia di inversione di spinta.

L'uso dell'inversione di spinta non costituisce una procedura standard - è utilizzata esclusivamente quando la decelerazione necessaria non può essere ottenuta utilizzando i freni ruota. (L'inversione di spinta può essere estremamente fastidiosa in quanto un rapido cambiamento del regime del motore dal regime minimo a quello di inversione produce un rumore forte e improvviso).

Tuttavia, poiché la maggior parte delle piste sono utilizzate sia per il decollo che per l'atterraggio, l'inversione di spinta produce un effetto molto ridotto sulle curve isolivello in quanto l'energia sonora totale prodotta in corrispondenza della pista è dominata dal rumore prodotto dalle operazioni di decollo. Il contributo dell'inversione di spinta alle curve isolivello può essere significativo soltanto quando l'uso di una pista è limitato alle operazioni di atterraggio.

Dal punto di vista fisico il rumore prodotto dall'inversione di spinta è un processo molto complesso ma, dato il suo impatto relativamente ridotto sulle curve isolivello, può essere modellizzato in modo semplice, tenendo conto del rapido cambiamento del regime del motore mediante un'adeguata segmentazione.

È chiaro che la modellizzazione del rullaggio di terra dopo l'atterraggio è meno semplice della modellizzazione del rumore prodotto nel rullaggio in fase di decollo. Per un uso generale, quando non siano disponibili informazioni dettagliate, si raccomandano le seguenti ipotesi di modellizzazione semplificate (cfr. **figura 2.7.h**).



**Figura 2.7.h: Modellizzazione del rullaggio di terra dopo l'atterraggio**

L'aeromobile tocca terra 300 metri oltre la soglia pista (che presenta le coordinate  $s = 0$  lungo la traccia di avvicinamento a terra). L'aeromobile è quindi decelerato su una distanza di arresto  $s_{stop}$  - i cui valori specifici relativi all'aeromobile figurano nella banca dati ANP - a partire dalla velocità dell'avvicinamento finale  $V_{final}$  fino a 15 m/s. A causa delle rapide variazioni di velocità all'interno di questo segmento, esso deve essere ulteriormente segmentato nella stessa maniera applicata al rullaggio ai terra in fase di decollo (o ai segmenti corrispondenti a fasi di volo contraddistinti da rapide variazioni di velocità), utilizzando le equazioni da 2.7.10 a 2.7.13.

Il regime del motore passa dal regime dell'avvicinamento finale al momento del contatto a un regime di inversione di spinta  $P_{rev}$  su una distanza di  $0,1 \cdot s_{stop}$ , quindi diminuisce al 10% del regime massimo disponibile sul rimanente 90 per cento della distanza di arresto. Fino al termine della pista (a  $s = -s_{RWY}$ ) la velocità dell'aeromobile rimane costante.

Le curve NPD per l'inversione di spinta non sono al momento incluse nella banca dati ANP e, pertanto, al fine di modellizzare questo effetto, è necessario basarsi sulle curve convenzionali. Di norma l'effetto del regime di inversione di spinta  $P_{rev}$  è pari a circa il 20% del pieno regime; pertanto si raccomanda di utilizzare questo valore in assenza di informazioni operative. Tuttavia, poiché a un dato regime l'inversione di spinta tende a generare un rumore significativamente superiore a quello della spinta propulsiva, una ponderazione  $\Delta L$  viene applicata al livello dell'evento derivato dai dati

NPD, che aumenta da 0 a un valore  $\Delta L_{rev}$  (5dB è il valore raccomandato in via provvisoria<sup>18</sup>) per  $0,1 \cdot s_{stop}$ , e che diminuisce quindi in modo lineare fino a 0 sulla distanza di arresto rimanente.

#### 2.7.14. Calcolo del rumore per un singolo evento

La parte fondamentale del processo di modellizzazione, illustrata qui nella sua interezza, è il calcolo del livello di rumore per un unico evento sulla base delle informazioni della traiettoria di volo di cui alle sezioni da 2.7.7 a 2.7.13.

#### 2.7.15. Metriche di un singolo evento

Il rumore prodotto dal movimento di un aeromobile nel punto di osservazione è espresso come "livello di esposizione sonora per singolo evento", un dato quantitativo che costituisce un indicatore del suo impatto sulle persone. Il suono ricevuto è misurato in termini di rumore, utilizzando una scala di base in decibel  $L(t)$  che applica una ponderazione in funzione della frequenza (o filtro) per riprodurre le caratteristiche dell'udito umano. La scala di maggiore importanza nella modellizzazione delle curve isolivello di un aeromobile è il livello sonoro ponderato (A),  $L_A$ .

La metrica più comunemente utilizzata per valutare interi eventi è data dai "livelli di esposizione sonora per singolo evento",  $L_E$ , che permettono di tener conto di tutta (o della maggior parte di) l'energia sonora di tali eventi. L'integrazione della dimensione temporale di tale processo genera le principali difficoltà della modellizzazione della segmentazione (o simulazione). Di più semplice modellizzazione è la metrica alternativa  $L_{max}$ , corrispondente al livello massimo istantaneo che si registra durante l'evento; è tuttavia  $L_E$  a costituire la componente basilare di tutti gli indici del rumore prodotto dalla maggior parte degli aeromobili moderni; in futuro i modelli pratici dovrebbero comprendere sia  $L_{max}$  sia  $L_E$ . Ciascuna metrica può essere misurata su differenti scale di rumore; nel presente documento viene considerato esclusivamente il livello sonoro ponderato (A). La scala è generalmente indicata in modo simbolico con l'estensione del suffisso della metrica, ovvero  $L_{AE}$ ,  $L_{Amax}$ .

Il livello di esposizione sonora per un singolo evento è espresso mediante la seguente equazione

$$L_E = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L(t)/10} dt \right) \quad (2.7.17)$$

dove  $t_0$  indica un tempo di riferimento. L'intervallo di integrazione  $[t_1, t_2]$  è scelto al fine di garantire che siano presi in conto (quasi) tutti i suoni significativi prodotti nell'evento. Molto spesso i limiti  $t_1$  e  $t_2$  sono scelti per coprire il periodo in cui il livello  $L(t)$  è uguale o inferiore a 10 dB di  $L_{max}$ . questo periodo è noto come tempo "con diminuzione limitata a 10 dB" ("10-dB down"). I livelli di esposizione al suono (rumore) repertoriati nella banca dati ANP sono valori "con diminuzione limitata a 10-dB"<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> Tale valore era stato raccomandato nell'edizione precedente del documento ECAC 29 ma è tuttora considerato provvisorio in attesa di acquisire ulteriori dati sperimentali probatori.

<sup>19</sup>  $L_E$  con diminuzione limitata a 10-dB può essere fino a 0,5 dB inferiore a  $L_E$  valutato su una durata maggiore. Tuttavia, fatta eccezione per le brevi distanze inclinate in cui i livelli sono elevati, il rumore ambiente estraneo rende spesso poco pratici i lunghi intervalli di misurazione e i valori con diminuzione limitata a 10-dB costituiscono la



Ai fini della modellizzazione delle curve isolivello degli aeromobili, la principale applicazione dell'equazione 2.7.17 è la metrica standard *Sound Exposure Level* (livello di esposizione al suono)  $L_{AE}$  (acronimo SEL):

$$L_{AE} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_A(t)/10} dt \right) \text{ con } t_0 = 1 \text{ secondo} \quad (2.7.18)$$

Le equazioni per calcolare il livello di esposizione possono essere usate per determinare i livelli di eventi per i quali è conosciuta l'intera variazione in funzione del tempo di  $L(t)$ . Nella metodologia raccomandata per la modellizzazione del rumore tali variazioni in funzione del tempo non sono definite; i livelli di esposizione di un evento sono calcolati sommando i valori dei segmenti, dove ciascun livello parziale di un evento definisce il contributo di un unico segmento finito della traiettoria di volo.

#### 2.7.16. Determinazione dei livelli di un evento sulla base dei dati NPD

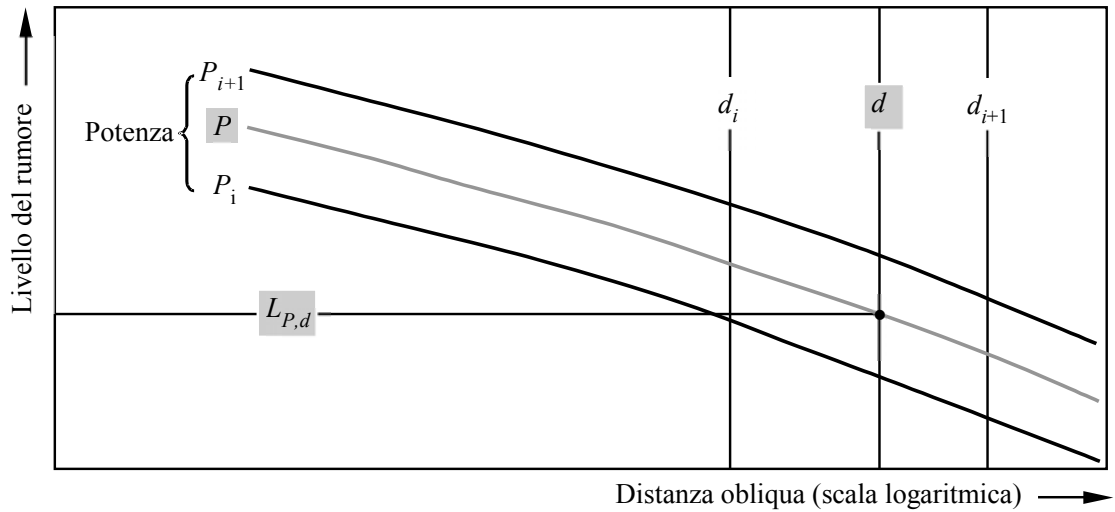
La principale fonte di dati relativi al rumore prodotto dagli aeromobili è la banca dati ANP (*Aircraft Noise and Performance*). Essa presenta i livelli  $L_{max}$  e  $L_E$  come funzioni della distanza di propagazione  $d$  - per tipi specifici di aeromobili e per le loro varianti, configurazioni di volo (avvicinamento, partenza, configurazioni dei flap) e regimi  $P$ . Essi fanno riferimento a un volo stabilizzato a velocità di riferimento specifiche  $V_{ref}$  lungo una traiettoria di volo rettilinea teoricamente infinita<sup>20</sup>.

In seguito viene descritto in che modo sono specificati i valori delle variabili indipendenti  $P$  e  $d$ . In una ricerca singola, conoscendo i valori di ingresso  $P$  e  $d$ , si possono ottenere i valori dei *livelli di riferimento*  $L_{max}(P,d)$  e/o  $L_{E\infty}(P,d)$  (applicabile a una traiettoria di volo infinita). A meno che non siano disponibili i valori esatti per  $P$  e/o  $d$ , è in genere necessario stimare per interpolazione il o i livelli di rumore dell'evento. Si utilizza un'interpolazione lineare tra i valori repertoriati dei regimi e un'interpolazione logaritmica tra i valori repertoriati delle distanze (cfr. **figura 2.7.i**).

---

norma. Poiché anche gli studi sugli effetti del rumore (utilizzati per "calibrare" le curve isolivello) tendono a utilizzare valori con diminuzione limitata a 10 dB, i valori della banca dati ANP sono considerati del tutto adeguati.

<sup>20</sup> Benché l'idea di una traiettoria di volo infinitamente lunga sia importante ai fini della definizione di un livello di esposizione al suono di un evento  $L_E$ , essa ha meno rilevanza nel caso del livello massimo di un evento  $L_{max}$  dove predomina il rumore emesso dall'aeromobile quando si trova in una posizione particolare in corrispondenza o prossimità del punto di approccio più vicino al punto di osservazione. A fini di modellizzazione il parametro della distanza NPD è scelto per rappresentare la distanza minima tra punto di osservazione e segmento.



**Figura 2.7.i: Interpolazione nelle curve rumore-potenza-distanza**

Se  $P_i$  e  $P_{i+1}$  sono i valori del regime del motore per i quali sono repertoriati i dati relativi al livello di rumore in rapporto alla distanza, il livello di rumore  $L(P)$  a una data distanza per il regime intermedio  $P$ , compreso tra  $P_i$  e  $P_{i+1}$ , è dato da:

$$L(P) = L(P_i) + \frac{L(P_{i+1}) - L(P_i)}{P_{i+1} - P_i} \cdot (P - P_i) \quad (2.7.19)$$

Se, a qualsiasi regime del motore,  $d_i$  e  $d_{i+1}$  sono distanze per le quali sono repertoriati dati sul rumore, il livello di rumore  $L(d)$  per una distanza intermedia  $d$ , compresa tra  $d_i$  e  $d_{i+1}$ , è dato da:

$$L(d) = L(d_i) + \frac{L(d_{i+1}) - L(d_i)}{\lg d_{i+1} - \lg d_i} \cdot (\lg d - \lg d_i) \quad (2.7.20)$$

Utilizzando le equazioni (2.7.19) e (2.7.20), si può ottenere un livello di rumore  $L(P,d)$  per qualsiasi regime del motore  $P$  e qualsiasi distanza  $d$  che figurano all'interno della banca dati NPD.

Per distanze  $d$  non comprese nella banca dati NPD, viene utilizzata l'equazione 2.7.20 per estrapolare dai due ultimi valori, ovvero per distanze minori da  $L(d_1)$  e  $L(d_2)$  o per distanze maggiori da  $L(d_{I-1})$  e  $L(d_I)$ , dove  $I$  è il numero totale di punti NPD sulla curva. Pertanto

$$\text{distanze minori:} \quad L(d) = L(d_2) + \frac{L(d_1) - L(d_2)}{\lg d_2 - \lg d_1} \cdot (\lg d_2 - \lg d) \quad (2.7.21)$$

$$\text{distanze maggiori:} \quad L(d) = L(d_{I-1}) - \frac{L(d_{I-1}) - L(d_I)}{\lg d_I - \lg d_{I-1}} \cdot (\lg d - \lg d_{I-1}) \quad (2.7.22)$$

Poiché, a brevi distanze  $d$ , i livelli di rumore tendono a crescere molto rapidamente di pari passo con la diminuzione della distanza di propagazione, si raccomanda di imporre per  $d$  un limite inferiore (30 metri), ovvero  $d = \max(d, 30 \text{ m})$ .

### Adeguamento in funzione dell'impedenza dei dati standard NPD

I dati NPD contenuti nella banca dati ANP sono normalizzati in funzione di condizioni atmosferiche specifiche (temperatura di 25°C e pressione di 101 325 kPa). Prima di utilizzare il metodo di interpolazione/estrapolazione sopradescritto, è necessario applicare ai dati NPD standard un adeguamento in funzione dell'impedenza acustica.

L'impedenza acustica è collegata alla propagazione di onde sonore in ambito acustico e viene definita come il prodotto della densità dell'aria per la velocità del suono. Per una data intensità sonora (potenza per unità di superficie) percepita a una distanza specifica dalla fonte, la pressione sonora associata (utilizzata per definire le metriche SEL e  $L_{Amax}$ ) dipende dall'impedenza acustica dell'aria nel punto di misurazione. È una funzione della temperatura e della pressione atmosferica (e, indirettamente, dell'altitudine). Vi è pertanto la necessità di adeguare i dati standard NPD della banca dati ANP per tenere conto delle effettive condizioni di temperatura e pressione al punto ricevitore, che sono generalmente differenti dalle condizioni normalizzate dei dati ANP.

L'adeguamento in funzione dell'impedenza da applicare ai livelli standard NPD è espresso come segue:

$$\Delta_{Impedance} = 10 \cdot \lg\left(\frac{\rho \cdot c}{409.81}\right) \quad (2.7.23)$$

dove:

$\Delta_{Impedance}$	Adeguamento in funzione dell'impedenza per le effettive condizioni atmosferiche al punto ricevitore (dB)
$\rho \cdot c$	Impedenza acustica (newton secondi/m <sup>3</sup> ) dell'aria al punto ricevitore (sapendo che l'impedenza dell'aria associata alle condizioni atmosferiche di riferimento dei dati NPD nella banca dati ANP è pari a 409,81).

L'impedenza  $\rho \cdot c$  è calcolata come segue:

$$\rho \cdot c = 416.86 \cdot \left[ \frac{\delta}{\theta^{1/2}} \right] \quad (2.7.24)$$

$\delta$	$p/p_0$ , rapporto tra la pressione dell'aria ambiente all'altitudine del punto di osservazione e la pressione atmosferica standard al livello medio del mare: $p_0 = 101 \text{ 325 kPa}$ (o $1 \text{ 013,25 mb}$ )
$\theta$	$(T + 273,15)/(T_0 + 273,15)$ rapporto tra la temperatura dell'aria all'altitudine del punto di osservazione e la temperatura atmosferica standard al livello medio del mare: $T_0 = 15,0 \text{ °C}$

L'adeguamento in funzione dell'impedenza acustica è generalmente inferiore ad alcuni decimi di decibel. In particolare va sottolineato che in condizioni atmosferiche standard ( $p_0 = 101\,325$  kPa e  $T_0 = 15,0$  °C), l'adeguamento in funzione dell'impedenza è inferiore a 0,1 dB (0,074 dB). Tuttavia, quando si registrano significative variazioni di temperatura e di pressione atmosferica rispetto alle condizioni di riferimento dei dati NPD, l'adeguamento può essere più pronunciato.

### 2.7.17. Espressioni generali

#### *Livello di un evento associato a un segmento Lseg*

I valori del segmento sono determinati applicando adeguamenti ai valori del livello di riferimento (traiettoria infinita) ricavati dai dati NPD. Il livello massimo di rumore di un segmento di traiettoria di volo  $L_{max,seg}$  può essere espresso generalmente come

$$L_{max,seg} = L_{max}(P, d) + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, \ell) \quad (2.7.25)$$

e il contributo di un segmento di traiettoria di volo a  $L_E$  come

$$L_{E,seg} = L_{E\infty}(P, d) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, \ell) + \Delta_F \quad (2.7.26)$$

I 'termini di correzione' nelle equazioni 2.7.25 e 2.7.26 - che sono descritti in dettaglio nella sezione 2.7.19 - si riferiscono ai seguenti effetti:

- $\Delta_V$  *Correzione della durata*: i dati NPD si riferiscono a una velocità di volo di riferimento. La correzione permette di adeguare i livelli di esposizione a velocità non di riferimento. (Essa non è applicata a  $L_{max,seg}$ .)
- $\Delta_I(\varphi)$  *Effetto di installazione*: descrive una variazione della *direttività laterale* dovuta alla schermatura, alla rifrazione e alla riflessione causate dalla cellula dell'aeromobile, dai motori e dai campi di flusso circostanti.
- $\Lambda(\beta, \ell)$  *Attenuazione laterale*: è significativa per la propagazione sonora ad angoli bassi rispetto al suolo; tiene conto dell'interazione tra onde sonore dirette e riflesse (effetto del suolo) e degli effetti di disomogeneità atmosferiche (causate in primo luogo dal suolo) che determinano la rifrazione delle onde sonore dirette verso il punto di osservazione al lato della traiettoria di volo.
- $\Delta_F$  *Correzione di un segmento finito (frazione di rumore)*: tiene conto della lunghezza finita del segmento che, ovviamente, genera una minore esposizione al rumore rispetto a un segmento di lunghezza infinita. Si applica esclusivamente alle metriche di esposizione.

Se il segmento è parte integrante del rullaggio a terra nelle fasi di decollo e atterraggio e il punto di osservazione è ubicato dietro il segmento preso in considerazione, si adottano misure speciali per rappresentare la direzionalità pronunciata del rumore dei motori a reazione registrato alle spalle di un aereo in procinto di decollare. Tali misure speciali consistono, segnatamente, nell'utilizzo di una forma specifica di rumore per il livello di esposizione:

$$L_{max,seg} = L_{max}(P, d) + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, \ell) + \Delta_{SOR} \quad (2.7.27)$$

$$L_{E,seg} = L_{E\infty}(P, d) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, \ell) + \Delta'_F + \Delta_{SOR} \quad (2.7.28)$$

$\Delta'_F$  Forma particolare della *correzione del segmento*

$\Delta_{SOR}$  *Correzione per la direttività*: tiene conto della direzionalità pronunciata del rumore dei motori a reazione registrato alle spalle del segmento di rullaggio a terra

Il trattamento specifico del rullaggio a terra è descritto nella sezione 2.7.19

La sezione che segue descrive il calcolo dei livelli di rumore del segmento.

*Livello di rumore dell'evento L del movimento di un aeromobile*

Il livello massimo  $L_{max}$  è semplicemente il più elevato dei valori del segmento  $L_{max,seg}$  (cfr. le equazioni 2.7.25 e 2.7.27)

$$L_{max} = \max(L_{max,seg}) \quad (2.7.29)$$

dove ciascun valore del segmento è determinato per i dati NPD dell'aeromobile relativi al regime  $P$  e alla distanza  $d$ . Di seguito sono illustrati questi parametri e i termini modificatori  $\Delta_I(\varphi)$  e  $\Lambda(\beta, \ell)$ .

Il livello di esposizione  $L_E$  è calcolato come la somma dei decibel dei contributi  $L_{E,seg}$  di ciascun segmento della traiettoria di volo rilevante sul piano del rumore; ovvero

$$L_E = 10 \cdot \lg\left(\sum 10^{L_{E,seg}/10}\right) \quad (2.7.30)$$

La somma viene effettuata fase per fase per tutti i segmenti della traiettoria di volo.

La parte rimanente del presente capitolo prende in esame la determinazione dei livelli di rumore associati ai segmenti  $L_{max,seg}$  e  $L_{E,seg}$ .

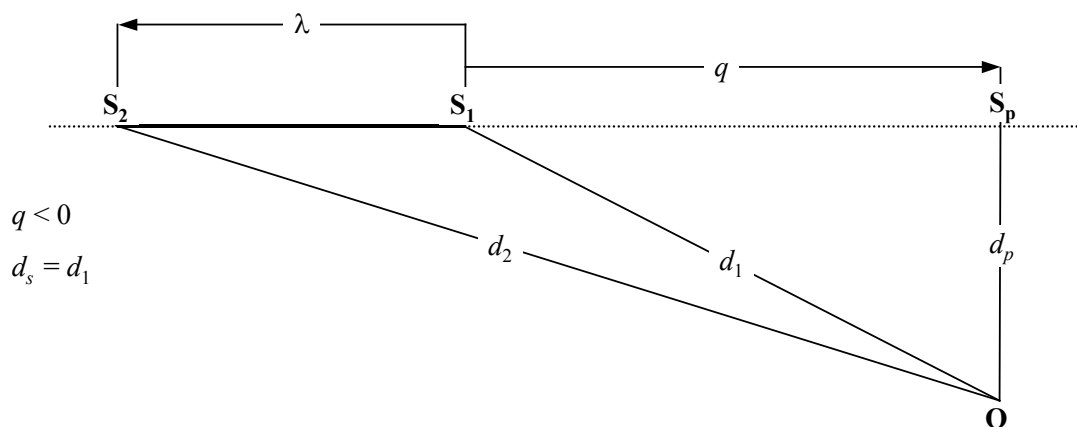
### 2.7.18. Parametri dei segmenti di traiettoria di volo

Il regime  $P$  e la distanza  $d$ , per i quali i livelli di riferimento  $L_{max,seg}(P, d)$  e  $L_{E\infty}(P, d)$  sono ricavati per interpolazione dalle tabelle NPD, sono determinati sulla base dei parametri geometrici e operativi che definiscono il segmento. Di seguito ne sono illustrate le modalità con l'ausilio di illustrazioni dello schema contenente il segmento e il punto di osservazione.

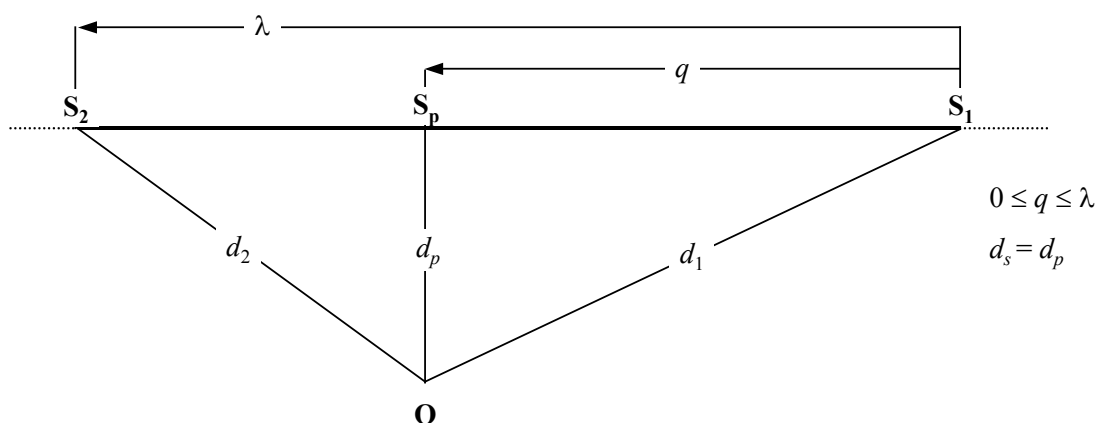
#### *Parametri geometrici*

Le **figure da 2.7.j a 2.7.l** mostrano le geometrie fonte-ricettore quando il punto di osservazione **O** è a) dietro, b) lungo e c) davanti al segmento  $S_1S_2$  dove la direzione del volo è da  $S_1$  a  $S_2$ . Nei diagrammi

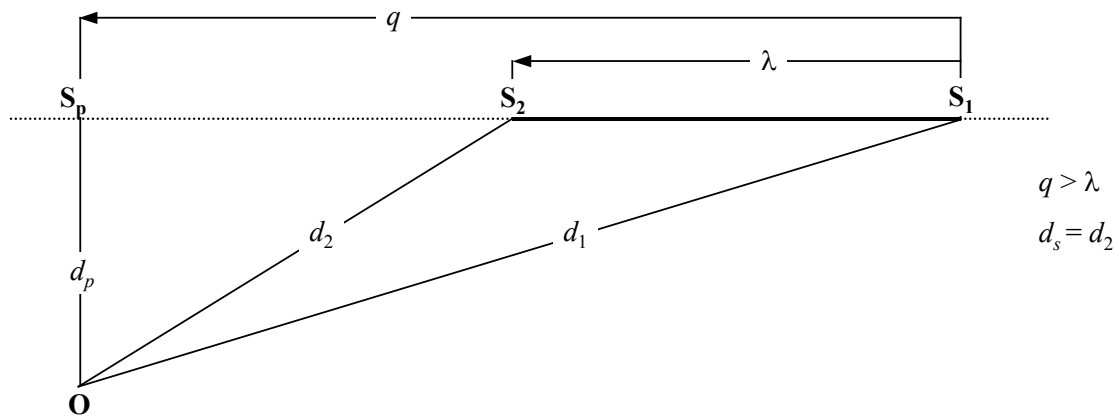
- O** è il punto di osservazione
- S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>** indicano l'inizio e la fine del segmento
- S<sub>p</sub>** è il punto dell'avvicinamento perpendicolare più vicino al punto di osservazione sul segmento o sulla sua estensione
- d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>** sono le distanze tra inizio del segmento, fine del segmento e punto di osservazione
- d<sub>s</sub>** è la distanza più breve tra segmento e punto di osservazione
- d<sub>p</sub>** è la distanza perpendicolare tra osservatore e segmento esteso (*distanza obliqua minima*)
- λ** è la lunghezza del segmento di traiettoria di volo
- q** è la distanza da **S<sub>1</sub>** a **S<sub>p</sub>** (negativa se il punto di osservazione si trova dietro il segmento)



**Figura 2.7.j: Geometria del segmento di traiettoria di volo quando il punto di osservazione è dietro il segmento**



**Figura 2.7.k: Geometria del segmento di traiettoria di volo quando il punto di osservazione si trova lungo il segmento**



**Figura 2.7.l: Geometria del segmento di traiettoria di volo quando il punto di osservazione si trova davanti al segmento**

Il segmento della traiettoria di volo è rappresentato da una linea continua in grassetto. La linea tratteggiata rappresenta l'estensione della traiettoria di volo che si estende all'infinito in entrambe le direzioni. Nel caso dei segmenti corrispondenti a fasi di volo, dove la metrica dell'evento è un livello di esposizione  $L_E$ , il parametro NPD della distanza  $d$  è la distanza  $d_p$  che intercorre tra  $S_p$  e il punto di osservazione, detta *distanza obliqua minima* (ovvero la distanza perpendicolare dal punto di osservazione al segmento o alla sua estensione, in altri termini alla traiettoria di volo infinita (ipotetica) di cui il segmento è considerato parte).

Tuttavia, per metriche del livello di esposizione in cui i punti di osservazione si trovino dietro i segmenti di terra durante il rullaggio in fase di decollo e per i punti di osservazione che si trovano davanti ai segmenti di terra durante il rullaggio successivo all'atterraggio, il parametro NPD della distanza  $d$  diventa la distanza  $d_s$ , la distanza più breve tra il punto di osservazione e il segmento (ovvero la stessa distanza utilizzata per le metriche del livello massimo).

Per le metriche del livello massimo il parametro NPD della distanza  $d$  è  $d_s$ , la distanza più breve tra il punto di osservazione e il segmento.

#### *Regime P del segmento*

I dati NPD descrivono il rumore prodotto da un aeromobile in volo rettilineo costante su una traiettoria di volo infinita, ovvero a regime del motore  $P$  costante. La metodologia raccomandata suddivide le effettive traiettorie di volo, lungo le quali si registrano variazioni di velocità e direzione, in un numero di segmenti finiti, ciascuno dei quali è considerato parte di un'uniforme e infinita traiettoria di volo per la quale sono utilizzabili i dati NPD. La metodologia prevede, tuttavia, variazioni di regime lungo un segmento che si producono in modo lineare in rapporto alla distanza, da  $P_1$  all'inizio del segmento a  $P_2$  alla fine dello stesso. È pertanto necessario definire un valore equivalente stabile  $P$  per il segmento, che viene assunto come il valore registrato nel punto del segmento più vicino al punto di osservazione. Se il punto di osservazione si trova lungo il segmento (figura 2.7.k), tale valore è ottenuto per interpolazione, come rappresentato dall'equazione 2.7.8, tra i valori finali, ovvero

$$P = \sqrt{P_1^2 + \frac{q}{\lambda} \cdot (P_2^2 - P_1^2)} \quad (2.7.31)$$

Se il punto di osservazione si trova davanti o dietro il segmento, tale valore è corrispondente al punto finale più vicino,  $P_1$  o  $P_2$ .

### 2.7.19. Termini per la correzione del livello di un evento associato a un segmento

I dati NDP definiscono i livelli di rumore di un evento come funzione della distanza misurata perpendicolarmente al di sotto di un segmento ideale di traiettoria livellata e rettilinea di lunghezza infinita lungo il quale l'aeromobile vola a regime del motore stabile e a una velocità di riferimento fissa<sup>21</sup>. Il livello dell'evento ottenuto per interpolazione dai dati NPD per un regime del motore e una distanza obliqua specifici è indicato come *livello di riferimento*. Esso si applica a una traiettoria di volo infinita e deve essere corretto per tenere conto degli effetti 1) della velocità non di riferimento, 2) degli effetti di installazione del motore (direttività laterale), 3) dell'attenuazione laterale, 4) della lunghezza finita di un segmento e 5) della direttività longitudinale dietro l'inizio del rullaggio in fase di decollo - si vedano le equazioni 2.7.25 e 2.7.26.

#### *La correzione della durata $\Delta V$ (esclusivamente livelli di esposizione LE)*

Questa correzione<sup>22</sup> tiene conto di una variazione dei livelli di esposizione quando l'effettiva velocità al suolo nel segmento è differente dalla velocità di riferimento dell'aeromobile  $V_{ref}$  a cui si riferiscono i dati NPD di base. Poiché, analogamente al regime motore, la velocità varia all'interno del segmento (la velocità al suolo varia da  $V_1$  a  $V_2$ ), è necessario definire una velocità equivalente del segmento  $V_{seg}$ , tenendo presente che il segmento è inclinato rispetto al suolo; ovvero

$$V_{seg} = V / \cos \gamma \quad (2.7.32)$$

dove  $V$  è qui il segmento di velocità al suolo equivalente (si veda a titolo informativo l'equazione B-22 che esprime  $V$  in termini di velocità calibrata),  $V_c$  e

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{z_2 - z_1}{s_2 - s_1} \right) \quad (2.7.33)$$

Per i segmenti corrispondenti a fasi di volo,  $V$  è assunta come la velocità al suolo nel punto di avvicinamento più vicino  $S$  - ottenuta per interpolazione tra i valori corrispondenti alle estremità del segmento, ipotizzando che quest'ultimo vari in modo lineare con il tempo; ovvero, se il punto di osservazione si trova lungo il segmento:

<sup>21</sup> Le specifiche NPD richiedono che i dati siano basati sulle misurazioni di un volo *rettilineo* stabile ma non necessariamente livellato; per creare le condizioni di volo necessarie, la traiettoria di prova dell'aeromobile può essere inclinata rispetto al piano orizzontale. Tuttavia, come si vedrà, le traiettorie inclinate comportano difficoltà computazionali; per questo motivo, quando si utilizzano i dati a fini di modellizzazione, è opportuno visualizzare le traiettorie fonte come rettilinee e livellate.

<sup>22</sup> La "correzione della durata", dovuta al fatto che essa tiene conto degli effetti della velocità dell'aeromobile sulla durata dell'evento sonoro, ammettendo l'ipotesi semplice che, restando costanti gli altri elementi, la durata, e quindi l'energia percepita dell'evento sonoro, è inversamente proporzionale alla velocità della fonte.



$$V = \sqrt{V_1^2 + \frac{q}{\lambda} \cdot (V_2^2 - V_1^2)} \quad (2.7.34)$$

Se il punto di osservazione si trova davanti o dietro il segmento, tale valore è corrispondente all'estremità più vicina,  $V_1$  or  $V_2$ .

Nel caso dei segmenti di pista (parti del rullaggio a terra nelle fasi di decollo o atterraggio per le quali  $\gamma = 0$ ),  $V_{seg}$  è assunta semplicemente come la media delle velocità all'inizio e alla fine del segmento; ovvero

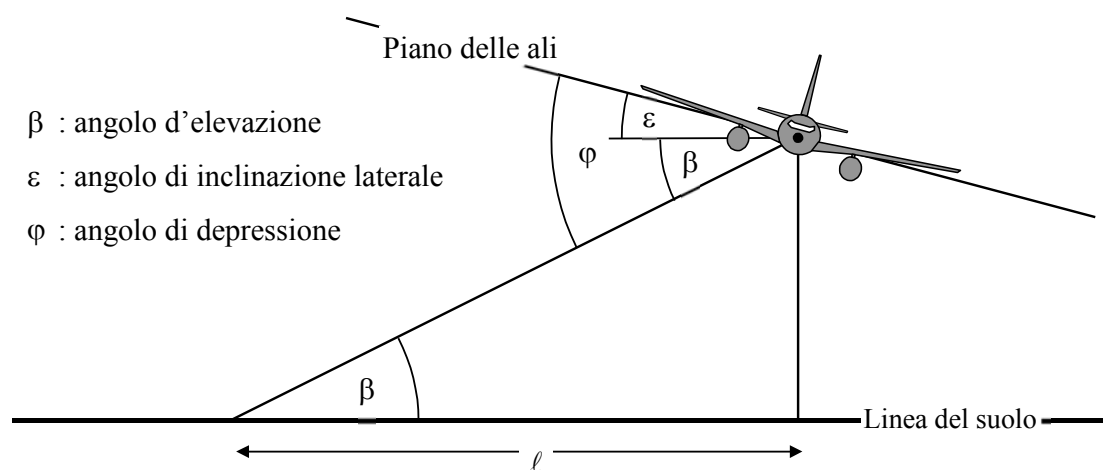
$$V_{seg} = (V_1 + V_2)/2 \quad (2.7.35)$$

In ogni caso la correzione cumulativa della durata è quindi

$$\Delta_V = 10 \cdot \lg(V_{ref} / V_{seg}) \quad (2.7.36)$$

### Geometria della propagazione del suono

La **figura 2.7.1** mostra la geometria di base nel piano perpendicolare alla traiettoria di volo dell'aeromobile. La linea al suolo è l'intersezione del piano perpendicolare con il piano del suolo. (Se la traiettoria di volo è livellata, la linea del suolo costituisce una **vista laterale** del piano del suolo) L'aeromobile è inclinato a un angolo  $\varepsilon$  misurato in senso antiorario rispetto al suo asse di rollio (ovvero con l'ala destra sollevata). L'angolo è pertanto positivo nelle virate a sinistra e negativo nelle virate a destra.



**Figura 2.7.m: Angoli del punto di osservazione di un aeromobile su un piano perpendicolare alla traiettoria di volo**

- L'angolo di elevazione  $\beta$  (compreso tra 0 e 90°) tra la traiettoria di propagazione diretta del suono e la linea del suolo<sup>23</sup> determina, insieme all'inclinazione della traiettoria di volo e lo spostamento laterale  $\ell$  del punto di osservazione dalla traccia al suolo, l'attenuazione laterale.
- L'angolo di depressione  $\varphi$ , tra il piano dell'ala e la traiettoria di propagazione, determina gli effetti di installazione del motore. Per quanto riguarda l'angolo di inclinazione si ha per convenzione  $\varphi = \beta \pm \varepsilon$ , designando con il segno positivo i punti di osservazione a destra e col segno negativo i punti di osservazione a sinistra.

*Correzione relativa all'installazione del motore  $\Delta I$*

Un aeromobile in volo costituisce una complessa fonte di rumore. Le fonti sonore costituite dai motori (e dalla cellula) sono già di per sé complesse; in più, la configurazione della cellula, e in particolare l'ubicazione dei motori, influenza le caratteristiche di irradiazione del rumore in virtù dei processi di riflessione, rifrazione e dispersione causati dalle superfici solide e dai campi di flusso aerodinamici. Ne risulta una direzionalità non uniforme del suono irradiato lateralmente in relazione all'asse di rollio dell'aeromobile, chiamata in questa sede *direttività laterale*.

Vi sono differenze significative nella direttività laterale tra aeromobili con motori montati nella parte posteriore della fusoliera e quelli con motori montati sotto le ali. Ne dà conto l'espressione riportata di seguito:

$$\Delta_I(\varphi) = 10 \cdot \lg \left[ \frac{(a \cdot \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)^b}{(c \cdot \sin^2 2\varphi + \cos^2 2\varphi)} \right] \text{ dB} \quad (2.7.37)$$

dove  $\Delta_I(\varphi)$  è la correzione, in dB, all'angolo di depressione  $\varphi$  (cfr. **figura 2.7.m**) e

$$a = 0,00384, \quad b = 0,0621, \quad c = 0,8786 \quad \text{per motori montati sotto le ali}$$

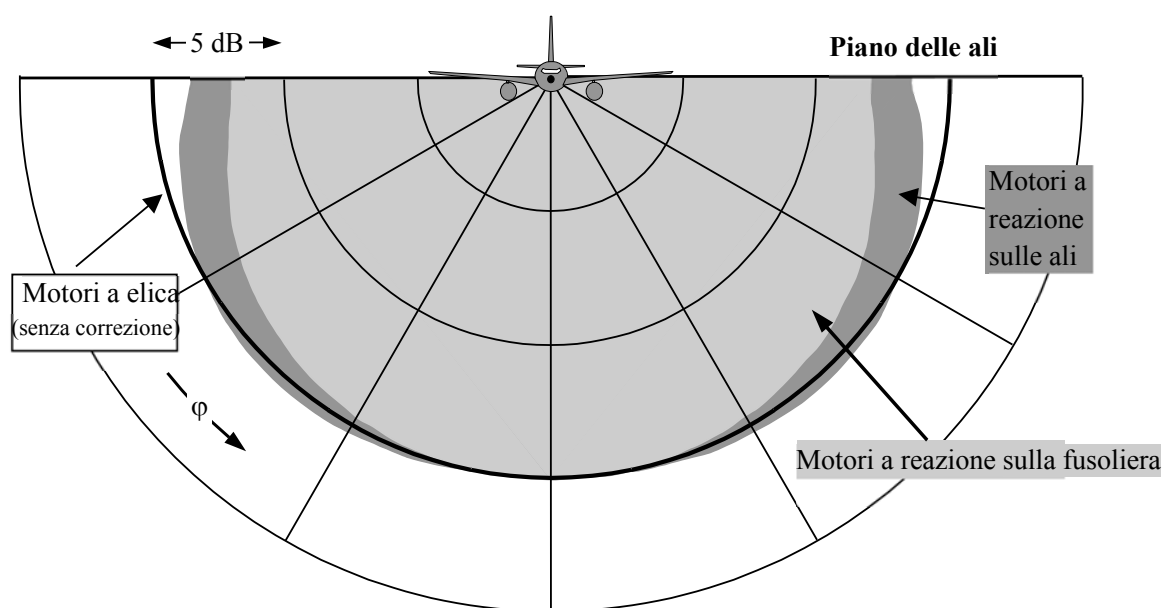
$$a = 0,1225, \quad b = 0,3290, \quad c = 1 \quad \text{per motori montati nella parte posteriore della fusoliera.}$$

Per gli aeromobili a turboelica le variazioni di direttività sono trascurabili e nel loro caso si può ipotizzare che

$$\Delta_I(\varphi) = 0 \quad (2.7.38)$$

La **figura 2.7.n** mostra la variazione di  $\Delta_I(\varphi)$  in relazione all'asse di rollio dell'aeromobile per tre installazioni di motori. Queste relazioni empiriche sono state ricavate dalla SAE basandosi su misurazioni sperimentali effettuate principalmente al di sotto dell'ala. Fino a quando non siano stati analizzati i dati di misurazioni effettuate al di sopra dell'ala, si raccomanda che, per  $\varphi$  negativo, si abbia  $\Delta_I(\varphi) = \Delta_I(0)$  per tutte le installazioni.

<sup>23</sup> In caso di terreno ondulato vi possono essere definizioni diverse di angolo di elevazione. Nel presente documento esso è definito dall'altezza dell'aeromobile al di sopra del punto di osservazione e dalla distanza obliqua - e non tiene quindi conto delle pendenze del terreno e degli ostacoli presenti sulla traiettoria di propagazione del rumore (cfr. le sezioni 2.7.6 e 2.7.10). Se, a causa dell'elevazione del terreno, il punto ricettore si trova al di sopra dell'aeromobile, l'angolo di elevazione  $\beta$  è fissato a zero.



**Figura 2.7.n: Direttività laterale degli effetti di installazione**

Si presuppone che  $\Delta_I(\varphi)$  sia bidimensionale, ovvero che non dipenda da nessun altro parametro - e in particolare che non subisca variazioni in relazione alla distanza longitudinale dal punto di osservazione dall'aeromobile. Ciò significa che l'angolo di elevazione  $\beta$  per  $\Delta_I(\varphi)$  è definito come  $\beta = \tan^{-1}(z/l)$ . Questa ipotesi è intesa a facilitare la modellizzazione fino a quando non vi sia una comprensione migliore dei meccanismi; in realtà gli effetti dell'installazione dovrebbero essere sostanzialmente tridimensionali. Nonostante ciò un modello bidimensionale si giustifica con il fatto che i livelli sonori di un evento tendono ad essere dominati dal rumore che si propaga lateralmente dal segmento più vicino.

*Attenuazione laterale  $A(\beta, \theta)$  (traiettoria di volo infinita)*

I livelli sonori degli eventi presenti nel repertorio NPD si riferiscono a un volo stabilizzato e livellato e sono basati in genere su misurazioni effettuate a 1,2 metri da un suolo soffice e piano al di sotto dell'aeromobile; il parametro della distanza è in realtà l'altezza al di sopra della superficie. Si ipotizza che qualsiasi effetto della superficie sui livelli sonori dell'evento al di sotto dell'aeromobile, che determini uno scostamento tra i livelli repertoriati e i valori registrati in campo aperto<sup>24</sup>, sia inerente ai dati (ovvero alle caratteristiche della relazione tra livello e distanza).

Al lato della traiettoria di volo, il parametro della distanza è la distanza obliqua minima – la lunghezza della perpendicolare tra il ricevitore e la traiettoria di volo. In ogni posizione laterale il livello di rumore è generalmente inferiore al livello che si registra alla stessa distanza immediatamente al di sotto dell'aeromobile. Indipendentemente dalla *direttività laterale* o dagli "effetti di installazione" sopradescritti, tale differenza è dovuta a un eccesso di *attenuazione laterale* che fa sì che i livelli sonori diminuiscano più rapidamente con la distanza di quanto indicato dalle curve NPD. Un precedente metodo, diffusamente utilizzato, per modellizzare la propagazione laterale

<sup>24</sup> Si definisce livello "in campo aperto" il livello che si sarebbe registrato in assenza di superficie.

del rumore prodotto da un aeromobile, era stato messo a punto dalla Society of Automotive Engineers (SAE) nel documento AIR-1751; gli algoritmi descritti di seguito si basano sui miglioramenti raccomandati ora dalla SAE (nel documento AIR-5662). L'attenuazione laterale è un effetto di riflessione acustica dovuto all'interferenza tra suono irradiato direttamente e suono riflesso dalla superficie. Essa dipende dalla natura della superficie e può determinare significative riduzioni nei livelli di suono osservati ad angoli di elevazione ridotti. Essa è inoltre fortemente influenzata dalla rifrazione sonora, stabile o instabile, provocata dai gradienti del vento e della temperatura e dalla turbolenza, fattori questi che sono a loro volta attribuibili alla presenza della superficie<sup>25</sup>. Il fenomeno della riflessione delle superfici è ben conosciuto e, in presenza di condizioni atmosferiche e di superficie uniformi, può essere descritto teoricamente con una certa precisione. Tuttavia, condizioni non uniformi di tipo atmosferico e di superficie - che non possono essere definite con una semplice analisi teorica - hanno una notevole incidenza sull'effetto di riflessione che tendono ad "amplificare" ad angoli di elevazione più elevati; per questi motivi la teoria è di limitata applicabilità. La SAE continua le proprie ricerche per arrivare a una migliore comprensione degli effetti delle superfici e ci si aspetta che possa pervenire alla definizione di modelli migliori. Nel frattempo, per calcolare l'attenuazione laterale si raccomanda di applicare la metodologia descritta di seguito e presentata nel documento AIR-5662. Essa si limita al caso della propagazione sonora sopra terreni soffici e piani, cosa adeguata per la grande maggioranza degli aeroporti civili. Gli adeguamenti per tenere conto degli effetti di superfici dure (o, cosa equivalente dal punto di vista acustico, dell'acqua) sono ancora in corso di sviluppo.

La metodologia si basa su un corpus sostanziale di dati sperimentali sulla propagazione del suono di aeromobili con motori montati nella fusoliera e in volo rettilineo (senza virate) stabile e livellato, riportato originariamente nel documento AIR-1751. Supponendo che, per un volo livellato, l'attenuazione aria-terra dipenda dai seguenti fattori: i) l'angolo di elevazione  $\beta$  misurato nel piano verticale e ii) lo spostamento laterale dalla traccia al suolo dell'aeromobile  $\ell$ , i dati sono stati analizzati al fine di ottenere una funzione empirica per l'adeguamento laterale *totale*  $\Lambda_T(\beta, \ell)$  (= livello dell'evento in posizione laterale meno il livello alla stessa distanza al di sotto dell'aeromobile).

Poiché il termine  $\Lambda_T(\beta, \ell)$  comprendeva sia la direttività laterale sia l'attenuazione laterale, quest'ultima può essere ricavata per sottrazione. Descrivendo la direttività laterale con l'equazione 2.7.37, con i coefficienti relativi al montaggio dei motori nella fusoliera e con  $\varphi$  sostituito da  $\beta$  (adeguato per i voli privi di virate), l'attenuazione laterale diventa:

$$\Lambda(\beta, \ell) = \Lambda_T(\beta, \ell) - \Delta_I(\beta) \quad (2.7.39)$$

dove  $\beta$  e  $\ell$  sono misurati come indicato nella **figura 2.7.m** su un piano perpendicolare alla traiettoria di volo infinita che, anche nel caso di un volo livellato, è verticale.

Benché  $\Lambda(\beta, \ell)$  possa essere calcolato direttamente utilizzando l'equazione 2.7.39 con  $\Lambda_T(\beta, \ell)$  ricavato da AIR-1751, si raccomanda di definire una relazione più efficiente. Di seguito è riportata un'approssimazione empirica adattata dal documento AIR-5662:

---

<sup>25</sup> I gradienti del vento e della temperatura e la turbolenza dipendono in parte dalla durezza e dalle caratteristiche di trasmissione del calore della superficie.

$$\Lambda(\beta, \ell) = \Gamma(\ell) \cdot \Lambda(\beta) \quad (2.7.40)$$

dove  $\Gamma(\ell)$  è un fattore della distanza dato da:

$$\Gamma(\ell) = 1,089 \cdot [1 - \exp(-0,00274\ell)] \quad \text{per } 0 \leq \ell \leq 914 \text{ m} \quad (2.7.41)$$

$$\Gamma(\ell) = 1 \quad \text{per } \ell > 914 \text{ m} \quad (2.7.42)$$

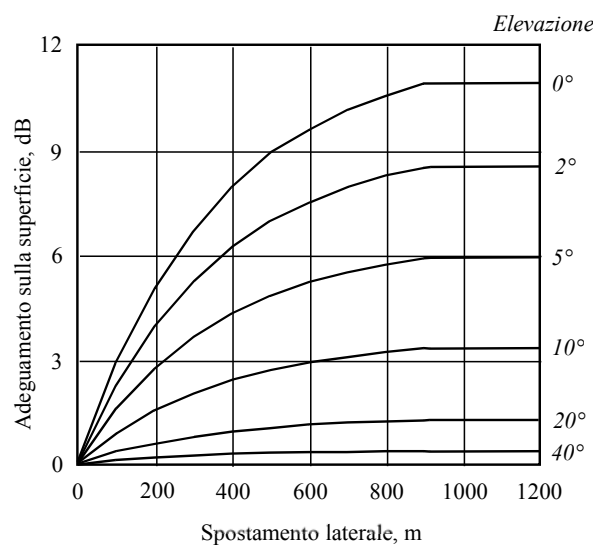
e  $\Lambda(\beta)$  è l'attenuazione laterale aria terra di lungo raggio data da

$$\Lambda(\beta) = 1,137 - 0,0229\beta + 9,72 \cdot \exp(-0,142\beta) \quad \text{per } 0^\circ \leq \beta \leq 50^\circ \quad (2.7.43)$$

$$\Lambda(\beta) = 0 \quad \text{for } 50^\circ \leq \beta \leq 90^\circ \quad (2.7.44)$$

L'espressione per l'attenuazione laterale  $\Lambda(\beta, \ell)$ , equazione 2.7.40, che si suppone adeguata per tutti i tipi di aeromobile, compresi gli aeromobili a turboelica e gli aerei con motori a reazione montati nella fusoliera o sotto le ali, è illustrata a livello grafico nella **figura 2.7.o**.

In determinate circostanze (in funzione del terreno) è possibile che  $\beta$  sia inferiore a zero. In questi casi si raccomanda che  $\Lambda(\beta) = 10,57$ .



**Figura 2.7.o: Variazione dell'attenuazione laterale  $\Lambda(\beta, \ell)$  con l'angolo di elevazione e la distanza**

*Attenuazione laterale di un segmento finito*

Le equazioni da 2.7.41 a 2.7.44 descrivono l'attenuazione laterale  $\Lambda(\beta, \ell)$  del suono che arriva al punto di osservazione da un aeromobile in volo stabilizzato lungo una traiettoria di volo infinita e livellata. Quando tali equazioni sono applicate a segmenti di traiettoria finiti e non livellati, l'attenuazione deve essere calcolata per una traiettoria livellata *equivalente* - in quanto il punto più vicino su una semplice estensione del segmento inclinato (che incrocia a un certo punto la superficie) non consente di ottenere un angolo di elevazione  $\beta$  adeguato.

La determinazione dell'attenuazione laterale per segmenti finiti differisce in modo marcato per le metriche  $L_{max}$  e  $L_E$ . I livelli massimi di un segmento  $L_{max}$  sono ricavati dai dati NPD come funzione della distanza di propagazione  $d$  dal punto più vicino sul segmento; non sono necessarie correzioni per tenere conto della dimensione del segmento. Analogamente si suppone che l'attenuazione laterale di  $L_{max}$  dipenda esclusivamente dall'angolo di elevazione dello stesso punto e dalla distanza di tale punto dal suolo. Pertanto, sono richieste soltanto le coordinate di tale punto. Nel caso di  $L_E$  il procedimento è più complesso.

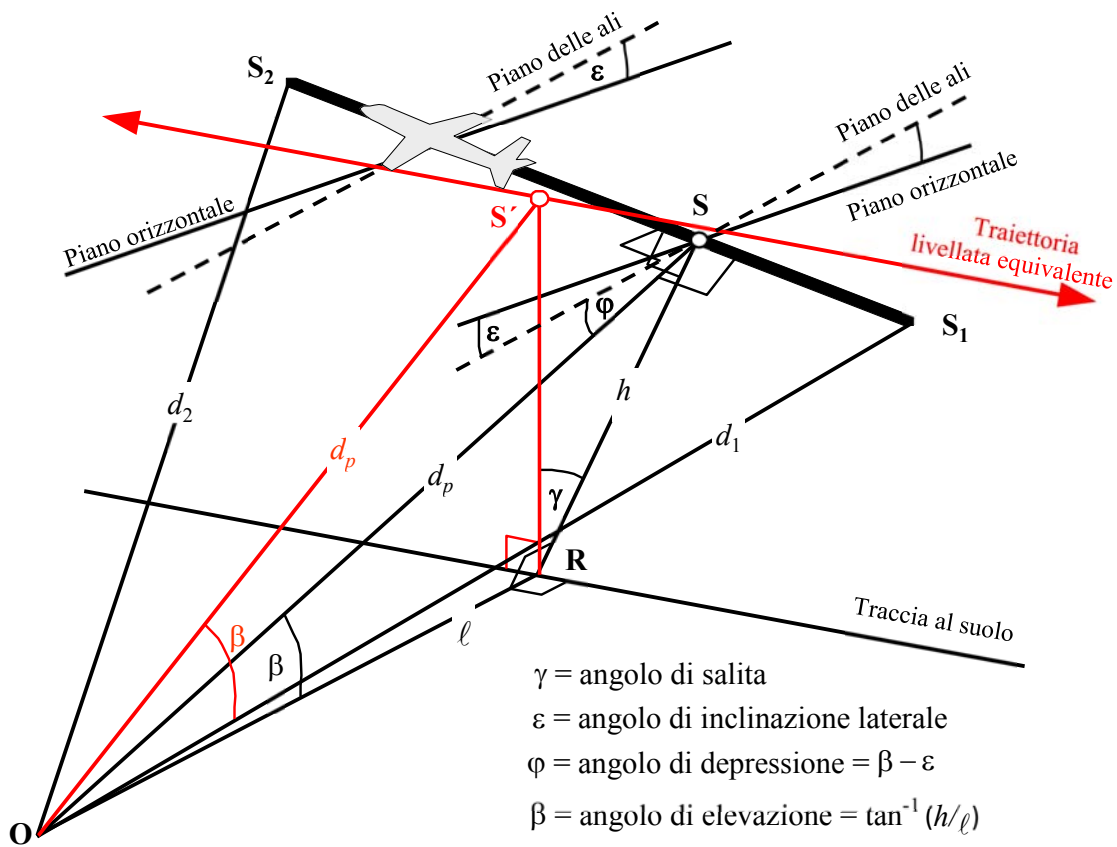
Il livello di riferimento di un evento  $L_E(P,d)$ , determinato a partire dai dati NPD, benché relativo a parametri di un segmento finito, si applica anche a una traiettoria di volo infinita. Il livello di esposizione determinato da un evento associato a un segmento  $L_{E,seg}$ , è ovviamente inferiore al livello di riferimento - e tale differenza corrisponde all'entità della correzione del segmento finito definita in seguito nella sezione 2.7.19. Tale correzione, che è una funzione della geometria dei triangoli  $OS_1S_2$  di cui alle **figure da 2.7.j a 2.7.l**, definisce in quale percentuale l'energia sonora totale di un segmento infinito ricevuta nel punto O provenga dal segmento; la stessa correzione si applica a prescindere dalla presenza o no di attenuazione laterale. L'attenuazione laterale deve essere calcolata per la traiettoria di volo infinita, ovvero in funzione dello spostamento e dell'elevazione, cosa che non avviene nel caso dei segmenti finiti.

Aggiungendo le correzioni  $\Delta_V$  e  $\Delta_I$ , e sottraendo l'attenuazione laterale  $\Lambda(\beta,\ell)$  dai *livelli di riferimento* NPD si ottiene il livello corretto del rumore di un evento per un volo stabilizzato e *livellato* equivalente su una traiettoria adiacente infinita e rettilinea. Tuttavia, gli effettivi segmenti di traiettoria di volo oggetto di modellizzazione, quelli che incidono sulle curve isolivello, sono raramente livellati; gli aeromobili sono in genere in fase di ascesa o discesa.

La **figura 2.7.p** illustra un segmento in fase di partenza  $S_1S_2$  - l'aeromobile sta salendo a un angolo  $\gamma$  - ma la situazione è molto simile in fase di arrivo. Il resto della traiettoria di volo "reale" non è mostrato; è sufficiente stabilire qui che  $S_1S_2$  rappresenta semplicemente una parte dell'intera traiettoria (normalmente curva). In questo caso il punto di osservazione **O** si trova lungo il segmento e alla sinistra dello stesso. L'aeromobile è inclinato (in senso antiorario rispetto alla traiettoria di volo) a un angolo  $\varepsilon$  in relazione all'asse orizzontale laterale. L'angolo di depressione  $\varphi$  dal piano dell'ala, di cui l'effetto di installazione  $\Delta_I$  è una funzione (equazione 2.7.39), si trova nel piano perpendicolare alla traiettoria di volo in cui  $\varepsilon$  è definito. Quindi  $\varphi = \beta - \varepsilon$  dove  $\beta = \tan^{-1}(h/\ell)$  e  $\ell$  è la distanza perpendicolare **OR** tra il punto di osservazione e la traccia al suolo; ovvero lo spostamento laterale del punto di osservazione<sup>26</sup>. Il punto di approccio del velivolo più vicino al punto di osservazione, **S**, è definito dalla perpendicolare **OS**, di lunghezza (distanza obliqua)  $d_p$ . Il triangolo **OS<sub>1</sub>S<sub>2</sub>** è conforme alla **figura 2.7.k** (geometria per il calcolo della correzione del segmento  $\Delta_F$ ).

---

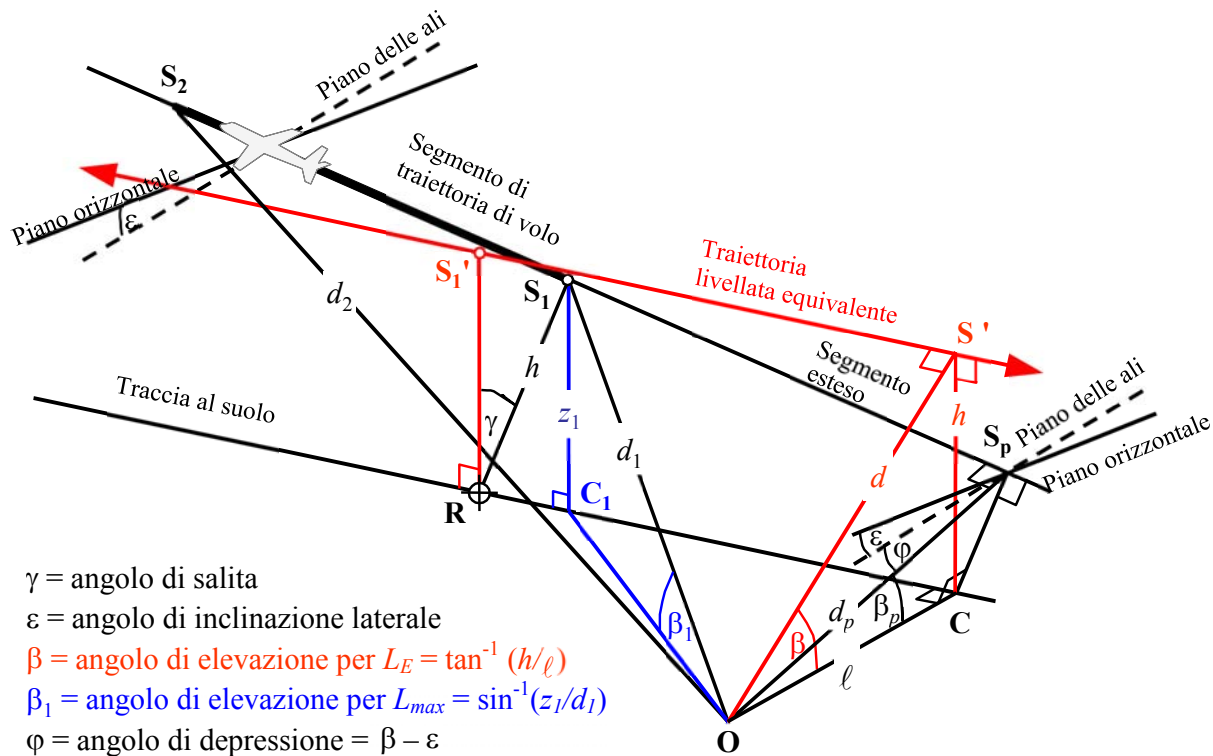
<sup>26</sup> Per un punto di osservazione situato alla destra del segmento  $\varphi$  sarebbe  $\beta + \varepsilon$  (cfr. sezione 2.7.19).



**Figura 2.7.p: Punto di osservazione lungo il segmento**

Per calcolare l'attenuazione laterale utilizzando l'equazione 2.7.40 (dove  $\beta$  è misurato in un piano verticale), una *traiettoria equivalente di volo livellato* viene definita nel piano verticale attraverso  $S_1S_2$  e con la stessa distanza obliqua perpendicolare  $d_p$  a partire dal punto di osservazione. Ciò può essere visualizzato ruotando di un angolo  $\gamma$  il triangolo **ORS**, e la sua corrispondente traiettoria di volo, rispetto a **OR** (cfr. **figura 2.7.p**), e ottenendo così il triangolo **ORS'**. L'angolo di elevazione di questa traiettoria di volo livellata equivalente (ora in un piano verticale) è  $\beta = \tan^{-1}(h/\ell)$  ( $\ell$  non cambia). In questo caso, con il punto di osservazione lungo il segmento, l'attenuazione laterale  $\Lambda(\beta, \ell)$  è la stessa per le metriche  $L_E$  e  $L_{max}$ .

La **figura 2.7.q** illustra la situazione in cui il punto di osservazione **O** si trova *dietro il segmento finito*, e non lungo lo stesso. In questo caso il segmento è osservato come una parte più distante di una traiettoria infinita; una perpendicolare può essere tracciata esclusivamente verso il punto  $S_p$  di un'estensione del segmento. Il triangolo **OS<sub>1</sub>S<sub>2</sub>** è conforme alla **figura 2.7.j** che definisce la correzione del segmento  $\Delta_F$ . In questo caso, tuttavia, i parametri per la direttività e l'attenuazione laterali sono meno ovvi.



F

figura 2.7.q: Punto di osservazione dietro il segmento

Ricordando che, come stabilito a fini di modellizzazione, la direttività laterale (effetto di installazione) è bidimensionale, l'angolo di depressione  $\varphi$  che la determina continua a essere misurato lateralmente rispetto al piano dell'ala dell'aeromobile (il livello di riferimento di un evento è sempre quello generato dall'aeromobile che attraversa la traiettoria di volo infinita rappresentata dal segmento esteso). L'angolo di depressione è pertanto determinato nel punto di avvicinamento più vicino, ovvero  $\varphi = \beta_p - \varepsilon$  dove  $\beta_p$  è l'angolo  $S_pOC$ .

Per le metriche del livello massimo per il parametro NPD della distanza si considera la distanza più breve in relazione al segmento, ovvero  $d = d_1$ . Per le metriche del livello di esposizione tale parametro è la distanza più breve  $d_p$  da  $O$  a  $S_p$  sulla traiettoria di volo estesa; ovvero, il livello ottenuto per interpolazione dai dati NPD è  $L_{E\infty}(P_1, d_p)$ .

Anche i parametri geometrici relativi all'attenuazione laterale sono diversi per i calcoli del livello massimo e del livello di esposizione. Per quanto riguarda le metriche del *livello massimo* l'adeguamento  $\Lambda(\beta, \ell)$  è dato dall'equazione 2.7.40 con  $\beta = \beta_1 = \sin^{-1}(z_1/d_1)$  e  $\ell = OC_1 = \sqrt{d_1^2 - z_1^2}$ , dove  $\beta_1$  e  $d_1$  sono definiti dal triangolo  $OC_1S_1$  nel piano verticale passante per  $O$  e  $S_1$ .

Nel calcolare l'attenuazione laterale per i soli segmenti corrispondenti a fasi di volo e per le metriche dei *livelli di esposizione*,  $\ell$  resta lo spostamento laterale più breve dall'estensione del segmento ( $OC$ ). Tuttavia è di nuovo necessario definire un valore appropriato di  $\beta$  al fine di visualizzare una *traiettoria (infinita) equivalente di volo livellato* di cui il segmento può essere considerato parte.



Questa traiettoria passa per  $S_1'$ , a un'altezza  $h$  sopra la superficie, dove  $h$  è uguale alla lunghezza di  $RS_1$ , la perpendicolare tra la traccia al suolo e il segmento. Ciò equivale a far ruotare la traiettoria di volo estesa reale di un angolo  $\gamma$  rispetto al punto  $R$  (cfr. **figura 2.7.q**). Nella misura in cui  $R$  sin trova sulla perpendicolare a  $S_1$ , il punto del segmento più vicino a  $O$ , la costruzione della traiettoria di volo livellata equivalente è la stessa di quando  $O$  si trova lungo il segmento.

Il punto di approccio più vicino della traiettoria di volo livellata equivalente al punto di osservazione  $O$  si trova in  $S'$ , la distanza obliqua  $d$ , cosicché il triangolo  $OCS'$  che si forma in questo modo sul piano verticale definisce l'angolo di elevazione  $\beta = \cos^{-1}(\frac{h}{d})$ . Benché questa trasformazione possa sembrare piuttosto complessa, va rilevato che la geometria fonte di base (definita da  $d_1$ ,  $d_2$  e  $\varphi$ ) non subisce alterazioni, in quanto il suono che si propaga dal segmento verso il punto di osservazione è quello che si avrebbe se l'intero volo lungo un segmento inclinato esteso all'infinito (di cui a fini di modellizzazione il segmento fa parte) avvenisse a velocità  $V$  e regime del motore  $P_1$  costanti. L'attenuazione laterale del suono che si propaga dal segmento e che è ricevuto nel punto di osservazione, d'altro canto, non si riferisce a  $\beta_p$ , l'angolo di elevazione della traiettoria estesa, bensì a  $\beta$ , l'angolo di elevazione della traiettoria livellata equivalente.

Il caso di un punto di osservazione posto davanti al segmento non viene descritto separatamente; è evidente che la situazione è essenzialmente analoga a quella del punto di osservazione posto dietro il segmento.

Tuttavia, per le metriche del livello di esposizione, laddove i punti di osservazione si trovano dietro i segmenti a terra durante il rullaggio in fase di decollo e davanti ai segmenti di terra durante il rullaggio successivo all'atterraggio, il valore di  $\beta$  diviene lo stesso che si ha nelle metriche del livello massimo, ovvero  $\beta = \beta_1 = \sin^{-1}(z_1/d_1)$  e  $\ell = OC_1 = \sqrt{d_1^2 - z_1^2}$

#### *Correzione del segmento finito $\Delta_F$ (esclusivamente livelli di esposizione $L_E$ )*

Il livello di riferimento adeguato dell'esposizione al rumore fa riferimento a un aeromobile in volo livellato, continuo, rettilineo e stabilizzato (benché con un angolo di inclinazione  $\varepsilon$  che è incompatibile con un volo rettilineo). Applicando la *correzione (negativa) del segmento finito*  $\Delta_F = 10 \cdot \lg(F)$ , dove  $F$  è la *frazione di energia*, si adegua ulteriormente il livello a quello che si avrebbe se l'aeromobile attraversasse esclusivamente il segmento finito (o non generasse alcun rumore per il resto della traiettoria di volo infinita).

Il termine "frazione dell'energia" permette di tenere conto della direttività longitudinale pronunciata del rumore emesso dall'aeromobile e dell'angolo formato dal segmento nel punto di osservazione. Benché i processi che determinano la direzionalità siano molto complessi, le ricerche hanno dimostrato che le curve isolivello risultanti sono piuttosto insensibili alle precise caratteristiche dimensionali assunte. L'espressione per  $\Delta_F$  riportata di seguito si basa su un modello di radiazione sonora bipolare a  $90^\circ$  alla quarta potenza, che si ritiene non essere influenzato dalla direttività e dall'attenuazione laterali. Nell'**appendice E** sono specificate in dettaglio le modalità con cui la correzione è ricavata.

La frazione di energia F è una funzione del triangolo  $OS_1S_2$  definito nelle **figure da 2.7.j a 2.7.l** in modo che:

$$\Delta_F = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2^2} + \arctan \alpha_2 - \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1^2} - \arctan \alpha_1 \right) \right] \quad (2.7.45)$$

con

$$\alpha_1 = -\frac{q}{d_\lambda}; \quad \alpha_2 = -\frac{q - \lambda}{d_\lambda}; \quad d_\lambda = d_0 \cdot 10^{\frac{L_{Exc}(P, d_p) - L_{max}(P, d_p)}{10}}; \quad d_0 = \frac{2}{\pi} \cdot V_{ref} \cdot t_0.$$

dove  $d_\lambda$  è nota come la ‘distanza scalare’ (cfr. **appendice E**). Si noti che  $L_{max}(P, d_p)$  è il livello massimo, ricavato dai dati NPD, per la distanza perpendicolare  $d_p$ , e NON il segmento  $L_{max}$ .

Si raccomanda di applicare un limite più basso di -150 dB a  $\Delta_F$ .

Nel caso particolare di punti di osservazione situati dietro ogni segmento di rullaggio nelle fasi di decollo e atterraggio, viene utilizzata una forma ridotta di frazione del rumore espressa nell’equazione a 2.7.45, che corrisponde allo specifico caso di  $q = 0$ . Il calcolo viene effettuato utilizzando

$$\Delta_F' = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{\pi} \left[ \alpha_2 / (1 + \alpha_2^2) + \tan^{-1} \alpha_2 \right] 10^{\Delta_{SOR}/10} \right] \quad (2.7.46)$$

dove  $\alpha_2 = \lambda / d_\lambda$  e  $\Delta_{SOR}$  è la funzione di direttività dell’inizio del rullaggio definita dalle equazioni 2.7.51 e 2.7.52.

Le ragioni a favore dell’uso di questa particolare forma di frazione del rumore sono ulteriormente spiegate nella sezione seguente in quanto parte integrante del metodo di applicazione della direttività all’inizio del rullaggio.

*Trattamento specifico dei segmenti di rullaggio a terra, compresa la funzione di direttività dell’inizio del rullaggio  $\Delta_{SOR}$*

Ai segmenti di rullaggio a terra, sia in fase di decollo sia di atterraggio, sono applicati i trattamenti specifici descritti di seguito.

*La funzione di direttività dell’inizio del rullaggio  $\Delta_{SOR}$*

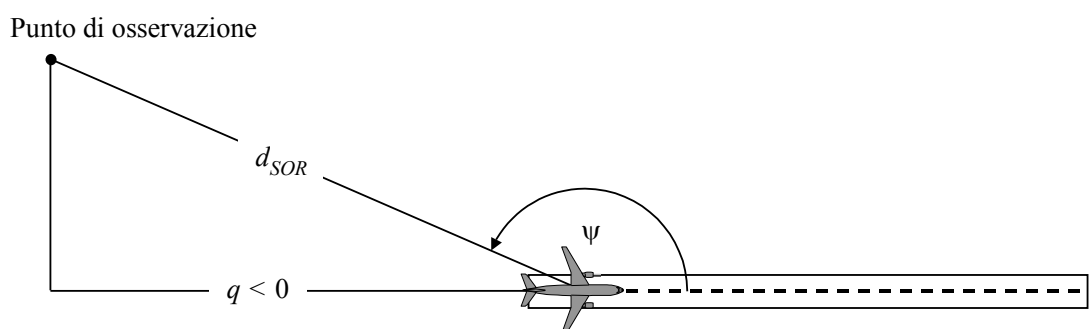
Il rumore prodotto dagli aeromobili con motori a reazione - soprattutto quelli muniti di motori con più basso rapporto di diluizione - evidenzia una caratteristica di irradiazione a lobi nell’arco posteriore, tipica del rumore del getto di scarico. Questa caratteristica è tanto più pronunciata, quanto è più elevata la velocità del motore e ridotta la velocità dell’aeromobile. Ciò è particolarmente significativo per punti di osservazione posti dietro l’inizio del rullaggio in cui sono presenti entrambi tali condizioni. Di questo effetto tiene conto la funzione della direttività  $\Delta_{SOR}$ .

La funzione  $\Delta_{SOR}$  è stata ricavata dopo diverse sedute di misurazione utilizzando microfoni adeguatamente posizionati dietro e al lato dei punti di inizio del rullaggio di aeromobili muniti di motori a reazione.

La **figura 2.7.r** illustra la pertinente geometria. L'angolo azimutale  $\psi$  tra l'asse longitudinale dell'aeromobile e il vettore del punto di osservazione è definito da

$$\psi = \arccos\left(\frac{q}{d_{SOR}}\right). \quad (2.7.47)$$

La distanza relativa  $q$  è negativa (cfr. **figura 2.7.j**) cosicché  $\psi$  varia tra  $0^\circ$  quando l'aeromobile procede in avanti e  $180^\circ$  quando procede nella direzione opposta.



**Figura 2.7.r: Geometria aeromobile-punto di osservazione a terra per la stima della correzione per la direttività**

La funzione  $\Delta_{SOR}$  rappresenta la variazione del rumore complessivo emesso in fase di rullaggio a terra in fase di decollo misurato dietro l'inizio del rullaggio in relazione al rumore complessivo emesso in fase di rullaggio a terra in fase di decollo misurato lateralmente all'inizio del rullaggio e alla stessa distanza:

$$L_{TGR}(d_{SOR}, \psi) = L_{TGR}(d_{SOR}, 90^\circ) + \Delta_{SOR}(d_{SOR}, \psi) \quad (2.7.48)$$

dove  $L_{TGR}(d_{SOR}, 90^\circ)$  è il livello del rumore complessivo emesso in fase di rullaggio a terra in fase di decollo prodotto da tutti i segmenti di rullaggio a terra in fase di decollo in un punto situato alla distanza  $d_{SOR}$  al lato dell'inizio del rullaggio. A distanze  $d_{SOR}$  inferiori alla distanza di normalizzazione  $d_{SOR,0}$ , la funzione di direttività relativa all'inizio del rullaggio è data da

$$\Delta_{SOR}^0 = 51,47 - 1,553 \cdot \psi + 0,015147 \cdot \psi^2 - 0,000047173 \cdot \psi^3 \quad \text{se } 90^\circ \leq \psi < 148,4^\circ \quad (2.7.49)$$

$$\Delta_{SOR}^0 = 339,18 - 2,5802 \cdot \psi - 0,0045545 \cdot \psi^2 + 0,000044193 \cdot \psi^3 \quad \text{se } 148,4^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \quad (2.7.50)$$

Se la distanza  $d_{SOR}$  è superiore alla distanza di normalizzazione  $d_{SOR,0}$ , la correzione per la direttività è moltiplicata per un fattore di correzione al fine di tenere conto del fatto che la direttività si riduce a distanze maggiori dall'aeromobile; ovvero

$$\Delta_{SOR} = \Delta_{SOR}^0 \quad \text{se} \quad d_{SOR} \leq d_{SOR,0} \quad (2.7.51)$$

$$\Delta_{SOR} = \Delta_{SOR}^0 \cdot \frac{d_{SOR,0}}{d_{SOR}} \quad \text{se} \quad d_{SOR} > d_{SOR,0} \quad (2.7.52)$$

La distanza di normalizzazione  $d_{SOR,0}$  è pari a 762 m (2 500 piedi).

*Trattamento di ricettori posti dietro ciascun segmento di rullaggio a terra in fase di decollo e atterraggio.*

La funzione  $\Delta_{SOR}$  consente nella maggior parte dei casi di captare l'effetto pronunciato di direttività della porzione iniziale del rullaggio in fase di decollo in punti collocati dietro l'inizio del rullaggio (in quanto è il punto più vicino ai ricettori con il rapporto più elevato tra regime dei motori e velocità dell'aeromobile). Tuttavia, l'uso della funzione  $\Delta_{SOR}$  così stabilita è "generalizzato" a posizioni poste dietro a ciascun singolo segmento di rullaggio a terra - nelle fasi di decollo e atterraggio -, e quindi non solo dietro il punto di inizio del rullaggio (nel caso del decollo).

I parametri  $d_S$  e sono calcolati in relazione all'inizio di ciascun singolo segmento di rullaggio a terra.

Il livello dell'evento  $L_{seg}$  per un punto collocato dietro a un dato segmento di rullaggio a terra nelle fasi di decollo o atterraggio è calcolato in modo da essere conforme alla funzione  $\Delta_{SOR}$ : esso viene calcolato essenzialmente per il punto di riferimento ubicato al lato del punto di inizio del segmento, alla stessa distanza  $d_S$  del punto effettivo, ed è ulteriormente adeguato con la funzione  $\Delta_{SOR}$  per ottenere il livello dell'evento nel punto effettivo.

Ciò significa che i diversi termini di correzione nelle equazioni riportate di seguito utilizzano i parametri geometrici corrispondenti a tale punto di riferimento ubicato al lato del punto di inizio del segmento:

$$L_{max,seg} = L_{max}(P, d = d_S) + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, l = d_S) + \Delta_{SOR} \quad (2.7.53)$$

$$L_{E,seg} = L_{E\infty}(P, d = d_S) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, l = d_S) + \Delta'_F + \Delta_{SOR} \quad (2.7.54)$$

dove  $\Delta'_F$  è la forma ridotta della frazione del rumore espressa nell'equazione (2.7.46) nel caso in cui  $q = 0$  (in quanto il punto di riferimento è ubicato al lato del punto di inizio del segmento) e tenendo presente che  $d_\lambda$  è calcolato usando  $d_S$  (e non  $d_p$ ):

$$d_\lambda = d_0 \cdot 10^{[L_{E\infty}(P, d_S) - L_{max}(P, d_S)]/10} \quad (2.7.55)$$

#### *2.7.20. Livello di rumore dell'evento L del movimento di un aeromobile dell'aviazione generale*

Il metodo descritto nella sezione 2.7.19 è applicabile agli aeromobili a turboelica dell'aviazione generale quando sono trattati come aerei a turboelica in relazione agli effetti di installazione del motore.

La banca dati ANP comprende voci relative a diversi aeromobili dell'aviazione generale. Benché, in molti casi, questi siano i più comuni aeromobili dell'aviazione generale in esercizio, vi possono essere casi in cui è opportuno utilizzare dati supplementari.

Qualora uno specifico aeromobile dell'aviazione generale non sia conosciuto o non si trovi nella banca dati ANP, si raccomanda l'uso di dati più generici in relazione agli aeromobili, quali i dati GASEPF e GASEPV. I dati GASEPF e GASEPV rappresentano un piccolo aeromobile monomotore dell'aviazione generale con, rispettivamente, elica a passo fisso ed elica a passo variabile. Nell'allegato I (tabelle da I-11 a I-17) sono presentate le voci corrispondenti.

#### *2.7.21. Metodo per il calcolo del rumore prodotto da elicotteri*

Per il calcolo del rumore prodotto da elicotteri si può impiegare lo stesso metodo di calcolo utilizzato per gli aeromobili ad ala fissa (di cui alla sezione 2.7.14), a condizione che gli elicotteri siano trattati come aeromobili a turboelica e che non siano applicati gli effetti di installazione del motore associati agli aeromobili con motori a reazione. Nell'allegato I (tabelle da I-18 a I-27) sono presentate le voci corrispondenti a due differenti serie di dati.

#### *2.7.22. Rumore associato alle operazioni di prova del motore (run-up), al rullaggio (taxiing) e ai gruppi ausiliari di potenza*

Nei casi in cui si ritiene che il rumore associato alle prove del motore e ai gruppi ausiliari di potenza debba essere oggetto di modellizzazione, ciò avviene applicando il capitolo relativo al rumore industriale. Benché di norma ciò non avvenga, il rumore prodotto dalle prove dei motori degli aeromobili (chiamate a volte "engine run-ups", funzionamento del motore ad aeromobile fermo) può talvolta contribuire all'impatto sonoro negli aeroporti. Durante tali prove, effettuate di solito per motivi tecnici al fine di verificare l'efficienza dei motori, gli aeromobili sono in genere stazionati lontano dagli edifici, dagli altri aerei e dai veicoli e personale in movimento, al fine di evitare danni dovuti al getto dei reattori.

Per ragioni supplementari di sicurezza e controllo del rumore, gli aeroporti, e in particolare quelli dotati di strutture di manutenzione in cui vengono effettuate frequenti prove dei motori, possono installare recinti antirumore ("noise pens") schermati su tre lati in modo tale da deflettere e dissipare il getto e il rumore dei reattori. Per studiare l'impatto sonoro di tali strutture, impatto che può essere ulteriormente attenuato e ridotto mediante l'uso di altre barriere di terra o barriere sonore di grandi dimensioni, occorre trattare i recinti antirumore come fonte di rumore industriale e utilizzare un modello adeguato di propagazione del suono e del rumore.

#### *2.7.23. Calcolo dei livelli cumulativi*

Le sezioni da 2.7.14 a 2.7.19 descrivono il calcolo del livello del suono/rumore dell'evento di un singolo movimento dell'aeromobile in un singolo punto di osservazione. L'esposizione totale al rumore in detto punto di osservazione è calcolata cumulando i livelli degli eventi collegati a tutti i movimenti degli aeromobili significativi dal punto di vista del rumore, ovvero tutti i movimenti in partenza o in arrivo che influenzano il livello cumulativo.

#### 2.7.24. Livelli sonori equivalenti ponderati

I livelli sonori equivalenti con ponderazione temporale, che danno conto di tutta l'energia sonora ricevuta dagli aeromobili, sono espressi in modo generico dalla formula

$$L_{eq,W} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{t_0}{T_0} \cdot \sum_{i=1}^N g_i \cdot 10^{L_{E,i}/10} \right] + C \quad (2.7.56)$$

La somma è ottenuta per tutti gli eventi di rumore  $N$  nell'intervallo temporale  $T_0$  ai quali si applica l'indice del rumore;  $L_{E,i}$  è il livello di esposizione al rumore di un evento isolato dell' $i$ -esimo evento sonoro;  $g_i$  è un fattore di ponderazione dipendente dal momento del giorno (di solito è definito per periodi diurni, serali e notturni). In effetti  $g_i$  è un moltiplicatore associato al numero di voli effettuati in periodi specifici. La costante  $C$  può avere significati differenti (costante di normalizzazione, adeguamento stagionale, ecc.).

Utilizzando la relazione

$$g_i = 10^{\Delta_i/10}$$

dove  $\Delta_i$  è la ponderazione in decibel dell' $i$ -esimo periodo, l'equazione 2.7.56 può essere riformulata come

$$L_{eq,W} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{t_0}{T_0} \sum_{i=1}^N 10^{(L_{E,i} + \Delta_i)/10} \right] + C \quad (2.7.57)$$

ovvero, la ponderazione dipendente dal momento del giorno è espressa da un effetto compensativo supplementare.

#### 2.7.25. Numero di operazioni ponderato

Il livello di rumore cumulativo è stimato sommando i contributi di tutti i differenti tipi o categorie di aeromobile che utilizzano le differenti rotte di volo che costituiscono lo scenario aeroportuale in questione.

Per descrivere questa sommatoria sono introdotti i seguenti indici:

- $i$         indice per il tipo o categoria di aeromobile
- $j$         indice per la traccia di volo o le traiettorie secondarie (qualora siano definite)
- $k$         indice per il segmento della traccia di volo

Molti indici del rumore – e soprattutto i livelli di suono equivalenti – comprendono nella loro definizione fattori di ponderazione in funzione del momento del giorno  $g_i$  (equazioni 2.7.56 e 2.7.57).

La sommatoria può essere semplificata introducendo un "numero ponderato di operazioni"

$$M_{ij} = (g_{day} \cdot N_{ij,day} + g_{evening} \cdot N_{ij,evening} + g_{night} \cdot N_{ij,night}) \quad (2.7.58)$$

I valori  $N_{ij}$  rappresentano il numero di operazioni del tipo/categoria di aeromobile  $i$  sulla traccia (o sottotraiettoria)  $j$  durante, rispettivamente, i periodi diurni, serali e notturni<sup>27</sup>.

Sulla base dell'equazione (2.7.57) il livello sonoro equivalente cumulativo (generico)  $L_{eq}$  al punto di osservazione  $(x,y)$  è

$$L_{eq,W}(x,y) = 10 \cdot \lg \left[ \frac{t_0}{T_0} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k M_{ij} \cdot 10^{L_{E,ijk}(x,y)/10} \right] + C \quad (2.7.59)$$

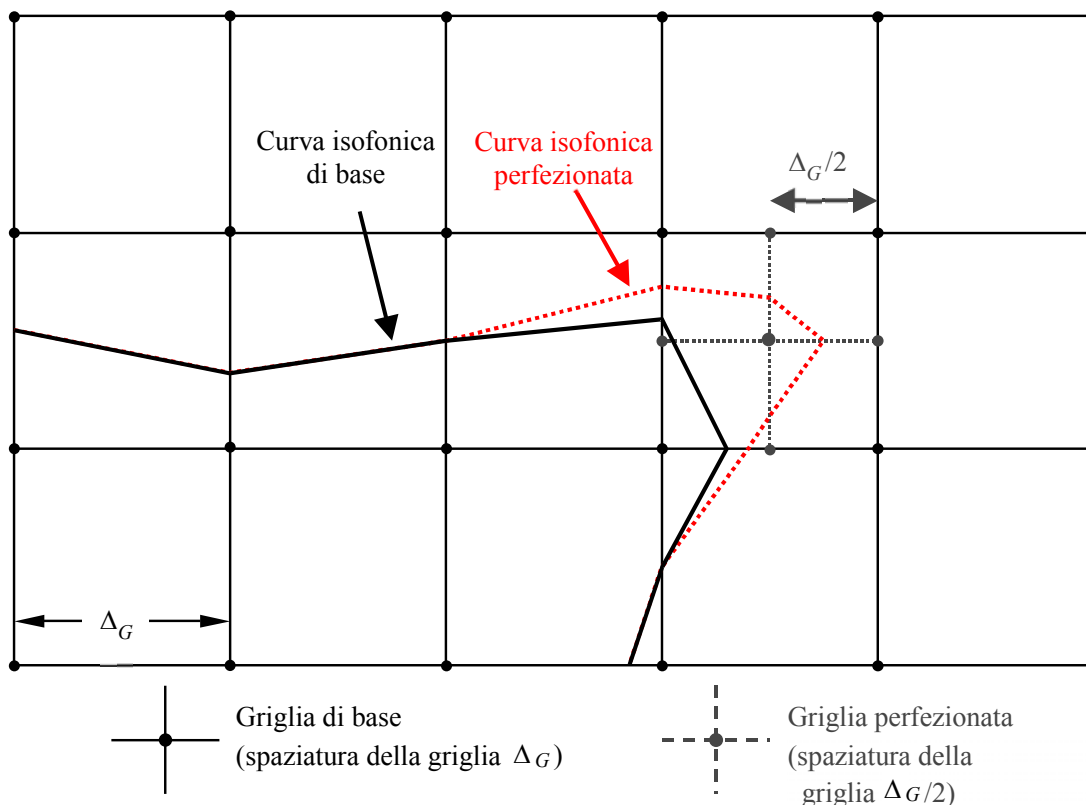
$T_0$  è il periodo temporale di riferimento. Esso dipende – oltre che dai fattori di ponderazione  $g_i$  – dalla definizione specifica dell'indice di ponderazione utilizzato (ad es.,  $L_{DEN}$ ).  $L_{E,ijk}$  è il contributo al livello di rumore di un singolo evento del segmento  $k$  della traccia o sottotraiettoria  $j$  determinato dal movimento di un aeromobile di categoria  $i$ . La stima di  $L_{E,ijk}$  è descritta in dettaglio nelle sezioni da 2.7.14 a 2.7.19.

#### 2.7.26. Calcolo e perfezionamento della griglia standard

Quando le curve isolivello sono ottenute per interpolazione tra i valori dell'indice in punti di una griglia quadrettata, la loro accuratezza dipende dalla spaziatura nella griglia (o dimensione delle maglie)  $\Delta_G$ , soprattutto nelle cellule in cui si registra una forte curvatura delle curve isolivello dovuta agli elevati gradienti nella distribuzione spaziale dell'indice (cfr. **figura 2.7.s**). Gli errori di interpolazione possono essere ridotti restringendo la spaziatura della griglia; poiché, tuttavia, in questo modo aumentano i punti della griglia, aumentano anche i tempi di calcolo. Per ottimizzare una maglia di una griglia regolare è necessario trovare un equilibrio tra accuratezza del modello e tempi di esecuzione dei calcoli.

---

<sup>27</sup> I periodi temporali possono variare rispetto ai tre citati a seconda della definizione di indice del rumore utilizzata.



**Figura 2.7.s: Griglia standard e perfezionamento della griglia**

Un notevole miglioramento dell'efficacia dei calcoli con, di conseguenza, risultati più accurati, si ottiene utilizzando una griglia irregolare al fine di perfezionare l'interpolazione nelle cellule critiche. La tecnica, illustrata nella **figura 2.7.s**, prevede di restringere la maglia a livello locale lasciando inalterata la maggior parte della griglia. Si tratta di una tecnica semplice che può essere realizzata nelle seguenti fasi:

1. definizione di una soglia di perfezionamento differente  $\Delta L_R$  per l'indice del rumore;
2. calcolo della griglia di base per una spaziatura  $\Delta_G$ ;
3. verifica delle differenze  $\Delta L$  dei valori dell'indice tra nodi adiacenti della griglia;
4. in caso di differenze del tipo  $\Delta L > \Delta L_R$ , definizione di una nuova griglia con una spaziatura  $\Delta_G/2$  e stima dei livelli per i nuovi nodi con le modalità seguenti:

Se  $\begin{cases} \Delta L \leq \Delta L_R \\ \Delta L > \Delta L_R \end{cases}$  calcolare il nuovo valore  $\begin{cases} \text{per interpolazione lineare, a partire dai valori adiacenti;} \\ \text{ricorrendo direttamente ai dati di base in entrata.} \end{cases}$

5. ripetizione delle fasi da 1 a 4 finché tutte le differenze siano al di sotto della differenza limite;

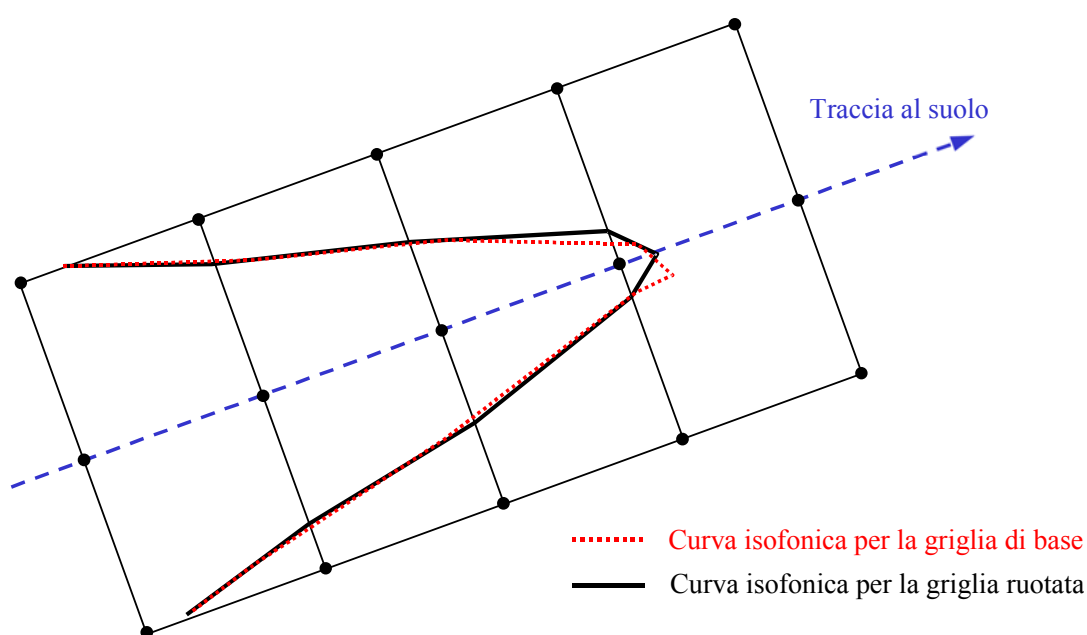


6. stima delle curve isolivello mediante interpolazione lineare.

Se i valori dell'indice di una serie devono essere aggregati con altri (ad esempio, quando si calcolano gli indici ponderati sommando le curve isolivello separate diurne, serali e notturne) è necessario verificare che le griglie separate siano identiche.

2.7.27. Ricorso alla rotazione delle griglie

In molti casi pratici la vera forma di una curva isolivello tende ad essere simmetrica rispetto alla traccia al suolo. Tuttavia, se la direzione di tale traccia non è allineata alle griglia di calcolo, la curva isolivello può risultare asimmetrica.



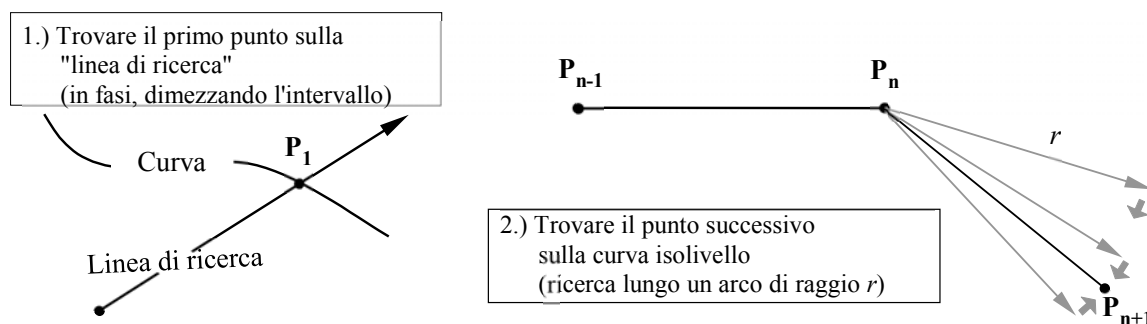
**Figura 2.7.t: Ricorso alla rotazione di una griglia**

Un modo semplice per evitare questo effetto è quello di stringere la griglia, cosa che, tuttavia, causa un aumento dei tempi di calcolo. Una soluzione più elegante consiste nel far ruotare la griglia di calcolo in modo che la sua direzione sia parallela alle tracce al suolo principali (ovvero, di solito, parallela alla pista principale). La **figura 2.7.t** mostra l'effetto di tale rotazione della griglia sulla forma della curva isolivello.

2.7.28. Tracciato delle curve isolivello

Un algoritmo che permette di risparmiare tempo, in quanto elimina la necessità di calcolare una griglia completa di valori di indice "in cambio" di una complessità di calcolo leggermente superiore,

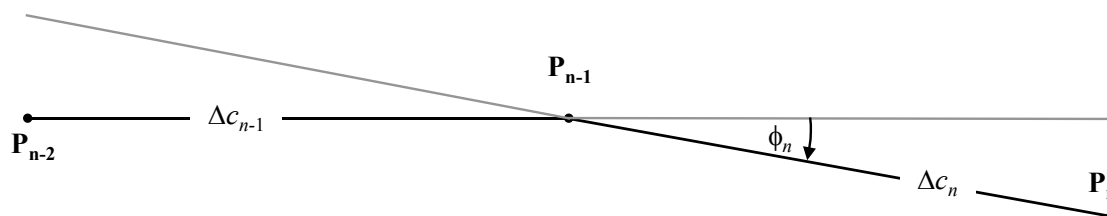
consiste nel tracciare punto per punto il tracciato della curva isolivello. Questa opzione prevede l'effettuazione e la ripetizione di due tappe fondamentali (cfr. **figura 2.7.u**):



**Figura 2.7.u: Il concetto di algoritmo di tracciato**

La prima tappa consiste nell'individuazione di un primo punto  $P_1$  sulla curva isolivello. A tal fine si calcolano i livelli dell'indice del rumore  $L$  in punti equidistanti lungo una 'linea di ricerca' che dovrebbe intersecarsi alla curva isolivello richiesta di livello  $L_C$ . Quando ciò avviene, la differenza  $\delta = L_C - L$  cambia di segno. In questo caso si riduce a metà l'intervallo lungo i punti di tale linea e si inverte la direzione di ricerca. Si procede in questo modo finché  $\delta$  è inferiore rispetto a una soglia di accuratezza predefinita.

La seconda tappa, che viene ripetuta fino a quando la curva isolivello non sia sufficientemente ben definita, consiste nell'identificazione del punto successivo sulla curva isolivello  $L_C$  - che si trova a una distanza rettilinea specifica  $r$  dal punto attuale. Facendo variare in fasi successive l'angolo di rotazione, vengono calcolati i livelli dell'indice del rumore e le differenze  $\delta$  all'estremità di vettori che descrivono un arco di raggio  $r$ . Dimezzando e invertendo gli incrementi con modalità analoghe, questa volta in direzione del vettore, viene determinato il punto successivo della curva isolivello con una precisione predefinita.



**Figura 2.7.v: Parametri geometrici che definiscono le condizioni per l'algoritmo di tracciato**

È necessario imporre determinate limitazioni per garantire che la curva isolivello sia stimata con un livello sufficiente di accuratezza (cfr. **figura 2.7.v**):

1. La lunghezza della corda  $\Delta c$  (la distanza tra due punti della curva isolivello) è compresa in un intervallo  $[\Delta c_{min}, \Delta c_{max}]$ , ad es. [10 m, 200 m].
2. Il rapporto di lunghezza tra due corde adiacenti di lunghezza  $\Delta c_n$  e  $\Delta c_{n+1}$  è limitato, ad es.,  $0,5 < \Delta c_n / \Delta c_{n+1} < 2$ .
3. Per quanto riguarda il buon adeguamento della lunghezza della corda alla curvatura della curva isolivello, devono essere rispettate le seguenti condizioni:

$$\phi_n \cdot \max(\Delta c_{n-1}, \Delta c_n) \leq \varepsilon \quad (\varepsilon \approx 15 \text{ m})$$

dove  $\phi_n$  è la differenza nell'orientamento delle corde.

L'esperienza nell'uso di questo algoritmo ha dimostrato che, in media, devono essere calcolati da 2 a 3 valori dell'indice al fine di determinare un punto della curva isolivello con un'accuratezza migliore di 0,01 dB.

Soprattutto quando si tratta di calcolare curve isolivello ampie, l'algoritmo in questione permette di ridurre in modo notevole i tempi di calcolo. Va tuttavia rilevato che l'applicazione di tale algoritmo richiede una certa esperienza soprattutto quando una curva isolivello si suddivide in isole distinte.

## **2.8. Associazione di livelli di rumore e popolazione negli edifici**

Per valutare l'esposizione al rumore della popolazione viene presa in considerazione esclusivamente l'edilizia abitativa. In altri termini non sono associate persone a edifici che abbiano destinazione diversa da quella residenziale, come scuole, ospedali, uffici o fabbriche. L'associazione delle persone agli edifici con destinazione residenziale deve avvenire sulla base dei dati più recenti disponibili (a seconda della normativa pertinente degli Stati membri).

Poiché il calcolo relativo agli aeromobili è effettuato su una griglia con risoluzione 100m x 100m, che rappresenta il caso specifico del rumore emesso dagli aeromobili, i livelli devono essere ricavati per interpolazione sulla base della griglia dei livelli di rumore più vicina.

### *Determinazione del numero di abitanti di un edificio*

Il numero di abitanti di un edificio destinato all'edilizia abitativa costituisce un importante parametro intermedio per stimare l'esposizione al rumore. Purtroppo, non sempre sono disponibili dati su questo parametro. Di seguito viene indicato come tale parametro possa essere ricavato utilizzando dati più facilmente accessibili.

Vengono utilizzati i seguenti simboli:

$BA$  = superficie di base dell'edificio

$DFS$  = superficie abitativa

$DUFS$  = superficie abitativa unitaria

$H$  = altezza dell'edificio

$FSI$  = superficie abitativa per abitante

$Inh$  = numero di abitanti

$NF$  = numero di piani

$V$  = volume degli edifici residenziali

Per calcolare il numero di abitanti, a seconda della disponibilità di dati si utilizza la procedura relativa ai casi 1 o 2 riportati di seguito.

*CASO 1: sono disponibili dati sul numero di abitanti*

1 A: Il numero di abitanti è noto o è stato stimato sulla base delle unità abitative. In questo caso il numero di abitanti di un edificio corrisponde alla somma del numero di abitanti di tutte le unità abitative dello stesso:

$$Inh_{building} = \sum_{i=1}^n Inh_{dwelling_{unit_i}} \quad (2.8.1)$$

1 B: Il numero di abitanti è noto soltanto per entità più grandi di un edificio, ad esempio i lati degli isolati urbani, gli isolati urbani, i quartieri o anche l'intero comune. In questo caso il numero di abitanti di un edificio è stimato sulla base del volume dello stesso:

$$Inh_{building} = \frac{V_{building}}{V_{total}} \times Inh_{total} \quad (2.8.2)$$

L'indice '' si riferisce qui all'entità presa in considerazione in ciascun caso. Il volume di un edificio è dato dal prodotto della sua superficie di base per la sua altezza:

$$V_{building} = BA_{building} \times H_{building} \quad (2.8.3)$$

Qualora non sia nota l'altezza di un edificio, la si può stimare sulla base del numero di piani  $NF_{building}$ , ipotizzando un'altezza media per piano pari a 3 metri:

$$H_{building} = NF_{building} \times 3 \text{ m} \quad (2.8.4)$$

Qualora nemmeno il numero di piani sia noto, si utilizza un valore basato sul numero di piani rappresentativo della località o del quartiere.

Il volume totale  $V_{total}$  degli edifici destinati all'edilizia abitativa nell'entità presa in considerazione è calcolato come somma dei volumi di tutti gli edifici destinati all'edilizia abitativa in tale entità.

$$V_{total} = \sum_{i=1}^n V_{building_i} \quad (2.8.5)$$

*CASO 2: non sono disponibili dati sul numero di abitanti*

In questo caso il numero di abitanti è stimato sulla base della superficie media abitativa per abitante  $FSI$ . Se tale parametro non è noto, si utilizza un valore standard nazionale.

2 A: La superficie abitativa è nota sulla base del numero di unità abitative. In questo caso il numero di abitanti di ciascuna unità abitativa è stimato come segue:

$$Inh_{dwelling_{unit_i}} = \frac{DUFS_i}{FSI} \quad (2.8.6)$$

Ora il numero di abitanti dell'edificio può essere stimato come nel precedente CASO A1.

2 B: La superficie abitativa è nota per l'intero edificio, ovvero si conosce la somma delle superfici abitative di tutte le unità abitative dell'edificio. In questo caso il numero di abitanti è stimato come segue:

$$Inh_{building} = \frac{DFS_{building}}{FSI} \quad (2.8.7)$$

2 C: La superficie abitativa è nota soltanto per entità più grandi di un edificio, ad esempio i lati degli isolati urbani, gli isolati urbani, i quartieri o anche l'intero comune.

In questo caso il numero di abitanti di un edificio è stimato sulla base del volume dello stesso, come descritto nel precedente CASO 1B, stimando come segue il numero di abitanti:

$$Inh_{total} = \frac{DFS_{total}}{FSI} \quad (2.8.8)$$

2 D: La superficie abitativa è ignota. In questo caso il numero di abitanti di un edificio è stimato come descritto nel precedente CASO 2 B, stimando come segue la superficie abitativa:

$$DFS_{building} = BA_{building} \times 0,8 \times NF_{building} \quad (2.8.9)$$

Il fattore 0,8 è il fattore di conversione *superficie lorda* → *superficie abitativa (calpestabile)*. È consentito l'uso di un fattore diverso, purché sia riconosciuto come rappresentativo della zona in esame e chiaramente documentato.

Se il numero di piani dell'edificio non è noto, esso può essere stimato sulla base dell'altezza dell'edificio,  $H_{building}$ , ottenendo in genere come risultato un numero di piani non intero:

$$NF_{building} = \frac{H_{building}}{3m} \quad (2.8.10)$$

Qualora non si conosca né l'altezza dell'edificio né il numero di piani, si utilizza un valore basato sul numero di piani rappresentativo della località o del quartiere.

#### *Designare punti ricettori sulle facciate degli edifici*

La valutazione dell'esposizione al rumore della popolazione si basa sui livelli registrati in punti ricettori posti a un'altezza di 4 metri dal terreno antistante le facciate di edifici destinati all'edilizia abitativa.

Per calcolare il numero di abitanti, in caso di sorgenti di rumore terrestri, si utilizza la procedura relativa ai casi 1 o 2 riportati di seguito. Nel caso del rumore generato da aeromobili, calcolato conformemente al punto 2.6, tutti gli abitanti di un edificio sono associati al punto più vicino sulla griglia per il calcolo del rumore.

#### *CASO 1*

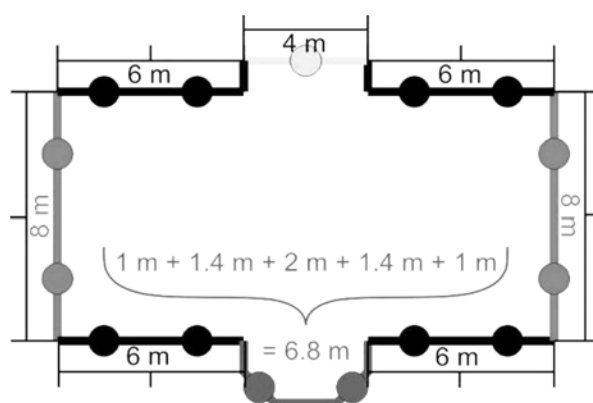


Figura a: esempio di ricettori ubicati attorno a un edificio sulla base della procedura del CASO 1.

- a) I segmenti di lunghezza superiore a 5 m sono suddivisi con intervalli regolari della massima lunghezza possibile (ma comunque non superiore a 5 m). I punti ricettori sono posti nel mezzo di ciascun intervallo regolare.

- b) I segmenti rimanenti di lunghezza superiore a 2,5 m sono rappresentati da un punto ricettore nel mezzo di ciascun segmento.
- c) I segmenti rimanenti adiacenti di lunghezza totale superiore a 5 m sono trattati come oggetti polilinea con modalità simili a quelle descritte alle lettere a) e b).
- d) Il numero di abitanti assegnato a un punto ricettore è ponderato in funzione alla lunghezza della facciata rappresentata in modo che la somma di tutti i punti ricettori corrisponda al numero totale di abitanti.
- e) Soltanto nel caso di edifici con piani di superficie tale da indicare la presenza di una sola unità abitativa per piano, per le statistiche viene direttamente utilizzato, e correlato al numero di abitanti, il livello di rumore della facciata più esposta.

*CASO 2*

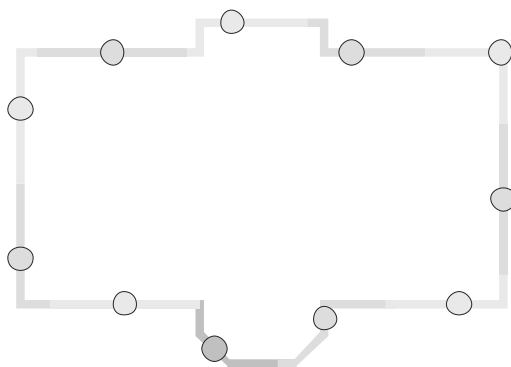


Figura b: esempio di ricettori ubicati attorno a un edificio sulla base della procedura del CASO 2.

- a) Le facciate sono considerate separatamente o suddivise in segmenti di 5 m a partire dal punto iniziale e il punto ricettore è posto a metà della facciata o del segmento di 5 m.
- b) La sezione rimanente presenta un punto ricettore nel centro della stessa.
- c) Il numero di abitanti assegnato a un punto ricettore è ponderato in funzione alla lunghezza della facciata rappresentata in modo che la somma di tutti i punti ricettori corrisponda al numero totale di abitanti.
- d) Soltanto nel caso di edifici con piani di superficie tale da indicare la presenza di una sola unità abitativa per piano, per le statistiche viene direttamente utilizzato, e correlato al numero di abitanti, il livello di rumore della facciata più esposta.

### **3. DATI DI IMMISSIONE**

Le appendici da F a I indicano i dati di immissione da utilizzare in combinazione con i metodi sopradescritti.

Qualora i dati di immissione riportati nelle appendici da F a I non siano applicabili o provochino scostamenti dal valore reale tali da non consentire il rispetto delle condizioni di cui ai punti 2.1.2 e 2.6.2, è possibile utilizzare altri valori, purché tali valori, e la metodologia usata per ricavarli, siano sufficientemente documentati e ne sia dimostrata l'adeguatezza. Tali informazioni devono essere rese pubbliche.

### **4. METODI DI MISURAZIONE**

Nei casi in cui, per qualsiasi motivo, siano effettuate misurazioni, queste ultime devono essere conformi ai principi che disciplinano le misurazioni medie di lungo termine di cui alle norme ISO 1996-1:2003 e ISO 1996-2:2007 o, per il rumore prodotto dagli aeromobili, ISO 20906:2009.