

1. Il modello matematico SCHALL 03 (Ed. 1990)

Il modello di calcolo dell'emissione sonora da parte della ferrovia si basa sulle regole di calcolo contenute nell'opuscolo "SCHALL 03" (SCHALL significa SUONO in tedesco), seconda edizione corretta del luglio 1990, edito dalle Ferrovie Statali Tedesche - Ufficio Centrale delle Ferrovie Statali - Monaco di Baviera.

Il metodo si basa su questi punti principali:

- Definizione del "valore di base", pari a 51 dB(A), che rappresenta il Livello Equivalente prodotto a 25 m di distanza ed a 3.5m di altezza dall'asse del binario dal passaggio di un convoglio/ora, lungo 100m, alla velocità di 100 km/h, dotato di freni a disco, ipotizzando il terreno piano e privo di ostacoli, su binario continuo saldato rettilineo con traversine in legno.
- Calcolo di un Livello Medio di Emissione $L_{m,E}$, che rappresenta il livello equivalente, sempre a 25 m dall'asse binario ed a 3.5m di quota, a partire dal "valore di base" corretto per tener conto del numero, lunghezza e velocità dei convogli transitanti in un'ora, dell'effettivo tipo di armamento, della presenza di passaggi sopraelevati, passaggi a livello, ponti, curve, scambi, della percentuale di vagoni con freni a disco, del tipo di materiale rotabile.
- Suddivisione del tracciato ferroviario in tratti di limitata lunghezza, a partire dal centro di ciascuno dei quali viene effettuato il calcolo dell'energia sonora emessa.
- Calcolo dell'attenuazione del suono prodotto da ciascun tratto nel corso della propagazione dal centro dello stesso al punto in cui si vuole valutare il livello sonoro ("punto di immissione"), tenendo conto dell'effetto della distanza, dell'interazione con il terreno, della diffrazione causata da eventuali schermature o altri ostacoli, dell'attenuazione fornita da barriere vegetali (boschi).
- Somma energetica dei livelli parziali provenienti da ciascun tratto, e conseguente ottenimento del valore complessivo L_r nel punto di immissione.

Gli ultimi due "steps" vengono poi ripetuti per tutti i punti di immissione desiderati, in modo da disporre di dati sufficienti, ad esempio, al tracciamento di mappature isolivello in pianta o in sezioni verticali.

Nei seguenti sottoparagrafi vengono sviluppati in maggior dettaglio gli elementi fondamentali della procedura di calcolo su esposta.

1.1 Calcolo di $L_{m,E}$

A partire dal "valore di base" di 51 dB(A), si opera il calcolo di $L_{m,E}$ secondo la seguente relazione:

$$L_{m,E} = 10 \cdot \lg \left[\sum_i 10^{0.1 \cdot (51 + D_{Fz} + D_D + D_l + D_v)} \right] + D_{Fb} + D_{Br} + D_{Bu} + D_{Ra}$$

in cui compaiono i seguenti termini correttivi:

D_{Fz} : Influenza dei tipi di veicoli. In generale sulla linea circolano treni costituiti da veicoli di tipo diverso, e da qui discende la necessità di effettuare la sommatoria energetica (con indice i). Secondo SCHALL 03 i veicoli possono essere classificati in 6 categorie, come riportato dalla seguente tabella:

Tipo n.	Tipo di veicolo	D _{Fz} (dBA)
1	Veicoli speciali con ammortizzatori antirumore, serie 401	- 4
2	Veicoli con freno a disco su ruota, serie 403, 420, 472	- 2
3	Veicoli con freno a disco su ruota, serie Bx - loc. inclusa.	- 1
4	Metropolitane	+ 2
5	Tram	+ 3
6	Altri tipi di veicoli (carri merci, autom. elett. e diesel, etc.)	0

D_D: Influenza del tipo di freni; La percentuale p di carrozze con freni a disco produce un termine correttivo pari a:

$$D_D = 10 \cdot \lg(5 - 0.04 \cdot p)$$

Va osservato che questo termine è nullo quando p=100.

D_l: Influenza della lunghezza del treno; il fatto che ciascun tipo di treno abbia una lunghezza l diversa da 100m produce una variazione del livello di emissione direttamente proporzionale alla lunghezza, secondo la relazione:

$$D_l = 10 \cdot \lg(0.01 \cdot l)$$

D_v: Influenza della velocità; il fatto che ciascun tipo di treno abbia una velocità v ammessa nel tratto considerato diversa da 100 km/h produce una variazione del livello di emissione proporzionale al quadrato della velocità stessa, secondo la relazione:

$$D_v = 20 \cdot \lg(0.01 \cdot v)$$

D_{Fb}: Influenza del tipo di armamento; a seconda del tipo di armamento impiegato nel tratto considerato, si applicano i seguenti fattori correttivi:

Armamento n.	Tipo di armamento	D _{Fb} (dBA)
1	Binario con copertura erbosa - ferrovia urbana	- 2
2	Ballast + traversine in cemento, binari rettificati periodicamente	da - 2 a + 2, sulla base di specifici dati rilevati
3	Ballast + traversine in legno	0
4	Ballast + traversine in cemento	+ 2
5	Ferrovie fisse, armamento a piastre, a blocchetti annegati nel CLS, o comunque con piano riflettente	+ 5

D_{Br}: Influenza dei ponti; sebbene per la maggior parte dei ponti non sarebbe necessario aggiungere D_{Br} = 3 dBA, si deve comunque introdurre tale termine come margine di sicurezza, poichè in corrispondenza dei ponti possono emergere rumori a bassa frequenza, che non verrebbero presi in

adeguata considerazione tramite i livelli acustici ponderati A. Si deve comunque notare che, con la attuale legislazione italiana, quanto sopra non è considerato, e pertanto l'applicazione del termine D_{Br} è quantomeno discutibile.

D_{Bu} : Influenza dei passaggi a livello; per un tratto pari a due volte la larghezza della strada, si aggiunge il termine correttivo $D_{Bu} = 5 \text{ dB(A)}$.

D_{Ra} : Influenza dello stridio in curva; nella percorrenza di curve con ridotto raggio di curvatura possono verificarsi fenomeni di stridio, che aumentano significativamente la rumorosità. La seguente tabella fornisce i valori del termine correttivo D_{Ra} , da applicare a tutto lo sviluppo della curva, in funzione del raggio di curvatura:

Raggio di curvatura	D_{Ra} (dBA)
< 300 m	+ 8
da 300 m fino a 500 m	+ 3
> 500 m	0

1.2 Suddivisione del tracciato in tratti

L'intero tracciato ferroviario deve essere suddiviso in un adeguato numero di tratti, in modo che la lunghezza del singolo tratto k-esimo, denominata l_k , stia in una ragionevole proporzione con la distanza s_k dal punto di immissione del centro del tratto considerato. In particolare, deve sempre essere verificato che:

$$0.01 \cdot s_k \leq l_k \leq 0.5 \cdot s_k$$

Inoltre occorre verificare che, all'interno di ciascun tratto, vi sia omogeneità delle caratteristiche di emissione riportate nel precedente paragrafo; in caso contrario, occorre suddividere ulteriormente il tratto in esame in due o più sottotratti di caratteristiche omogenee, ed eseguire separatamente il calcolo per ciascuno di essi.

Per ogni singolo tratto si dovrà calcolare il livello medio di emissione del tratto considerato, denominato $L_{m,E,k}$ e da esso il contributo k-esimo al livello complessivo al ricevitore, che verrà indicato con $L_{r,k}$.

1.3 Calcolo dell'attenuazione per propagazione.

A partire dal livello medio di emissione del singolo tratto, il contributo che esso produce al ricevitore (punto di immissione) verrà calcolato con la relazione:

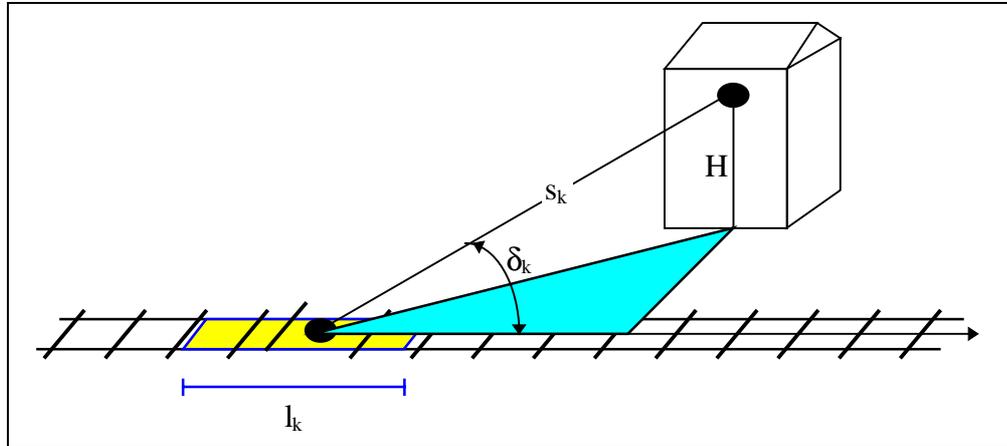
$$L_{r,k} = L_{m,E,k} + 19.2 + 10 \cdot \lg(l_k) + D_{r,k} + D_{s,k} + D_{L,k} + D_{BM,k} + D_{Korr,k} + S$$

In cui è:

$L_{m,E,k}$: Livello medio di emissione del tratto k-esimo, calcolato come in 1.1

l_k : Lunghezza in metri del tratto k-esimo.

$D_{r,k}$: Differenza di livello dovuta alla direttività di emissione; essa si calcola in funzione dell'angolo δ_k fra l'asse del binario (o la sua tangente nel centro del tratto k-esimo, in caso di curva) e la congiungente sorgente-ricevitore. La seguente figura illustra graficamente la costruzione geometrica necessaria a definire l'angolo δ_k .



La differenza di livello dovuta alla direttività si calcola poi con la relazione:

$$D_{r,k} = 10 \cdot \lg \left[0.22 + 1.27 \cdot \sin^2(\delta_k) \right]$$

$D_{s,k}$: Differenza di livello dovuta alla distanza sorgente-ricevitore, s_k ; si calcola con l'usuale relazione di divergenza sferica (sorgente puntiforme), nell'ipotesi di emissione su 2π steradiani, cioè:

$$D_{s,k} = -10 \cdot \lg(2 \cdot \pi \cdot s_k^2)$$

$D_{L,k}$: Differenza di livello dovuta all'assorbimento dell'aria, linearmente proporzionale alla distanza sorgente-ricevitore s_k , secondo la relazione:

$$D_{L,k} = -\frac{s_k}{200}$$

$D_{BM,k}$: Differenza di livello dovuta allo smorzamento del suolo; essa dipende sia dalla distanza sorgente-ricevitore, sia dall'altezza media rispetto al suolo di tale congiungente (h_m), secondo la relazione:

$$D_{BM,k} = \frac{h_m}{s_k} \cdot \left(34 + \frac{600}{s_k} \right) - 4.8 \leq 0$$

in essa il segno di ≤ 0 indica che se il risultato è maggiore di zero, esso va comunque posto uguale a zero.

$D_{Korr,k}$: Somma delle differenze di livello causate da varie influenze sul percorso di propagazione (barriere, ostacoli, vegetazione, etc.), calcolata sulla base delle specificazioni del successivo paragrafo.

- S: Termine correttivo “legale”, avente valore di -5 dB(A); esso tiene conto del minor effetto di disturbo causato dal rumore ferroviario rispetto ad altre fonti di rumorosità ambientale, come consentito dalle normative tedesche 16.BImSchV. La applicazione del termine correttivo S in Italia è attualmente impossibile, perlomeno finchè la materia resta regolata soltanto dal D.P.C.M. 1 marzo 1991. Tuttavia una proposta di Legge Quadro sul Rumore recentemente circolata ripropone tale termine correttivo, assegnandogli addirittura il valore di -6 dB(A).

1.4 Calcolo delle variazioni di livello prodotte da “Influenze sul percorso di propagazione” $D_{Korr,k}$

La somma algebrica delle singole variazioni di livello sonoro produce il valore complessivo di $D_{Korr,k}$:

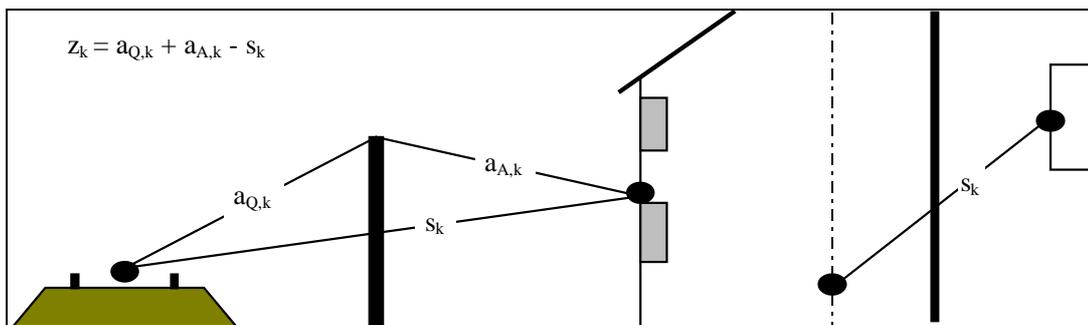
$$D_{Korr,k} = D_{e,k} + D_{B,k} + D_{G,k} + D_{R,1,k} + D_{R,2,k}$$

In cui è:

- $D_{e,k}$: Variazione di livello prodotta da schermature; essa si calcola con una relazione che tiene conto della differenza di cammino diretto-diffratto, z_k , di un fattore correttivo $K_{w,k}$ che tiene conto della divergenza geometrica e del termine correttivo per smorzamento del suolo $D_{BM,k}$ già illustrato al precedente paragrafo. La relazione è la seguente:

$$D_{e,k} = -\left[10 \cdot \lg(3 + 60 \cdot z_k \cdot K_{w,k}) + D_{BM,k}\right] \leq 0$$

in cui il valore di z_k va determinato con la seguente costruzione geometrica:

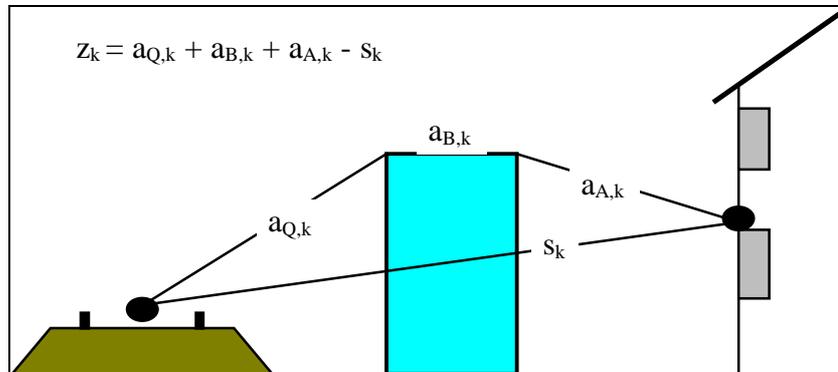


Il fattore correttivo $K_{w,k}$ si calcola invece come:

$$K_{w,k} = e^{-\frac{1}{2000} \sqrt{\frac{a_{Q,k} \cdot a_{A,k} \cdot s_k}{2 \cdot z_k}}}$$

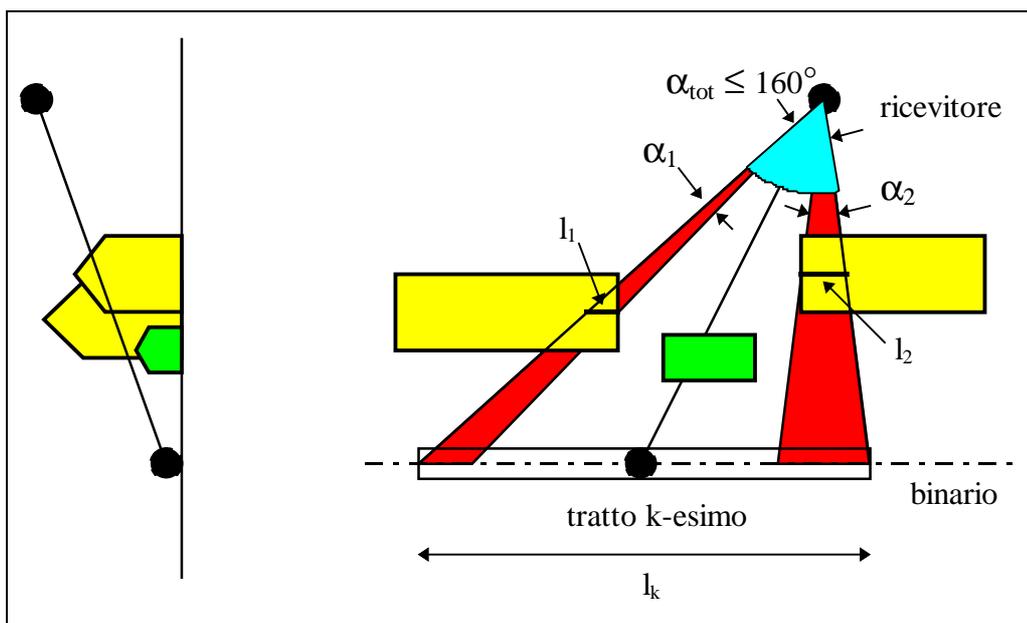
Si ha una certa attenuazione per schermatura anche nel caso in cui la linea di congiunzione diretta fra punto di emissione e punto di immissione non intersechi l’ostacolo, ma passi appena al di sopra dello stesso. In tali casi si calcola ugualmente il valore di z_k , ma con segno negativo. Se tale valore è maggiore di -0.033 si ha comunque una piccola riduzione di livello sonoro causata dalla schermatura.

Nel caso di ostacoli non sottili, il cammino diffratto viene calcolato come la lunghezza del percorso minimo in grado di superarlo, come mostrato dalla seguente figura:



$D_{B,k}$: Attenuazione prodotta da edifici isolati; nel caso che lungo la ferrovia sia presente una fila di edifici isolati, l'effetto schermante da essi prodotto viene calcolato mediante il termine $D_{B,k}$ anzichè $D_{e,k}$. Se poi è presente anche una schermatura, si deve impiegare solo uno dei due termini suddetti, in particolare quello che fornisce la maggiore attenuazione.

Il calcolo di $D_{B,k}$ richiede anzitutto la definizione di una "schermatura equivalente", costituita da una ipotetica schermatura non interrotta, di altezza pari all'altezza media degli edifici, e collocata ad una distanza dalla ferrovia tale da essere circa nel mezzo degli edifici isolati. Per tale schermatura equivalente si opera il calcolo di $D_{e,k}$, come illustrato al punto precedente. Si debbono poi determinare i rapporti di visibilità lineare ed angolare, denominati rispettivamente $p_{l,k}$ e $p_{\alpha,k}$, in base a questa costruzione geometrica:



In cui, per valutare tali rapporti, si applicano queste relazioni:

$$p_{l,k} = \frac{l_1 + l_2}{l_k} \quad p_{\alpha,k} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_{\text{tot}}}$$

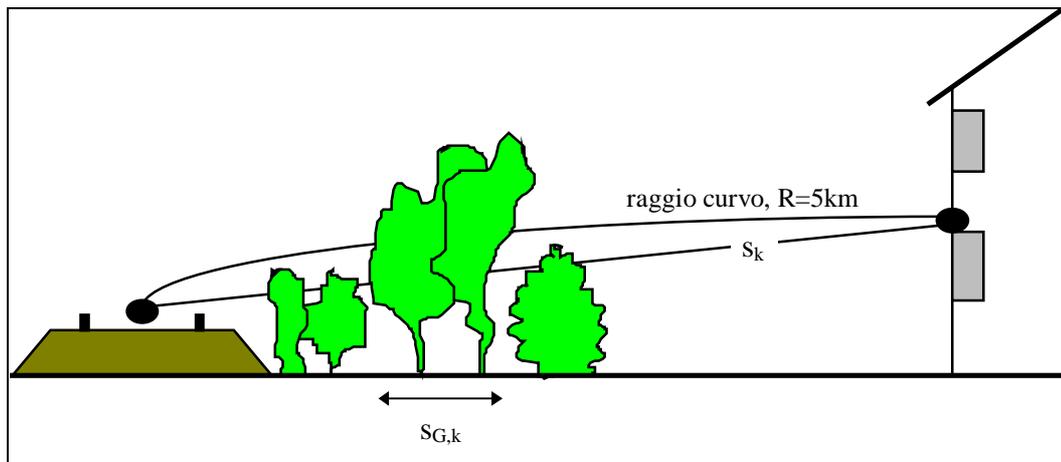
Occorre poi adottare il valore minimo di tali due rapporti, che viene indicato con p_{\min} ; si calcola infine il termine relativo alla schermatura degli edifici isolati con la relazione:

$$D_{B,k} = 10 \cdot \lg \left[1 - p_{\min} + 10^{0,1 \cdot D_{e,k}} \right] \leq 0$$

$D_{G,k}$: Attenuazione causata da propagazione attraverso fitta boscaglia; nel caso una parte non trascurabile del tragitto sonoro avvenga in attraversamento di fitta boscaglia permanente (non a foglie caduche), si ammette una riduzione di livello sonoro proporzionale alla lunghezza $s_{G,k}$ di tale parte di tragitto, secondo la relazione:

$$D_{G,k} = -0,05 \cdot s_{G,k} \geq -5$$

Va osservato che tale attenuazione non può essere superiore a 5 dB, e che la determinazione dell'effettiva lunghezza di attraversamento $s_{G,k}$ va fatta tenendo in considerazione la curvatura sul piano verticale dei raggi sonori, con raggio di curvatura pari a 5 km, come mostrato dalla seguente figura:



$D_{R,1,k}$: Riflessione su parete non assorbente; quando la ferrovia costeggia una parete verticale riflettente, o una fila serrata di edifici, sul lato prospiciente si verifica un incremento medio di livello sonoro, quantificato mediante il termine $D_{R,1,k}$, pari a 2 dB(A). Ciò consente di fare a meno della costruzione della sorgente immagine del 1° ordine. Tuttavia, nel caso in cui si abbia su un lato della ferrovia una parete riflettente, e sul lato opposto una schermatura fonoassorbente, è necessario per valutare correttamente il livello sonoro nei punti schermati da tale barriera impiegare la tecnica della sorgente immagine, secondo quanto specificato nelle norme tecniche VDI 2714.

$D_{R,2,k}$: Riverberazione fra pareti contrapposte; nel caso la ferrovia si snodi fra muri di sostegno paralleli e riflettenti, oppure fra 2 file di case completamente serrate, i livelli sonori risultano ulteriormente aumentati (rispetto all'aumento causato da un singolo muro riflettente) di un termine $D_{R,2,k}$, il cui valore massimo è pari a 3.2 dB(A). Tale aumento, dovuto a fenomeni di riflessioni multiple fra gli edifici, dipende dalla distanza media fra le pareti contrapposte w e dall'altezza media delle stesse h , secondo la relazione:

$$D_{R,2,k} = 4 \cdot \frac{h}{w} \leq 3.2$$

1.5 Calcolo del livello sonoro complessivo

Una volta operato il calcolo dei singoli contributi provenienti dai tratti in cui sono stati suddivisi i binari, si effettua una somma energetica di tutti i contributi ricevuti, che consente di ottenere il livello complessivo nel punto ricevitore considerato (punto di immissione), L_r :

$$L_r = 10 \cdot \lg \left[\sum_k 10^{0.1 \cdot L_{r,k}} \right]$$

Il metodo SCHALL 03 si presta particolarmente bene all'implementazione numerica su personal computer, poichè i calcoli da eseguire sono tutti descritti da formulazioni analitiche complicate ma definite, in cui compaiono termini legati ad una descrizione geometrica semplificata del territorio.

Presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Parma è stato realizzato un apposito software in grado di operare i calcoli richiesti da SCHALL 03: esso è stato scritto in Visual Basic, e presenta pertanto una interfaccia utente amichevole che rende molto improbabili eventuali errori nell'introduzione dei dati richiesti. Il programma consente l'introduzione dei dati geometrici mediante l'importazione di files DXF provenienti da AutoCAD (TM), e fornisce in uscita i risultati in un formato ASCII perfettamente compatibile con il software di mappatura SURFER (Golden Software, TM). In tal modo è possibile ottenere sia i valori numerici esatti nei punti di maggior interesse, sia rappresentazioni grafiche mediante mappature a colori e/o con curve isolivello, tracciate sia in pianta che su sezioni verticali ortogonali all'asse del binario.

Sebbene il software non provveda automaticamente al dimensionamento delle schermature antirumore, esso consente di valutare rapidamente l'effetto di diverse ipotesi progettuali, e di scegliere dunque la configurazione ottimale dei manufatti antirumore onde conseguire la richiesta riduzione di livello sonoro con il minimo impiego di materiale.

2. Il modello RLS-81 per il rumore stradale

Per la previsione del rumore prodotto dal traffico stradale é stato utilizzato il modello denominato R.L.S.-81, realizzato appunto nel 1981 dal Ministero dei Trasporti della Repubblica Federale Tedesca [3,4]. Esso fornisce queste relazioni per il calcolo del livello sonoro prodotto da una autostrada, supposta "lunga e diritta", alla distanza di 25 m:

$$L_{m,E} = L_{Lkw} + 10 \cdot \lg[M \cdot (1 + R \cdot p)] + DL_{Str0} + DL_K + DL_{Stg}$$

ove:

$$L_{Lkw} = 27.2 + 10 \cdot \lg[1 + (0.02 \cdot V_{Lkw})]$$

$$R = \frac{10^{0.1(L_{Pkw} - L_{Lkw})} - 1}{100}$$

$$L_{Pkw} = 22.6 + 12.5 \cdot \lg[V_{Pkw}]$$

nelle quali compaiono i termini correttori:

- DL_{Str0}: per il tipo di pavimentazione stradale;
- DL_K : per l' effetto di disturbo dei semafori;
- DL_{Stg} : per la pendenza della strada.

Nelle relazioni compaiono inoltre le seguenti grandezze:

- M : portata oraria complessiva
- p : percentuale di veicoli pesanti
- V_{Lkw} : velocità dei veicoli leggeri (in km/h)
- V_{Pkw} : velocità dei veicoli pesanti (in km/h)

Il livello $L_{m,E}$ così calcolato rappresenta il livello sonoro ad una distanza di 25 m dalla strada. E' poi possibile calcolare il Livello Equivalente L_{eq} a qualsiasi distanza d , tramite la relazione:

$$L_{eq} = L_{m,E} + 13.8 - 3.5 \cdot \lg(d^2) - 0.5 \cdot [\lg(d^2)]^2$$

Nel caso di strade che non possono essere considerate "lunghe e diritte", si procede suddividendo le stesse in tratti più corti, e sommando energeticamente i livelli sonori prodotti da tutti i tratti in ciascun punto di ascolto. La regola per la suddivisione in tratti di una strada è che la lunghezza l_i di ciascun tratto deve sempre essere compresa fra la distanza d_i fra il centro di tale tratto ed il ricevitore considerato, e la metà di tale valore:

$$d_i \geq l_i > \frac{d_i}{2}$$

In questo caso, ovviamente, il punto centrale di ciascun tratto viene considerato come una singola sorgente sonora concentrata, e pertanto la legge di attenuazione con la distanza da adottare diviene la seguente:

$$L_{eq,i} = L_{m,E,i} + 10 \cdot \lg(l_i) + 8.8 - 8.2 \cdot \lg(d_i^2) - 0.5 \cdot [\lg(d_i^2)]^2$$

In cui l_i è la lunghezza in metri del tratti i -esimo, e d_i è la distanza del punto centrale di tale tratto dal ricevitore considerato. Ovviamente occorre poi sommare energeticamente tutti i contributi prodotti dai singoli tratti stradali, onde ottenere il livello sonoro complessivo al ricevitore:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg\left[\sum_i 10^{0.1 L_{eq,i}}\right]$$

Per operare automaticamente tale processo é stato realizzato un opportuno codice di calcolo su PC, in linguaggio Visual Basic, che genera in uscita una griglia regolare di valori di Livello Sonoro. Tali dati vengono poi rielaborati con il programma Surfer, onde ottenere rappresentazioni grafiche mediante curve isolivello, come illustrato nel paragrafo successivo.

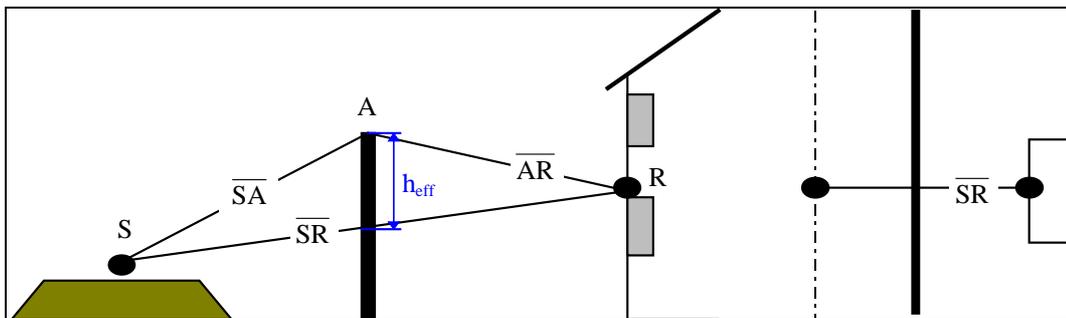
I livelli così calcolati possono poi venire corretti per tenere conto della presenza di ulteriori fenomeni legati alla propagazione, mediante l'aggiunta di termini correttivi causati dall'effetto di schermatura da parte di ostacoli, dalla presenza di spessi strati di vegetazione e dall'effetto di riflessioni multiple fra gli edifici. Per valutare l'attenuazione ottenibile dalle schermature il metodo di calcolo RLS-81 fornisce la seguente espressione, valida per strade "lunghe e diritte con sezione a norme DIN":

$$DL_{ls} = 8 \cdot \lg[1 + 80 \cdot z] - 0.1 \cdot \sqrt{K}$$

in cui δ e K assumono i seguenti valori:

$$z = \overline{SA} + \overline{AR} - \overline{SR} \qquad K = h_{eff} \cdot (\overline{SA} + \overline{AR})$$

In base alle convenzioni grafiche riportate nella seguente figura:



Questa é la riduzione di livello dovuta alla schermatura di una corsia con una barriera avente ad entrambi i lati della sezione la "lunghezza aggiuntiva standard", per valutare la quale RLS-81 fornisce opportuni criteri di ottimizzazione.

Va osservato che il metodo RLS-81 localizza la sorgente sonora ad una altezza di 0.5 m sopra la pavimentazione stradale.

Nel caso invece del calcolo con strade suddivise in tratti, l'attenuazione della schermatura deve essere calcolata per ogni singolo tratto i-esimo, con la relazione:

$$DL_{ls,i} = 10 \cdot \lg \left[1 + 80 \cdot z_i \cdot e^{-\frac{K_i \cdot z_i}{11400}} \right]$$

Essa va ovviamente applicata al singolo livello parziale $L_{eq,i}$ prima della sommatoria energetica che fornisce il livello complessivo al ricevitore.

Per quanto riguarda poi l'attenuazione prodotta dall'attraversamento di uno spesso strato vegetale, in modo che la lunghezza del raggio sonoro intersecante la vegetazione sia s_{geh} , essa si calcola come:

$$DL_{geh} = -0.06 \cdot s_{geh} \qquad \geq -10$$

Infine nel caso di riflessioni multiple fra facciate contrapposte, situate a distanza w ed aventi altezza h , si ha un incremento di rumorosità dato da:

$$DL_{rijl} = 5 \cdot \left(\frac{h}{w} - 0.1 \right) \leq 5$$