

# Considerazioni e riscontri sperimentali sulla fenomenologia fluidodinamica e acustica degli imbocchi-sbocchi dei tunnel sulle linee ferroviarie ad alta velocità

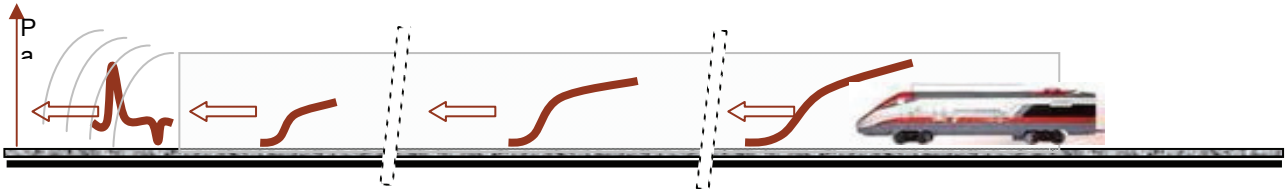
Curcuruto S., Atzori D., Marsico G., Betti R., Sacchetti F., Mazzocchi E., De Rinaldis L.  
ISPRA, Via Vitaliano Brancati 48, 00144 Roma, giuseppe.marsico@isprambiente.it

Amadasi G.  
SCS-EUROACOUSTIC, Via Gandhi 13, 10051 Avigliana (TO), g.m.amadasi@scs-controlsys.com

## 1. INTRODUZIONE

Quando un treno AV (Alta Velocità) entra o esce da una galleria genera fenomeni descrivibili con modelli di fluidodinamica che portano alla creazione di fenomeni acustici non riconducibili alla metrica tradizionale su base energetica, quali i livelli di pressione sonora ponderati "A". Si formano ad esempio onde di compressione all'interno del tunnel che si propagano verso l'uscita opposta, normalmente definite come "micro-onde di pressione", la cui ampiezza dipende dalla velocità del convoglio e dal rapporto tra la sezione frontale del treno e quella del tunnel. La figura seguente illustra il fenomeno che si crea per un tunnel con bocca di ingresso perpendicolare alla linea di corsa del treno; una frazione delle onde di compressione che arriva all'uscita del tunnel viene emessa verso l'esterno e un'altra parte viene riflessa indietro nel tunnel sotto forma di onde di espansione.

Figura 1 – Generazione delle micro-onde di pressione



Esistono in bibliografia vari lavori di ricerca relativi ai fenomeni aerodinamici e acustici legati alla percorrenza all'interno di tunnel ferroviari dei treni ad alta velocità, che hanno cercato di identificare e oggettivare sperimentalmente i fenomeni acustici, ispirandosi ad alcuni dei risultati già pubblicati, il presente studio ha condotto un'indagine sulla situazione italiana per i tunnel sulle linee ferroviarie ad alta velocità, in presenza di mitigazioni e particolari soluzioni costruttive degli imbocchi-sbocchi.

## 2. FASTIDIO O DISTURBO ACUSTICO

Il fastidio uditivo dovuto al transito del convoglio nel tunnel, all'ingresso e uscita o all'incrocio di due treni, è già stato studiato per i passeggeri all'interno del treno ed esistono dei criteri e dei limiti massimi della sovra-pressione generata all'interno del treno, legati al grado di sigillatura aerea degli stessi. La progettazione della sezione di un tunnel ferroviario per convogli ad alta velocità tiene normalmente conto dei fenomeni che possono generare fastidio auditivo dovuto alle "micro-onde di pressione" e deve valutare la realizzazione di eventuali interventi di mitigazione.

Per l'Italia (RFI) vengono indicati in 1500 Pa e in 500 Pa/s, rispettivamente la variazione massima di pressione all'interno delle carrozze e la massima velocità di variazione della pressione per una velocità nominale dei convogli di 300 km/h.

In merito al disturbo verso l'esterno, in Giappone furono osservate micro-onde di pressione fin dai primi anni 70 con tunnel ferroviari di sezione molto ridotta (circa 63 m<sup>2</sup>), che divennero da

subito oggetto di contestazione da parte degli abitanti, visto che la densità della popolazione in Giappone è tale per cui esistono aree residenziali nelle immediate vicinanze dei tunnel dei treni di tipo Shinkansen ad alta velocità. Venne infatti stabilito un limite di sovra-pressione di 20 Pa alla distanza di 20 m dalla bocca del tunnel ferroviario.

In Europa sono stati quasi sempre realizzati tunnel ferroviari di sezione prossima ai 100 m<sup>2</sup> e il fenomeno delle micro-onde di pressione è stato oggetto solo recentemente di alcune analisi specifiche.

### 3. FENOMENO DELLE MICRO-ONDE DI PRESSIONE

Il valore massimo di sovra-pressione si manifesta ad una distanza compresa tra 1 e 2 km dall'ingresso del treno nel tunnel. Un modello numerico reperibile in bibliografia è il "Thermo Tun" che considera i parametri di lunghezza e sezione del tunnel, velocità, tipologia e composizione dei convogli, rapporto velocità, e il cosiddetto "pressure-tightness", coefficiente di tenuta  $\tau$ , che definisce il grado di sigillatura del treno e fornisce una misura di quanto la pressione interna varia in funzione delle fluttuazioni della pressione esterna. Alcuni treni asiatici ad esempio richiedono più di 40 secondi per passare da una sovra-pressione di 3000 Pa ad una di 100 Pa. Un metodo di calcolo del coefficiente è presente in bibliografia ed è stato convalidato sperimentalmente all'interno di tunnel e di carrozze ferroviarie (Baron et al, 2006).

Il valore del coefficiente  $\tau$  è dipendente dalla velocità del convoglio e varia da un valore 11 ad un valore 18 per uno stesso tipo di treno che viaggia rispettivamente a 300 km/h e a 350 km/h. Lo studio ha evidenziato come portando la sezione dei tunnel verso il valore di 90-100 m<sup>2</sup> il fenomeno delle micro-onde di pressione viene minimizzato sia per il confort dei passeggeri sia per il possibile disturbo in una zona esterna alla bocca del tunnel.

L'intensità delle micro-onde di pressione dipende dal gradiente di pressione in ingresso e in uscita e dalla propagazione lungo il tunnel e può essere calcolata con un modello lineare (Kim et al, 2008).

Il gradiente di pressione all'ingresso causato da un treno di velocità  $U$  può essere stimato con la formula:

$$\left( \frac{d_p}{d_t} \right)_{EM \max} = \frac{1}{2} \rho \frac{U^3}{\pi k D} \frac{1 - (1 - R)^2}{(1 - M) \{ M + (1 - R)^2 \}}$$

dove:

$U$ : velocità del treno in km/h

$M$ : Numero di Mach ( $U/a$ )

$a$ : Velocità sonica

$R$ :  $A_2/A_1$ , Rapporto tra le sezioni del tunnel e del treno

$K$ : costante empirica dipendente dal coefficiente  $C_x$  della testa del treno

$\rho$ : densità dell'aria kg/m<sup>3</sup>

$D$ : diametro del tunnel in m

L'intensità delle micro-onde di pressione in uscita dal tunnel può essere stimata ad una qualsiasi distanza dall'uscita con la formula:

$$\Delta p_{pulse, \max(t)} = \frac{\Delta p^* D^2}{4 \pi r \Delta l} \tan^{-1} \left( \frac{\pi \Delta l}{L} \right)$$

dove:

$\Delta l$ : coefficiente relativo alla tipologia della situazione

$L$ : ampiezza dell'onda di compressione

$r$ : distanza radiale dall'uscita del tunnel

### 3.1 VALORI DELLE MICRO-ONDE DI PRESSIONE

I risultati sperimentali reperibili in bibliografia per un treno con velocità di 300 km/h, hanno fornito i valori in Pa delle micro-onde di pressione a 20 m di distanza dalla bocca del tunnel per 3 aree trasversali del tunnel e per varie lunghezze, secondo la seguente tabella.

Tabella 1 – Valori delle micro-onde di pressione a 20 m dall'uscita del tunnel

Velocità treno	300 km/h		D=20m da bocca tunnel			
Area Tunnel m <sup>2</sup>	90.3		95.1		100.1	
Lunghezza tunnel m	Pa	dB rif.2e-5	Pa	dB rif.2e-5	Pa	dB rif.2e-5
0	16.69	118.4	16.14	118.1	16.03	118.1
200	17.22	118.7	16.74	118.5	16.37	118.3
400	17.82	119.0	17.38	118.8	16.74	118.5
600	18.48	119.3	18.06	119.1	17.16	118.7
800	19.19	119.6	18.77	119.4	17.62	118.9
1000	19.96	120.0	19.52	119.8	18.12	119.1
2000	24.58	121.8	23.77	121.5	21.17	120.5
3000	30.34	123.6	28.74	123.1	25.10	122.0
4000	36.92	125.3	34.25	124.7	29.74	123.4
5000	43.93	126.8	40.06	126.0	34.91	124.8
6000	50.97	128.1	45.93	127.2	40.39	126.1
7000	57.69	129.2	51.66	128.2	45.95	127.2
8000	63.88	130.1	57.08	129.1	51.37	128.2

Come si potrà notare il valore di 20 Pa a 20 m dalla bocca di uscita del tunnel viene superato quando la lunghezza del tunnel supera i 2000 m.

### 4. MITIGAZIONI REALIZZABILI SULLA BOCCA DEL TUNNEL

Un'eventuale mitigazione del fenomeno deve dunque avvenire per i treni in ingresso al tunnel anche se le micro-onde di pressione si formano all'uscita del tunnel stesso. Un metodo molto utilizzato è quello di evitare che la sezione del tunnel sia perpendicolare alla linea ferroviaria: si deve infatti cercare di limitare il gradiente di pressione e pertanto la variazione di sezione del tunnel deve essere progressiva e/o si devono creare degli sfoghi per l'aria che viene compressa dall'ingresso del treno. In parole più semplici, si può dire che un taglio a 45° della bocca di ingresso aumenta il tempo di ingresso del treno nel tunnel. Le immagini seguenti, desunte dalla bibliografia, illustrano le mitigazioni comunemente utilizzate.

Figura 2 – Soluzioni mitigative dell'imbocco del tunnel



Le tipologie A e B presentano un taglio a 45° e si differenziano per l'area degli sfoghi d'aria, ridotta per il tipo B dove gli sfoghi superiori e parte di quelli laterali non sono presenti. La tipologia C è un taglio perpendicolare con sfoghi d'aria laterali; la tipologia D cosiddetta a "becco di flauto" è quella presa in considerazione per il presente studio.

La tabella seguente illustra il grado di mitigazione delle micro-onde di pressione ottenibile con le soluzioni di cui sopra, rispetto ad un ingresso con taglio perpendicolare e senza sfoghi d'aria.

Tabella 2 – Grado di mitigazione delle micro-onde di pressione

Lunghezza del tunnel		Sezione perpendicolare	Sezione inclinata a 45°	45° con sfoghi aria	45° con sfoghi aria ridotti	Perpendicolare con sfoghi aria	Becco di flauto con sfoghi aria superiori
				A	B	C	D
1 km	coefficiente	0.9068	0.8037	0.5254	0.5153	0.5172	0.4063
	rate	standard	11.40%	42.10%	43.20%	43.00%	55.20%
0.75 km	coefficiente	0.9353	0.8084	0.5285	0.5524	0.539	0.4015
	rate	standard	13.60%	43.50%	40.90%	42.40%	57.10%
0.5 km	coefficiente	0.871	0.7746	0.5126	0.5117	0.5249	0.4067
	rate	standard	11.10%	41.10%	41.30%	39.70%	53.30%

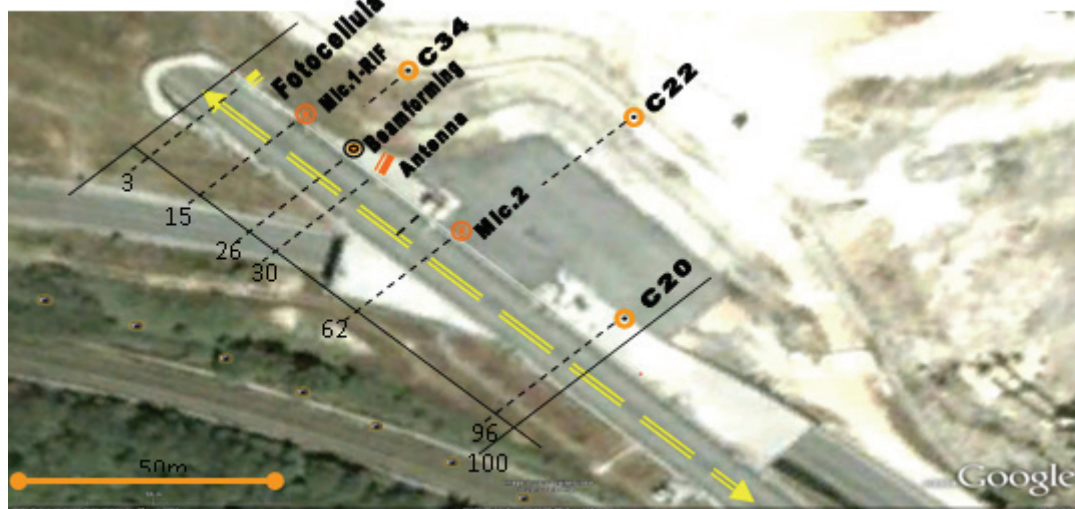
Il miglior risultato, tra il 53% e il 57% lo si ottiene con le soluzioni cosiddette “a becco di flauto”.

## 5. FENOMENOLOGIA RISCONTRATA COMUNEMENTE IN ITALIA

Il set-up di misura del sito preso in esame ha previsto: una Fotocellula per la determinazione della posizione del treno, un sistema di rilevamento della velocità del convoglio, 2 postazioni microfoniche (Mic.) in prossimità della linea ferroviaria, 3 stazioni di rilevamento del rumore ambientale C poste nell'area circostante, un sistema beam-forming puntato verso la bocca del tunnel, un'antenna per olografia acustica orientata perpendicolarmente alla bocca del tunnel.

La figura seguente riporta schematicamente il sito e le strumentazioni dislocate.

Figura 3 – Set-up di misura utilizzato

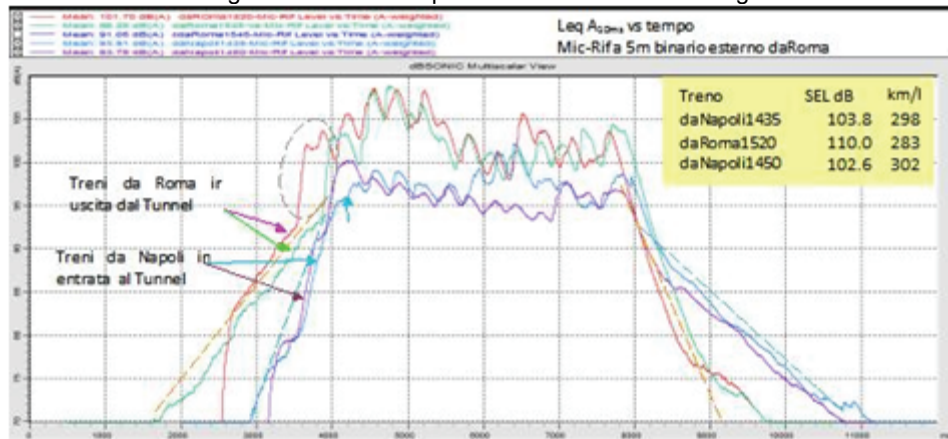


### 5.1 OSSERVAZIONI SULL'ANDAMENTO TEMPORALE DELLA PRESSIONE SONORA

Sono stati considerati 5 passaggi di treni di cui 3 sulla direttrice Roma-Napoli (convogli in uscita dal tunnel) e 2 sulla direttrice Napoli-Roma (convogli in ingresso al tunnel) nel sito di Morolo Sud.

Le tracce riportate nella figura seguente sono state traslate orizzontalmente in sovrapposizione e pertanto l'asse orizzontale dei tempi è relativo.

Figura 3 – Storia temporale del rumore di 5 convogli



Dal confronto delle tracce si possono effettuare le seguenti osservazioni:

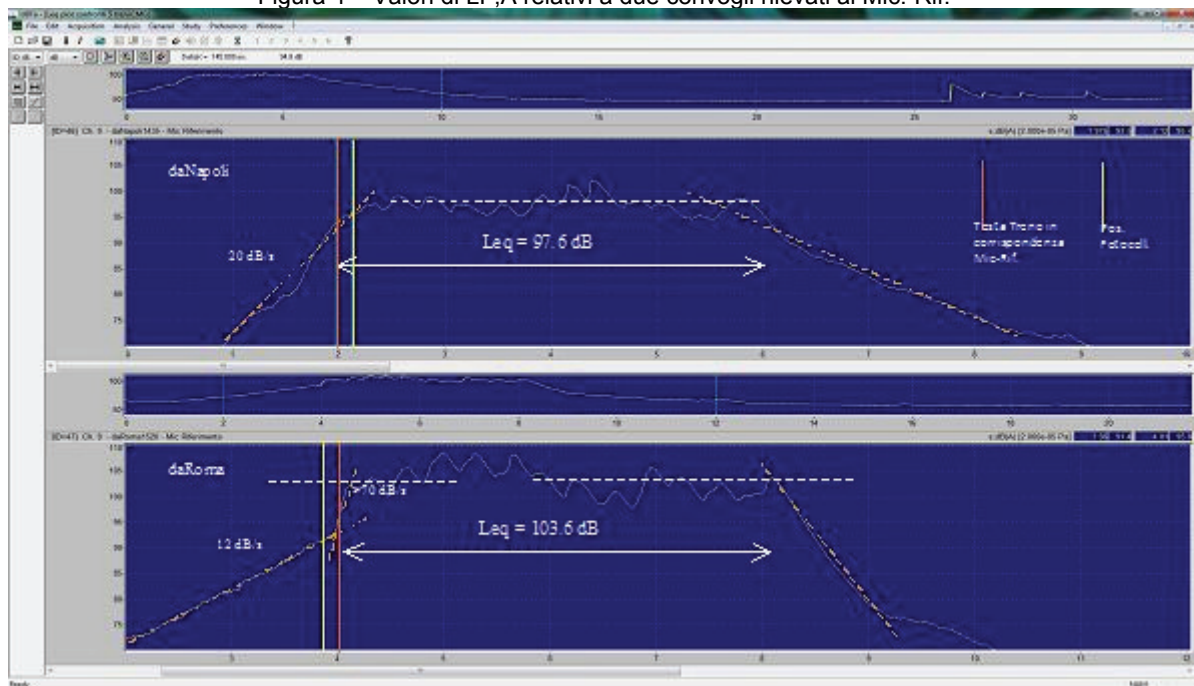
Le tracce presentano diverse pendenze per i treni in uscita e in ingresso al tunnel, rette tratteggiate in colore arancione per i treni da Roma e in colore azzurro per i treni da Napoli, le quali si ripetono in modo speculare dopo il transito dei convogli;

Le tracce dei treni in uscita dal tunnel presentano una zona di salita molto rapida del livello sonoro nel momento dell'uscita (ovale tratteggiato in colore grigio, salita  $> 70$  dB/s) rispetto a quelli in entrata (pendenza di 20 dB/s);

Per quanto attiene ai valori di SEL, essi risultano di circa 103 dB per i treni da Napoli (più lontani dal punto di misura) e di circa 109.5 per quelli da Roma, correlano inversamente con la velocità (valori di SEL maggiori per velocità minori dei convogli), risultano di -0.7 dB per i treni da Roma la cui velocità risulta di +7 km/h, e di -1.2 dB per i treni da Napoli la cui velocità è +4 km/h.

Nella figura di seguito riportata sono tracciati i valori  $LF, A$  di due convogli, dei quali sono stati calcolati i valori di  $Leq$  globale su due porzioni centrali equivalenti.

Figura 4 – Valori di  $LF, A$  relativi a due convogli rilevati al Mic.-Rif.





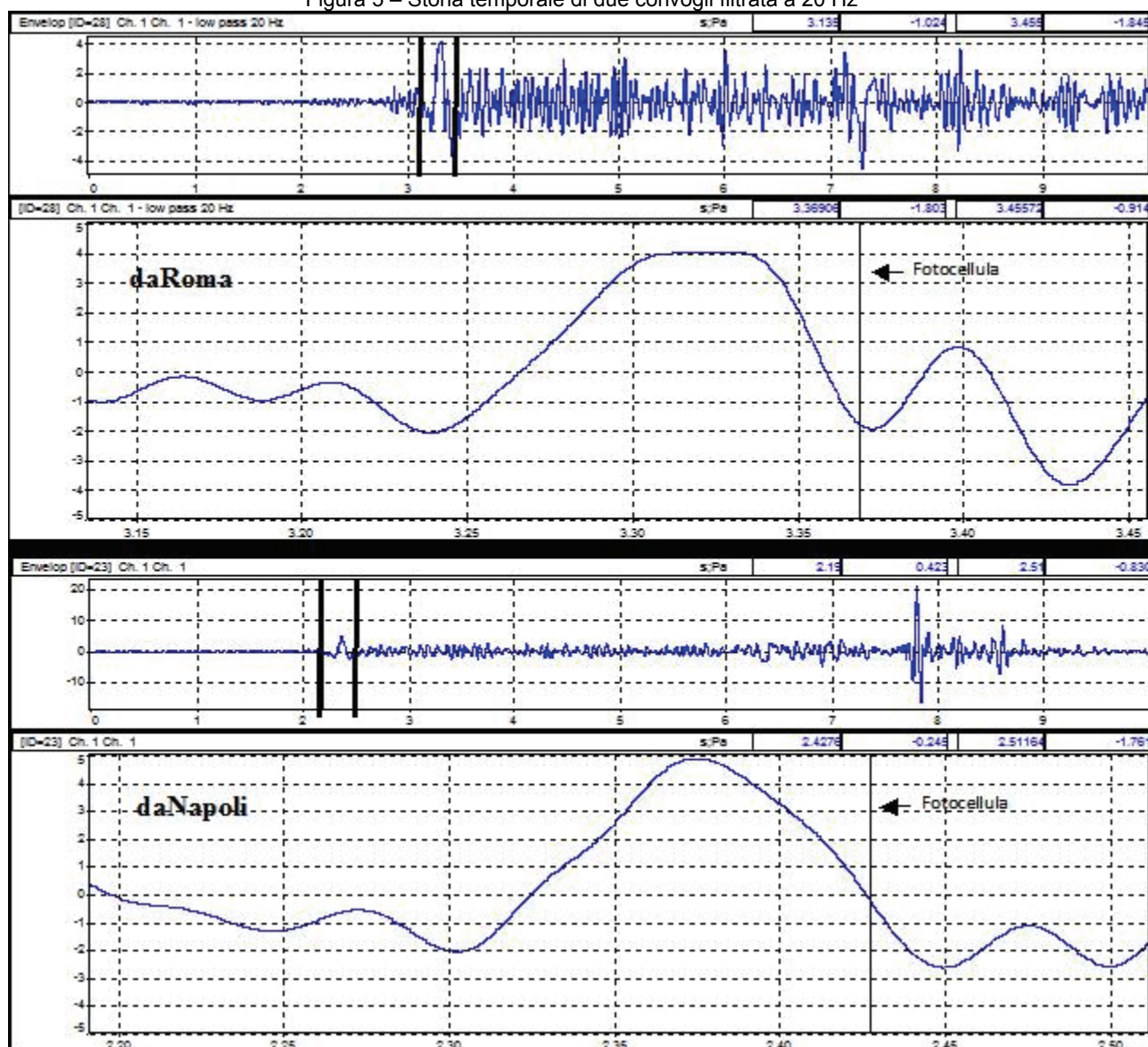
I valori di  $Leq,A$  differiscono di 6 dB, di cui 3 dB sono dovuti alla diversa distanza dei convogli dal microfono, circa 1 dB è dato dalla velocità inferiore del treno da Roma (vedi osservazioni sul SEL) e altri 2 dB sono probabilmente riconducibili all'effetto barriera della massicciata, relativamente al microfono di riferimento Mic-Rif qui considerato, che si trovava ad 1.5 m dal suolo.

## 5.2 VARIAZIONE DI PRESSIONE SONORA IN BASSA FREQUENZA

Sono stati considerati due passaggi da Napoli e da Roma nel sito di Morolo Sud rilevati nella postazione microfonica n.1 e in transito con velocità dell'ordine di 300 km/h; il convoglio da Napoli era sul binario più lontano dal microfono.

I segnali audio registrati sono stati filtrati in passa-basso a 20 Hz con un filtro di pendenza 10 dB/ottava, simile alla curva "G", ottenendo le storie temporali di seguito raffigurate, con uno zoom nella zona di interesse.

Figura 5 – Storia temporale di due convogli filtrata a 20 Hz



Osservando la storia temporale delle variazioni di pressione di 4 e 5 Pa, rispettivamente per il treno da Roma e il treno da Napoli, si potrà notare che mentre il treno da Napoli fa registrare un massimo dell'onda di pressione "prima" di arrivare alla fotocellula, coerentemente con la direzione di marcia: esso incontra prima la postazione microfonica e poi la fotocellula, quello da Roma invece fa registrare un massimo di pressione "prima" della fotocellula, ma la direzione di marcia è

inversa: esso incontra “prima” la fotocellula e “poi” il microfono; quindi il massimo di pressione si forma “prima” che il treno giunga sul microfono. I valori riscontrati di 4-5 Pa corrispondono a circa 108 dB rif.  $2 \times 10^{-5}$  Pa.

Questi valori sono abbastanza simili a quelli riscontrati dai treni considerati nello studio Giapponese preso dalla bibliografia (vedere quanto esposto precedentemente) i quali erano riferiti a velocità inferiori e i tunnel non presentavano ingressi a becco di flauto.

E' chiaro che il valore di Livello sonoro a frequenze sotto i 20 Hz è assolutamente trascurabile nel contesto attuale dal punto di vista dell'energia sonora in scala “A”: la ponderazione “A” a 20 Hz è >50 dB e quindi il livello ad esse associato diventa di 58 dBA in prossimità della linea ferroviaria. E' quindi necessario studiare più precisamente la percezione sonora di eventuali ricettori e la possibile presenza di un effetto di rinforzo del livello sonoro dei convogli in ingresso e uscita dal tunnel adottando parametri specifici sia a metrica convenzionale sia di tipo psico-acustico.

## 6. VALUTAZIONE DEI FENOMENI OSSERVATI

La prima caratteristica osservata per l'ingresso-uscita dei treni AV dai tunnel è quella relativa alla rapidità di salita del Livello sonoro all'inizio dell'evento (onset ratio), misurabile dalla traccia sonora in dB/secondo. Alcuni studi (Plotkin et al, 1987) hanno infatti dimostrato che fenomeni sonori con un tempo di salita del Livello sonoro più veloce sono più fastidiosi di quelli con tempo di salita del livello più lenta, o di rumori stazionari con lo stesso livello sonoro globale.

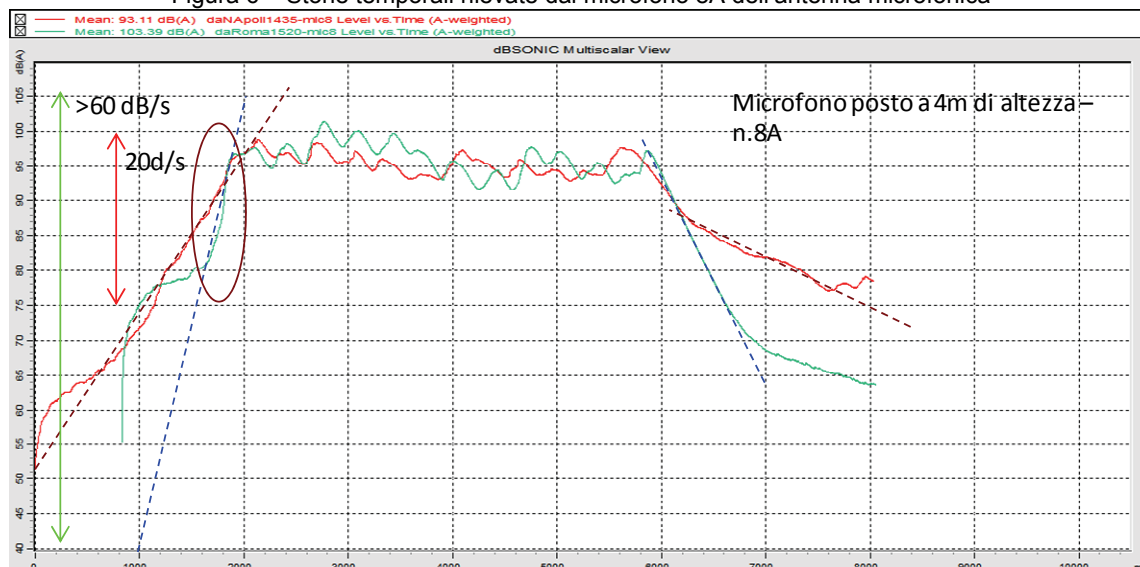
### 6.1 RAPIDITÀ DI SALITA E PSEUDO-IMPULSIVITÀ

Una rapidità di salita (onset rate) del Livello sonoro maggiore di 15 dB/s causa sicuramente un disturbo percepibile per ricettori posti a circa 20 m durante il passaggio di un treno con velocità di circa 250 km/h. Il valore di onset ratio aumenta con la velocità del convoglio e comporta disturbo a distanze maggiori dalla linea ferroviaria.

Valori prossimi a 25 o 30 dB/s si possono ritrovare a distanze prossime alla sede ferroviaria e normalmente generano uno stato di allarme (startle) nell'individuo; il valore di 30 dB/s è preso come valore limite per introdurre anche questo tipo di valutazione negli studi di impatto acustico ambientale.

Considerando la posizione microfonica identificata come 8A (appartenente all'antenna di microfoni), microfono posto a 4 m di altezza e a 30 m dalla bocca del tunnel, si traccia il grafico seguente che riporta le tracce  $L_{pFA}$  dei passaggi dei due treni da Napoli 1435 e da Roma 1520; la traccia del convoglio da Roma 1520 è stata traslata orizzontalmente sopra la traccia del convoglio da Napoli 1435 e corretta di circa -9 dB (traslazione verticale), fino a sovrapporre le tracce.

Figura 6 – Storie temporali rilevate dal microfono 8A dell'antenna microfonica



La differenza di livello di circa 9 dB è dovuta alla diversa distanza dei convogli dal microfono, alla diversa velocità, all'annullamento del probabile effetto schermo del ballast (effetto negativo) e al contributo della componente dei pantografi sul dBA. Gli andamenti dei valori  $L_{p_{F,A}}$  per il microfono 8A sono abbastanza simili a quelli rilevati per il Microfono di riferimento, con l'andamento ripido in salita (circolato sul grafico) per il treno da Roma in uscita dal tunnel (traccia verde).

I treni in uscita presentano una maggiore rapidità di variazione del livello sonoro rispetto a quelli in entrata al tunnel ( $>60$  dB/s), sebbene vada osservato che tali variazioni sono anche legate alla direzionalità di emissione del treno assimilabile ad un dipolo con emissione laterale molto maggiore rispetto a quella frontale, e con un repentino innalzamento del livello sonoro, superiore ai 30 dB/s riportati in bibliografia come limite oltre il quale si crea un maggior disturbo acustico; tale fenomeno si potrebbe descrivere con il fatto che un ricettore percepisce repentinamente una brusca variazione del livello sonoro dandogli lo stato di allerta (startle) definibile più in generale come "effetto sorpresa".

La presenza del fenomeno "sorpresa" si manifesta in maniera sempre minore man mano che ci si allontana dalla linea ferroviaria ed esiste una relazione che consente di determinare la distanza oltre la quale tale effetto è trascurabile. La distanza è data in funzione della velocità del treno nel caso di terreno piatto senza ostacoli con la formula:

$$d = 0.04U$$

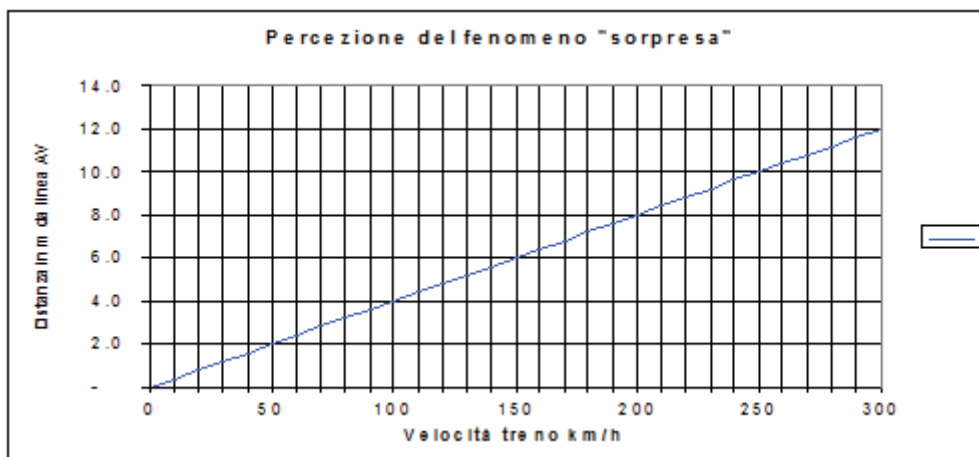
dove:

d: distanza dalla linea ferroviaria in m

U: velocità del treno in km/h

Il grafico seguente fornisce la distanza in funzione della velocità del treno (U.S. Dept. of Transportation, 2005)

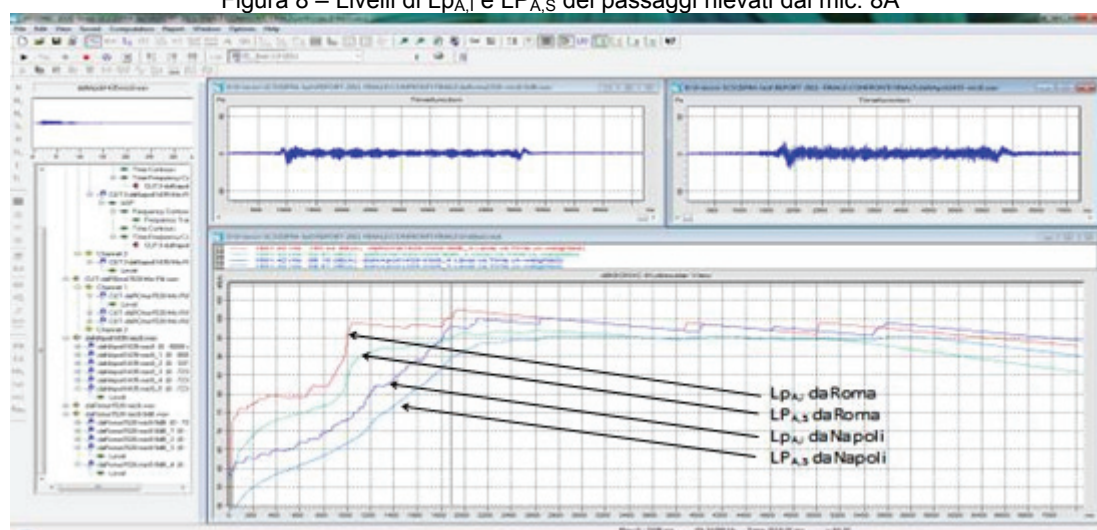
Figura 7 – Distanza limite dell'effetto sorpresa



Per completare l'analisi sono stati tracciati i valori di  $L_{p_{A,I}}$  e  $L_{p_{A,S}}$  (Impulse-Slow) in sovrapposizione per i treni in esame: da Napoli e da Roma; le curve del da Roma1520 sono state corrette di 9 dB per allinearne le ampiezze.



Figura 8 – Livelli di  $L_{pA,I}$  e  $L_{pA,S}$  dei passaggi rilevati dal mic. 8A



Come si può vedere il parametro Impulse è influenzato da tutte le fasi di pass-by del treno e la differenza rispetto al parametro Slow può ricondurre al fenomeno ricercato di rinforzo dell'emissione sonora in uscita dal tunnel, considerando che la differenza maggiore I-S si crea nella fase iniziale della storia temporale.

La seguente tabella riassume i valori su base energetica per i due treni considerati: da Napoli 1435 e da Roma 1520. I valori del treno da Roma 1520 sono stati corretti per la distanza dei due treni rispetto alla posizione del microfono per un confronto diretto.

Tabella 3 – Valori su base energetica dei passaggi rilevati dal mic. 8A

Microfono 8A a 4m di altezza		Velocità	Leq su T passaggio	SEL	Picco max	RMS Slow	L <sub>pI</sub> ,max	L <sub>pS</sub> ,max	Effetto "sorpresa" vicino linea ferroviaria
da Napoli1435	entra nel tunnel	km/h	dBA	dBA	dB	dB	dBA	dBA	dB/s
		298.3	91.0	102	120.7	87.6	100.5	95.4	20
daRoma1520	uscite dal tunnel		101	111.8	129.9	90.1	112.2	106.7	
correz. Distanza			-9	-9	-9	-9	-9	-9	
Da Roma1520	uscite dal tunnel	283.8	92	102.8	120.9	81.1	103.2	97.7	>70

La seconda caratteristica osservata è quella relativa al contenuto in bassa frequenza al di sotto dei 20 Hz, fenomeno legato a onde di pressione che si formano con il treno in uscita dal tunnel, non generate dall'ingresso del convoglio dalla parte opposta.

## 7. PRESENZA DI FENOMENI A BASSA FREQUENZA

Da quanto mostrato precedentemente, sono stati misurati dei livelli di pressione sonora in bassa frequenza simulando la curva "G", i cui valori sono risultati di 108 dB rif. 2e-5Pa.

La curva "G" è definita dalla ISO 7196 – 1995 ed utilizzata come la curva "A", ma centrata sul valore di 10 Hz (la curva A è su 1000 Hz) per simulare la percezione umana agli infrasuoni. Generalmente si ritiene che un fenomeno a bassa frequenza è percepibile quando supera il valore di 90 dB rif. 2e-5 Pa e per valori più elevati può causare insonnia, ansia e aumento della pressione sanguigna.

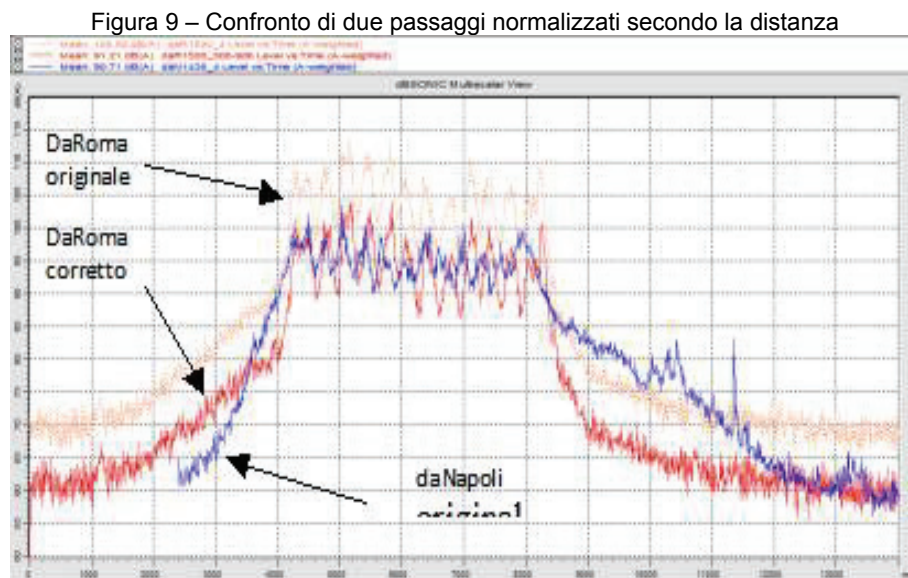
La fenomenologia acustica generata dall'ingresso-uscita dei treni AV nei tunnel ferroviari è stata valutata per gli altri parametri psico-acustici.

## 7.1 VALUTAZIONI PSICO-ACUSTICHE

Per procedere ad un confronto con i parametri psico-acustici è necessario normalizzare i segnali registrati per tener conto della diversa distanza dei due treni dalla postazione microfonica (ad esempio: mic. 8A a 4 m di altezza). L'operazione è più complessa della semplice sottrazione in dB operata precedentemente sui valori in dB dei parametri energetici calcolati, si tratta in effetti di operare direttamente sul segnale temporale.

L'operazione è stata realizzata su un tratto segnale temporale di 14 secondi sul quale è stato calcolata una funzione ASP, e ridotto di 9 dB il contenuto energetico, per poi procedere con una re-sintesi ottenendo il nuovo segnale corretto.

La figura seguente mostra il risultato ottenuto confrontando le tracce del  $LeqA_{10ms}$ .

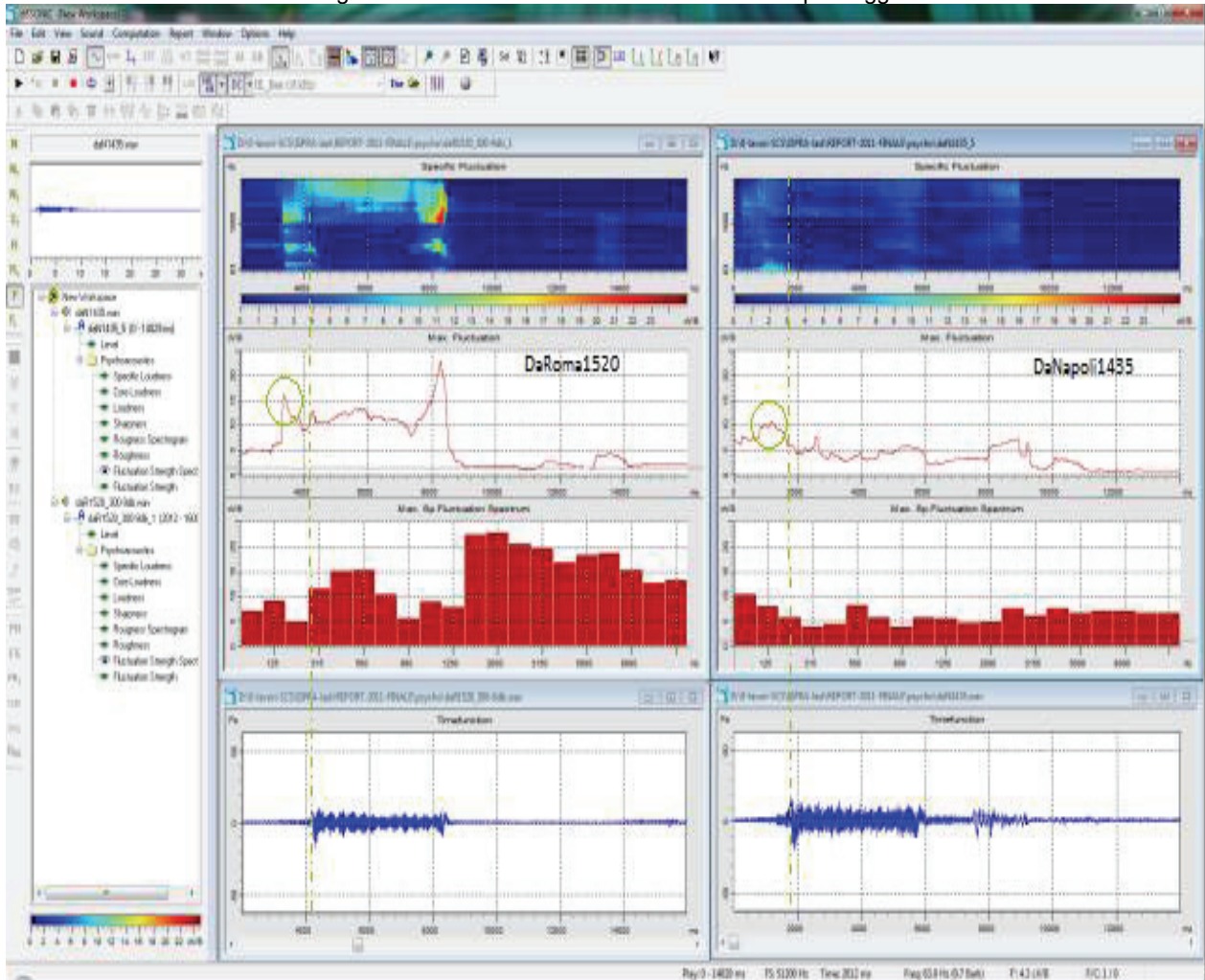


Il segnale originale del treno da Roma 1520 (linea in arancione punteggiata) è stato corretto ottenendo il nuovo segnale (traccia rossa), la cui energia è ridotta di 9 dB rispetto alla registrazione originale. Il segnale del treno da Napoli 1435 è tracciato con la linea blu.

Sono stati analizzati alcuni indicatori Psico-acustici che determinano il Loudness ed è stato trovato un chiaro valore di differenziazione dell'emissione sonora dei treni considerati per il parametro "Forza di Fluttuazione" F (Fluctuation Strength). Questo parametro è infatti sensibile a variazioni acustiche in bassa frequenza fino a circa 20 Hz. Oltre questo valore di frequenza si utilizza invece un altro parametro detto "Ruvideità" (Roughness). La notevole differenza di F tra il treno da Roma e quello da Napoli sembra essere giustificato pertanto dalla maggiore variazione di livello espressa come Fluctuation Strength F che si misura in vacil che rappresenta la fluttuazione prodotta da un tono a 1 kHz di 60 dB con ampiezza del 100%, modulato a 4 Hz; la funzione F tiene in conto anche del fenomeno di masking temporale e del valore della frequenza di modulazione.

La figura seguente riporta l'analisi di Fluttuazione (modulazioni a frequenze inferiori a 20 Hz) per i due treni nella quale si vede come i valori di F siano nettamente superiori per il treno da Roma 1520.

Figura 10 – Confronto della Fluttuazione di due passaggi



Si potrà notare come il fenomeno accade in effetti "prima" del passaggio della testa treno in corrispondenza del microfono, le linee verticali in verde corrispondono alla posizione della testa treno in corrispondenza al microfono di misura.

## 8. CONCLUSIONI

Lo studio dei fenomeni di fluidodinamica e acustici sui treni AV presso gli imbocchi-sbocchi dei tunnel, ha messo in luce la presenza di fenomeni acustici non facilmente oggettivabili con la metrica tradizionale su base energetica.

La prima analisi è stata quella di verificare la presenza di un fenomeno di onde di micro-pressione in uscita, provocate dall'ingresso del convoglio dalla parte opposta, come descritto dalla bibliografia, ed è stato riscontrato che tale fenomeno è pressoché assente in quanto i tunnel esaminati avevano mitigazioni adeguate (imbocco a becco di flauto). Le successive analisi hanno invece messo in luce la presenza di altri fenomeni acustici tra cui la presenza di onde di pressione sonora in bassa frequenza ( $<20\text{Hz}$ ) e valori particolarmente rapidi di salita del Livello sonoro (dB/s) per i treni in uscita dal tunnel.

Sono stati ricercati e applicati altri parametri non convenzionali per oggettivare un possibile disturbo acustico, che potranno essere adottati come buoni descrittori affiancandosi ai parametri più tradizionali, quali la curva di ponderazione "G", il tempo di salita del Livello sonoro (onset rate in dB/s), il valore del fattore di cresta del segnale, la presenza di modulazione in bassa frequenza (Fluctuation Strength).

Ad oggi gli studi previsionali e le verifiche strumentali si limitano all'utilizzo quasi sempre all'utilizzo dei valori di LASmax e SEL che però non possono descrivere la fenomenologia complessa descritta nel presente studio, ad essi potrebbero essere affiancati altri parametri, sia a metrica tradizionale sia non-convenzionale.

Nell'ambito di una previsione di impatto acustico o di verifica post-operam per situazioni simili a quelle qui descritte, potrà risultare utile considerare la lista seguente e adottare come "valori di attenzione" di alcuni parametri, al fine di prevenire la possibile formazione di un disturbo acustico o verificarne l'effettiva esistenza.

Tabella 3 – Possibili valori di attenzione da adottare

Classificazione	Parametro e Descrizione	Valori di attenzione
Dato di base	velocità del treno	> 250 km/h
Dato aggiuntivo	area della bocca del tunnel	< 100 m <sup>2</sup>
Dato aggiuntivo	variazione non progressiva della bocca del tunnel	Non a becco di flauto
Dato di base	SEL	
Dato aggiuntivo	L <sub>max</sub> con ponderazioni A e Lin e costanti Slow e Impulse	
Dato aggiuntivo	L <sub>eq,A</sub> sul tempo effettivo di passaggio del treno	
Dato aggiuntivo	L <sub>eq,A</sub> (t= 10ms) a partire da testa treno a 50m dalla bocca	
Dato aggiuntivo	Valore di picco massimo Lin	> 100 dB
Disturbo	Livello di pressione sonora in bassa frequenza	L <sub>p,G</sub> > 94dB (1 Pa)
Disturbo	Onset-rate	> 20dB/s
Dato aggiuntivo	Fattore di cresta sulla postazione di misura	> 20 dB
Disturbo	Valore F (Fluctuation Strength)	> 10 cV

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Baron A., Molteni P. and Vigeveno L. *Highspeed trains : Prediction of micro-pressure wave radiation from tunnel portals* - - 2006, Journal of sound and vibration, pp 59-72
- [2] Kim, Seon-Hong, Moon, Yeon-Oh, Seok, Jin-Ho, Kim, Ki-Lim, Kim, Chan-Dong, & Yoo, Ho-Sik, *A study on tunnel cross-section design with particular consideration of aerodynamic characteristics for the Honam H.S.R* - Yooshin Engineering Corporation, Seoul, Korea - World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety - India
- [3] K. Kikuchi, M. Lida, T. Takasaki, H. Takami, *Field Measurement of Wayside Low-Frequency Noise Emitted from Tunnel Portals and Trains of High-Speed Railway*, Environmental Engineering Division, Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji, Tokyo - Japan
- [4] K. Plotkin, L.C. Sutherland, J.A. Molino, *Environmental Noise Assessment for Military Aircraft Training Routes: Volume 2: Recommended Noise Metric*, Wyle Laboratories Report WR 86-21 prepared for Wright Patterson Air Force Base AAMRL/BBE, April 1987
- [5] U. S. Department of Transportation - Federal Railroad Administration, "FRA": *High-Speed Ground Transportation: Noise and Vibration Impact Assessment - HMMH Report No. 293630-4* - October 2005