

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

Treno AV (Alta Velocità) che entra o esce da una galleria:

➤ genera fenomeni descrivibili con modelli di fluidodinamica che creano fenomeni acustici

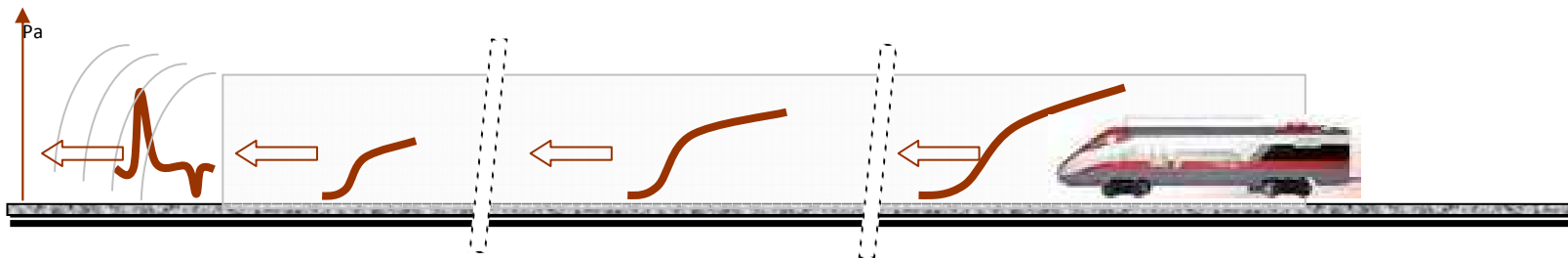
➔ *non riconducibili alla metrica tradizionale su base energetica*

➔ *non sono i livelli di pressione sonora ponderati "A".*

➤ forma onde di compressione all'interno del tunnel

"micro-onde di pressione" che si propagano verso l'uscita opposta,

- la cui ampiezza dipende dalla velocità del convoglio
- e dal rapporto tra la sezione frontale del treno e quella del tunnel



Fastidio o disturbo acustico dovuto al transito del convoglio nel tunnel

➤ per i passeggeri all'interno del treno:

- *esistono dei criteri e dei limiti massimi della sovra-pressione generata all'interno del treno,*
- *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.*
- *RFI indica 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.*

➤ per le aree esterne:

- *in Giappone furono osservate micro-onde di pressione fin dai primi anni 70 con tunnel ferroviari di sezione d'ingresso di circa 63 m²*
- *dopo contestazione da parte degli abitanti*
 - ➔ *alta densità della popolazione in Giappone*
 - ➔ *aree residenziali nelle immediate vicinanze dei tunnel dei treni Shinkansen ad alta velocità.*
 - ➔ *Venne stabilito un limite di sovra-pressione di 20 Pa alla distanza di 20 m dalla bocca del tunnel ferroviario.*
- *In Europa sono quasi sempre realizzati tunnel ferroviari di sezione prossima ai 100 m²*

Il fenomeno delle micro-onde di pressione è stato oggetto solo recentemente di alcune analisi specifiche.

Fenomeno delle micro-onde di pressione

Massimo di sovra-pressione si manifesta ad una distanza compresa tra 1 e 2 km dall'ingresso del treno nel tunnel.

- Parametri del modello Thermo Tun:
 - lunghezza e sezione del tunnel,
 - velocità,
 - tipologia e composizione dei convogli,
 - rapporto velocità,
 - “pressure-tightness”, coefficiente di tenuta τ ,
 - *definisce il grado di sigillatura del treno e fornisce una misura di quanto la pressione interna varia in funzione delle fluttuazioni della pressione esterna → anche + di 40 da 3000 Pa a 100 Pa di sovra-pressione*
 - *τ dipende dalla velocità del convoglio e varia da 11 a 18 per uno stesso tipo di treno a 300 km/h e a 350 km/h.*

Con una sezione dei tunnel di 90-100 m² il fenomeno delle micro-onde di pressione viene minimizzato

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

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
- ρ : densità dell'aria kg/m³
- D: diametro del tunnel in m

→ L'intensità delle micro-onde di pressione in uscita ad una qualsiasi distanza dall'uscita come: $\Delta p_{pulse, \max(t)} = \frac{\Delta p^* D^2}{4 \pi r \Delta l} \tan^{-1} \left(\frac{\pi \Delta l}{L} \right)$

dove:

- Δl : coefficiente relativo alla tipologia della situazione
- L: ampiezza dell'onda di compressione
- r: distanza radiale dall'uscita del tunnel

VALORI DELLE MICRO-ONDE DI PRESSIONE

Velocità del treno di 300 km/h

Valori in Pa delle micro-onde di pressione misurati

- a 20 m di distanza dalla bocca del tunnel
- per 3 aree trasversali del tunnel
- per varie lunghezze

Velocità treno 300 km/h

D=20m da bocca tunnel

Area Tunnel m ²	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

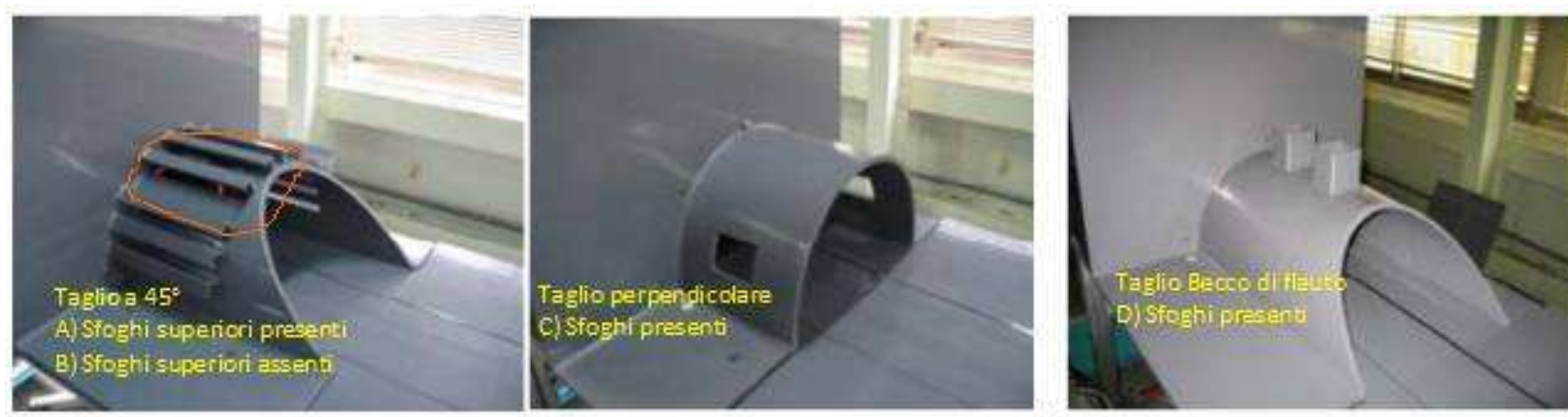
Come si potrà notare il valore di 20 Pa a 20 m dalla bocca di uscita del tunnel viene superato quando la lunghezza del tunnel supera i 2000 m.

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.

Se la sezione del tunnel non è perpendicolare alla linea ferroviaria, si limita il gradiente di pressione

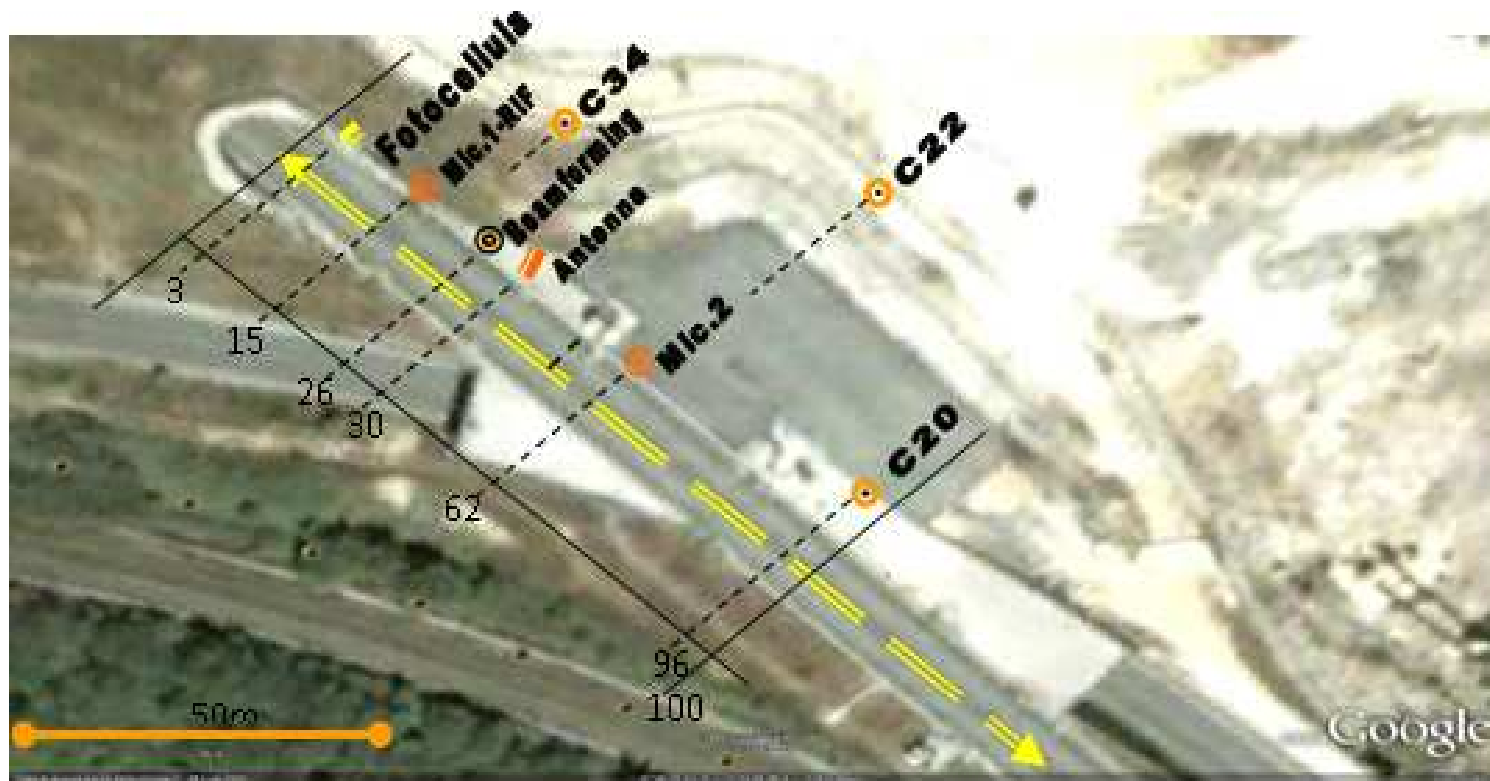
- variazione di sezione del tunnel progressiva
- creare degli sfoghi per l'aria che viene compressa dall'ingresso del treno
- un taglio a 45° della bocca di ingresso aumenta il tempo di ingresso del treno nel tunnel



Lunghezza del tunnel		-		45° con sfoghi aria			
		Perpendicolare	45°	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%

Grado di mitigazione in % rispetto a taglio perpendicolare, miglior risultato tra 53% e 57% con "becco di flauto"

CAMPO PROVE PRINCIPALE DI MOROLO-SUD



Altri campi prova:

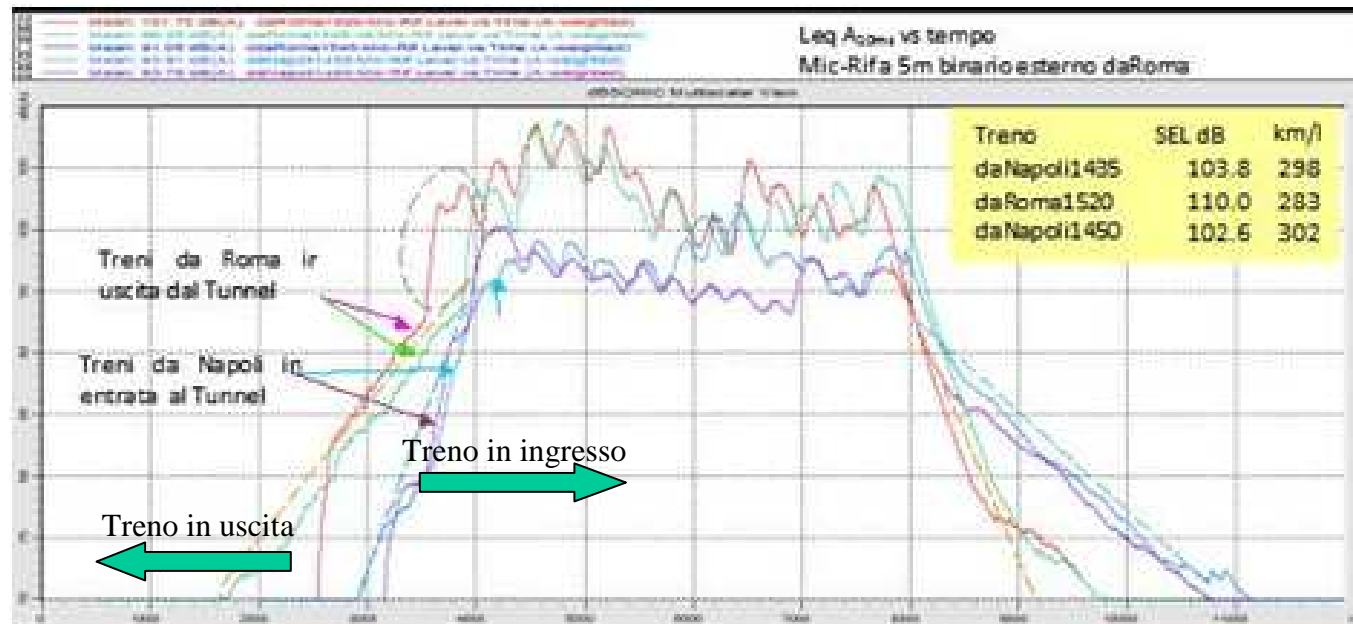
- Morolo Nord
- Caivano Nord

STORIA TEMPORALE DELLA PRESSIONE SONORA (1)

Tracce relative a 5 passaggi di treni:

3 sulla Roma-Napoli (convogli in uscita dal tunnel) e 2 sulla Napoli-Roma (convogli in ingresso al tunnel)

Le tracce traslate orizzontalmente in sovrapposizione, asse orizzontale dei tempi è relativo.



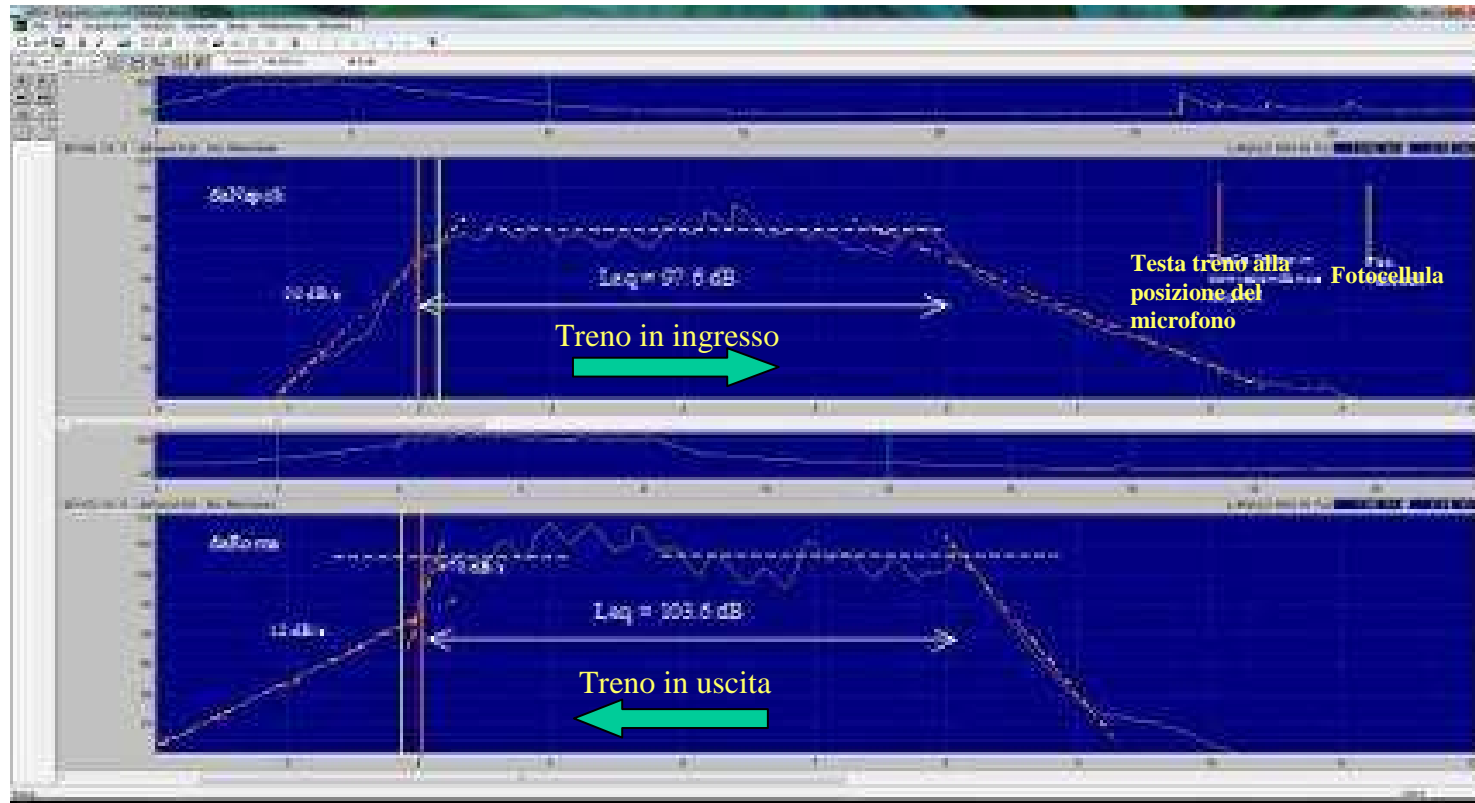
Osservazioni:

- diverse pendenze per i treni in uscita e in ingresso al tunnel, tratteggiate in arancio per i treni da Roma e in azzurro per i treni da Napoli
- Pendenze speculari dopo il transito dei convogli;
- treni in uscita dal tunnel → salita molto rapida del livello sonoro nel momento dell'uscita (ovale) - salita > 70 dB/s
- Treni in entrata → pendenza di 20 dB/s
- Valori di SEL di 103 dB per i treni da Napoli (più lontani dal punto di misura) e di 109.5 per quelli da Roma
- 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.

SEL correla inversamente con la velocità → valori di SEL maggiori per velocità minori dei convogli

STORIA TEMPORALE DELLA PRESSIONE SONORA (2)

Valori $L_{p, Fast, A}$ di due convogli, dei quali sono stati calcolati i valori di L_{eq} globale su due porzioni centrali equivalenti



I valori di $L_{eq, A}$ differiscono di 6 dB:

- 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)
- altri 2 dB sono riconducibili all'effetto barriera della massicciata, relativamente al microfono di riferimento Mic-Rif qui considerato, che si trovava ad 1.5 m dal suolo.

VARIAZIONE DI PRESSIONE SONORA IN BASSA FREQUENZA

Due passaggi da Napoli e da Roma rilevati nella postazione microfonica n.1 - velocità circa 300 km/h - convoglio da Napoli era sul binario più lontano dal microfono.

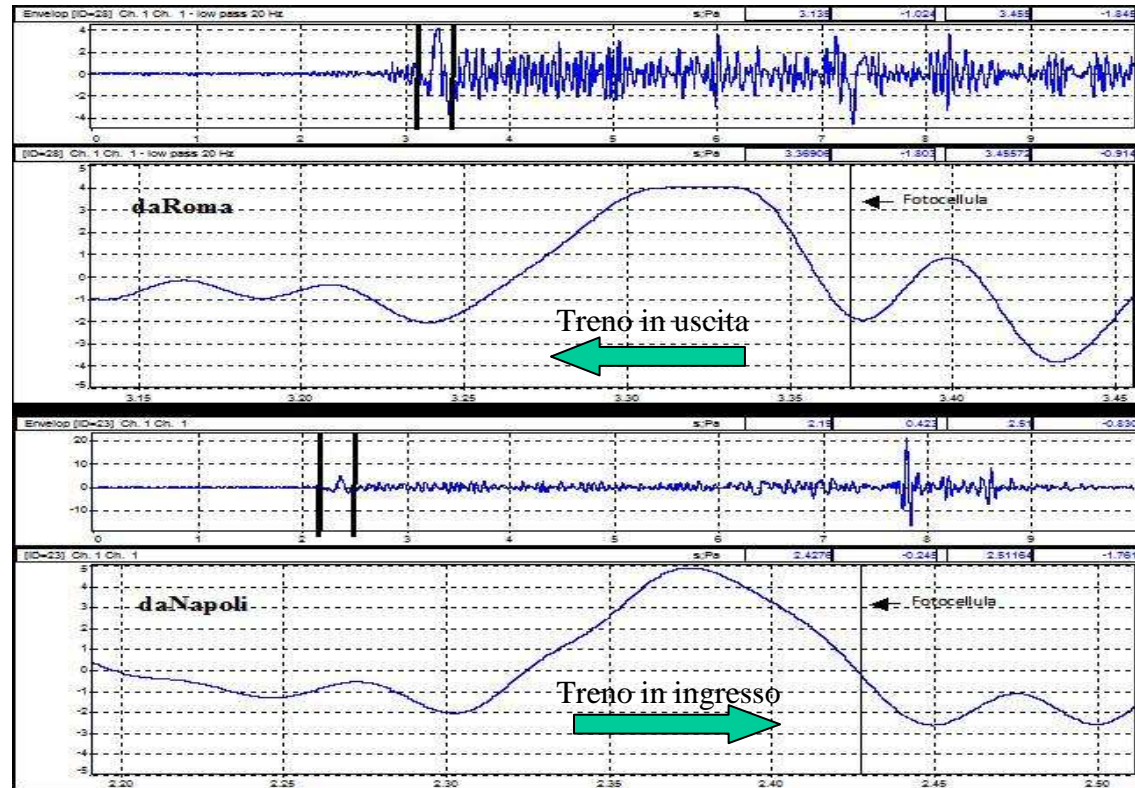
I segnali audio registrati sono stati filtrati in passa-basso a 20 Hz con un filtro di pendenza 10 dB/ottava, simile alla curva "G", ottenendo le storie temporali di seguito raffigurate, con uno zoom nella zona di interesse

Variazione di pressione di 4 Pa (da Roma) e 5 Pa (da Napoli) - circa 108 dB rif. 2×10^{-5} Pa

da Napoli → massimo "prima" della fotocellula
incontra prima la postazione microfonica e poi la fotocellula,

da Roma → massimo "prima" della fotocellula, ma direzione di marcia è inversa
incontra "prima" la fotocellula e "poi" il microfono;
massimo di pressione si forma "prima" che il treno giunga sul microfono.

Valori simili ai treni Giapponesi (bibliografia) a velocità inferiori e ingressi tunnel non a becco di flauto.

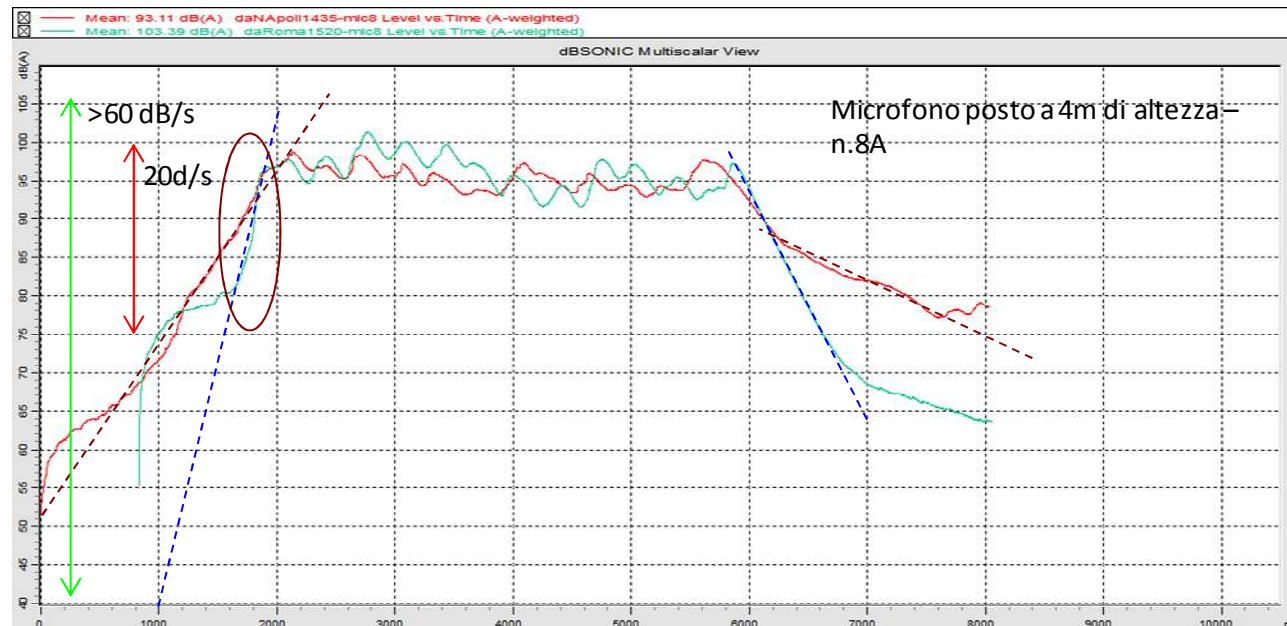


Livello sonoro < 20 Hz → trascurabile come energia sonora "A"

necessario studiare la percezione sonora ai ricettori per un possibile rinforzo del livello sonoro dei convogli in ingresso e uscita dal tunnel → parametri specifici a metrica convenzionale o di tipo psico-acustico

RAPIDITÀ DI SALITA E PSEUDO-IMPULSIVITÀ – *effetto sorpresa*

- Una rapidità di salita (*onset rate*) del Livello sonoro > di 15 dB/s causa disturbo a ricettori posti a circa 20 m durante il passaggio di un treno con velocità di circa 250 km/h.
- il valore di 30 dB/s è preso come valore limite per la generazione di uno stato di allarme (startle) nell'individuo;
- Il valore di onset ratio aumenta con la velocità del convoglio e comporta disturbo a distanze maggiori dalla linea ferroviaria.
- Valori prossimi di 25 o 30 dB/s si ritrovano sempre vicino alla sede ferroviaria



Storia temporale posizione microfonica 8A posta a 4 m di altezza e a 30 m dalla bocca del tunnel

- LpF,A 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, dovuti 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

Valori dell'effetto sorpresa

- I treni in uscita presentano una maggiore rapidità (>60 dB/s) di variazione del livello sonoro rispetto a quelli in entrata al tunnel presente anche effetto direzionalità di emissione del treno assimilabile ad un dipolo con emissione laterale molto maggiore rispetto a quella frontale
- repentino innalzamento del livello sonoro, superiore ai 30 dB/s (riportati in bibliografia come limite del maggior disturbo acustico)
- un ricettore percepisce repentinamente una brusca variazione del livello sonoro destando lo stato di allerta (startle) definibile più in generale come “effetto sorpresa”.

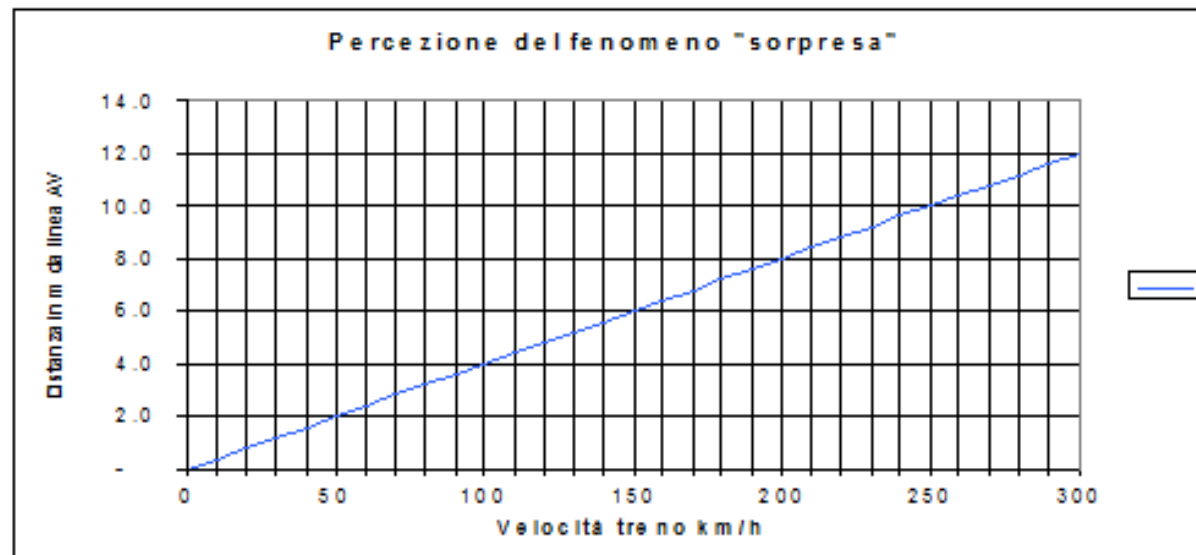
La presenza del fenomeno “sorpresa” si manifesta in maniera sempre minore man mano che ci si allontana dalla linea ferroviaria ed esiste una relazione che consente di determinare la distanza oltre la quale tale effetto è trascurabile.

La distanza è data in funzione della velocità del treno nel caso di terreno piatto senza ostacoli con la formula: $d = 0.04U$

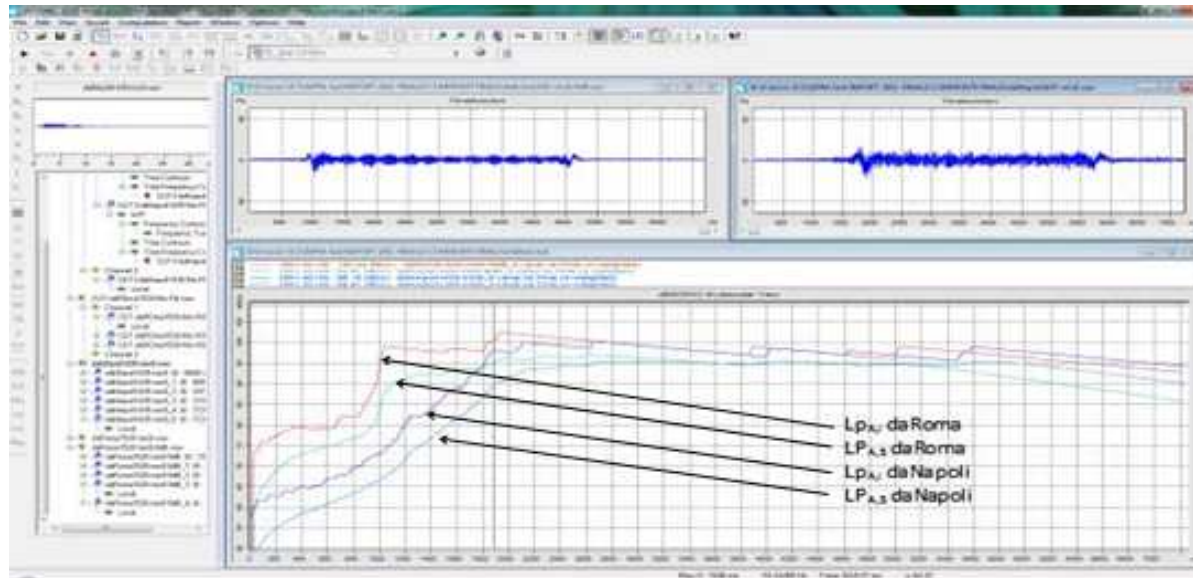
dove:

d: distanza dalla linea ferroviaria in m

U: velocità del treno in km/h



I PARAMETRI I, S e l'effetto sorpresa



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.

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

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.

FENOMENI A BASSA FREQUENZA E FENOMENI PSICO-ACUSTICI

Sono stati misurati livelli di pressione sonora in bassa frequenza simulando la curva “G”, ottenendo valori 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).
- Simula la percezione umana agli infrasuoni.
- Si ritiene che un fenomeno a bassa frequenza è percepibile quando supera il valore di 90 dB rif. 2e-5 Pa
- Per valori più elevati può causare insonnia, ansia e aumento della pressione sanguigna.

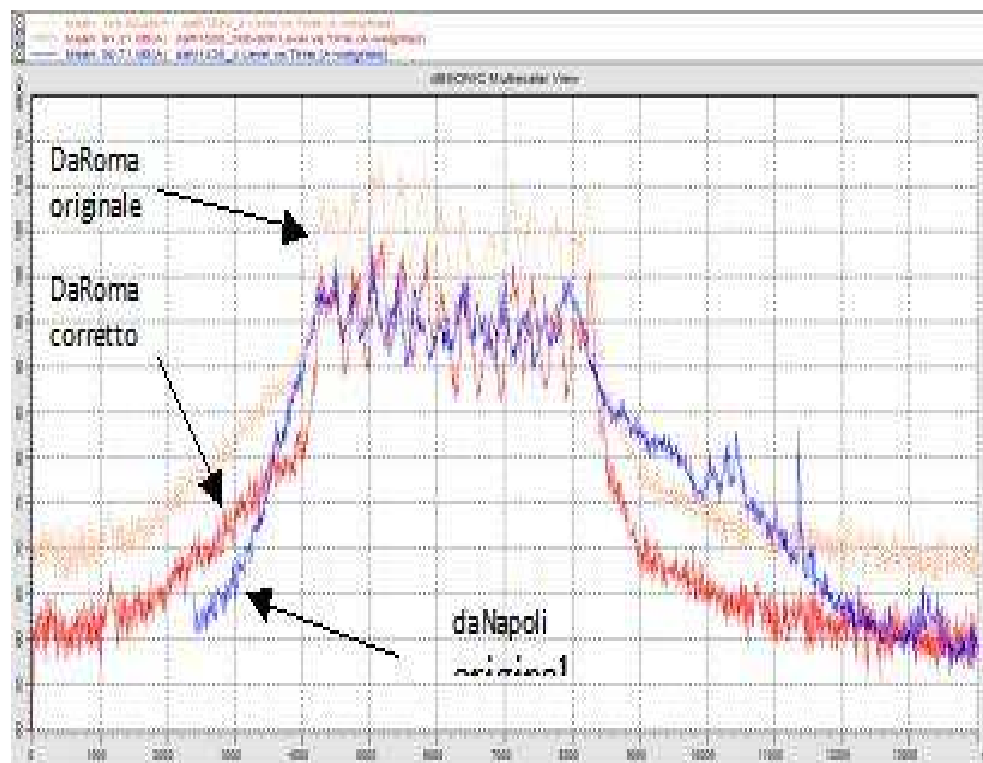
Calcolo parametri psico-acustici: necessaria normalizzazione dei segnali registrati per tener conto della diversa distanza dei due treni dalla postazione microfonica

- Operazione (più complessa della semplice sottrazione in dB) realizzata su un segnale temporale di 14 secondi
- Calcolo di una funzione ASP, e riduzione di 9 dB del contenuto energetico
- Processo di re-sintesi per ottenere nuovo segnale corretto.

Risultato ottenuto confrontando le tracce del LeqA10ms.

E' stato trovato che il parametro “Forza di Fluttuazione” F (Fluctuation Strength) è sensibile a variazioni acustiche in bassa frequenza fino a circa 20 Hz.

Oltre questo valore di frequenza si utilizza il parametro di “Ruvidità” (Roughness).



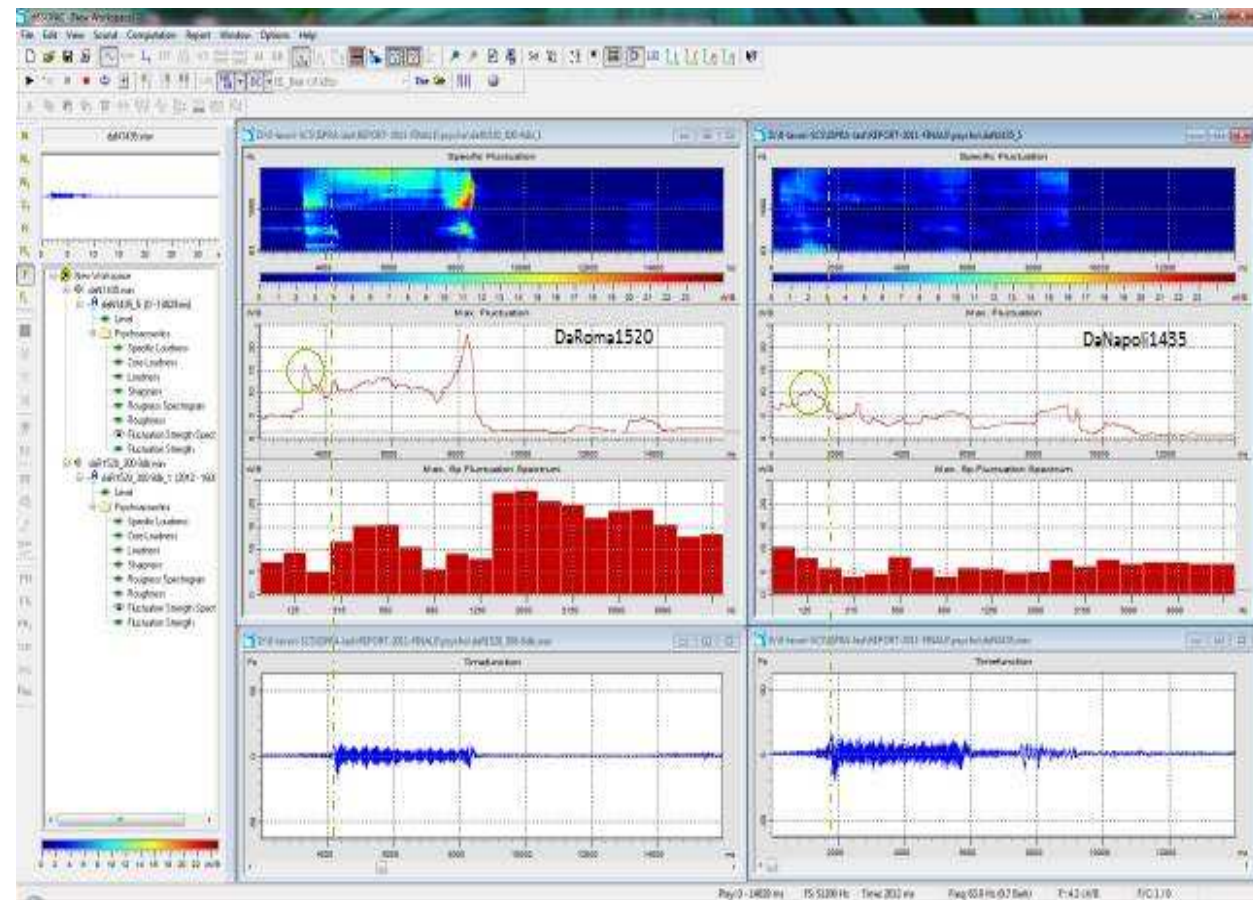
“Forza di Fluttuazione” F (Fluctuation Strength)

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 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.

Si potrà notare come il fenomeno accade “prima” del passaggio della testa treno in corrispondenza del microfono,

Le linee verticali in verde corrispondono alla posizione della testa treno al microfono di misura.



CONCLUSIONI

Fenomeni di fluidodinamica e acustici sui treni AV presso gli imbocchi-sbocchi dei tunnel

→ fenomeni acustici non facilmente oggettivabili con la metrica tradizionale su base energetica.

- Fenomeno della presenza di onde di micro-pressione in uscita provocate dall'ingresso del convoglio dalla parte opposta
- Molto ridotto in quanto i tunnel esaminati avevano mitigazioni adeguate (imbocco a becco di flauto)
- Presenza di onde di pressione sonora in bassa frequenza (<20Hz)
- Valori particolarmente rapidi di salita del Livello sonoro (dB/s) per i treni in uscita dal tunnel

Ricerca di parametri non convenzionali per oggettivare un possibile disturbo acustico, adottabili come buoni descrittori affiancandosi ai parametri più tradizionali

- curva di ponderazione "G"
- tempo di salita del Livello sonoro (onset rate in dB/s)
- valore del fattore di cresta del segnale
- presenza di modulazione in bassa frequenza (Fluctuation Strength).

Previsioni di impatto: i valori di LASmax e SEL non descrivono la fenomenologia complessa qui presentata e sarebbero da considerare altri parametri, sia a metrica tradizionale sia non-convenzionale.

Tabella relativa ad alcuni parametri non-convenzionali e ai relativi valori di attenzione, utili al fine di prevenire la possibile formazione di un disturbo acustico o per verificarne l'effettiva esistenza.

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 ²
Dato aggiuntivo	variazione non progressiva della bocca del tunnel	Non a becco di flauto
Dato di base	SEL	
Dato aggiuntivo	L_{max} con ponderazioni A e Lin e costanti Slow e Impulse	
Dato aggiuntivo	$L_{eq,A}$ sul tempo effettivo di passaggio del treno	
Dato aggiuntivo	$L_{eq,A}$ (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	$L_{p,G} > 94dB$ (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