

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. ARCHITETTURA, AMBIENTE E TERRITORIO

S.O. AMBIENTE

PROGETTO FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA

COLLEGAMENTO LAMEZIA T. – CATANZARO.

ELETTRIFICAZIONE TRATTA LAMEZIA T. – CATANZARO L. E

VELOCIZZAZIONE TRATTA LAMEZIA T. – SETTINGIANO

**STUDIO ACUSTICO E VIBRAZIONALE
RELAZIONE GENERALE**

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RC0Y 01 R 22 RG IM0004 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	A. Ventimiglia <i>A. Ventimiglia</i>	Luglio 2021	A. Corvaja <i>A. Corvaja</i>	Luglio 2021	I. D'Amore	Luglio 2021	C. Ercolani <i>C. Ercolani</i> PER EMISSIONE ITALFERR S.p.A. Dott.ssa Carolina Ercolani S.O. Ambiente

File: RC0Y.01.R.22.RG.IM.0000.001A

n. Elab.: x

INDICE

Sommario

1	PREMESSA	4
2	RIFERIMENTI NORMATIVI	7
2.1	Legge Quadro 447/95	7
2.2	D.P.R. 459/98	9
2.3	D.P.R. 142/04	10
2.4	Decreto per la predisposizione degli interventi antirumore da parte dei gestori delle infrastrutture (DM 29/11/2000)	12
3	CONCORSUALITÀ DELLE SORGENTI DI RUMORE PRESENTI SUL TERRITORIO	14
4	LIMITI ACUSTICI E APPLICAZIONE DELLE CONCORSUALITÀ	16
5	LIMITI ACUSTICI E AREE NATURALISTICHE E PARCHI	19
6	LIMITI ACUSTICI E ZONIZZAZIONI ACUSTICHE DEI COMUNI INTERESSATI	20
7	ILLUSTRAZIONE DELLE TECNICHE PREVISIONALI ADOTTATE	22
7.1	Dati di input del modello	23
7.1.1	Modello di esercizio	24
7.1.2	Emissioni dei rotabili	24
8	CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA ANTE OPERAM	25
8.1	Modello di Esercizio Attuale	25
8.2	Modello di Esercizio delle altre linee	27
9	GLI IMPATTI CON LA REALIZZAZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO	31
9.1	Modello di Esercizio di progetto	31
9.2	Considerazioni sui livelli sonori <i>Post Operam</i> - Ante Mitigazione	33
10	METODI PER IL CONTENIMENTO DELL'INQUINAMENTO ACUSTICO	34
10.1	Interventi alternativi di mitigazione del rumore ferroviario	34

10.2	Requisiti acustici	36
10.3	Descrizione delle barriere antirumore	38
10.4	Gli interventi sugli edifici	38
11	LE OPERE DI MITIGAZIONE SUL TERRITORIO E I LIVELLI ACUSTICI <i>POST MITIGAZIONE</i>	41
12	STUDIO VIBRAZIONALE	44
13	RIFERIMENTI NORMATIVI	45
13.1	Il quadro delle norme di riferimento	45
13.2	ISO2631 "Valutazione sull'esposizione del corpo umano alle vibrazioni"	45
13.3	UNI 9614:1990 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"	
13.4	UNI 9916:2014 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"	
14	AREA DI STUDIO	50
14.1	Inquadramento territoriale	50
14.2	Inquadramento geologico	50
15	INDAGINI VIBRAZIONALI	59
15.1	Rilievi di vibrazioni	59
15.2	Analisi dei rilievi	61
15.2.1	Entità vibrazionale e relativa variabilità dei transiti ferroviari	61
16	STUDIO DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI	62
16.1	Le vibrazioni indotte in fase di esercizio	62
16.2	Caratterizzazione della sorgente di vibrazioni	63
16.2.1	Interazione ruota-rotaia	63
16.2.2	Velocità dei treni	65
16.2.3	Corpo ferroviario	65
16.3	La propagazione delle vibrazioni nel terreno	66
16.4	La propagazione delle vibrazioni nelle strutture edilizie	72
16.4.1	Risposta degli edifici alle vibrazioni	72

16.4.2 Accoppiamento terreno – fondazioni edificio	74
16.4.3 Trasmissione attraverso l'edificio	75
16.4.4 Risonanze strutturali dei solai	75
16.4.5 Individuazione delle vibrazioni trasmesse a ciascun edificio e stima della risposta	
16.4.6 Rumore trasmesso per via solida dalle strutture	78
17 LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	80
17.1 Previsione dell'impatto in fase di esercizio	80
17.2 Traffico di esercizio	81
17.3 Livelli vibrazionali indotti	81
17.3.1 Individuazione dei livelli emissivi	81
17.3.2 Livello di emissione massima	82
17.3.3 Livello di emissione complessivo	83
17.4 Individuazione delle potenziali aree critiche	86

1 PREMESSA

Il presente documento contiene i risultati dello studio relativo all'impatto acustico E vibrazionale prodotto dall'elettificazione e dalla velocizzazione della linea Lamezia Terme – Settingiano – Catanzaro Lido.

Il progetto, in particolare, prevede la Velocizzazione della tratta attuale Lamezia Terme C.le – Settingiano con interventi diffusi di modifica della geometria delle curve esistenti (aumento sopraelevazioni e/o varianti di tracciato in sede) per una lunghezza di circa 29 km.

Inoltre, sulla Lamezia Terme Centrale – Catanzaro Lido, a semplice binario, è previsto un intervento di elettificazione dell'attuale linea, che si sviluppa per un'estesa di circa 43 km (dalla pk 0+000 alla pk 43+160).

Di seguito sono sintetizzate le tratte oggetto di rettifica di tracciato con varianti piano altimetriche del tracciato esistente:

VELOCIZZAZIONE TRAMITE VARIANTI DI TRACCIATO			
Nome intervento	Curva compresa nell'intervento	Sviluppo intervento (m)	Velocità esistente / velocità di progetto (Km/h)
VARIANTE 1	CURVA 2	955	80 / 140
VARIANTE 2	CURVA 3	1090	80 / 140
VARIANTE 3	CURVA 4	710	80 / 140
VARIANTE 4	CURVA 5	600	80 / 140
VARIANTE 5	CURVA 20a e 20b		30 / 110-140
VARIANTE 6	CURVA 21	1592	80 / 140
VARIANTE 7	CURVE 22, 23 e 24	1108	80 / 140
VARIANTE 8	CURVA 27	454	80 / 140
VARIANTE 9	CURVE 28 e 29	924	80 / 140

Figura 1-1 Interventi di progetto: primo elenco

Vista la limitata disponibilità del finanziamento, che non coprirebbe la velocizzazione di tutta la Linea, si è reso necessario individuare dei tratti compatibili con tale finanziamento e che offrissero un buon recupero dei tempi di percorrenza. All'interno di tale scenario si è dato quindi seguito allo sviluppo della progettazione dei seguenti tratti:

- km 10÷13 tra le stazioni di Nicastro e Feroletto;
- km 19÷24 tra le stazioni di Feroletto e Marcellinara;
- km 27 ÷ 29+310 tra le stazioni di Marcellinara e Settingiano.

Nella seguente tabella sono riportate le varianti interessate dalle tratte individuate per lo sviluppo della progettazione.

Tratta intervento	Tratta intervento	Nome intervento	Curva compresa nell'intervento	Velocità esistente / velocità di progetto (Km/h)
km 10+13	Velocizzazione tramite aumento della sopraelevazione	Variante 10	Curva 7	80 / 90
		Variante 10	Curva 8	80 / 90
		Variante 10	Curva 9	80 / 90
		Variante 10	Curva 10	80 / 90
km 19+24	Velocizzazione tramite varianti di tracciato	Variante 5	Curva 20a e 20b	30 / 110-140
		Variante 6	Curva 21	80 / 140
		Variante 7	Curva 22-23-24	80 / 140
km 27 + 29+310	Velocizzazione tramite varianti di tracciato	Variante 8	Curva 27	80 / 140
		Variante 9	Curva 28 e Curva 29	80 / 140

Figura 1-2 Interventi di progetto: lista aggiornata

L'iter metodologico seguito -nel rispetto del Manuale di Progettazione RFI delle Opere Civili cod. RFI DTC SI AM MA IFS 001 D del 31.12.2020 può essere schematizzato secondo le fasi di lavoro di seguito riportate:

- Individuazione dei valori limite di immissione secondo il DPR 459/98 (decreto sul rumore ferroviario), il DMA 29/11/2000 (piani di contenimento e di risanamento acustico) e DPR 142/04 (decreto sul rumore stradale) per tener conto della concorsualità del rumore prodotto dalle infrastrutture stradali presenti all'interno dell'ambito di studio. Al di fuori della fascia di pertinenza acustica ferroviaria si analizzano i limiti dettati dalle Classificazioni Acustiche dei Comuni interessati.
- Caratterizzazione ante operam. In questa fase dello studio è stato analizzato il territorio allo stato attuale (situazione ante operam) identificando gli ingombri e le volumetrie di tutti i fabbricati presenti potenzialmente impattati. Tali analisi sono state estese fino a 300m per lato, per tener conto dei primi fronti edificati presenti al di fuori della fascia di pertinenza ferroviaria. Con l'ausilio del modello di simulazione SoundPLAN si è proceduto alla valutazione dei livelli acustici nello scenario Ante Operam.
- Livelli acustici ante mitigazione. Con l'ausilio del modello di simulazione SoundPLAN si è proceduto alla valutazione dei livelli acustici con la realizzazione del progetto in esame. Gli algoritmi di calcolo scelti per valutare la propagazione dell'onda sonora emessa dall'infrastruttura ferroviaria fanno riferimento al metodo Schall 03, DIN 18005. I risultati del modello di simulazione sono stati quindi messi a confronto con i limiti acustici della linea, eventualmente ridotti per la presenza infrastrutture concorrenti così come previsto dal D.M. 29 novembre 2000.
- Metodi per il contenimento dell'inquinamento acustico. In questa parte dello studio sono state descritte le tipologie di intervento da adottare indicandone i requisiti acustici minimi.
- Individuazione degli interventi di mitigazione. L'obiettivo è stato quello di abbattere le eccedenze acustiche dai limiti di norma mediante l'inserimento di barriere antirumore. Come anticipato, *sono state a tale scopo previste barriere di altezza 2m sul piano del ferro*.

Il presente documento è stato redatto dalla dott.ssa Alessandra Ventimiglia, iscritta all'Elenco Nazionale dei Tecnici Competenti in Acustica N.7746 (già iscritta nell'elenco dei Tecnici

Competenti in Acustica Ambientale della Regione Lazio n.1085). Gli elaborati correlati, elencati nella seguente tabella, sono stati redatti e/o verificati dalla stessa.

Elaborato	Codifica
Mappe Acustiche Ante Operam – Periodi Diurno e Notturno	RC0Y01R22N5IM0004001A÷015A
Mappe Acustiche Post Operam – Periodi Diurno e Notturno	RC0Y01R22N5IM0004016A÷030A
Mappe Acustiche Post Mitigazione – Periodi Diurno e Notturno	RC0Y01R22N5IM0004031A÷045A

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

2.1 Legge Quadro 447/95

In data 26/10/1995, viene pubblicata la Legge 26 ottobre 1995 n° 447 «*Legge quadro sull'inquinamento acustico*».

Detto strumento normativo, che sostituisce il D.P.C.M. 1 marzo 1991, affronta il tema dell'inquinamento acustico del territorio, ricomprendendo al suo interno le definizioni fondamentali e definendo competenze ed adempimenti necessari alla tutela dell'ambiente dal rumore.

La Legge Quadro indica le metodiche da adottare per il contenimento della problematica (piani e disposizioni in materia d'impatto acustico), e fornisce all'art. 2 comma 1 una definizione del fenomeno, dell'ambito di applicazione della normativa e delle sorgenti.

In particolare, la Legge Quadro fa riferimento agli **ambienti abitativi**, definiti come: «*ogni ambiente interno ad un edificio destinato alla permanenza di persone o comunità ed utilizzato per le diverse attività umane, fatta eccezione per gli ambienti destinati ad attività produttive per i quali resta ferma la disciplina di cui al D.L. 15/08/91, n.277, salvo per quanto concerne l'immissione di rumore da sorgenti sonore esterne ai locali in cui si svolgono le attività produttive*».

Nella definizione riportata risultano quindi comprese le residenze e comunque tutti quegli ambienti ove risiedono comunità e destinati alle diverse attività umane, ai quali non viene in genere ristretto il concetto di ambiente abitativo.

Sempre all'interno dell'art. 2 comma 1. la Legge Quadro fornisce la definizione di sorgente di rumore suddividendole tra *sorgenti fisse* e *sorgenti mobili*.

In particolare, vengono inserite tra le **sorgenti fisse** anche le infrastrutture stradali e ferroviarie:

«... *le installazioni unite agli immobili anche in via transitoria il cui uso produca emissioni sonore, le infrastrutture stradali, ferroviarie, commerciali; ...; le aree adibite ad attività sportive e ricreative.*»

La Legge Quadro ribadisce la necessità che i comuni predispongano una **zonizzazione acustica comunale**. Le aree previste per la zonizzazione del territorio sono sei e sono così caratterizzate:

I - AREE PARTICOLARMENTE PROTETTE

Rientrano in questa classe le aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per l'utilizzazione, quali aree ospedaliere, scolastiche, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse naturalistico, ricreativo, culturale, archeologico, parchi naturali e urbani;

II - AREE PREVALENTEMENTE RESIDENZIALI

Rientrano in questa classe le aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, limitata presenza di attività commerciali, totale assenza di attività industriali ed artigianali;

III - AREE DI TIPO MISTO

Rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale e di attraversamento, con media densità di popolazione, con presenza di attività commerciali, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali, interessate da attività che impiegano macchine operatrici;

IV - AREE DI INTENSA ATTIVITÀ UMANA

Rientrano in questa classe:

- a) le aree urbane interessate da intenso traffico veicolare, con elevata presenza di attività commerciali ed uffici, presenze di attività artigianali, con dotazione di impianti di servizi a ciclo continuo;
- b) *le aree in prossimità* di strade di grande comunicazione, *di linee ferroviarie*, di aeroporti e porti;
- c) le aree con limitata presenza di piccole industrie;

V - AREE PREVALENTEMENTE INDUSTRIALI

Rientrano in questa classe le aree interessate da insediamenti industriali e con scarsità di abitazioni;

VI - AREE ESCLUSIVAMENTE INDUSTRIALI

Rientrano in questa classe le aree interessate da industrie a ciclo continuo prive di insediamenti abitativi.

Un aspetto innovativo della Legge Quadro è invece l'introduzione, accanto al criterio valore limite assoluto di immissione nell'ambiente e del criterio differenziale previsti dall'ex D.P.C.M., di altri metodi di valutazione dello stato e dell'inquinamento acustico ambientale, che di seguito vengono elencati:

- criterio del valore limite massimo di emissione;
- criterio del valore di attenzione;
- criterio del valore di qualità.

Si rileva pertanto che la Legge analizza sotto diversi aspetti la problematica acustica imponendo, accanto ai limiti di tutela per i ricettori, dei limiti sulle emissioni delle specifiche sorgenti e degli obiettivi di qualità da perseguire nel tempo.

Per l'individuazione dei limiti di applicabilità e delle soglie numeriche relative a ciascun criterio di valutazione, la Legge 447/95 demanda al D.P.C.M. del 14/11/1997 «*Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore*».

Da tale D.P.C.M. resta, però, ancora una volta esclusa la regolamentazione delle infrastrutture di trasporto.

2.2 D.P.R. 459/98

Per quanto concerne la disciplina del rumore ferroviario, il D.P.C.M del 14/11/97, coerentemente con quanto previsto dalla Legge Quadro 447/95, rimanda pertanto al D.P.R. n. 459 del 18/11/98.

Di seguito, si sintetizzano i contenuti salienti del regolamento.

Per le Infrastrutture esistenti e di nuova realizzazione con velocità di progetto non superiore a 200 km/h, a partire dalla mezzera dei binari esterni e per ciascun lato, deve essere considerata una fascia di pertinenza dell'infrastruttura di ampiezza pari a 250 m, suddivisa a sua volta in due fasce: la prima, più vicina all'infrastruttura, della larghezza di m 100, denominata fascia A; la seconda, più distante dall'infrastruttura, della larghezza di m 150, denominata fascia B.

All'interno di tali fasce i valori limite assoluti di immissione del rumore prodotto dall'infrastruttura ferroviaria sono i seguenti:

1. Per scuole, ospedali, case di cura, e case di riposo il limite è di 50 dBA nel periodo diurno e di 40 dBA nel periodo notturno. Per le scuole vale solo il limite diurno;
2. Per i ricettori posti all'interno della fascia A di pertinenza ferroviaria, il limite è di 70 dBA nel periodo diurno e di 60 dBA nel periodo notturno;
3. Per i ricettori posti all'interno della fascia B di pertinenza ferroviaria, il limite è di 65 dBA nel periodo diurno e di 55 dBA nel periodo notturno;
4. Oltre la fascia di pertinenza, valgono i limiti previsti dai piani di zonizzazione acustica comunali

Il rispetto dei limiti massimi di immissione, entro o al di fuori della fascia di pertinenza, devono essere verificati con misure sugli interi periodi di riferimento diurno (h. 6÷22) e notturno (h. 22÷6), in facciata degli edifici e ad 1 m dalla stessa, in corrispondenza dei punti di maggiore esposizione.

Inoltre, qualora, in base a considerazioni tecniche, economiche o di carattere ambientale, il raggiungimento dei predetti limiti non sia conseguibile con interventi sull'infrastruttura, si deve procedere con interventi diretti sui ricettori.

In questo caso, all'interno dei fabbricati, dovranno essere ottenuti i seguenti livelli sonori interni:

1. 35 dBA di Leq nel periodo notturno per ospedali, case di cura, e case di riposo;
2. 40 dBA di Leq nel periodo notturno per tutti gli altri ricettori;
3. 45 dBA di Leq nel periodo diurno per le scuole.

I valori sopra indicati dovranno essere misurati al centro della stanza a finestre chiuse a 1,5 m di altezza sul pavimento.

2.3 D.P.R. 142/04

In data 1 Giugno 2004 viene pubblicato il Decreto del Presidente della Repubblica 30 marzo 2004, n. 142, - "Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell'inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare, a norma dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n. 447".

Il decreto per le infrastrutture stradali, così come previsto dal suddetto art. 5 del D.P.C.M. 14/11/1997, fissa le fasce di pertinenza a partire dal confine dell'infrastruttura (art. 3 comma 3) ed i limiti di immissione che dovranno essere rispettati.

Il D.P.R. 142/04 interessa come campo di applicazione le seguenti infrastrutture stradali così come definite dall'Art. 2 del Codice della Strada (D.L.vo n. 285 del 30/04/1992) e secondo le Norme CNR 1980 e direttive PUT per i sottotipi individuati ai fini acustici.

Sono in particolare indicate le seguenti classi di strade:

A - Autostrade

B - Strade extraurbane principali

C - Strade extraurbane secondarie (suddivise in sottocategorie ai sensi del D.M. 5.11.02 per le strade di nuova realizzazione e secondo le norme CNR 1980 e direttive PUT per le strade esistenti e assimilabili)

D - Strade urbane di scorrimento (suddivise in sottocategorie secondo le norme CNR 1980 e direttive PUT per le strade esistenti e assimilabili)

E - Strade urbane di quartiere

F - Strade locali

Il Decreto individua, diversamente per le strade di nuova realizzazione o per le strade esistenti e assimilabili, l'ampiezza delle fasce di pertinenza ed i relativi limiti associati per ogni sottotipo di infrastruttura stradale, come riportato nelle tabelle seguenti:

Strade di nuova realizzazione

TIPI DI STRADA Secondo codice della strada	SOTTOTIPI A FINI ACUSTICI (secondo D.M. 5.11.02 - Norme funz. E geom. Per la costruzione delle strade)	Ampiezza fascia di pertinenza acustica (m)	Scuole*, ospedali, case di cura e di riposo		Altri Ricettori	
			Diurno dB(a)	Notturmo dB(a)	Diurno dB(a)	Notturmo dB(a)
A - autostrada		250	50	40	65	55
B - extraurbane principali		250	50	40	65	55
C - extraurbane secondarie	C 1	250	50	40	65	55
	C 2	150	50	40	65	55
D - urbane di scorrimento		100	50	40	65	55
E - urbane di quartiere		30	definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in tabella C allegata al D.P.C.M. in data 14 novembre 1997 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane, come previsto dall'art. 6, comma 1, lettera a), della legge n. 447 del 1995.			
F - locali		30				

* per le scuole vale il solo limite diurno

Strade esistenti e assimilabili (ampliamento in sede, affiancamenti e varianti)

TIPI DI STRADA Secondo codice della strada	SOTTOTIPI A FINI ACUSTICI (secondo Norme CNR 1980 e direttive PUT)	Ampiezza fascia di pertinenza acustica (m)	Scuole*, ospedali, case di cura e di riposo		Altri Ricettori	
			Diurno dB(a)	Notturmo dB(a)	Diurno dB(a)	Notturmo dB(a)
A - autostrada		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
B - extraurbane principali		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
C - extraurbane secondarie	Ca (strade a carreggiate separate e tipo IV CNR 1980)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
	Cb (tutte le strade extraurbane secondarie)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		50 (fascia B)			65	55
D - urbane di scorrimento	Da (strade a carreggiate separate e interquartiere)	100	50	40	70	60
	Db (tutte le strade urbane di scorrimento)	100			65	55
E - urbane di quartiere		30	definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in tabella C allegata al D.P.C.M. in data 14 novembre 1997 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane, come previsto dall'art. 5, comma 1, lettera a), della legge n. 447 del 1995.			
F - locali		30				

* per le scuole vale il solo limite diurno

Per quanto concerne il rispetto dei limiti, il DPR 142 stabilisce che lo stesso sia verificato in facciata degli edifici ad 1 metro dalla stessa ed in corrispondenza dei punti di maggiore esposizione.

Per i recettori inclusi nella fascia di pertinenza acustica, devono essere individuate ed adottate opere di mitigazione sulla sorgente, lungo la via di propagazione del rumore e direttamente sul ricettore, per ridurre l'inquinamento acustico prodotto dall'esercizio dell'infrastruttura, con l'adozione delle migliori tecnologie disponibili, tenuto conto delle implicazioni di carattere tecnico-economico.

Ove non sia tecnicamente conseguibile il rispetto dei limiti con gli interventi sull'infrastruttura, ovvero qualora in base a valutazioni tecniche, economiche o di carattere ambientale si evidenzi l'opportunità di procedere ad interventi diretti sui recettori, deve essere assicurato il rispetto dei seguenti limiti:

- a) 35 dBA - Leq notturno per ospedali, case di cura e case di riposo;
- b) 40 dBA - Leq notturno per tutti gli altri ricettori di carattere abitativo;
- c) 45 dBA - Leq diurno per le scuole.

Tali valori sono valutati al centro della stanza, a finestre chiuse, all'altezza di 1,5 metri dal pavimento.

2.4 Decreto per la predisposizione degli interventi antirumore da parte dei gestori delle infrastrutture (DM 29/11/2000)

In data 6 Dicembre 2000, viene pubblicato il Decreto del Ministero dell'Ambiente n.141 del 29 Novembre 2000 "*Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore*".

Detto strumento normativo, stabilisce i criteri tecnici per la predisposizione degli interventi antirumore, definendo, oltre agli obblighi del gestore, i criteri di priorità degli interventi, riportando inoltre in Allegato (Allegato 2) i criteri di progettazione degli interventi stessi (Allegato 3 – Tabella 1), l'indice dei costi di intervento e i criteri di valutazione delle percentuali dell'attività di risanamento da ascrivere a più sorgenti sonore che immettono rumore in uno stesso punto.

In particolare, all'art. 4 "Obiettivi dell'attività di risanamento", il Decreto stabilisce che le attività di risanamento debbano conseguire il rispetto dei valori limite del rumore prodotto dalle infrastrutture di trasporto così come stabiliti dai regolamenti di esecuzione di cui all'art. 11 della Legge Quadro.

Nel caso di sovrapposizione di più fasce di pertinenza, il rumore immesso non deve superare complessivamente il maggiore fra i valori limite di immissione previsti per le singole infrastrutture.

Per quanto concerne le priorità di intervento, nell'Allegato 1 viene riportato la seguente relazione per il calcolo dell'indice di priorità P,

$$P = \sum R_i (L_i - L_i^*) \quad (I).$$

nella quale:

R_i è il numero di abitanti nella zona i-esima,

$(L_i - L_i^*)$ è la più elevata delle differenze tra i valori di esposizione previsti e i limiti imposti dalla normativa vigente all'interno di una singola zona;

Relativamente alle infrastrutture concorrenti, il Decreto stabilisce che l'attività di risanamento sia effettuata secondo un criterio di valutazione riportato nell'allegato 4 oppure attraverso un accordo fra i medesimi soggetti, le regioni e le province autonome, i comuni e le province territorialmente competenti.

Il criterio indicato dal decreto nell'Allegato 4 viene introduce il concetto di "Livello di soglia", espresso mediante la relazione

$$L_s = L_{zona} - 10 \cdot \log_{10} N \quad (II)$$

e definito come "il livello cui deve pervenire, a seguito di risanamento, ogni singola sorgente, avente rumore egualmente ponderato.

Nella relazione (II) il termine N rappresenta il numero delle sorgenti interessate al risanamento, e L_{zona} è il limite assoluto di immissione. Se il livello equivalente di rumore immesso da una sorgente è inferiore di 10 dBA rispetto al valore della sorgente avente massima immissione ed inferiore al livello di soglia calcolato con il numero di sorgenti diminuito di 1, il contributo della sorgente stessa può essere trascurato.

3 CONCORSUALITÀ DELLE SORGENTI DI RUMORE PRESENTI SUL TERRITORIO

La verifica di concorsualità, come indicata dall'Allegato 4 del DM 29/11/2000 "Criterio di valutazione dell'attività di risanamento da ascrivere a più sorgenti sonore che immettono rumore in un punto", richiede in primo luogo l'identificazione degli ambiti interessati dalle fasce di pertinenza dell'infrastruttura principale e dalle infrastrutture secondarie presenti sul territorio. La verifica è di tipo geometrico e viene svolta considerando le aree di sovrapposizione tra le fasce di pertinenza delle infrastrutture di trasporto stradali e ferroviarie potenzialmente concorsuali.

Se il ricettore è compreso all'interno di un'area di concorsualità è in primo luogo necessario verificare la significatività della sorgente concorsuale.

La sorgente concorsuale non è sicuramente significativa e può essere trascurata, se la differenza fra il livello di rumore causato dalla sorgente principale e quello causato dalla sorgente secondaria è superiore a 10 dBA.

Nell'area di progetto le infrastrutture che possono essere ritenute concorsuali sono:

- Autostrada A3 – Strada di categoria A: fascia A 100 m – fascia B 150 m
- SP107 – Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- SS18d – Strada urbana di categoria Db nel tratto interessato: fascia "B" (limiti acustici da fascia B) 100m
- Via Giovanni De Sensi Lamezia Terme – Strada urbana di categoria Da nel tratto interessato: fascia A 100m
- SS109 – Strada urbana di categoria Db nel tratto interessato: fascia "B" (limiti acustici da fascia B) 100m
- Via Armando Scarpino Lamezia Terme – Strada urbana di categoria Da nel tratto interessato: fascia A 100m
- Via Monsignor Azio Davoli Lamezia Terme – Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- SP78 - Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- SP79 – Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- SP85 – Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- SP80 – Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- SP84 – Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- SS280 – Strada di categoria B: fascia A 100 m – fascia B 150 m
- SS19DIR – Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- Via Campo dei Fiori Settingiano – Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- SS280dir – Strada di categoria B di nuova realizzazione: fascia unica "B" (limiti acustici da fascia B)250 m

- SP46 – Strada di categoria Cb nel tratto considerato: fascia A 100m – fascia B 50m
- SS106 VarA – Strada di categoria B: fascia A 100 m – fascia B 150 m
-
- SS 106 – Strada urbana di categoria Db nel tratto interessato: fascia A 100m
- SS19g – Strada urbana di categoria Db nel tratto interessato: fascia “B” 100m

Le fasce di pertinenza considerate per tali infrastrutture) sono riportate nelle Mappe Acustiche Post Operam e Post Mitigazione (elaborati RC0Y01R22N5IM0004016A÷45A).

4 LIMITI ACUSTICI E APPLICAZIONE DELLE CONCURSUALITÀ

Per individuare i limiti che ciascun ricettore deve rispettare si considera quanto indicato nel Decreto Attuativo per la regolamentazione dei limiti d'immissione delle infrastrutture ferroviarie del 18/11/98 n° 459 "Regolamento recante norme di esecuzione dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n° 447, e nel DMA 29/11/2000.

Come evidenziato nei riferimenti normativi, i limiti di riferimento variano in funzione del tipo di ricettore cui si fa riferimento e del numero di sorgenti presenti sul territorio che possono definirsi concorsuali con quella oggetto di analisi.

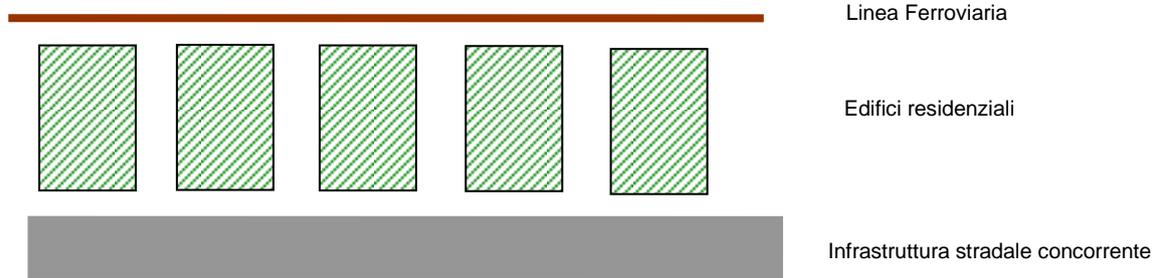
Per il tipo di ricettori, alcuni di essi assumono i limiti sia nel periodo diurno, sia nel periodo notturno, mentre altri nel solo periodo diurno: ciò perché il limite di riferimento è relativo al periodo in cui effettivamente l'edificio in questione è utilizzato in maniera continuativa.

Tabella A – Valori di riferimento in assenza di sorgenti concorsuali

Tipo di ricettore	Fascia A (0-100 m)		Fascia B (100-250 m)	
	Periodo diurno dBA	Periodo notturno dBA	Periodo diurno dBA	Periodo notturno dBA
Residenziale	70	60	65	55
Terziario	70	-	65	-
Ospedale/Casa di Cura	50	40	50	40
Scuola	50	-	50	-
Altro (utilizzo saltuario)	-	-	-	-

Si fa presente che a prescindere dall'appartenenza geometrica ad una determinata fascia di pertinenza acustica, di fatto per il ricettore non dovrebbero assumere rilevanza le infrastrutture potenzialmente concorrenti che non insistono sullo stesso fronte rispetto all'infrastruttura principale oggetto di analisi.

Infatti, ove la linea ferroviaria e l'infrastruttura stradale concorrente insistono su fronti opposti di nuclei di residenziali consolidati, la presenza stessa dell'edificato costituirebbe un ostacolo alla propagazione dell'uno o dell'altro contributo acustico e pertanto non vi dovrebbe essere concorsualità effettiva.



Nel complessivo dei ricettori, si riscontrano casi di fabbricati esposti al rumore di una o due sorgenti. Nel primo caso e cioè nel caso di ricettori esposti al solo rumore della linea ferroviaria in questione, si applicano i valori limite sintetizzati nella Tabella A prima riportata. Mentre nel caso di concorsualità fra due o più infrastrutture i valori limite di riferimento sono stati calcolati imponendo che la somma dei contributi *egualmente ponderati* non superasse il valore della sorgente avente massima immissione.

Nell'area oggetto di studio le infrastrutture potenzialmente concorrenti presentano limiti differenziati in funzione della tipologia di infrastruttura. L'Allegato 4 del DM 29/11/2000 riporta come calcolare i limiti di soglia nelle aree di sovrapposizione tra le fasce di infrastrutture concorsuali.

Nella seguente tabella si riportano le possibili combinazioni di concorsualità indicando con la lettera "A" la fascia di pertinenza acustica caratterizzata dal valore limite di 70 dBA diurni e 60 dBA notturni, con la lettera "B" la fascia di pertinenza acustica caratterizzata dal valore limite e 65 dBA diurni e 55 dBA notturni.

Tabella B – Valori di soglia in presenza di sorgenti concorsuali

Fasce di pertinenza			Valori di soglia dell'infrastruttura ferroviaria	
Linea ferroviaria	Prima infrastruttura concorsuale	Seconda infrastruttura concorsuale	Diurno dBA	Notturmo dBA
A	A	-	67,0	57,0
A	B	-	67,0	57,0
B	B	-	62,0	52,0
B	A	-	67,0	57,0
A	A	A	65,2	55,2
A	A	B	65,2	55,2
A	B	A	65,2	55,2
A	B	B	65,2	55,2
B	A	A	65,2	55,2

Fasce di pertinenza			Valori di soglia dell'infrastruttura ferroviaria	
Linea ferroviaria	Prima infrastruttura concorsuale	Seconda infrastruttura concorsuale	Diurno dBA	Notturmo dBA
B	A	B	65,2	55,2
B	B	A	65,2	55,2
B	B	B	60,2	50,2

I limiti riportati in tabella si riferiscono a edifici residenziali; in caso di edifici adibiti ad attività commerciali o uffici saranno considerati unicamente i valori diurni, in quanto relativi al periodo di riferimento in cui è prevista la permanenza di persone.

5 LIMITI ACUSTICI E AREE NATURALISTICHE E PARCHI

Per le aree naturalistiche e i parchi pubblici, ci si attiene a quanto previsto dal Manuale di Progettazione RFI delle Opere Civili: deve essere garantito il rispetto dei limiti previsti dalle norme nel solo periodo diurno in analogia a quanto viene richiesto per le scuole, in corrispondenza di punti significativi (zone maggiormente esposte e caratterizzate dalla presenza non saltuaria delle persone) da individuare all'interno di tali aree.

All'interno dell'ambito di studio non è stata rilevata la presenza di parchi o aree naturali.

6 LIMITI ACUSTICI E ZONIZZAZIONI ACUSTICHE DEI COMUNI INTERESSATI

Per l'articolo 4 e 5 del DPR 459/98 i ricettori che ricadono al di fuori della fascia di pertinenza acustica dell'infrastruttura devono rispettare i limiti della tabella C del DPCM 14/11/97, ossia i limiti imposti dalle zonizzazioni acustiche comunali attraversate dalla linea ferroviaria. La linea di progetto attraversa i Comuni di Lamezia Terme (CZ), Feroletto Antico (CZ), Pianopoli (CZ), Amato, Marcellinara (CZ), Settingiano (CZ), Borgia (CZ) e Catanzaro. Le fasce di pertinenza acustica e l'ambito di studio di progetto si estendono anche al di là dei Comuni menzionati fino al territorio dei comuni di Miglierina (CZ), Tiriolo (CZ), Caraffa di Catanzaro (CZ) e San Floro (CZ).

Di questi Comuni, in ottemperanza a quanto previsto dalla Legge Quadro 447/95, alcuni (Comune di Lamezia Terme, Pianopoli, Amato, Settingiano, Caraffa di Catanzaro, San Floro e Catanzaro), sono provvisti di Piano di zonizzazione acustica. Nella tabella seguente si riporta lo stato di approvazione dei suddetti piani, aggiornato a giugno 2021.

<i>Comune</i>	<i>Delibera</i>
Comune di Lamezia Terme (CZ)	Approvazione: Deliberazione della Commissione straordinaria n. 31 del 01.04.2019
Comune di Pianopoli (CZ)	Approvazione: Deliberazione consiliare n. 40 del 29.11.2016
Comune di Amato (CZ)	Adozione: Deliberazione di Consiglio Comunale n. 9 del 16.04.2013
Comune di Settingiano (CZ)	Adozione: Delibera Consiglio Comunale n. 37 del 30.11.2018
Comune di Caraffa di Catanzaro (CZ)	-
Comune di San Floro (CZ)	Adozione: Delibera Consiglio Comunale n. 12 del 08.04.2019
Comune di Catanzaro (CZ)	Approvazione: Delibera Consiglio Comunale n. 7 del 13.02.2003

I piani di classificazione acustica comunali sono stati riportati nelle Mappe acustiche Post Operam e Post Mitigazione (elaborati RC0Y01R22N5IM0004016A÷45A).

Per quanto concerne la classificazione del territorio, i diversi Comuni hanno stilato piani molto differenti in parte a causa della varietà delle aree attraversate dalla ferrovia, in parte per un diverso approccio metodologico.

I restanti Comuni di Feroletto Antico (CZ), Marcellinara (CZ), Miglierina (CZ), Tiriolo (CZ) e Borgia (CZ) non dispongono attualmente di un Piano Comunale di Classificazione Acustica (P.C.C.A); pertanto, al fine di verificare il rispetto dei livelli sonori indotti dalla realizzazione e dall'esercizio dell'impianto e dalle opere connesse, occorre far riferimento al D.P.C.M. 01/03/1991 (art. 8 c.1 D.P.C.M. 14/11/97 e art. 6 D.P.C.M. 01/03/91) che prevede dei limiti di accettabilità per differenti classi di destinazione d'uso, riportati nella seguente Tabella:

Classi di destinazione d'uso	Limite Diurno Leq (A)	Limite Notturno Leq (A)
Territorio nazionale	70	60

Classi di destinazione d'uso	Limite Diurno Leq (A)	Limite Notturno Leq (A)
Zona Urbanistica A*	65	55
Zona Urbanistica B*	60	50
Zona esclusivamente industriale	70	70

* Zone di cui all'art. 2 del decreto ministeriale 2 aprile 1968

7 ILLUSTRAZIONE DELLE TECNICHE PREVISIONALI ADOTTATE

L'impatto prodotto dalle infrastrutture ferroviarie può essere valutato con l'ausilio di appositi modelli matematici di simulazione.

Un modello si basa sulla schematizzazione del fenomeno attraverso una serie di ipotesi semplificative che riconducono qualsiasi caso complesso alla somma di casi semplici e noti.

Per la caratterizzazione dello stato attuale, per la previsione dell'impatto acustico della linea in analisi e per il dimensionamento degli interventi di abbattimento del rumore è stato utilizzato il modello di simulazione SoundPLAN.

Tale modello è sviluppato dalla Braunstein & Berndt GmbH sulla base di norme e standard definiti dalle ISO da altri standards utilizzati localmente come le Shall 03 e DIN 18005 emanate della Germania Federale, le ÖAL 30 Austriache e le Nordic Kilde 130.

Grazie alla sua versatilità e ampiezza del campo applicativo, è all'attualità il Software previsionale acustico più diffuso al mondo. In Italia è in uso a centri di ricerca, Università, Agenzie per l'Ambiente, ARPA, Comuni, Società e studi di consulenza.

La peculiarità del modello SoundPLAN si basa sul metodo di calcolo per "raggi". Il sistema di calcolo fa dipartire dal ricevitore una serie di raggi ciascuno dei quali analizza la geometria della sorgente e quella del territorio, le riflessioni e la presenza di schermi.

Studiando il metodo con maggior dettaglio si vede che ad ogni raggio che parte dal ricettore viene associata una porzione di territorio e così, via via, viene coperto l'intero territorio

Quando un raggio incontra la sorgente, il modello calcola automaticamente il livello prodotto della parte intercettata. Pertanto, sorgenti lineari come strade e ferrovie vengono discretizzate in tanti singoli punti sorgente ciascuno dei quali fornisce un contributo. La somma dei contributi associati ai vari raggi va quindi a costituire il livello di rumore prodotto dall'intera sorgente sul ricettore.

I contributi forniti dai diversi raggi vengono evidenziati nei diagrammi di output. In tali schematizzazioni la lunghezza del raggio è proporzionale al contributo in rumore fornito da quella direzione.

Quando un raggio incontra una superficie riflettente come la facciata di un edificio, il modello calcola le riflessioni multiple. A tal proposito l'operatore può stabilire il numero di riflessioni massimo che deve essere calcolato ovvero la soglia di attenuazione al di sotto della quale il calcolo deve essere interrotto.

Questa metodologia di calcolo consente quindi una particolare accuratezza nella valutazione della geometria del sito e risulta quindi molto preciso ed efficace in campo urbano, dove l'elevata densità di edifici, specie se di altezza elevata, genera riflessioni multiple che producono un innalzamento dei livelli sonori.

La possibilità di inserire i dati sulla morfologia dei territori, sui ricettori e sulle infrastrutture esistenti ed in progetto mediante cartografia tridimensionale consente di schematizzare i luoghi in maniera più che mai realistica e dettagliata. Ciò a maggior ragione se si considera che, oltre alla conformazione morfologica, è possibile associare ad elementi naturali e antropici specifici comportamenti acustici. Il modello prevede infatti l'inserimento di appositi

coefficienti che tengono conto delle caratteristiche più o meno riflettenti delle facciate dei fabbricati.

7.1 Dati di input del modello

L'applicazione del modello previsionale ha richiesto l'inserimento dei dati riguardanti i seguenti aspetti:

1. morfologia del territorio
2. geometria dell'infrastruttura
3. caratteristiche dell'esercizio ferroviario con la realizzazione degli interventi in progetto;
4. emissioni acustiche dei singoli convogli.

Si nota che i dati relativi ai punti 1 e 2 (morfologia del territorio e geometria dell'infrastruttura) sono stati derivati da cartografia vettoriale appositamente prodotta per il progetto definitivo e dalle planimetrie, profili e sezioni di progetto. I dati territoriali sono stati verificati mediante i sopralluoghi in campo effettuati nel corso di elaborazione del censimento dei ricettori.

Per quanto concerne lo standard di calcolo, è stato utilizzato quello delle Deutsche Bundesbahn, sviluppato nelle norme Shall 03. I parametri di calcolo utilizzati sono invece i seguenti:

Ordine di riflessione	2	Ponderazione	dB(A)
Max raggio di ricerca [m]	5000	Imposta bonus ferrovia di 5 dB	<input type="checkbox"/>
Max.distanza riflessioni da Ric. [m]	200	Considera le superfici stradali come aree "hard" (G=0)	<input checked="" type="checkbox"/>
Max.distanza riflessioni da Srg. [m]	50		
Tolleranza (dB)	0,010		
Tolleranza rispettata per ..	risultato complessivo		

Per l'elaborazione del DGM (Digital Ground Model) sono stati implementati nel modello i seguenti elementi:

- Punti quota
- Curve di livello
- Bordi stradali
- Bordi del rilevato ferroviario

- Sommità e base di rilevati e trincee

Nei paragrafi seguenti si riportano nel dettaglio i dati di input utilizzati per l'esercizio.

7.1.1 Modello di esercizio

Di seguito si riportano nel dettaglio i dati di input utilizzati per l'esercizio ferroviario:

1. La tipologia di convogli in transito.
2. Il numero di transiti relativamente al periodo diurno e notturno per le diverse categorie di convogli.
3. Lunghezza media di ciascuna tipologia di treno

7.1.2 Emissioni dei rotabili

Le emissioni sonore da associare ad ogni tipologia di convoglio ferroviario previsto nel Modello di Esercizio attuale e futuro sono state estratte dal documento redatto da Rete Ferroviaria Italiana "Stima dei livelli sonori ai sensi del DM Ambiente 29/11/00 – Rapporto delle misure – Volume 1 – Emissioni dei treni".

In particolare, si è fatto riferimento ai dati contenuti nell'Annesso 5: *sommario SEL @ 25 m normalizzati a 100 km/h*, che di seguito vengono riportati.

Sommario SEL @ 25 m normalizzati a 100 Km/h

	dBA	63 Hz	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8K
Valore medio ALn 668	89,9	57,9	64,1	73,4	84,7	85,8	81,8	77,7	66,2
Deviazione standard	2,2	3,9	2,9	2,6	3,0	2,5	2,3	2,4	3,4
Valore medio DIR / IR	94,3	61,1	67,2	78,8	84,4	88,4	90,7	84,5	74,1
Deviazione standard	4,7	3,7	4,3	5,6	5,7	5,3	4,6	4,5	4,4
Valore medio E / EN	96,7	62,7	73,9	85,7	90,6	90,9	90,8	87,8	76,2
Deviazione standard	3,2	0,5	2,5	2,8	3,3	3,2	3,0	3,9	4,3
Valore medio ETR 450-460-480	88,9	55,5	60,5	68,3	72,9	77,7	86,9	81,9	69,5
Deviazione standard	3,8	3,4	3,6	4,9	5,0	4,5	3,9	4,0	3,9
Valore medio ETR 500	90,6	57,0	61,8	71,7	76,8	81,8	88,5	81,8	69,8
Deviazione standard	3,0	2,7	3,2	4,1	3,6	3,2	3,2	3,3	2,9
Valore medio IC	94,9	60,5	65,8	75,7	81,0	87,7	92,5	85,6	74,1
Deviazione standard	4,8	3,3	4,1	5,9	6,0	5,3	4,7	4,7	4,7
Valore medio REG	92,3	60,9	67,6	77,9	83,6	86,3	87,9	83,3	73,5
Deviazione standard	4,7	4,7	4,6	5,7	5,7	5,0	4,6	4,7	5,0
Valore medio REG-MET	86,9	53,9	63,2	74,1	79,3	81,9	81,0	77,9	69,3
Deviazione standard	4,1	3,6	3,8	4,4	4,9	4,7	3,7	3,6	3,5
Valore medio MERCI	102,5	65,3	77,1	87,7	95,5	97,7	96,3	91,9	79,8
Deviazione standard	6,2	5,6	6,8	7,5	6,9	6,9	5,3	5,6	6,0

8 CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA ANTE OPERAM

Il progetto di elettrificazione e velocizzazione della linea Lamezia Terme Centrale – Catanzaro Lido si sviluppa dal km 0 al km 43+160 circa.

Il tracciato interessa il tessuto urbano di Lamezia Terme e di Catanzaro Lido rispettivamente all'inizio e alla fine dell'intervento. La restante parte della linea attraversa aree rurali e montane con diversi tratti in galleria, in particolare quelle di maggior estensione: Gabella (pk 12+952 – 13+161), Pianopoli (pk 17+487 – 18+614), Montecavaliere (pk 18+958 – 19+932), Marcellinara (pk 25+018 – 26+781).

Al fine di delineare il clima acustico nell'ambito di progetto prima della realizzazione dell'opera, si vuole avere una stima dei livelli acustici ad oggi rilevabili in situ.

Non essendo disponibili delle misure dirette dei livelli acustici nella zona indagata, si potrebbe stimare, in prima approssimazione, che il clima acustico Ante Operam sia rappresentato dai piani di classificazione acustica. Data la disomogeneità della pianificazione nel territorio indagato (si veda il capitolo 6), si è ritenuto opportuno produrre delle mappe acustiche elaborate al fine di caratterizzare il clima acustico Ante Operam (elaborati RC0Y01R22N5IM0004001A-015A).

Le mappe sono state elaborate con il metodo delineato nel capitolo 7 *“Illustrazione delle tecniche previsionali adottate”* tramite il modello di simulazione SoundPLAN.

Le mappe riportano la stima dei livelli acustici, Leq, nel periodo notturno e diurno a 4m di altezza dal suolo nella situazione attuale, nonché le fasce di pertinenza ferroviaria attuali, per poter confrontare i livelli acustici determinati dal modello di esercizio attuale con i limiti di norma.

Per lo scenario Ante Operam è stato utilizzato il tracciato attuale, senza le modifiche apportate per la velocizzazione.

Si sottolinea come, a prescindere dai livelli acustici simulati nelle mappe, il clima acustico Ante Operam sia determinato anche dalle molteplici infrastrutture viarie, elencate nel capitolo 3 sulla concorsualità.

8.1 Modello di Esercizio Attuale

Il modello di esercizio attuale è stato desunto dall'elaborato di Esercizio.

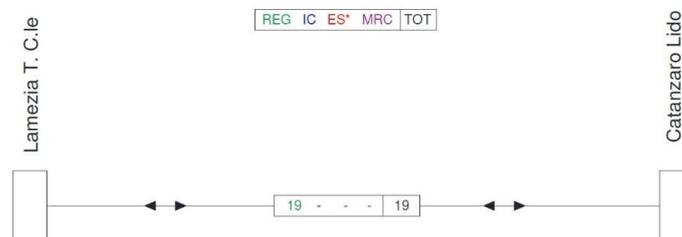
La tratta è caratterizzata esclusivamente da un traffico di tipo Regionale (REG) per un totale complessivo di circa 20 treni/giorno. Per quanto riguarda il materiale rotabile i servizi presenti sulla linea, alla data di stesura del presente documento, sono effettuati con Automotrici Diesel “Aln 668”. L'attuale rango massimo di linea è il Rango B.

Nella tabella successiva si riporta il numero di treni/giorno per ciascun tipo di servizio che interessa la tratta in oggetto (estrazione da PIC di RFI per un giorno ferialo medio di dicembre 2019). Viene anche riportata la suddivisione tra circolazioni diurne e notturne. Nella figura successiva sono riportati, in maniera grafica, tali valori.

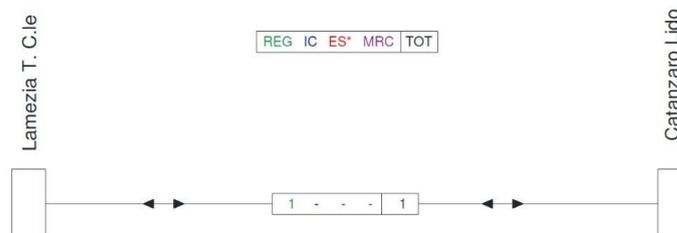
Modello di esercizio attuale tra Lamezia T. C.le e Catanzaro Lido (per entrambi i sensi di marcia)

Provenienza	Destinazione	Categoria	Treni diurni (6 – 22)	Treni notturni (22 – 6)	Totale
Lamezia T. C.le	Catanzaro Lido	REG	5	-	5
	Crotone	REG	2	-	2
	Locri	REG	2	-	2
	Sibari	REG	1	-	1
Catanzaro Lido	Lamezia T. C.le	REG	6	1	7
Crotone	Lamezia T. C.le	REG	2	-	2
Locri	Lamezia T. C.le	REG	1	-	1
Totale			19	1	20

MODELLO DI ESERCIZIO ATTUALE DIURNO - 6-22



MODELLO DI ESERCIZIO ATTUALE NOTTURNO - 22-6



Modello di esercizio attuale

Le velocità dei convogli si possono desumere dalla seguente tabella:

Tratta intervento	Tratta intervento	Nome intervento	Curva compresa nell'intervento	Velocità esistente / velocità di progetto (Km/h)
km 10+13	Velocizzazione tramite aumento della sopraelevazione	Variante 10	Curva 7	80 / 90
		Variante 10	Curva 8	80 / 90
		Variante 10	Curva 9	80 / 90
		Variante 10	Curva 10	80 / 90
km 19+24	Velocizzazione tramite varianti di tracciato	Variante 5	Curva 20a e 20b	30 / 110-140
		Variante 6	Curva 21	80 / 140
		Variante 7	Curva 22-23-24	80 / 140
km 27 + 29+310	Velocizzazione tramite varianti di tracciato	Variante 8	Curva 27	80 / 140
		Variante 9	Curva 28 e Curva 29	80 / 140

Ad oggi, quindi, la velocità dei convogli è di 80 km/h, tranne nella zona della variante 5, nei pressi del torrente Canello, dove c'è un rallentamento fino a 30 km/h per poter percorrere il ponte provvisorio sul torrente stesso, a seguito del collasso strutturale del ponte storico nel 2011.

8.2 Modello di Esercizio delle altre linee

È stato reperito anche il MdE sulle altre linee che si sviluppano all'interno delle fasce di pertinenza acustica dell'infrastruttura in progetto e che, pertanto, rappresentano una ulteriore sorgente di studio. Insieme alla linea di progetto, quindi, si è tenuto conto del contributo prodotto dalle linee:

- Linea Campora – Lamezia Terme – Rosarno (costa tirrenica)
- Linea Sibari – Crotona – Catanzaro (costa jonica)

Di seguito un inquadramento delle linee calabresi per poter ubicare la linea di progetto:

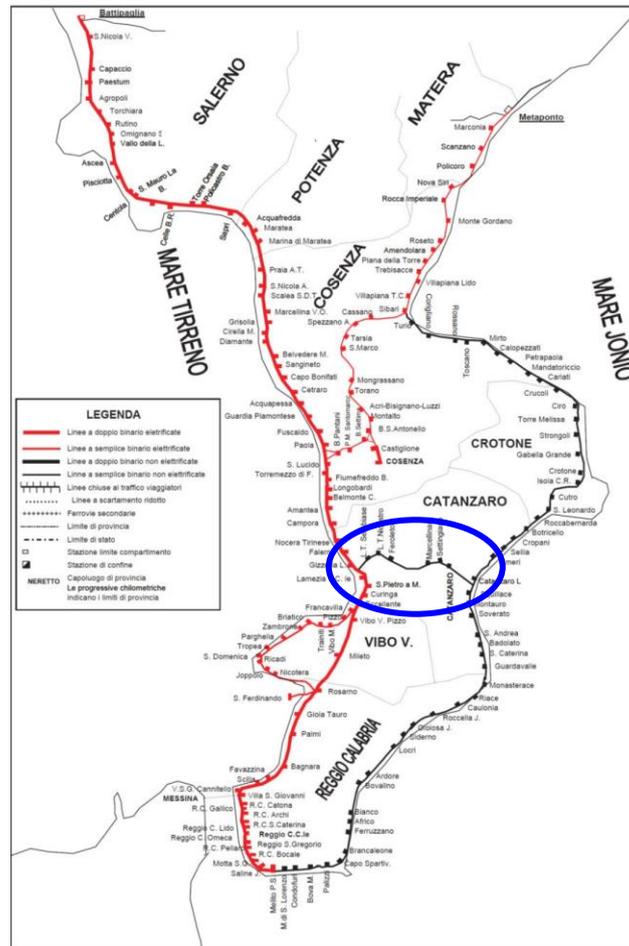


Figura 8-1 Ferrovie Calabresi e linea di intervento

Per quanto riguarda la **linea Campora – Rosarno** il modello di esercizio è stato desunto dall'elaborato RC0P00R22RGIM0006001A – Relazione Generale dello Studio acustico e Vibrazionale del progetto di modifica di tracciato della tratta Campora-Rosarno.

	Tipologia di Treno		Servizio diurno	Servizio notturno	Totali
			6:00 – 22:00	22:00 – 6:00	
			N° treni	N° treni	
Campora - Lamezia Terme C.le	Treni LP	ES	6	0	6
		IC	19	1	20
	Treni Regionali		14	6	20
	Merci		8	1	9
Lamezia Terme C.le - PM Eccellente	Treni LP	ES	6	0	6
		IC	14	6	20
	Treni Regionali		37	4	41
	Merci		9	0	9
PM Eccellente - Rosarno	Treni LP	ES	6	0	6
		IC	14	4	18
	Treni Regionali		21	1	22
	Merci		9	0	9

Tipologia di Treno		Materiale Rotabile	Rango di velocità
Treni LP	ES	ETR 485 ETR 470	P C
	IC	2 E402 (101-180) + 7 carrozze; E402 (101-180) + 7 carrozze; E444 + 7 carrozze	C
		E444 + 9 carrozze E656 + 8 carrozze	B (Intercity notte)
Regionali		ALe 501/502 (2M + 1R); E464 + 3 carrozze	C B
Merci		E652 + 1074 t	A

La velocità di tracciato è pari a 155 km/h, ne deriva che le velocità di Rango sono le seguenti:

- Vel. Rango A = 140 km/h;
- Vel. Rango B = 160 km/h;
- Vel. Rango C = 170 km/h;
- Vel. Rango P = 200 km/h.

Per la **linea Sibari – Catanzaro Lido - Locri**, invece è stato consultato l'elaborato RC0T02D16RGES0001001A – “Relazione Tecnica di Esercizio” per il progetto di elettrificazione della tratta Sibari – Crotona – Catanzaro

	Tipologia di Treno		Servizio Diurno	Servizio Notturno	Totali
			6:00 – 22:00	22:00 – 6:00	
			N° treni	N° treni	
Crotona – Catanzaro Lido	Treni LP	ES	-	-	-
		IC	4	-	4
	Treni Regionali		64	-	64

	Treni Mercè		-	8	8
Catanzaro Lido - Locri	Treni LP	ES	-	-	-
		IC	4	-	4
	Treni Regionali		32	-	32
	Treni Mercè		-	-	-

Velocità massima per i treni regionali 160 km/h, per i treni mercè 100 km/h.

9 GLI IMPATTI CON LA REALIZZAZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO

Al fine di stimare l'impatto dal punto di vista acustico delle opere in progetto sul territorio circostante è stato utilizzato il modello di simulazione SoundPLAN, come per la caratterizzazione acustica Ante Operam.

Si è costruito un nuovo modello di simulazione a partire da quello attuale a cui sono stati sovrapposti gli interventi del progetto della Velocizzazione. Inoltre, sono stati aggiornati i convogli che costituiscono la sorgente ferroviaria, in base a quanto riportato nel modello di esercizio di progetto che vede l'Elettrificazione della linea.

9.1 Modello di Esercizio di progetto

L'offerta commerciale ipotizzata è caratterizzata dal traffico passeggeri regionale e dall'introduzione del traffico merci. Il modello di esercizio passeggeri ipotizzato risulta compatibile con lo schema dei servizi previsti dall'Accordo Quadro fra Regione Calabria e RFI; viene, comunque, verificato un modello di esercizio con un carico più gravoso sull'infrastruttura per quello che concerne la capacità utilizzata per le tratte oggetto di intervento.

Tale modello di esercizio prevede traffico misto passeggeri e merci, come specificato di seguito:

- o per il traffico passeggeri: 64 treni/giorno totali (pari a 4 treni/ora, per 16 ore di esercizio giornaliero);
- o per il traffico merci: 8 treni/giorno totali (pari ad 1 treno/ora, per 8 ore di esercizio notturno).

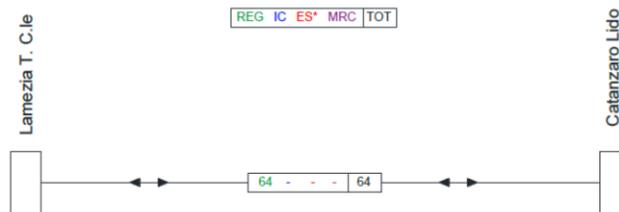
Nelle figure seguenti è riportata la sintesi del modello di esercizio di progetto, diviso per fascia diurna (6 – 22) e per fascia notturna (22 – 6). Si è ipotizzato che il traffico passeggeri sia totalmente di tipo Regionale; ciò non toglie la possibilità di effettuare eventualmente servizi di tipo IC, sempre nel rispetto di massimo 64 treni/giorno totali per il traffico passeggeri (Regionale + IC).

Il modello di esercizio di progetto è stato desunto dall'elaborato di Esercizio.

Tipologia di Treno		Servizio Diurno	Servizio Notturno	Totali	
		6:00 – 22:00	22:00 – 6:00		
		N° treni	N° treni	N° treni/giorno	
Lamezia Terme Centrale – Catanzaro Lido	Treni LP	ES	-	-	
		IC	-	-	
	Treni Regionali		64	-	64
	Treni Merci		-	8	8

Di seguito uno schematico del modello di esercizio di progetto:

MODELLO DI ESERCIZIO FUTURO DIURNO - 6-22



MODELLO DI ESERCIZIO FUTURO NOTTURNO - 22-6

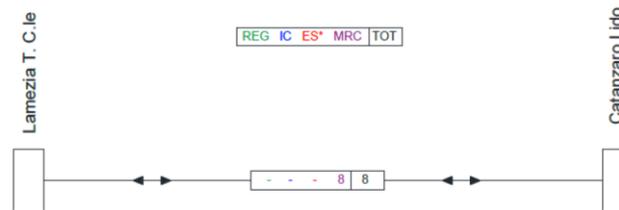


Figura 3 - Modello di esercizio di progetto

Si riportano le caratteristiche dei treni “tipo” considerati:

- per il servizio passeggeri (Minuetto Elettrico – 3 casse):
 - o lunghezza totale: 52 m;
 - o peso totale: 113 t (con carico all’80%);
 - o velocità massima raggiungibile: 160 km/h;
 - o rango massimo: C;
- per i treni merci:
 - o singola trazione: locomotrice E 652;
 - o carico massimo rimorchiabile (tara + carico): 700 t;
 - o peso totale del treno (loco + carico massimo rimorchiabile): 805 t;
 - o rango massimo: A (con massima velocità limitata a 55 km/h per composizioni treni eccedenti la categoria B2 – 18 t asse, ipotizzando il mantenimento dell’attuale categoria assiale C3L- 20 t per asse).

Per le velocità si fa riferimento alla seguente tabella:

Tratta intervento	Tratta intervento	Nome intervento	Curva compresa nell'intervento	Velocità esistente / velocità di progetto (Km/h)
km 10+13	Velocizzazione tramite aumento della sopraelevazione	Variante 10	Curva 7	80 / 90
		Variante 10	Curva 8	80 / 90
		Variante 10	Curva 9	80 / 90
		Variante 10	Curva 10	80 / 90
km 19+24	Velocizzazione tramite varianti di tracciato	Variante 5	Curva 20a e 20b	30 / 110-140
		Variante 6	Curva 21	80 / 140
		Variante 7	Curva 22-23-24	80 / 140
km 27 + 29+310	Velocizzazione tramite varianti di tracciato	Variante 8	Curva 27	80 / 140
		Variante 9	Curva 28 e Curva 29	80 / 140

È stato reperito anche il MdE sulle altre linee, si veda in merito il paragrafo 8.2 “Modello di Esercizio delle altre linee”. Le linee considerate, Campora – Lamezia Terme – Rosarno e Sibari – Catanzaro Lido – Locri, si sviluppano all’interno delle fasce di pertinenza acustica dell’infrastruttura in progetto e pertanto rappresentano una ulteriore sorgente di studio.

9.2 Considerazioni sui livelli sonori *Post Operam* - Ante Mitigazione

L'applicazione del modello di simulazione in precedenza descritto ha permesso di stimare i livelli sonori con la realizzazione delle opere in progetto.

Da un primo esame si nota che i superamenti maggiori si verificano nel periodo notturno, anche in virtù dei limiti più bassi.

È risultato necessario prevedere idonei interventi di mitigazione che sono stati dimensionati in relazione al periodo più critico e pertanto, come detto, rispetto al periodo notturno.

Per una visualizzazione cromatica dei livelli sonori lungo tutto il tracciato, sono state prodotte le Mappe Acustiche Isofoniche nello scenario *Post Operam* (elaborati RC0Y01R22N5IM0004016A-030A), relative ad un'altezza da piano campagna pari a 4 metri.

10 METODI PER IL CONTENIMENTO DELL'INQUINAMENTO ACUSTICO

Nei paragrafi seguenti si forniscono alcune note descrittive su metodi di contenimento dell'inquinamento acustico alternativi alle barriere antirumore, sui requisiti acustici delle barriere antirumore, sulle tipologie di barriere utilizzate in relazione alle prestazioni acustiche.

10.1 Interventi alternativi di mitigazione del rumore ferroviario

Finanziato dall'Unione Europea con il Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale (FESR) del periodo 2007-2013, il progetto **mitiga.rumore** “**Interventi alternativi di mitigazione del rumore ferroviario**” che prevedeva l'applicazione di un sistema di smorzatori di vibrazioni lungo la rotaia ed un sistema lubrificante del bordo della rotaia nei tratti curvilinei lungo la linea ferroviaria ai fini della mitigazione del rumore ferroviario, è stato sperimentato dalla Provincia di Bolzano in collaborazione con Rete Ferroviaria Italiana (RFI).

RFI ha permesso alla Provincia il montaggio in via sperimentale di questi due sistemi sulla linea del Brennero in due località distinte:

- in un tratto rettilineo tra i comuni di Bronzolo e di Ora sono installati due tipi diversi di smorzatori di vibrazioni rispettivamente della Schrey & Veit Srl ([Link esterno](#)) di Sprendlingen (DE) e della TATA ([Link esterno](#)) commercializzati da UUDEN BV ([Link esterno](#)) di Arnhem (NL).



Ammortizzatori Schrey & Veit (Foto: Schrey & Veit, 2012)

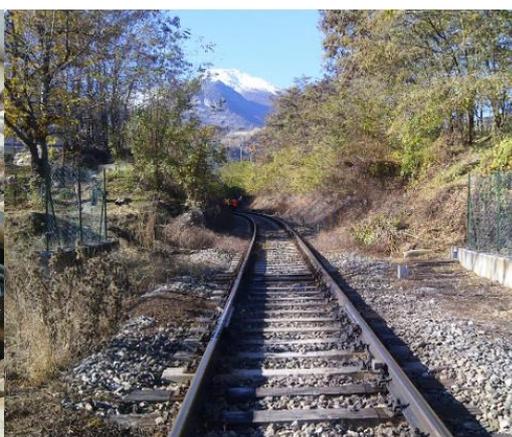


Ammortizzatori Van Uuden (Foto: Van Uuden, 2012)

- in un tratto in curva nel territorio comunale di Laion, adiacente all'abitato di Chiusa è installato un impianto di lubrificazione delle rotaie della P.A.L. Italia (Link esterno) di Novate Milanese (IT), lubrificanti della ditta Lincoln.



Lubrificatore P.A.L. Italia (Foto: P.A.L. Italia; 2012)



Impianto lubrificazione P.A.L. Italia (Foto: P.A.L. Italia; 2012)

I risultati del Progetto “mitiga.rumore”:

I lubrificatori installati nell'ambito del centro abitato di Chiusa, hanno contribuito ad attenuare il rumore di circa 1,5 dB. Oltre alla riduzione del rumore, con l'impiego dei lubrificatori si spera di limitare la formazione del corrugamento per logorio della superficie delle rotaie.

I due tipi di ammortizzatori sono stati invece testati tra i Comuni di Bronzolo e di Ora su un tratto di binario rettilineo di 300m circa, che fosse il più omogeneo possibile e che non presentasse irregolarità. Nel dettaglio, la riduzione media del livello sonoro per i treni merci è stata leggermente inferiore ad 1 dB mentre quella per i treni passeggeri supera 1 dB.

La riduzione del rumore ottenuta con i due sistemi è mediamente di 1 dB, e come riportato nelle conclusioni da parte della Provincia di Bolzano, nonostante il risultato positivo, la lieve riduzione del rumore ottenuta dalla sperimentazione non è chiaramente percepibile all'orecchio umano.

Viene ritenuto pertanto che entrambi i sistemi non costituiscano uno strumento di risanamento efficace per il nostro territorio e che non siano adeguati alla struttura dei binari utilizzati oltre che non sempre realizzabili.

La documentazione completa del Progetto “mitiga.rumore” è consultabile sul sito internet della Provincia di Bolzano al seguente indirizzo web:

<http://ambiente.provincia.bz.it/rumore/interventi-mitigazione-rumore-ferroviario.asp>

10.2 Requisiti acustici

La scelta della tipologia di barriera antirumore è stata effettuata tenendo conto di tutti i criteri tecnici e progettuali atti a garantire l'efficacia globale dell'intervento. L'effetto di una barriera è condizionato dalla minimizzazione dell'energia acustica che, come noto, schematicamente si propaga attraverso:

1. l'onda diretta, che, se la barriera non è sufficientemente dimensionata, giunge in corrispondenza del ricettore senza essere condizionata da ostacoli;
2. l'onda che giunge al ricettore dopo essere stata diffratta dal bordo superiore della barriera;
3. l'onda diffratta dal bordo superiore della barriera, riflessa dal suolo e quindi diretta verso il ricettore;
4. l'onda che si riflette tra la barriera e le pareti laterali dei vagoni;
5. l'onda che giunge al ricettore per trasmissione attraverso i pannelli che compongono la barriera;
6. l'onda riflessa sulla sede ferroviaria, diffratta dal bordo superiore della barriera e quindi diretta verso il ricettore.
7. l'onda assorbita.

Per quanto riguarda i punti 1, 2, 3, e 6 risulta di importanza fondamentale il dimensionamento delle barriere in altezza lunghezza e posizione.

Relativamente ai punti 4, 5, e 7 invece sono maggiormente influenti le caratteristiche acustiche dei materiali impiegati e le soluzioni costruttive adottate. L'abbattimento prodotto da una barriera si basa comunque principalmente sulle dimensioni geometriche. L'efficienza di una barriera è infatti strettamente legata alla differenza tra il cammino diffratto sul top dell'elemento e il cammino diretto (δ):

$\delta = a+b-c =$ differenza tra cammino diretto e cammino diffratto (vedi figura)

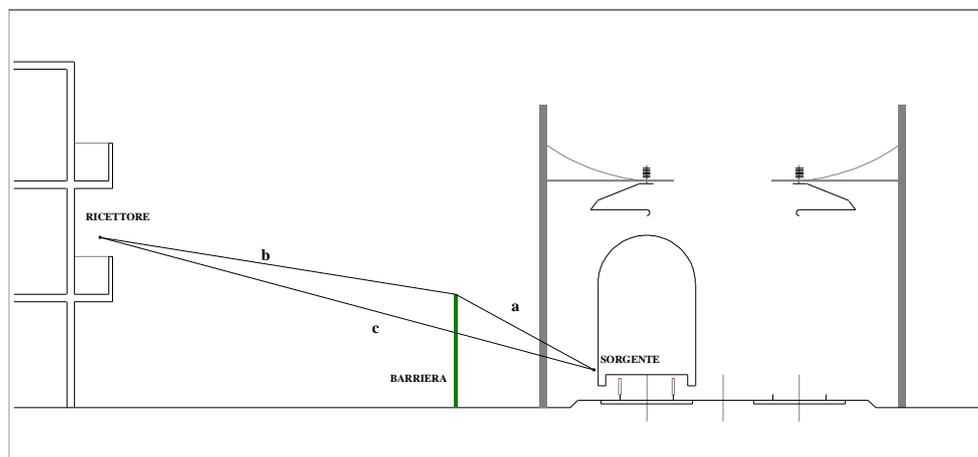


Figura 11-1- Propagazione onda sonora

In particolare, devono essere opportunamente definite le proprietà fonoisolanti e fonoassorbenti della barriera, attenendosi alle seguenti norme di carattere generale:

Il fonoisolamento deve essere di entità tale da garantire che la quota parte di rumore che passa attraverso la barriera sia di almeno 15 dB inferiore alla quota di rumore che viene diffratta verso i ricettori dalla sommità della schermatura.

Il fonoassorbimento è l'attitudine dei materiali ad assorbire l'energia sonora su di essi incidente, trasformandola in altra forma di energia, non inquinante (calore, vibrazioni, etc). L'adozione di materiali fonoassorbenti è utile per:

- evitare una riduzione dell'efficacia schermante totale;
- evitare un aumento della rumorosità per gli occupanti dei convogli (effetto tunnel).

L'impiego di materiali fonoassorbenti è pertanto consigliabile nel caso ferroviario al fine di evitare una perdita di efficacia per le riflessioni multiple che si generano tra le pareti dei vagoni e la barriera stessa.

Per quanto concerne le proprietà fonoassorbenti, dovranno essere utilizzati materiali con prestazioni acustiche particolarmente elevate e cioè almeno rispondenti ai coefficienti α relativi alla Classe *Ia* del Disciplinare Tecnico per le Barriere Antirumore delle Ferrovie dello Stato. Detti coefficienti sono riportati nella tabella seguente.

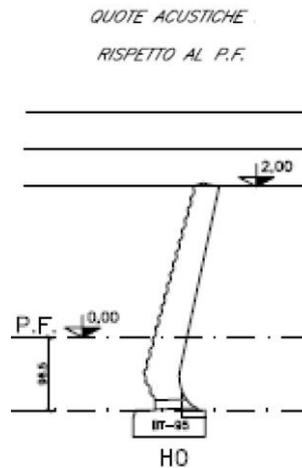
Freq.	α
125	0,30
250	0,60
500	0,80
1000	0,85
2000	0,85
4000	0,70

10.3 Descrizione delle barriere antirumore

La soluzione adottata deriva dai tipologici standard HS che RFI ha appositamente sviluppato.

Le barriere previste riprendono tutte lo standard RFI H0, quindi sono in ca ad una quota da p.f. di 2m.

Di seguito si riporta la sezione della soluzione adottata.



10.4 Gli interventi sugli edifici

Per ricondurre almeno all'interno degli ambienti abitativi i livelli acustici entro specifici valori è possibile intervenire direttamente sugli edifici esposti.

Nel caso di interventi sull'edificio per garantire un miglior livello di comfort, si prospettano quindi le possibilità di seguito elencate in ordine crescente di efficacia:

a) Sostituzione dei vetri con mantenimento degli infissi esistenti

Questa soluzione può essere utilizzata nel caso in cui si vuole ottenere un isolamento interno ad un edificio fra 28 e 33 dB rispetto al rumore in facciata e gli infissi esistenti siano di buona qualità e tenuta.

b) Sostituzione delle finestre

Questa soluzione può essere adottata quando si desidera avere un isolamento fra 33 e 39 dB. A seconda delle prestazioni richieste è possibile:

1. installare la nuova finestra con conservazione del vecchio telaio, interponendo idonee guarnizioni, quando si vuole ottenere un isolamento fino ad un massimo di 35 dB;
2. installare una nuova finestra di elevate prestazioni acustiche con sostituzione del vecchio telaio, quando si vuole ottenere un isolamento di 36-39 dB.

Per ottenere isolamenti superiori a 37 dB è necessario in ogni caso prendere particolari precauzioni riguardo ai giunti di facciata (nel caso di pannelli prefabbricati di grosse dimensioni), alle prese d'aria (aspiratori, ecc.), ai cassonetti per gli avvolgibili, ecc.

c) Realizzazione di doppie finestre

Questa soluzione è impiegata nei casi in cui è necessario ottenere un isolamento di facciata compreso tra 39 e 45 dB. Generalmente l'intervento viene attuato non modificando le finestre esistenti, ed aggiungendo sul lato esterno degli infissi antirumore scorrevoli (in alluminio o PVC).

Con riferimento a quanto la Norma (oggi abrogata e non sostituita) UNI 8204 indicava, si sono stabilite tre classi R1, R2 e R3 per classificare i serramenti esterni a seconda del diverso grado di isolamento acustico RW da questi offerto.

La classe R1 include la soluzione in grado di garantire un RW compreso tra 20 e 27 dBA; la classe R2 le soluzioni che garantiscono un RW compreso tra 27 e 35 dBA; la classe R3 tutte quelle soluzioni che offrono un RW superiore a 35 dBA. I serramenti esterni che offrono un potere fonoisolante minore di 20 dBA non sono presi in considerazione.

In tabella sono riportate per ciascuna di queste classi alcune informazioni generiche delle soluzioni tecniche possibili in grado di garantire un fonoisolamento rientrante nell'intervallo caratteristico della classe.

Per ciascuna classe si è ritenuto opportuno offrire almeno due soluzioni tipo al fine di porre il decisore, in presenza di vincoli di natura tecnica, economica e sociale, nella condizione di operare delle scelte tra più alternative.

CLASSE R1 - $20 \leq RW \leq 27$ dBA

- Vetro semplice con lastra di medio spessore (4÷6 mm), e guarnizioni addizionali. Doppio vetro con lastre di limitato spessore (3 mm), e distanza tra queste di almeno 40 mm.
-

CLASSE R2 - $27 \leq RW \leq 35$ dBA

- Vetro semplice con lastra di elevato spessore (8÷10 mm) e guarnizioni addizionali. Vetro stratificato antirumore con lastra di medio/elevato spessore (6÷8 mm) e guarnizioni addizionali.
 - Doppio vetro con lastre di medio spessore (4÷6 mm) guarnizioni addizionali e distanza tra queste di almeno 40 mm.
 - Doppia finestra con vetri semplici di spessore medio (4÷6 mm) senza guarnizioni addizionali.
-

CLASSE R3 - $RW > 35$ dBA

- Vetro stratificato antirumore di elevato spessore (10÷12 mm) e guarnizioni addizionali. Vetro camera con lastre di medio spessore (4÷6 mm), camera d'aria con gas fonoisolante e guarnizioni addizionali.
 - Doppia finestra con vetri semplici di spessore medio (4÷6 mm) e distanza tra le lastre di almeno 100 mm.
-

L'adozione di infissi antirumore può avere conseguenze in particolare sulla trasmissione di calore e sulla aerazione dei locali.

Gli aspetti che più frequentemente vengono infatti considerati come negativi, sono quelli relativi alla ventilazione ed al surriscaldamento dei locali nel periodo estivo. Ne consegue che gli infissi fonoisolanti dovranno essere dotati anche di aeratori che dovranno garantire il ricambio di aria necessario.

11 LE OPERE DI MITIGAZIONE SUL TERRITORIO E I LIVELLI ACUSTICI *POST MITIGAZIONE*

Il dimensionamento degli interventi di protezione acustica è stato finalizzato all'abbattimento dai livelli acustici prodotti nel periodo notturno (limiti più restrittivi, livelli sonori più elevati).

La scelta progettuale è stata quella di privilegiare l'intervento sull'infrastruttura: a tal fine sono stati previsti schermi acustici lungo linea che hanno permesso di mitigare il clima acustico in facciata degli edifici presso i quali sono stati riscontrati superamenti dai limiti di norma nello scenario Ante Mitigazioni.

Con l'ausilio del modello di simulazione *SoundPLAN* descritto nei paragrafi precedenti è stata effettuata la verifica e l'ottimizzazione delle opere di mitigazione.

Codice BA	Lato Linea	Lunghezza	Altezza da p.f.	Standard RFI	pk inizio	pk fine	Note
		[m]	[m]				
BA_S_01	Nord	342	2	H0	0+413	0+753	
BA_S_02	Nord	166	2	H0	5+150	5+316	
BA_S_03	Nord	1017	2	H0	5+740	6+757	
BA_S_04	Nord	835	2	H0	6+902	7+737	
BA_S_05	Nord	1665	2	H0	8+032	9+696	
BA_S_06	Nord	137	2	H0	9+818	9+953	
BA_S_07	Nord	1755	2	H0	10+124	11+879	
BA_S_08	Nord	230	2	H0	12+235	12+466	
BA_S_09	Nord	332	2	H0	14+003	14+336	
BA_S_10	Nord	354	2	H0	14+914	15+276	
BA_S_11	Nord	303	2	H0	21+439	21+783	
BA_S_11v	Nord	399	2	H0	21+783	23+141	ricadente nella variante 6
BA_S_12	Nord	1077	2	H0	23+940	25+014	
BA_S_13	Nord	93	2	H0	26+913	27+013	
BA_S_13v	Nord	156	2	H0	27+013	27+162	ricadente nella variante 8
BA_S_14v	Nord	517	2	H0	28+822	29+338	ricadente nella variante 9
BA_S_15	Nord	689	2	H0	38+706	39+393	
BA_D_01	Sud	335	2	H0	0+413	0+753	
BA_D_02	Sud	2379	2	H0	4+823	7+204	
BA_D_03	Sud	1889	2	H0	8+097	9+990	
BA_D_04	Sud	480	2	H0	10+299	10+777	
BA_D_05	Sud	201	2	H0	11+077	11+280	
BA_D_06	Sud	469	2	H0	11+997	12+465	
BA_D_07	Sud	380	2	H0	13+306	13+687	
BA_D_08	Sud	370	2	H0	14+003	14+373	
BA_D_09	Sud	1331	2	H0	15+221	16+556	

Codice BA	Lato Linea	Lunghezza	Altezza da p.f.	Standard RFI	pk inizio	pk fine	Note
BA_D_10	Sud	1653	2	H0	40+660	42+309	

Gli estremi della schermatura acustica indicati nella tabella, rappresentati graficamente ed indicati nelle *Mappe isofoniche Post Mitigazione* (elaborati RC0Y01R22N5IM0004031A-045A), potranno subire modifiche in fase di progettazione e realizzazione in funzione delle reali condizioni al contorno, ma comunque di entità tale da non modificare l'efficacia mitigativa complessiva.

L'altezza del manufatto è considerata rispetto alla quota del piano del ferro.

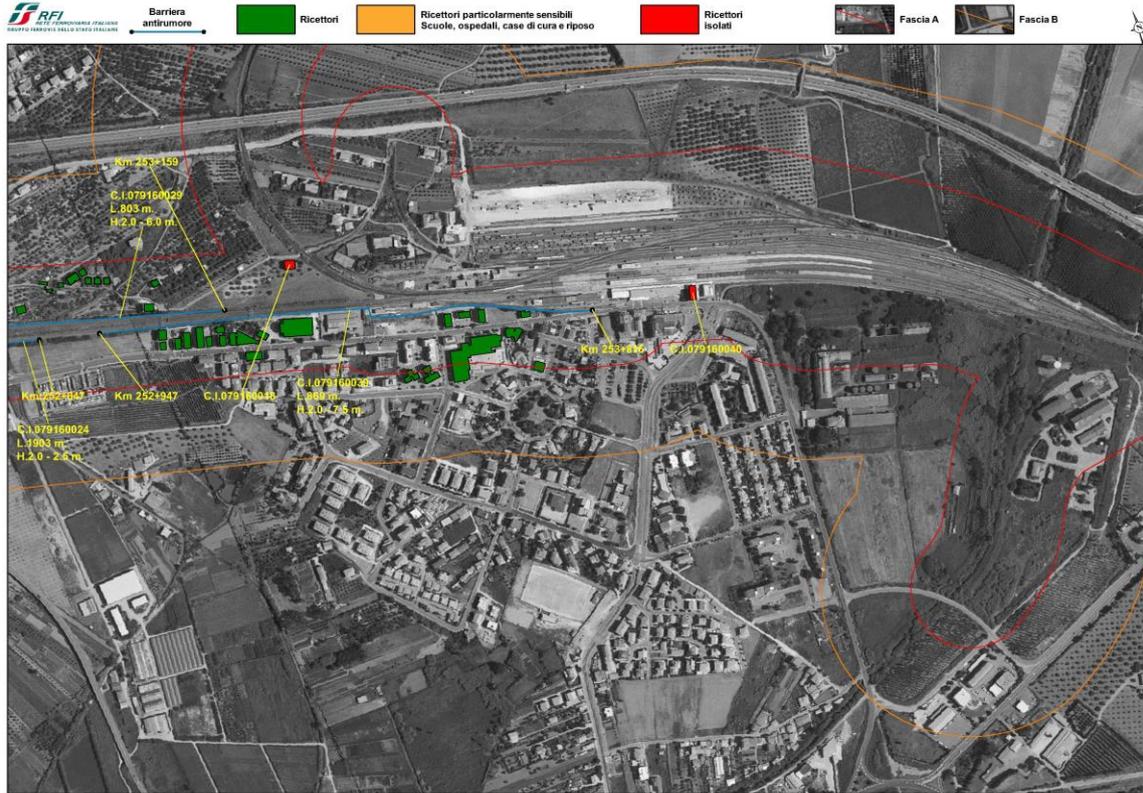
Per una visualizzazione cromatica dei livelli sonori lungo tutto il tracciato per lo scenario Post Mitigazioni, sono state prodotte le Mappe Acustiche Isofoniche nello scenario Post Mitigazione (elaborati RC0Y01R22N5IM0004031A÷045A), relative ad un'altezza da piano campagna pari a 4 metri.

La realizzazione degli interventi che non ricadono all'interno nelle varianti planoaltimetriche della Velocizzazione della linea (fondo grigio in tabella), è rimandata al Piano di Risanamento Acustico.

In particolare, per quanto riguarda i ricettori presenti all'inizio dell'intervento presso la stazione di Lamezia Terme Centrale, ma prospicienti la linea Tirrenica Campora – Rosarno, è evidente che un intervento finalizzato alla mitigazione del rumore prodotto dall'esercizio della linea in progetto risulterebbe non efficace, vista la differenza nei traffici sulle due linee; in tutti i casi l'intervento ottimale è certamente quello di collocare la BA lungo la linea Tirrenica, in quanto in grado di schermare i contributi di entrambe le sorgenti ferroviarie.

Per tale intervento si rimanda pertanto al Piano di Risanamento della Rete Ferroviaria Italiana, nell'ambito del quale saranno dimensionate le idonee opere di mitigazione acustica.

Si riporta di seguito la tavola del PRA RFI con indicazione degli interventi già previsti a protezione degli edifici elencati nella tabella precedente. I Codici Intervento C.I. sono 079160029 e 079160039.



Regione CALABRIA - Comune di LAMEZIA TERME (CZ) - Tavoleta n° 180123 - Mappa degli interventi - Scala 1:5.000

12 STUDIO VIBRAZIONALE

Il presente capitolo contiene i risultati dello studio relativo all'impatto vibrazionale prodotto dai transiti ferroviari lungo la linea Lamezia Terme Centrale – Catanzaro Lido a valle degli interventi di progetto di Elettrificazione e Velocizzazione della linea.

Il lavoro tiene conto delle indicazioni delle norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, e si basa anche sui risultati di campagne di rilievi vibro-metrici eseguite in situazioni analoghe alla presente.

L'analisi dei livelli vibro-metrici viene effettuata distinguendo le tipologie di convogli che transiteranno sulla ferrovia, le condizioni geologiche che costituiscono il terreno tra ferrovia e ricettori e la tipologia di ricettore in termini di struttura e numero di piani.

Il valore complessivo di accelerazione che tiene conto anche del modello di esercizio all'orizzonte temporale di progetto, è confrontato con i limiti indicati dalle norme tecniche per il periodo diurno (07-22) e il periodo notturno (22-07), così come previsto dal "Manuale di Progettazione delle Opere Civili di RFI (cod. RFI DTCSIAMMAIFS 001 D del 31.12.2020)".

13 RIFERIMENTI NORMATIVI

13.1 Il quadro delle norme di riferimento

A differenza del rumore ambientale, regolamentato a livello nazionale dalla Legge Quadro n. 447/95, non esiste al momento alcuna legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni. Esistono invece numerose norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, che costituiscono un utile riferimento per la valutazione del disturbo in edifici interessati da fenomeni di vibrazione.

Per quanto riguarda il disturbo alle persone, i principali riferimenti sono costituiti dalla norma ISO 2631 / Parte 2 "*Evaluation of human exposure to whole body vibration / "Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)"*". La norma assume particolare rilevanza pratica poiché ad essa fanno riferimento le norme tecniche per la redazione degli Studi di Impatto Ambientale relativi alla componente ambientale "Vibrazioni", contenute nel D.P.C.M. 28/12/1988. Ad essa, seppur con alcune non trascurabili differenze, fa riferimento la norma UNI 9614:1990 "*Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"*".

Si riporta di seguito la principale normativa tecnica esistente in riferimento all'aspetto ambientale vibrazioni.

13.2 ISO2631 "Valutazione sull'esposizione del corpo umano alle vibrazioni"

La ISO 2631-2 si applica a vibrazioni trasmesse da superfici solide lungo gli assi x, y e z per persone in piedi, sedute o coricate. Il campo di frequenze considerato è 1÷80 Hz e il parametro di valutazione è il valore efficace dell'accelerazione a_{rms} definito come:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

dove $a(t)$ è l'accelerazione in funzione del tempo, T è la durata dell'integrazione nel tempo dell'accelerazione. La norma definisce tre curve base per le accelerazioni e tre curve base per le velocità (in funzione delle frequenze di centro banda definite per terzi di ottava) che rappresentano le curve approssimate di uguale risposta in termini di disturbo, rispettivamente per le accelerazioni riferite all'asse Z, agli assi X, Y e alla combinazione dei tre assi.

L'Annex A della ISO 2631-2 (che non rappresenta peraltro parte integrale della norma) fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni; in pratica sono riportati i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base delle accelerazioni e delle velocità al variare del periodo di riferimento (giorno e notte), del tipo di vibrazione (vibrazioni continue o intermittenti, vibrazioni transitorie) e del tipo di insediamento

(ospedali, laboratori di precisione, residenze, uffici, industrie). Le vibrazioni devono essere misurate nel punto di ingresso nel corpo umano e deve essere rilevato il valore di accelerazione r.m.s. perpendicolarmente alla superficie vibrante. Nel caso di edifici residenziali in cui non è facilmente definibile un asse specifico di vibrazione, in quanto lo stesso edificio può essere usato da persone in piedi o coricate in diverse ore del giorno, la norma presenta una curva limite che tiene conto delle condizioni più sfavorevoli combinate in tre assi.

13.3 UNI 9614:1990 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"

La norma è sostanzialmente in accordo con la ISO 2631-2. Tuttavia, sebbene le modalità di misura siano le stesse, la valutazione del disturbo è effettuata sulla base del valore di accelerazione r.m.s. ponderato in frequenza, il quale è confrontato con una serie di valori limite dipendenti dal periodo di riferimento (*giorno*, dalle 7:00 alle 22:00, e *notte*, dalle 22:00 alle 7:00) e dalle destinazioni d'uso degli edifici. Generalmente, tra le due norme, la UNI 9614:1990 si configura come più restrittiva.

I livelli di soglia indicati dalla suddetta norma sono riportati nella tabella seguente:

Luogo	Accelerazione [m/s ²]	L [dB]
Aree critiche	3.3 * 10 ⁻³	71
Abitazioni (notte)	5.0*10 ⁻³	74
Abitazioni (giorno)	7.2*10 ⁻³	77
Uffici	14.4*10 ⁻³	83
Fabbriche	28.8*10 ⁻³	89

Tabella 13-1 Valori di soglia di vibrazione relativi al disturbo alle persone (UNI 9614:1990)

Considerato che gli effetti prodotti dalle vibrazioni sono differenti a seconda della frequenza delle accelerazioni, vanno impiegati dei filtri che ponderano le accelerazioni a seconda del loro effetto sul soggetto esposto. Tali filtri rendono tutte le componenti dello spettro equivalenti in termini di percezione e quindi di disturbo. I simboli dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza e del corrispondente livello sono rispettivamente, a_w e

Lw. Quest'ultimo, espresso in dB, è definito come $L_w = 20 \log_{10} (a_w / 10^{-6} \text{ m/s}^2)$. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono secondo l'asse z prevede una attenuazione di 3 dB per ottava tra 4 e 1 Hz, una attenuazione nulla tra 4 e 8 Hz ed una attenuazione di 6 dB per ottava tra 8 e 80 Hz. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono secondo gli assi x e y prevede un'attenuazione nulla tra 1 e 2 Hz e una attenuazione di 6 dB per ottava tra 2 e 80 Hz. La banda di frequenza 1-80 Hz deve essere limitata da un filtro passabanda con una pendenza asintotica di 12 dB per ottava. Nel caso la postura del soggetto esposto non sia nota o vari nel tempo, va impiegato il filtro definito nel prospetto I della norma, ottenuto considerando per ogni banda il valore minimo tra i due filtri suddetti. In alternativa, i rilievi su ogni asse vanno effettuati utilizzando in successione i filtri sopraindicati; ai fini della valutazione del disturbo verrà considerato il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza più elevato. Nell'Appendice della norma UNI 9614:1990, che non costituisce parte integrante della norma, si indica che la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante deve essere svolta confrontando i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, o i corrispondenti livelli più elevati riscontrati sui tre assi, con una serie di valori limite riportati nei prospetti II e III. Quando i valori o i livelli delle vibrazioni in esame superano i limiti, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto. Nel caso di vibrazioni di tipo impulsivo è necessario misurare il livello di picco dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza; tale livello deve essere successivamente diminuito di 3 dB al fine di stimare il corrispondente livello efficace. I limiti possono essere adottati se il numero di eventi impulsivi giornalieri non è superiore a 3. Nel caso si manifestino più di 3 eventi impulsivi giornalieri i limiti fissati per le abitazioni, gli uffici e le fabbriche vanno diminuiti in base al numero di eventi e alla loro durata, moltiplicandoli per un fattore correttivo F. Nessuna riduzione può essere applicata per le aree critiche. Nel caso di impulsi di durata inferiore a 1 s si deve porre $F = 1.7 \cdot N^{-0.5}$. Per impulsi di durata maggiore si deve porre $F = 1.7 \cdot N^{-0.5} \cdot t^{-k}$, con $k = 1.22$ per pavimenti in calcestruzzo e $k = 0.32$ per pavimenti in legno. Qualora i limiti così calcolati risultassero inferiori ai limiti previsti per le vibrazioni di livello stazionario, dovranno essere adottati questi ultimi valori.

13.4 UNI 9916:2014 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"

I danni agli edifici determinati dalle vibrazioni vengono trattati dalla UNI 9916 "*Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici*", norma in sostanziale accordo con i contenuti tecnici della ISO 4866 e in cui viene richiamata, sebbene non faccia parte integrante della norma, la DIN 4150, parte 3. La norma UNI 9916 fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii allo scopo di permettere anche la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica. Altro scopo

della norma è di ottenere dati comparabili sulle caratteristiche delle vibrazioni rilevate in tempi diversi su uno stesso edificio, o su edifici diversi a parità di sorgente di eccitazione, nonché di fornire criteri di valutazione degli effetti delle vibrazioni medesime.

Gli edifici sono classificati secondo tre tipologie:

- costruzioni residenziali e costruzioni strutturalmente simili;
- costruzioni industriali e costruzioni strutturalmente simili;
- costruzioni che, per la loro sensibilità particolare alle vibrazioni, non rientrano nella classificazione delle prime due categorie o sono di grande valore intrinseco (per esempio edifici monumentali soggetti a tutela).

La Norma fornisce infine una classificazione degli effetti di danno a carico delle strutture secondo due livelli:

- *Danno di architettonico (o di soglia):* effetto residuo delle vibrazioni che determina alterazione estetica o funzionale dell'edificio senza comprometterne la stabilità strutturale o la sicurezza degli occupanti. Il danno architettonico si presenta in molti casi con la formazione o l'accrescimento di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o sulle superfici intonacate o nei giunti di malta delle costruzioni in mattoni
- *Danno maggiore:* Effetto che si presenta con la formazione di fessure più marcate, distacco e caduta di gesso o pezzi di intonaco fino al danneggiamento di elementi strutturali (per esempio fessure nei pilastri e nelle travature, apertura di giunti).

L'Appendice D della UNI 9916 contiene i criteri di accettabilità dei livelli della velocità massima con riferimento alla DIN 4150.

Per velocità massima è da intendersi la velocità massima di picco (peak component particle velocity).

Per le vibrazioni di breve durata (quelle per cui sono da escludere problemi di fatica e amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata), i limiti sono riportati nel seguente prospetto:

Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni a breve durata sulle costruzioni						
Classe	Tipo di Edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s				
		Fondazioni			Piano Alto	Solai Componente Verticale
		Da 1Hz a 10Hz	Da 10Hz a 50Hz	Da 50Hz a 100Hz	Per tutte le frequenze	Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, edifici	20	Varia	Varia	40	20

	industriali e costruzione strutturalmente simili		linearmente da 20 ($f = 1\text{Hz}$) a 40 ($f=50\text{Hz}$)	linearmente da 40 ($f = 1\text{Hz}$) a 50 ($f=50\text{Hz}$)		
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 ($f = 1\text{Hz}$) a 15 ($f=50\text{Hz}$)	Varia linearmente da 5 ($f = 1\text{Hz}$) a 20 ($f=50\text{Hz}$)	15	20
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	3	Varia linearmente da 3 ($f = 1\text{Hz}$) a 8 ($f=50\text{Hz}$)	Varia linearmente da 8 ($f = 1\text{Hz}$) a 10 ($f=50\text{Hz}$)	8	3/4

Per frequenze oltre in 100Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100Hz

Per le vibrazioni permanenti invece i valori di riferimento sono riportati nel seguente prospetto:

Valori di riferimento per le componenti orizzontali della velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni durature sulle costruzioni		
Classe	Tipo di Edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzione strutturalmente simili	10
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	25

	ELETTRIFICAZIONE E VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA LAMEZIA TERME CENTRALE – CATANZARO LIDO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO - ECONOMICA					
	STUDIO ACUSTICO E VIBRAZIONALE Relazione Generale	COMMESSA RC0Y	LOTTO 01	CODIFICA R 22 RG	DOCUMENTO IM 00.04.001	REV. A

14 AREA DI STUDIO

14.1 Inquadramento territoriale

Nella figura seguente è rappresentata l'area geografica in cui si localizza l'intervento oggetto di studio.

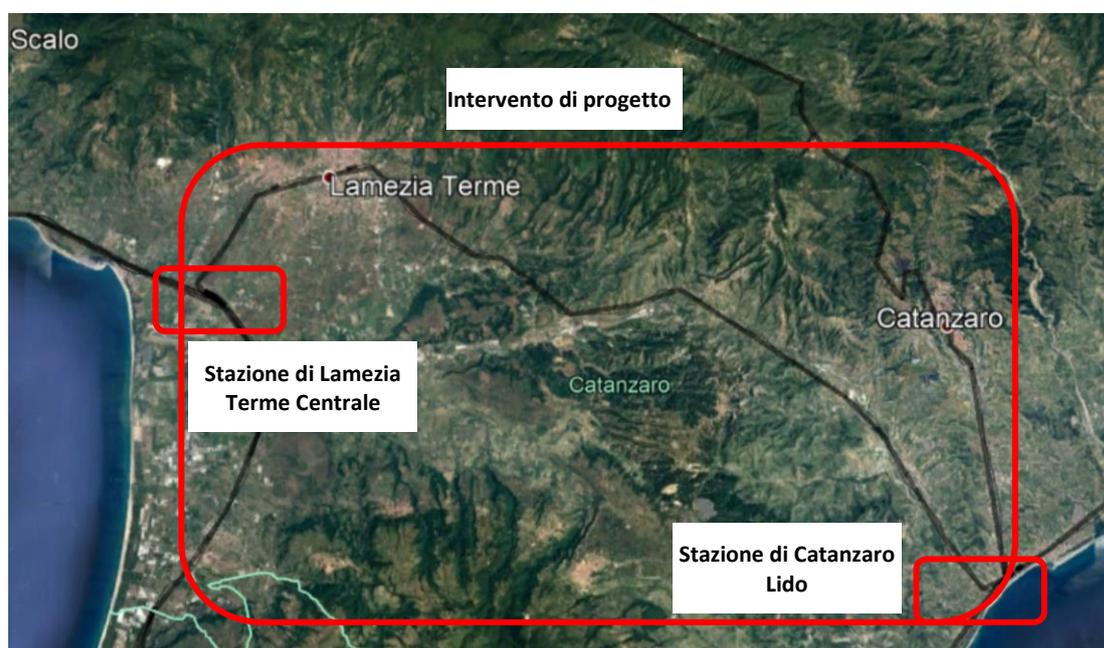


Figura 14-1 Vista aerea dell'inquadramento generale dell'intervento oggetto di studio

L'area di intervento ricade nel territorio dei Comuni di Lamezia Terme (CZ), Feroletto Antico (CZ), Pianopoli (CZ), Amato, Marcellinara (CZ), Settingiano (CZ), Borgia (CZ) e Catanzaro.

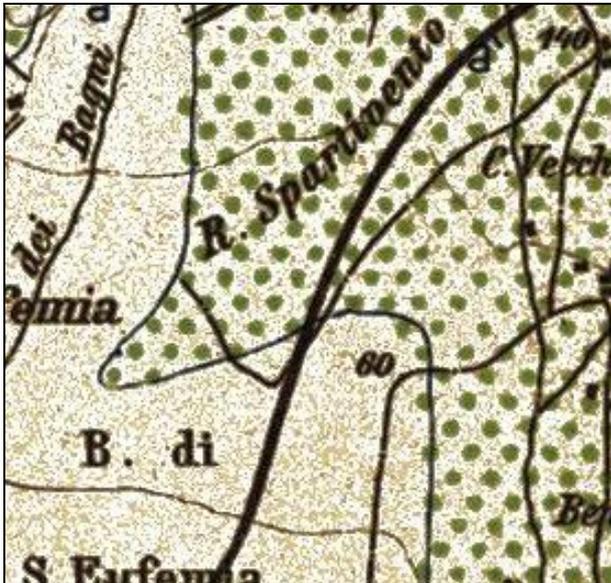
L'ambito di studio è caratterizzato da un tessuto urbano continuo con presenza di edifici residenziali e commerciali all'inizio e alla fine dell'intervento. La maggior parte del tracciato ricade in zona rurale o montana poco abitata.

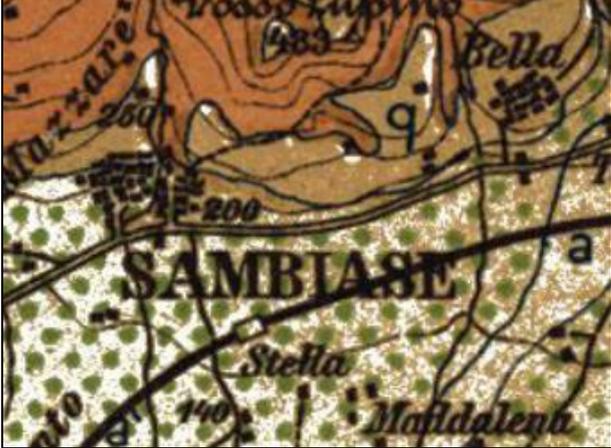
14.2 Inquadramento geologico

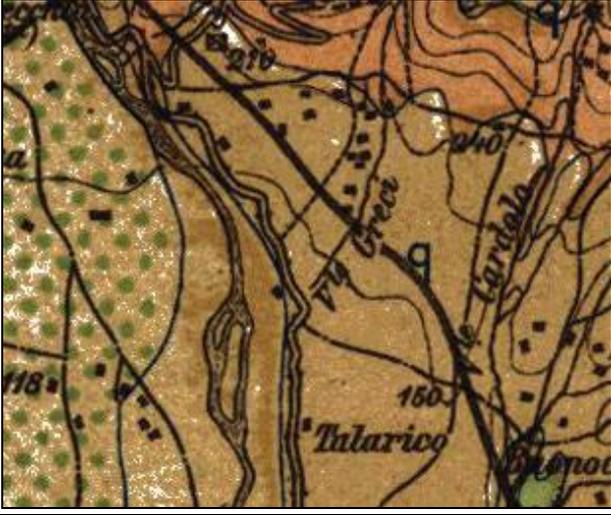
I dati necessari alla definizione del quadro geologico dell'area di interesse sono stati ricavati dalle analisi sviluppate nell'ambito dello studio geologico, al quale si rimanda per eventuali approfondimenti.

L'intero ambito di studio ricade nei Fogli 241 "Nicastro" e 242 "Catanzaro" della Carta Geologica d'Italia, scala 1: 100.000.

Nella seguente tabella si riporta in sintesi quanto descritto nell'elaborato dello studio geologico con degli stralci della Carta Geologica d'Italia 1: 100.000 e l'indicazione degli affioramenti secondo questa cartografia e secondo quella disponibile dal Geoportale Nazionale (*in corsivo*). La legenda nell'ultima riga della tabella.

Località Bosco Amatello – Folgio 241 “ Nicastro”	<p>materiale alluvionale (Olocene) materiale di conoide (Olocene-Pleistocene) depositi di conoide sabbioso-conglomeratici <i>depositi detritici, alluvionali e fluviolacustri pleistocenici (R4), in prossimità del limite con depositi alluvionali attuali (R1).</i></p>
	

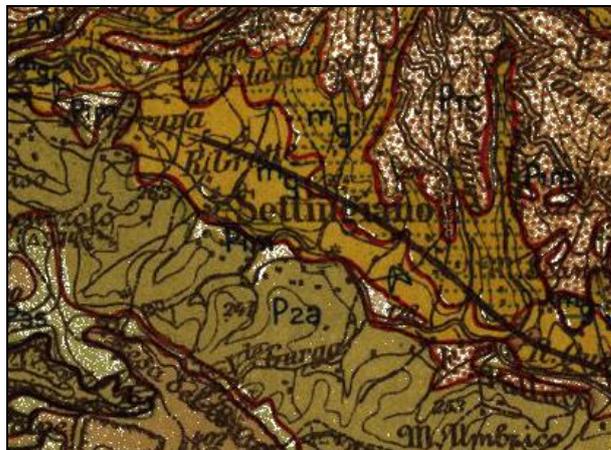
<p>Sambiase – Folgio 241 “ Nicastro”</p>	<p>materiale alluvionale (Olocene) materiale di conoide antico (Pleistocene) <i>depositi detritici, alluvionali e fluviolacustri pleistocenici (R4), in prossimità del limite con depositi alluvionali attuali (R1)</i></p>
	
<p>Nicastro – Folgio 241 “ Nicastro”</p>	<p>conglomerati poligenici in matrice sabbiosa grossolana poco consolidati (Miocene Superiore – Pleistocene Inferiore) materiale alluvionale e derivante da solifluzione e dilavamento (Olocene) <i>depositi olocenici (R1)</i></p>
	

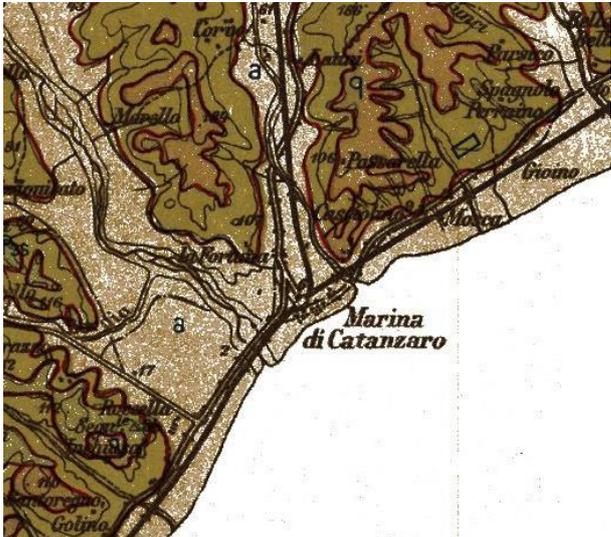
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Contrada Gabella Cardolo – Foglio 241 “ Nicastro”</p>	<p>depositi marini terrazzati depositi alluvionali e di conoide <i>Sabbie e conglomerati plio-pleistocenici (R11)</i> <i>Sabbie e conglomerati pleistocenici.</i></p>	
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Scalo Ferroviario Feroleto Antico – Foglio 241 “ Nicastro”</p>	<p>depositi marini terrazzati pleistocenici ed un lembo isolato di materiale alluvionale <i>Sabbie e conglomerati plio-pleistocenici (R11)</i> <i>Sabbie e conglomerati pleistocenici</i></p>	

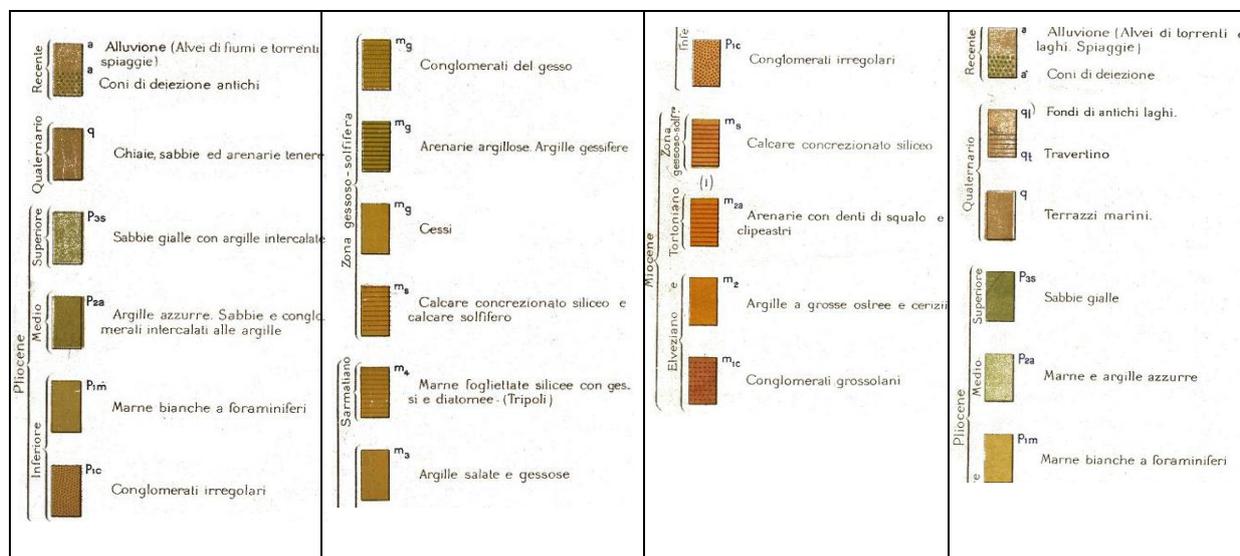
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Marcellinara loc. Quote Barile – Foglio 241 “ Nicastro”</p>	<p>area di transizione tra le alluvioni (a, alvei di torrenti e laghi) e marne e argille azzurre (p2a).</p> <p><i>sabbie e conglomerati pleistocenici (R11)</i></p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Marcellinara loc. Massaro – Foglio 241 “ Nicastro”</p>	<p>argille grigio-azzurre con intercalazioni sabbiose e siltiti, ascrivibili alle Argille di Cutro (Piacenziano-Calabriano)</p> <p>depositi marini terrazzati pleistocenici</p> <p>depositi alluvionali attuali relativi al Fiume Amato</p> <p><i>Argille plio-pleistoceniche (R12)</i></p>



Marcellinara – Foglio 242 “ Catanzaro”	<p>argille grigio-azzurre con intercalazioni sabbiose e siltiti, esse sono ascrivibili alle Argille di Cutro (Piacenziano-Calabriano)</p> <p>argilliti e/o siltiti con lenti di gesso microcristallino appartenenti alla formazione gessoso-solfifera (Miocene Medio-Superiore)</p> <p>gessi macrocristallini (Miocene Superiore)</p> <p>conglomerati poligenici in matrice sabbiosa grossolana poco consolidati (Miocene Superiore – Pliocene Inferiore)</p> <p><i>Arenarie ed argille (subordinati calcari ed evaporiti) del Miocene superiore (R18)</i></p> <p><i>Formazione Gessoso-Solfifera (R19)</i></p>
Settingiano – Foglio 242 “ Catanzaro”	<p>Formazione Gessoso-solfifera</p> <p>materiali conglomeratici miocenici</p> <p><i>Formazione Gessoso-solfifera (R19)</i></p>



<p>Catanzaro – Foglio 242 “ Catanzaro”</p>	<p>depositi alluvionali del fondovalle del Fiume Corace (a)</p> <p>Argille azzurre plioceniche, sabbie e conglomerati intercalati alle argille (P2a)</p> <p><i>depositi alluvionali, detritici, lacustri e marini attuali (R1)</i></p> <p><i>argille plio-pleistoceniche (R12)</i></p> 
<p>Catanzaro Lido – Foglio 242 “ Catanzaro”</p>	<p>depositi ciottolosi e sabbiosi dei letti fluviali (Olocene)</p> <p>materiale alluvionale e derivante da solifluzione e dilavamento (Olocene)</p> <p>depositi conglomeratici e sabbiosi terrazzati di ambiente marino (Pleistocene).</p> <p><i>Sabbie e conglomerati pleistocenici (R7), al limite con depositi alluvionali, detritici, lacustri e marini attuali (R1).</i></p> 



Ai fini del presente studio ci si è dedicati unicamente a quelle aree per le quali è prevedibile un potenziale impatto da vibrazioni, e dunque ci si è limitati ad analizzare i tratti della linea per i quali sono presenti potenziali ricettori entro una distanza di 50 m dal tracciato ferroviario.

La descrizione stratigrafica del suolo ai fini di uno studio di impatto da vibrazioni deve necessariamente ricondursi ad una classificazione delle tipologie di suolo estremamente più sintetica rispetto alle definizioni derivanti dallo studio geognostico utile ai fini della progettazione strutturale delle opere.

In particolare, l'interesse del presente studio è nella rilevazione di tre grandi categorie di suolo, per le quali si rileva un comportamento propagativo differente con parametri individuati dalla letteratura.

In base alla classificazione di Ungar e Bender le stratigrafie del terreno possono essere associate con le seguenti proprietà utili ai fini del presente studio.

Tipologia suolo	Velocità di propagazione delle onde longitudinali [m/s]	Fattore di smorzamento	Densità [kg/m ³]
Roccia	3500	0,01	2650
Sabbia, limo, ghiaia, loess	600	0,1	1600
Argilla, suolo argilloso	1500	0,1 – 0,2	1700

La classificazione ai fini vibrazionali è indicata nella seguente tabella.

Simbologia stratigrafica	Descrizione	Velocità di propagazione delle onde longitudinali [m/s]	Fattore di smorzamento	Densità [kg/m²]
Aa	Terreno prevalentemente sabbioso, con eventuale presenza di limo, ghiaia, loess	600	0,1	1600
FMA	Roccia	3500	0,01	2650
FR	“	“	“	“

15 INDAGINI VIBRAZIONALI

15.1 Rilievi di vibrazioni

Lo studio vibrazionale del presente progetto si è basato su una campagna di rilievi vibrometrici eseguita in condizioni simili a quelle del territorio in esame. I risultati sperimentali sono stati utilizzati per la determinazione della propagazione delle onde vibrazionali di origine ferroviaria nel terreno.

Le misure constano di una sezione lungo la linea, con l'installazione di tre terne accelerometriche T1, T2 e T3 poste a distanze crescenti dall'asse del binario in modo da valutare sia l'emissione vibrazionale dei convogli ferroviari che le modalità di propagazione delle vibrazioni nel terreno.

- Le misure sono state eseguite secondo le modalità indicate dalla norma UNI 9614:1990, come indicato dal Manuale di Progettazione RFI delle Opere Civili cod. RFIDTCSIAMMAIFS001D del 31.12.2020. Lungo la via di propagazione sono stati posizionati tre vibrometri in corrispondenza del punto denominato VIB01, ciascuno dotato di tre accelerometri (uno per ciascun asse di riferimento) così posizionati:
- Terna 1 (T1): in prossimità dei binari, a circa 8 metri dall'asse del binario più esterno, su terreno di riporto;
- Terna 2 (T2): a circa 18 metri dai binari dell'asse più esterno su un terreno analogo a quello della Terna 1;
- Terna 3 (T3): a circa 28 metri dai binari su un terreno analogo a quello delle Terne 1 e 2.

Gli accelerometri vengono sistemati in modo da individuare tre componenti ortogonali di accelerazione orientate secondo un sistema di riferimenti allineato con la sorgente di vibrazioni. Nello specifico si identificano l'asse trasversale X, l'asse longitudinale Y e l'asse verticale Z (cfr. scheda di figura seguente).

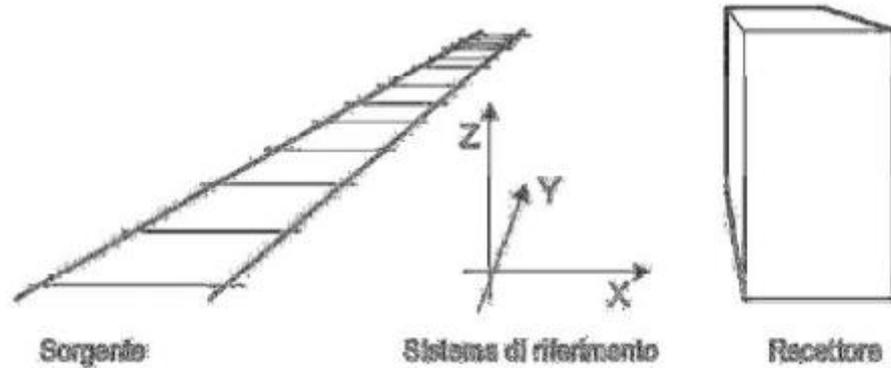


Figura 15-1 Orientamento delle componenti vibrazionali rispetto alle sorgenti



Figura 15-2 Esempio di installazione dell'accelerometro

I rilievi vibrometrici permettono di determinare:

- L'entità e la variabilità dei transiti ferroviari in un numero statisticamente significativo alla sorgente;
- Le caratteristiche di emissione delle vibrazioni di origine ferroviaria;
- Le modalità di propagazione delle vibrazioni con una validazione sperimentale attraverso la funzione di trasferimento.

15.2 Analisi dei rilievi

15.2.1 Entità vibrazionale e relativa variabilità dei transiti ferroviari

I transiti ferroviari sono caratterizzati da una notevole variabilità dei livelli di accelerazione vibrazionale emessa dovuta alle diverse caratteristiche tipologiche dei convogli e alle condizioni di percorrenza lungo la linea.

Nel periodo di misura è stato possibile campionare i livelli di accelerazione relativi a diversi treni merci e Regionali, che costituiscono la totalità del modello di esercizio previsto dal presente progetto. Questi dati, insieme alle informazioni relative alla velocità dei convogli e alla durata degli eventi vibrazionali, hanno permesso di estrapolare le emissioni del “treno merci medio” e del “regionale medio” nelle condizioni in esame.

Nella tabella seguente si riportano i valori dei livelli di accelerazione L_w lungo gli assi X, Y e Z, riferiti sia alla condizione critica, ovvero al singolo transito che ha indotto i valori massimi di accelerazione, sia alla condizione media ricorrente sulla base dei valori osservati nell'intero periodo di misura.

Tipologi a treno	Postazione	Vel. media [km/h]	Durata media [s]	Lw,eq max [dB]			Lw,eq media [dB]		
				X	Y	Z	X	Y	Z
Regionale	T1 (8 m da binario)	105	24	74,0	73,8	74,0	69,1	69,1	69,0
	T2 (18 m da binario)	105	24	61,9	57,8	56,6	54,3	53,2	50,4
	T3 (28 m da binario)	105	24	54,9	50,1	50,6	47,3	45,5	44,4
Merci	T1 (8 m da binario)	70	53	73,0	72,3	72,4	69,0	69,1	68,9
	T2 (18 m da binario)	70	53	54,7	54,6	51,7	51,7	52,4	48,8
	T3 (28 m da binario)	70	53	47,7	46,9	45,7	44,7	44,7	42,8

Tabella 15-1 Livelli di accelerazione L_w,eq in dB riferiti ad un singolo transito di un convoglio delle due tipologie Regionale e Merci nella condizione di massima e media emissione rilevati in corrispondenza dei punti T1, T2 e T3 a 8, 18 e 28 m

16 STUDIO DELL'IMPATTO DA VIBRAZIONI

16.1 Le vibrazioni indotte in fase di esercizio

L'esercizio di una linea ferroviaria è fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante. I treni che si muovono su un percorso ferrato eccitano i binari e il relativo sottofondo su cui essi poggiano.

Le cause di tali vibrazioni sono da ricondursi all'interazione del sistema veicolo/armamento/struttura di sostegno e dipendono da diversi fattori quali la tipologia di convoglio, le velocità di esercizio le caratteristiche dell'armamento, la tipologia di terreni e non ultimo le caratteristiche strutturali dei fabbricati.

In generale gli aspetti che intervengono nel condizionare l'importanza del disturbo vibrazionale negli edifici si possono riassumere nei seguenti punti:

a) Interazione ruota- rotaia

b) Velocità del treno

c) Comportamento corpo ferroviario: tipo e dimensioni della linea (tunnel, trincea, superficie, rilevato, viadotto); spessore delle pareti della infrastruttura in tunnel o in trincea

d) Trasmissione nel terreno: natura e caratteristiche del suolo; leggi di attenuazione nel suolo

e) Trasmissione agli edifici: distanza plano-altimetrica tra linea e fondazioni edificio; caratteristiche del sistema fondazionale degli edifici; caratteristiche strutturali degli edifici.

Nei successivi sotto paragrafi vengono esaminati nel dettaglio i più importanti aspetti che influenzano il disturbo vibrazionale e le modalità con cui sono stati considerati nell'elaborazione del modello previsionale.

Le vibrazioni così generate si propagano nel terreno circostante, sia terreno o roccia, sotto forma di vibrazioni per via solida. Le modalità di propagazione dipendono dalla composizione del terreno, che può influenzare pesantemente l'ampiezza e la stessa velocità di propagazione. Quando l'onda vibrazionale incontra un edificio, la vibrazione può essere percepita sia sotto forma di vibrazione (vibrazioni trasmesse al corpo) sia sottoforma di rumore re-irradiato (di bassa frequenza).

Tali fenomeni sono in grado di determinare effetti indesiderati sulla popolazione esposta e sugli edifici. Il disturbo sulle persone, classificato come "annoyance", dipende in misura variabile dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attività svolta. Le

vibrazioni possono causare danni agli edifici in alcune situazioni, o in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati e prolungati livelli di sollecitazione dinamica. Tali situazioni si verificano tuttavia in corrispondenza di livelli di vibrazione notevoli, superiori di almeno un ordine di grandezza rispetto ai livelli tipici dell'annoyance.

16.2 Caratterizzazione della sorgente di vibrazioni

16.2.1 Interazione ruota-rotaia

La sorgente di vibrazioni ferroviaria consiste nel movimento del treno lungo le rotaie e dalle conseguenti forze che nascono nell'interazione fra ruota, rotaia e struttura di appoggio della rotaia. I treni, in fase di riposo, esercitano una forza statica data dal peso trasmesso dalle ruote alle rotaie e distribuito dalla rotaia stessa, dalle traversine, dal supporto (ballast,,,) e dal terreno: si tratta del carico statico. Quando il treno si mette in movimento questa forza si sposta insieme al treno stesso, ma a causa delle imperfezioni e irregolarità superficiali di ruota, rotaia nonché delle variazioni nel tipo di supporto della rotaia il carico statico eserciterà una forza dinamica, che si trasforma in vibrazioni generate nel punto di contatto ruota-rotaia e trasmesse nel terreno circostante. I parametri che influenzano il livello e le caratteristiche delle vibrazioni indotte dal passaggio del treno sono:

- **Vibrazioni indotte dalla risposta della struttura del binario:**
 - Carico statico assiale (peso del treno e spaziatura interassiale);
 - Geometria e composizione del treno (tipo, lunghezza,..);
 - Velocità del treno.
- **Interfaccia ruota-rotaia**
 - Imperfezioni della ruota (eccentricità, sbilanciamento, zone piatte, asperità);
 - Andatura instabile dei veicoli ferroviari;
 - Accelerazione e decelerazione del treno.
- **Imperfezioni della rotaia**
 - Qualità della rotaia (corrugamenti, corrosione, asperità, giunti,...),
 - Curve e chicane (forze centrifughe).
- **Variazioni nella struttura di supporto**
 - Geometria e rigidità della struttura di supporto (traversine, ballast e terreno),

– Presenza di ghiaccio.

Un aumento del carico assiale aumenta ovviamente il carico dinamico generato dal passaggio del treno. Il raddoppio del carico assiale può aumentare i livelli di vibrazione da 2 a 4 dB (Kurzweil, 1979). La composizione dei treni ha inoltre un impatto notevole sulla generazione di vibrazioni, così come la velocità stessa del treno può portare a notevoli incrementi di vibrazione: secondo Kurzweil (1979) un raddoppio della velocità può comportare un aumento di vibrazione da 4 a 6 dB (cfr. paragrafo successivo).

Le imperfezioni superficiali della ruota e della rotaia sono la causa principale delle vibrazioni. Nel primo caso le tipiche irregolarità superficiali sono le zone lisce (piatte) della ruota per effetto della frenatura. Le irregolarità della rotaia possono essere costituite invece da giunti fra spezzoni di rotaia (rotaie non saldate), corrugamenti, asperità o altro ancora. Secondo Kurzweil questi difetti possono aumentare i livelli di vibrazione da 10 a 20 dB.

Oltre a quelle menzionate, altre cause di vibrazione possono essere ricondotte alla presenza di curve, alle accelerazioni e/o decelerazioni del treno, alla guida instabile dei veicoli, etc.

Le variazioni nella struttura di supporto delle rotaie dipendono dalla geometria, rigidità e spaziatura fra le traversine. Il contatto tra la traversina e il ballast incide sulla emissione vibrazionale: una traversina che può perdere il contatto con il ballast sottostante oppure essere supportata meglio dallo stesso genera una discontinuità di resistenza (minore o maggiore a seconda del caso) al passaggio del treno e quindi una differente propagazione della vibrazione nel terreno. E' piuttosto comune individuare un picco corrispondente alla frequenza della spaziatura delle traversine e in funzione della velocità del treno. Anche la rigidità e l'eterogeneità del ballast possono influenzare le forze generate dal transito del treno. Come descritto sopra, il carico generato dai treni è dovuto ad un carico statico, dovuto al peso del treno, e ad un carico dinamico, generato dalle imperfezioni della rotaia, ruote, struttura di appoggio. I carichi dinamici variano il carico (e quindi la forza) complessiva trasmessa nella misura percentuale relativa al carico statico descritta nella seguente tabella.

Tipo di carico	Carico	Contributo
Statico	Peso del treno	100%
Dinamico	Contributo quasi-statico nelle curve	10-40%
“	Contributo dovuto ad asperità delle rotaie	50 – 300%
“	Contributo dovuto ad asperità delle ruote	50 – 300 %
“	Contributo dovuto ad accelerazioni e frenature	5 – 20 %

16.2.2 Velocità dei treni

La velocità del treno ha un effetto significativo sul disturbo vibrazionale negli edifici, anche se spesso inferiore a quanto potrebbe essere atteso sulla base di considerazioni soggettive,

I livelli di vibrazione variano con legge logaritmica in base dieci in funzione delle variazioni nella velocità del treno, ossia:

$$L = L_0 + 10 \div 20 \cdot \log\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

dove:

L e L_0 : sono i livelli di vibrazioni in decibel

V e V_0 : sono le rispettive velocità di transito dei treni

Dalla relazione sopra riportata si evince che al raddoppiare della velocità di transito si produce un incremento variabile tra i 3 e i 6 dB nei livelli di vibrazione e ciò in maniera indipendente dalla frequenza.

16.2.3 Corpo ferroviario

La vibrazione prodotta dai veicoli ferroviari attraverso la rotaia e la traversina su cui poggia raggiunge la struttura di appoggio sottostante, che può essere costituita da ballast (pietrisco di granulometria definita) o da strutture più o meno complesse in grado di attenuare le vibrazioni (dove si ritiene necessario allo scopo di ridurre l'impatto verso ricettori sensibili). A seconda della tipologia di corpo ferroviario la propagazione delle vibrazioni differisce notevolmente.

Nel caso di tracciati caratterizzati dalla presenza di tratti in rilevato le vibrazioni al terreno la vibrazione si propaga dalla struttura di supporto delle rotaie al terreno sottoforma di onde elastiche. Queste sono generalmente comprese tra i 20 e gli 80 Hz, con livelli di accelerazione dell'ordine di 60-70 dB¹, per distanze da 15 a 30 metri dalla linea ferroviaria con velocità di esercizio sino a 100 Km/h. Altresì il tipico spettro di frequenza generato dal

¹ 0 dB \cong 1 μ m/s²

transito di treni in gallerie è compreso fra 4 Hz e alcune centinaia di Hz. Vi possono essere picchi di frequenza compresi fra 80 e 100 dB.

16.3 La propagazione delle vibrazioni nel terreno

La propagazione delle vibrazioni nel terreno è un fenomeno molto complesso da determinare in quanto strettamente dipendente dalle caratteristiche specifiche del sito di studio sulla base delle caratteristiche morfologiche, tipologiche del terreno, etc.

Seppur esistono in letteratura numerosi modelli che permettono il calcolo della propagazione delle vibrazioni ferroviarie, modelli che vanno da equazioni di tipo empirico a modelli BEM/FEM, nel caso in oggetto si è ritenuto opportuno rifarsi a dati sperimentali specifici all'ambito di studio.

In linea generale la propagazione delle onde vibrazionali nel terreno è funzione di due principali fenomeni di attenuazione.

L'attenuazione geometrica per una linea di emissione di lunghezza infinita (lunghezza del treno maggiore della distanza sorgente-ricettore) si esprime come:

$$A_g = 20 \cdot \log_{10}((d+d_0)/d)^n$$

dove:

$d+d_0$: distanza dall'asse della linea ferroviaria

d_0 : distanza di riferimento

$n=0,5$ per galleria, $n=1$ per tracciato di superficie

La varietà delle conformazioni morfologiche del terreno comporta le maggiori incertezze di valutazione della propagazione delle vibrazioni. I fattori che possono influire nella determinazione dell'attenuazione nel terreno sono molteplici. I più determinanti sono costituiti dalla natura del mezzo, dal suo grado di costipazione, dall'attrito statico fra i granuli e quindi dalla granulometria, dalla fratturazione del mezzo, dalla presenza di acqua, e da altri fattori la cui differente combinazione può determinare gradi di attenuazione differenti in mezzi litologicamente similari.

Agli effetti dell'analisi del terreno alle azioni dinamiche risulta quindi determinante la suddivisione tra rocce lapidee (tipo A nella norma UNI 9916) e rocce sciolte (da tipo B a tipo F nella norma UNI 9916).

In generale le rocce lapidee trasmettono tutta la gamma di frequenze, e principalmente le più alte, mentre le rocce sciolte lasciano passare solo le basse frequenze, che comunque corrispondono a quelle di risposta degli edifici. Inoltre, mentre le rocce lapidee difficilmente possono subire variazioni di struttura sotto sollecitazioni dinamiche, le rocce sciolte, risultano di gran lunga più sensibili. La loro risposta alla azione di disturbo è diversa a seconda che l'intensità del disturbo sia lieve o al contrario forte: in altre parole il comportamento dei materiali sciolti è fortemente non lineare. Nel primo caso non si ha una vera variazione della struttura mentre nel secondo caso la vibrazione produce per tutte le rocce sciolte un assestamento e quindi una riduzione di porosità. Ciò avviene in misura maggiore per le rocce incoerenti poiché i granuli sottoposti a vibrazione perdono resistenza di attrito e quindi vengono favoriti fenomeni di scorrimento con assestamenti.

L'analisi delle caratteristiche geolitologiche degli strati superficiali del terreno è finalizzata al riconoscimento dei parametri correlabili alla propagazione delle vibrazioni nel terreno. I valori tipici di densità, velocità di propagazione e fattore di perdita, noti esclusivamente per alcune classi geologiche e in presenza di un ammasso omogeneo, sono riassunti nella sottostante tabella.

Tipo di terreno	Densità [t/m ³]	Velocità di propagazione [m/s]	Fattore di perdita η
Roccia compatta	2.65	3500	0.01
Sabbia, limo, ghiaia, loess	1.6	600	0.1
Argilla, terreni argillosi	1.7	1500	0.2÷0.5

L'attenuazione dovuta all'assorbimento del terreno è stata calcolata con la formula:

$$A_t = 4,34 \cdot \Omega \cdot \eta \cdot x/c \text{ con } c = (E/d)^{1/2}$$

dove:

- x: distanza dall'asse della linea ferroviaria
- Ω: frequenza [rad*s⁻¹]
- η: coeffic. di assorbimento del terreno (fattore di perdita)

- c: velocità di propagazione dell'onda longitudinale nel terreno
- E: modulo elastico
- d: densità del terreno

L'attenuazione dovuta alle discontinuità del terreno è stata considerata in modo semplificato ammettendo che l'onda di compressione si sposti dal suolo "a" al suolo "c" e che incida perpendicolarmente alla superficie di separazione dei due mezzi:

$$A_i = 20 \cdot \log\left[\frac{1 + d_c \cdot c_c / d_a \cdot c_a}{2}\right]$$

dove:

d_c, d_a = densità dei suoli "c" e "a"

c_c, c_a = velocità di propagazione nei suoli "c" e "a"

In considerazione dei molteplici fattori che possono condizionare il trasferimento delle vibrazioni nel suolo, per la costruzione del modello sono stati utilizzati i dati sperimentali rilevati dalla campagna di rilievi già citata. Si nota che, conoscendo la mutua distanza tra le postazioni, dai dati sperimentali è possibile estrapolare le funzioni di attenuazione, tramite regressione, le quali descrivono la propagazione nel terreno dell'onda vibrazionale in funzione della distanza. Nei grafici seguenti sono riportati i valori sperimentali sui quali è applicata la regressione logaritmica al fine di definire la funzione di trasferimento.

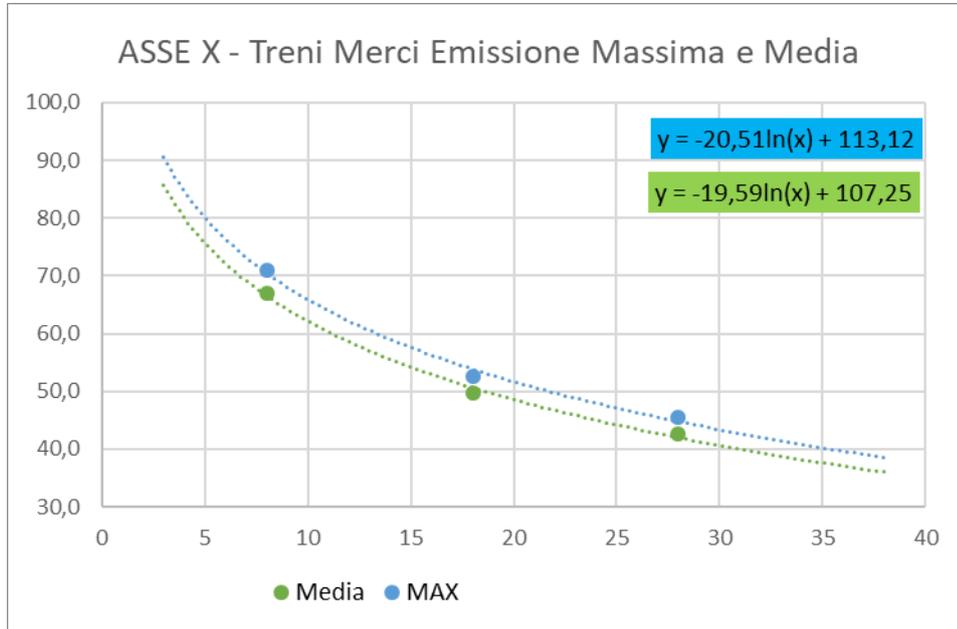


Figura 16-1 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse X per un singolo transito ferroviario di treno merci nella condizione di massima e media emissione riportati alla velocità di progetto di 55km/h

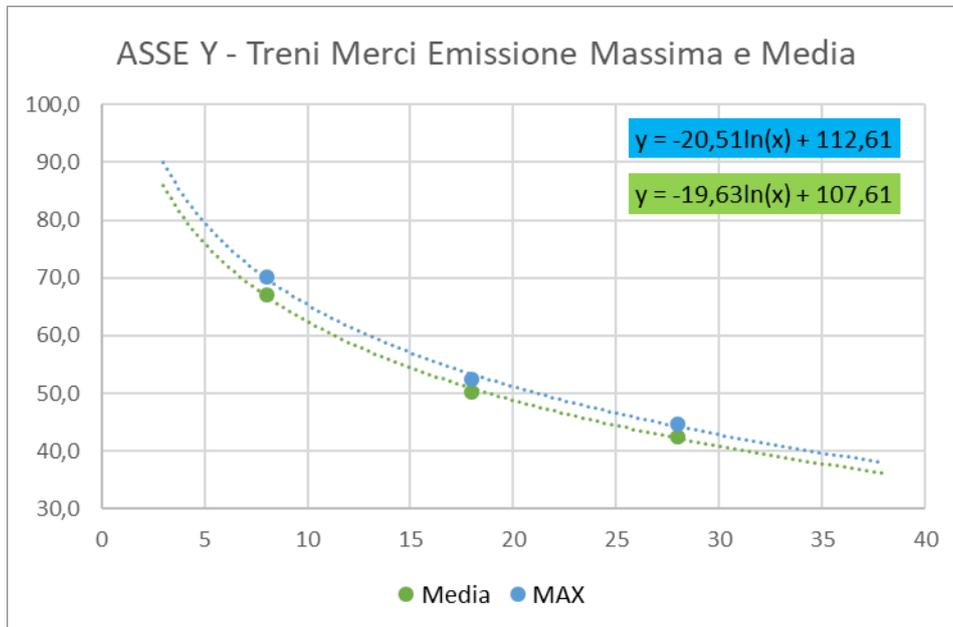


Figura 16-2 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Y per un singolo transito ferroviario di treno merci nella condizione di massima e media emissione riportati alla velocità di progetto di 55km/h

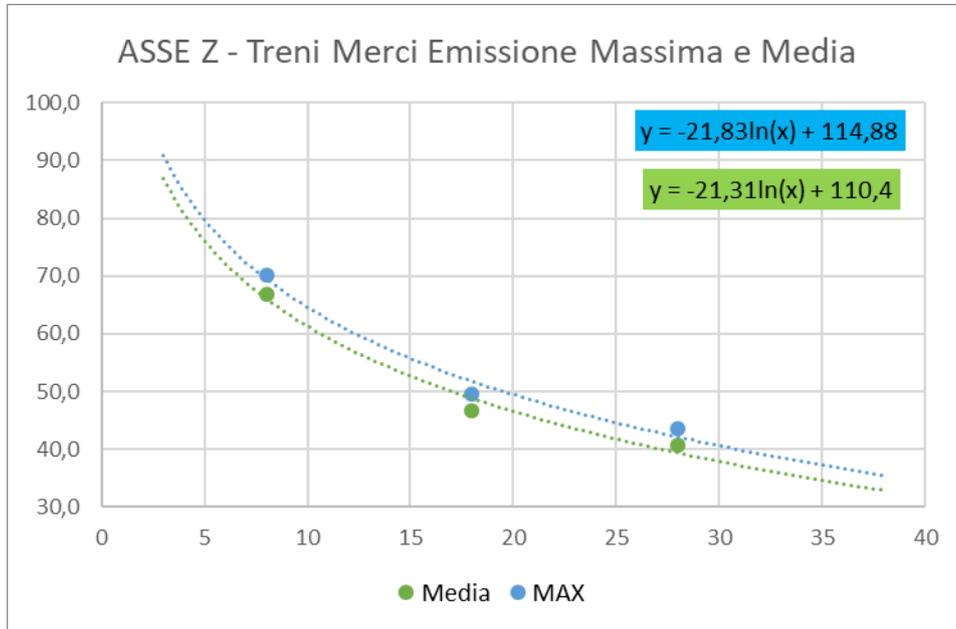


Figura 16-3 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Z per un singolo transito ferroviario di treno merci nella condizione di massima e media emissione riportati alla velocità di progetto di 55km/h

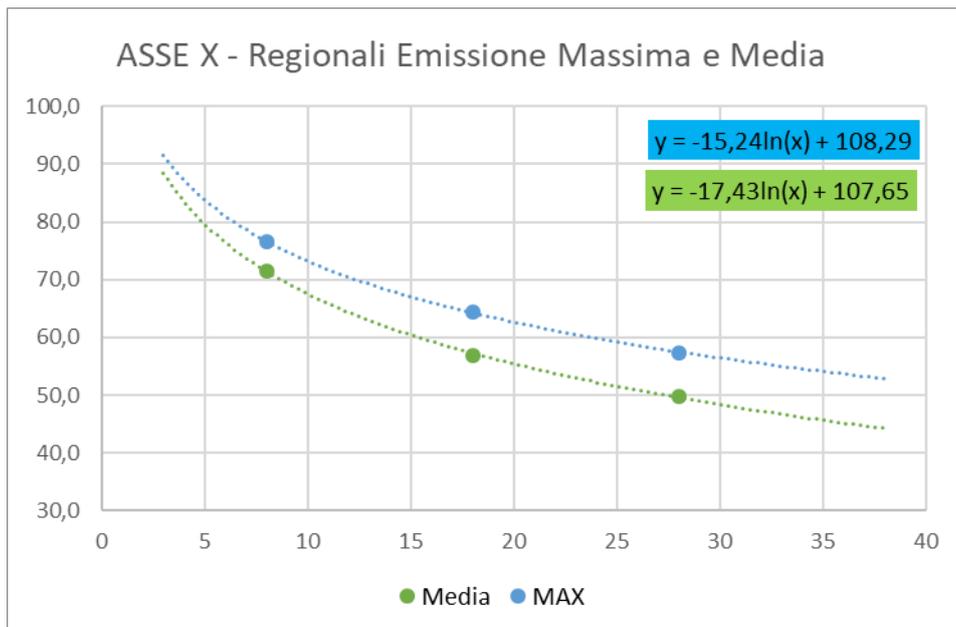


Figura 16-4 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse X per un singolo transito ferroviario di treno regionale nella condizione di massima e media emissione riportati alla velocità di progetto di 140km/h

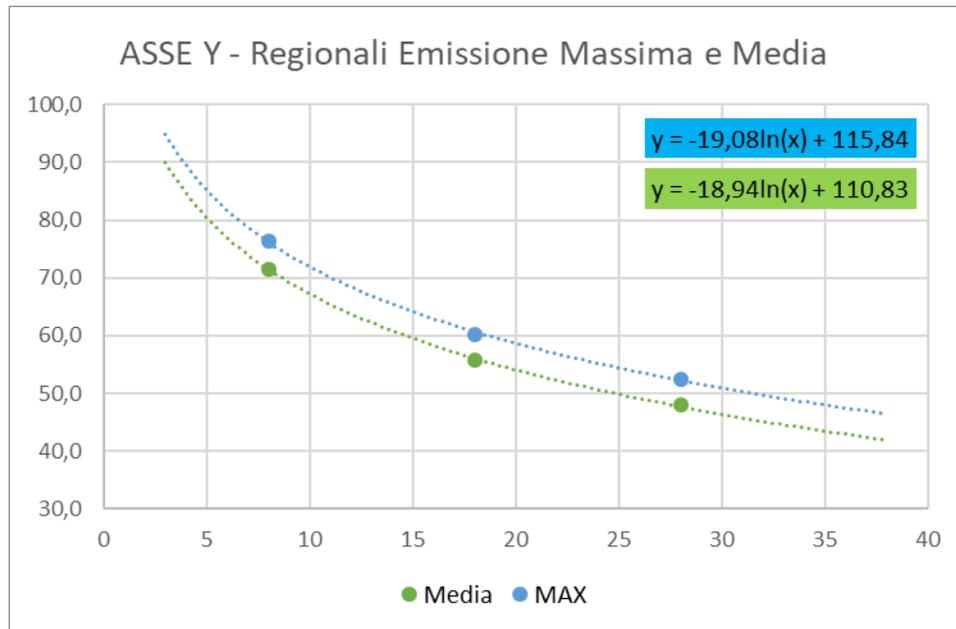


Figura 16-5 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Y per un singolo transito ferroviario di treno regionale nella condizione di massima e media emissione riportati alla velocità di progetto di 140km/h

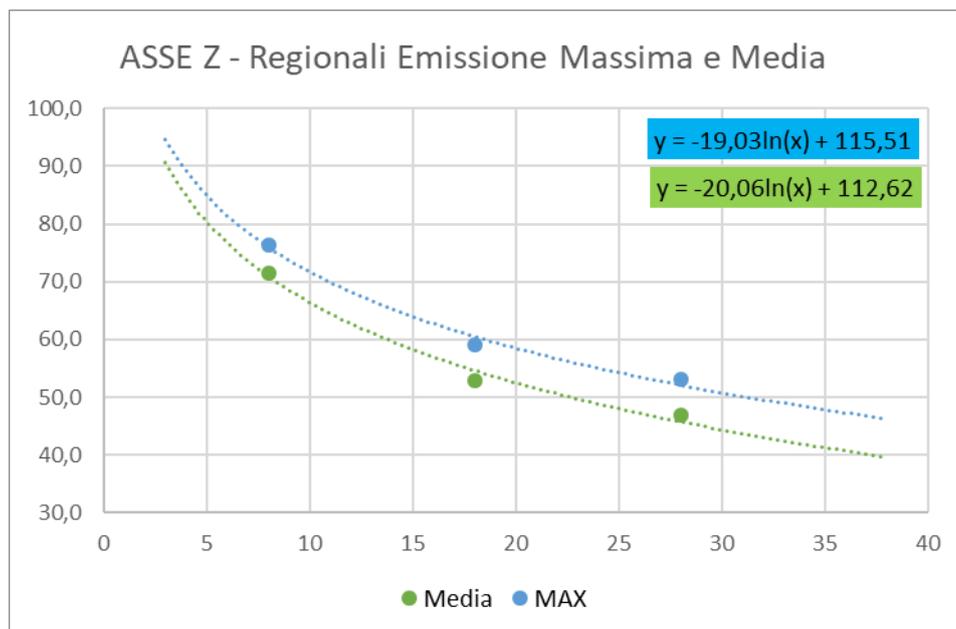


Figura 16-6 Individuazione della legge di propagazione delle vibrazioni nel terreno sulla base dei dati sperimentali lungo l'asse Z per un singolo transito ferroviario di treno regionale nella condizione di massima e media emissione riportati alla velocità di progetto di 140km/h

16.4 La propagazione delle vibrazioni nelle strutture edilizie

16.4.1 Risposta degli edifici alle vibrazioni

Il modello semplificato di propagazione illustrato in precedenza si riferisce ai soli fenomeni che avvengono nel terreno, supposto omogeneo ed isotropo (perlomeno all'interno di ogni strato). Quando invece le vibrazioni nel terreno raggiungono un edificio esse si propagano attraverso le sue fondazioni e successivamente alle altre parti dell'edificio (pareti, pavimenti, soffitti), trasferendo ad esse l'energia vibratoria. Queste possono essere percepite come vibrazioni trasmesse al corpo delle persone o come rumore re-irradiato di bassa frequenza. Le vibrazioni possono a loro volta mettere in movimento alcune parti o oggetti delle abitazioni (mobili, vetri, suppellettili) e questi possono generare rumore o causare danni a strumenti sensibili. In alcuni casi le vibrazioni particolarmente elevate e ripetute nel tempo possono procurare un danno strutturale agli edifici, ma ben raramente questi effetti si verificano con infrastrutture dei trasporti.

In presenza di edifici dalla struttura complessa, collegati al terreno mediante sistemi di fondazione di vario genere, accade che i livelli di accelerazione riscontrabili all'interno degli edifici stessi possono presentare sia attenuazioni, sia amplificazioni rispetto ai livelli sul terreno. In particolare, diversi sistemi di fondazione producono una attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante; tale aspetto è legato al fatto che l'interfaccia terreno-struttura non è perfettamente solidale, e pertanto genera fenomeni dissipativi. Detto fenomeno è condizionato dalla tipologia delle fondazioni (a platea, su plinti isolati, su travi rovesce, su pali, etc.). Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente di 0 dB alle basse frequenze, sino alla frequenza di risonanza della fondazione.

Per le altre tipologie di fondazioni possono essere utilizzate curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione della fondazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.

Va inoltre preso in esame il fenomeno della risonanza strutturale di elementi dei fabbricati, in particolare dei solai: allorché la frequenza di eccitazione coincide con la frequenza naturale di oscillazione libera della struttura, la stessa manifesta un rilevante aumento dei livelli di vibrazione rispetto a quelli presenti alla base della stessa.

La propagazione delle vibrazioni dalle fondazioni di un edificio all'ambiente ricevente all'interno dell'edificio è un problema estremamente complesso, che richiede peraltro la conoscenza esatta della struttura dell'edificio, e può dunque essere studiato solo in fase di progettazione di un nuovo edificio e richiede solitamente metodi numerici agli elementi finiti. Nel presente studio ci si deve necessariamente basare su considerazioni molto meno dettagliate, che tuttavia hanno solide basi sperimentali ed esperienziali.

La propagazione delle vibrazioni attraverso un edificio e la radiazione sonora conseguente viene stimata utilizzando formulazioni empiriche o modelli teorici. Le formulazioni più note si basano sugli studi di Kurzweil e Melke, e sono anche disponibili in testi quali *Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control*. L'approccio consiste nel trattare la vibrazione proveniente dal terreno con una serie di fattori correttivi dipendenti dalla particolare configurazione dell'edificio.

Fattore correttivo	Motivazione	Modalità di correzione
Accoppiamento terreno-fondazioni	Fattore correttivo che rappresenta la riduzione di vibrazione nell'interfaccia suolo-fondazioni.	I fattori correttivi da utilizzare consigliati dallo studio della Federal Transit Administration sono riportati nei diagrammi seguenti. La correzione risulta nulla al piano delle fondazioni. Possono essere utilizzati valori misurati in luogo delle correzioni generiche.
Trasmissione attraverso l'edificio	L'ampiezza di vibrazione subisce una attenuazione propagandosi lungo l'edificio.	Il comportamento tipico assume che vi sia una attenuazione da 1 a 2 dB per ciascun piano.
Risonanze strutturali dei solai	L'ampiezza di vibrazione viene amplificata dalle risonanze strutturali di solai/soffitti.	Per strutture con telaio in legno la frequenza fondamentale di risonanza dei solai è solitamente nel range 15-20-Hz. Strutture in cemento armato hanno frequenze di risonanza nella gamma 20-30-Hz. L'amplificazione nel range di risonanza implica una amplificazione di almeno 6 dB.

16.4.2 Accoppiamento terreno – fondazioni edificio

La quantità di vibrazioni che si trasmette agli edifici dipende dall'accoppiamento fra il terreno e le fondazioni. Solitamente vi è un'attenuazione delle vibrazioni in questo passaggio.

Per fondazioni a platea, a contatto con il terreno sottostante e sottoposte dunque alle stesse vibrazioni non vi è solitamente alcuna attenuazione (0 dB) per le frequenze fino alla frequenza di risonanza della struttura della platea. (Remington et al., 1987).

L'accoppiamento per edifici con strutture leggere è anch'esso stimato essere pari a 0 dB da Kurzweil, 1979. Per altri tipi di fondazioni (pali...) l'accoppiamento varia fra 2 e 15 dB in funzione della frequenza e della fondazione (Remington, 1987; Kurzweil, 1979). Per edifici fondati direttamente su strati rocciosi l'accoppiamento è 0 (Kurzweil, 1979). La riduzione delle vibrazioni fra terreno ed edificio è maggiore per oscillazioni verticali poiché l'edificio risulta strutturalmente più debole in senso orizzontale.

Nel presente lavoro i comportamenti strutturali verranno stimati sulla base dei seguenti diagrammi.

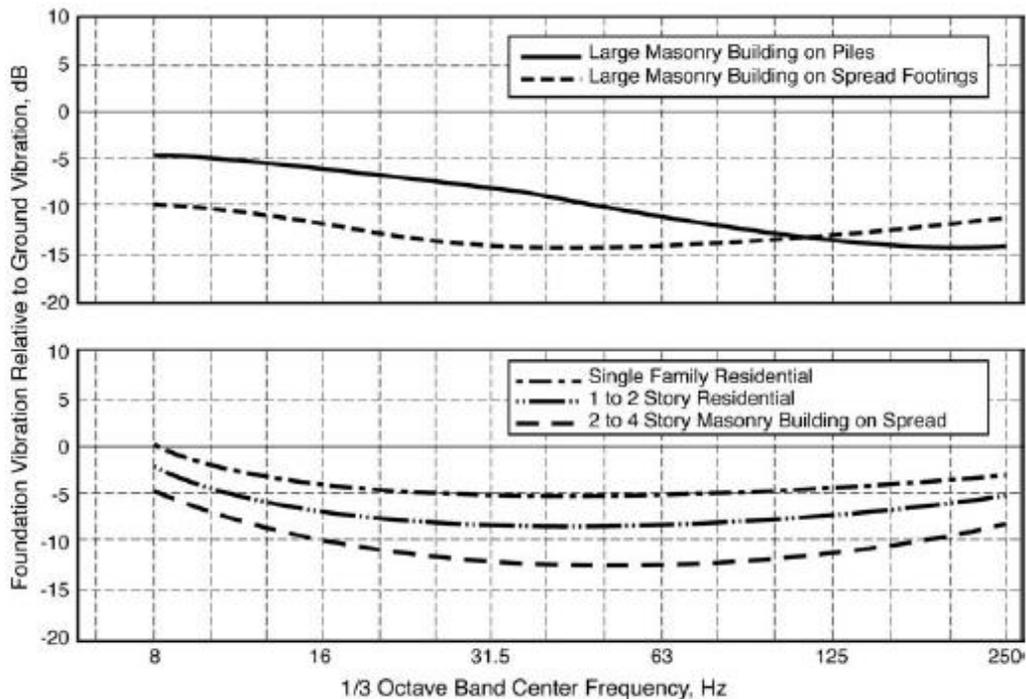


Figura 16-7 Risposta delle fondazioni per diverse tipologie di edifici (Fonte: FTA, USA)

16.4.3 Trasmissione attraverso l'edificio

Passando da un piano a quello sovrastante si verifica una progressiva riduzione dei livelli di vibrazione trasmessi. La figura seguente mostra il campo di variabilità tipico di tale attenuazione interpiano.

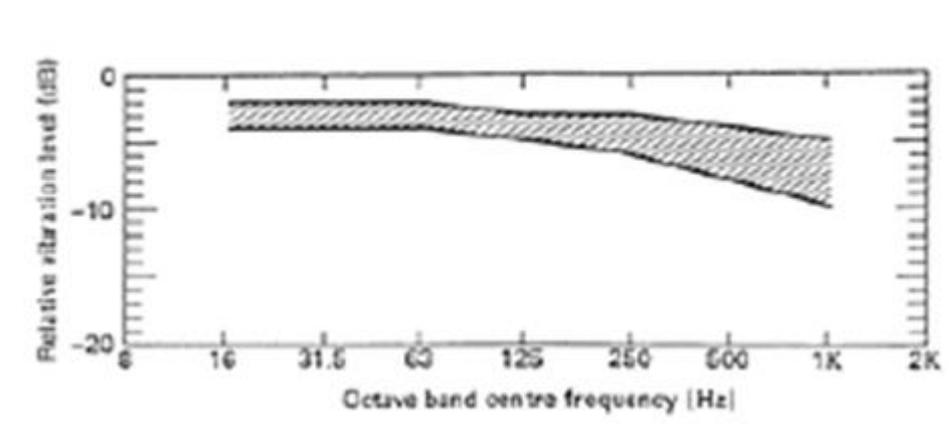


Figura 16-8 Attenuazione delle vibrazioni nel passaggio da un piano al successivo

Ungar and Bender (1975) proposero di valutare l'attenuazione delle vibrazioni attraverso l'edificio con la seguente relazione:

$$L_p = L_g - 3n \quad [\text{dB}]$$

dove:

L_g è la vibrazione alle fondazioni;

n è il numero di piani dell'edificio (o meglio il numero di piani interposti fra le fondazioni e il piano per il quale interessa calcolare la vibrazione).

Viene quindi calcolata una riduzione di 3 dB per ogni piano.

16.4.4 Risonanze strutturali dei solai

Pareti, solai e soffitti di un edificio talvolta amplificano le vibrazioni. Edifici con strutture leggere in genere non amplificano particolarmente, anche se si possono verificare amplificazioni ai piani superiori (Kurzweil, 1979). L'amplificazione può variare tra un fattore 0.5 (riduzione) e 2 (amplificazione) nella gamma di frequenza 25 - 30 Hz, anche se si sono osservate amplificazioni fino a un fattore 5 (Leventhall, 1987). Questo fenomeno è causato dal fatto che parti diverse di un edificio possono avere caratteristiche diverse di rigidità,

massa e smorzamento, con conseguenti diverse frequenze naturali di oscillazione. Di seguito vengono indicate alcune frequenze naturali tipiche.

Elemento edilizio	Frequenza naturale [Hz]
Pali	5-50
Pavimenti e solette	10-30
Finestre	10-100
Soffitti intonacati	10-20

Dawn and Stanworth (1979) hanno dimostrato che vi possono essere notevoli differenze nei livelli di vibrazione e nelle frequenze fra due pavimenti di un edificio. In genere, l'amplificazione è nella gamma 5 – 15 dB per le frequenze 16 – 80 Hz (Remington, 1987). E' comune che pavimento amplifichi nella gamma 10 – 30 Hz poichè a quelle frequenze le risonanze della struttura coincidono con i picchi di vibrazione prodotti dal transito del treno.

Nella figura successiva viene evidenziato il possibile campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai, che come si nota oscilla fra 5 e 12 dB nel campo di frequenze rilevanti dal punto di vista ferroviario.

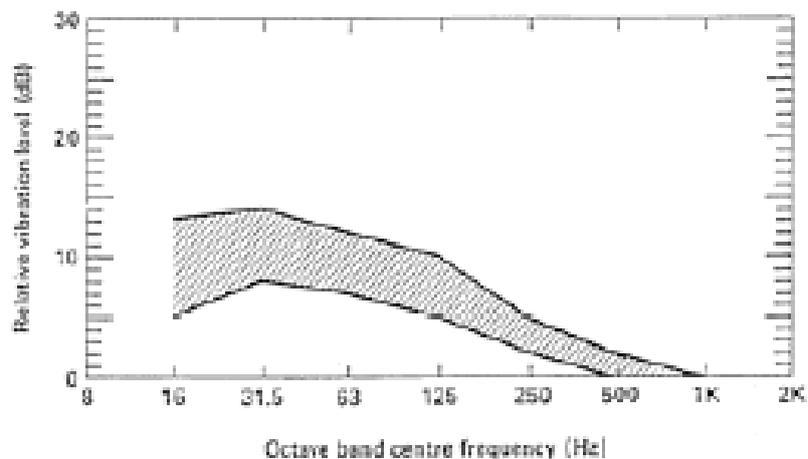


Figura 16-9 Amplificazione prodotta dai solai

Ne deriva quindi come l'effetto complessivo di questi fenomeni possa in generale portare ad una variazione dei livelli di vibrazione, misurati al centro dei solai, da 0 a +12dB rispetto ai livelli sul terreno.

16.4.5 Individuazione delle vibrazioni trasmesse a ciascun edificio e stima della risposta

Una stima dell'effetto locale di riduzione/amplificazione di ciascun edificio è possibile parametrizzando gli effetti combinati sopra descritti. In base alle caratteristiche delle fondazioni dell'edificio si definisce un fattore di attenuazione per le fondazioni secondo il seguente schema.

Tipologia fondazioni	Tipologia edificio	Fattore correttivo [dB]
Fondazioni a platea	Villetta monofamiliare	curva 1
“	Palazzina 1-2 piani	curva 2
“	Palazzina 2-4 piani	curva 3
“	Edificio di grandi dimensioni (industriale, commerciale, palazzo multipiano)	curva 4
Fondazioni su pali	Edificio di grandi dimensioni (industriale, commerciale, palazzo multipiano)	curva 5

La correzione in frequenza è desunta dal seguente diagramma.

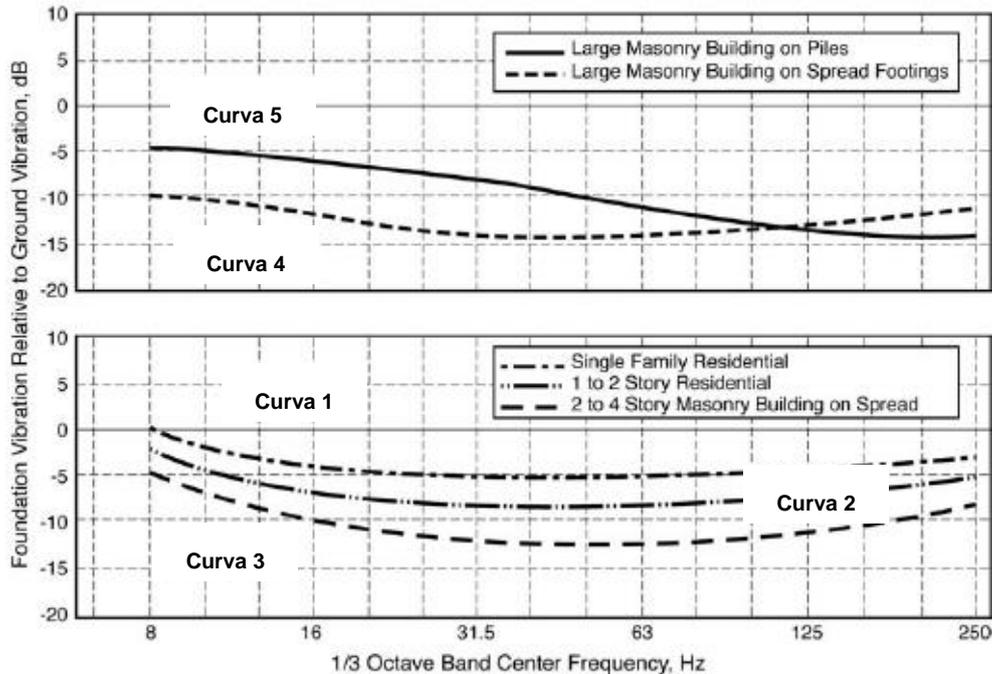


Figura 16-10 Fattori correttivi dovuti alla tipologia di fondazione

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate da edifici storici in muratura, con fondazioni direttamente immerse nel terreno e edifici di recente edificazione con ossatura in cemento armato e fondazioni continue. In queste condizioni, sulla base di quanto sin ora detto, la differenza tra il livello di vibrazione del terreno e quello dell'edificio si stima cautelativamente essere di circa +5 dB.

Tali fattori costituiscono un ulteriore elemento cautelativo nella valutazione del disturbo da vibrazioni e tengono conto dell'effetto combinato delle componenti positive, quali la perdita di accoppiamento suolo-fondazioni e l'attenuazione da piano a piano e delle componenti negative di attenuazione, quali la risonanza alle frequenze proprie dei solai.

L'approccio cautelativo con cui viene affrontato il tema è confermato anche da indagini effettuate sulle linee ferroviarie italiane.

16.4.6 Rumore trasmesso per via solida dalle strutture

Il rumore solido all'interno degli edifici è il risultato delle onde acustiche irradiate dalle superfici della stanza, includendo le pareti, i pavimenti, i soffitti e tutti gli altri elementi normalmente presenti quali finestre, porte, ecc. La relazione tra le ampiezze di vibrazione delle superfici della stanza ed i livelli di pressione sonora all'interno della stanza stessa è funzione del valore medio del coefficiente di assorbimento acustico che caratterizza le

superfici, dalla dimensione e forma della stanza e della distribuzione del campo di vibrazione sulle superfici vibranti.

Studi basati su considerazioni teoriche hanno consentito di formulare la seguente relazione che lega i livelli di pressione sonora con i livelli di vibrazione in accelerazione rilevabili in corrispondenza dell'orizzontamento della stanza:

$$L_p = L_a - 20 \cdot \log(f) + 16$$

dove:

L_p è il livello di pressione sonora in dB ($0 \text{ dB} = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$);

L_a è il livello di vibrazione di accelerazione all'orizzontamento in dB ($0 \text{ dB} = 1 \text{ } \mu\text{g}$);

F è la frequenza per bande a terzi di ottava in Hz.

L'applicazione del modello di propagazione del rumore solido per i ricettori analizzati nel presente studio non evidenziano situazioni di criticità preventivabili. Lo stato degli infissi di ciascun edificio, classificato "buono" in fase di censimento ricettori, potrebbe ridurre notevolmente l'insorgere di condizioni di attenzione per gli stessi ricettori potenzialmente interessati da livelli di vibrazioni disturbanti, qualora i vetri entrino in risonanza, vibrino ed emettano all'interno del locale un rumore avente le medesime frequenze.

17 LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO

17.1 Previsione dell'impatto in fase di esercizio

L'individuazione delle criticità che si potranno verificare con la realizzazione del progetto ha reso indispensabile determinare preventivamente i criteri di valutazione della sensibilità del territorio. Per quanto riguarda l'individuazione di criticità, in via cautelativa, si è fatto riferimento ai limiti indicati dalla norma ISO 2631/UNI 9614:1990 per le vibrazioni di livello costante, in particolare per la condizione di postura del corpo non nota, per la quale si indicano soglie uguali per tutti i tre assi di riferimento (x, y, z) di 77 dB per il giorno e 74 dB per la notte, per ambiti residenziali. Ciò, pertanto, senza tener conto dei valori di riferimento suggeriti dalla medesima norma nel caso di vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari (89,5 dB per il giorno - 86,7 dB per la notte). Applicando i modelli di calcoli precedentemente descritti, le funzioni di trasferimento sperimentali e attraversamenti litologici tipici dell'area in esame, i dati di caratterizzazione dei singoli transiti massimi e medi e tipologie edilizie sia in c.a. sia in muratura (con luci di solaio di 4 m), si è giunti al calcolo della distanza dalla sorgente a cui il livello di accelerazione ponderato risulti inferiore ai valori indicati dalla norma UNI 9614:1990 per i tutti i ricettori sia nel periodo diurno che notturno lungo tutti gli assi. In assenza, però, di dati precisi per ciascun edificio analizzato (terreno, fondazioni, strutture, destinazione d'uso), le valutazioni previsionali possono risentire di variazioni anche apprezzabili: a tal fine, nelle valutazioni conclusive si terrà conto in via cautelativa di un margine di tolleranza tale da rappresentare anche la variabilità dei parametri di input.

Il valore complessivo di accelerazione che tiene conto anche del modello di esercizio all'orizzonte temporale di progetto, è confrontato con i limiti indicati dalle norme tecniche per il periodo diurno (07-22) e il periodo notturno (22-07), così come previsto dal "Manuale di Progettazione delle Opere Civili di RFI" (cod. RFI DTC SI AM MA IFS 001 D del 31.12.2020).

Come indicato nel manuale citato, i valori di riferimento suggeriti dalla norma UNI 9614:1990 precedentemente descritti (punto A.4 della Appendice) nel caso di vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari, sono invece da confrontare con i livelli dei singoli transiti, distinti per tipologia di convoglio, adottando come intervallo di tempo rappresentativo la durata dell'evento, in caso di tracciato in sotterraneo.

17.2 Traffico di esercizio

Il numero di transiti considerati per la valutazione previsionale del disturbo da vibrazioni si basa sul modello di esercizio futuro individuato nell'ambito del progetto e riferito alla linea di progetto.

Si evidenzia infatti, che per tale studio non si è fatto riferimento alla sovrapposizione degli effetti dovuti alla coesistenza con le linee concorsuali, in quanto lo studio è finalizzato alla valutazione del solo disturbo indotto dalla linea in progetto e all'individuazione delle eventuali specifiche soluzioni mitigative.

Ai fini dell'applicazione del modello previsionale sono stati considerati i seguenti dati di input:

- 64 treni regionali diurni (6:00-22:00) e 8 treni merci notturni (22:00-6:00);
- Velocità di progetto pari a 140 km/h per i regionali e 55 km/h per i merci (si sono considerate le velocità massime raggiungibili sul tracciato, in via cautelativa).

Il modello di esercizio è stato desunto dall'elaborato di Esercizio.

17.3 Livelli vibrazionali indotti

17.3.1 Individuazione dei livelli emissivi

Le accelerazioni complessivamente prodotte dall'esercizio della linea ferroviaria di progetto sono fornite dall'applicazione dell'emissione delle singole tipologie di treno e verso di percorrenza al traffico di esercizio previsto, in riferimento alle postazioni di indagine effettuate e tenendo conto del tempo di esposizione medio. Nelle tabelle seguenti si evincono per i tre assi di riferimento X, Y e Z e nelle tre postazioni T1, T2 e T3 di riferimento il valore complessivo di esposizione nel periodo diurno e nel periodo notturno calcolato sulla base del modello di esercizio atteso e delle velocità di percorrenza. Inoltre, è stato considerato un fattore di correzione per tener conto della differenza tra il livello vibrazionale nel terreno e quello all'interno dell'edificio che, nel caso specifico per le motivazioni dette nel capitolo precedente si stima essere cautelativamente di +5 dB.

La valutazione è eseguita sia considerando il singolo transito nella condizione di massima emissione vibrazionale che l'intero modello di esercizio nell'arco delle 24 ore, differenziando le analisi tra periodo diurno e notturno.

Per quanto concerne il livello di emissione massima, questo è rappresentato dai valori vibrazionali massimi indotti da un singolo transito di un convoglio ferroviario determinato

sulla base dei dati sperimentali e opportunamente corretti rispetto ai valori di velocità massima secondo la formula riportata nel par.16.2.2. Inoltre, è stato considerato l'ulteriore fattore di +5dB per tener conto della propagazione delle vibrazioni all'interno dell'edificio (cfr. par.16.4.5) che cautelativamente è stato considerato come fenomeno di amplificazione seppur non sempre verificato in quanto dipende strettamente dalle caratteristiche strutturali del singolo edificio.

17.3.2 Livello di emissione massima

La tratta in studio si riferisce alla linea Lamezia Terme Centrale – Catanzaro Lido a un solo binario.

Per quanto riguarda le emissioni ferroviarie, sulla base dei dati sperimentali già citati, è stato individuato il livello emissivo massimo rilevato e corretto secondo la velocità di percorrenza assunta e i fattori cautelativi di amplificazione delle vibrazioni all'interno degli edifici.

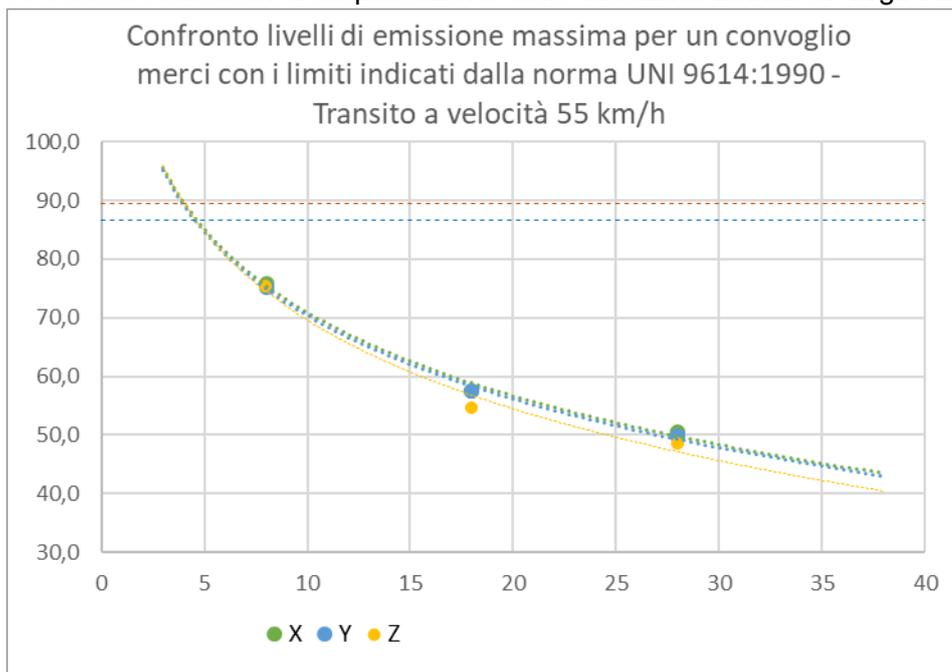


Figura 17-1 Confronto dei livelli di emissione massima riferiti al transito di un singolo convoglio ferroviario merci a 55 km/h in funzione della distanza dall'asse del binario più esterno con i limiti indicati dalla UNI 9614:1990 in Appendice A4

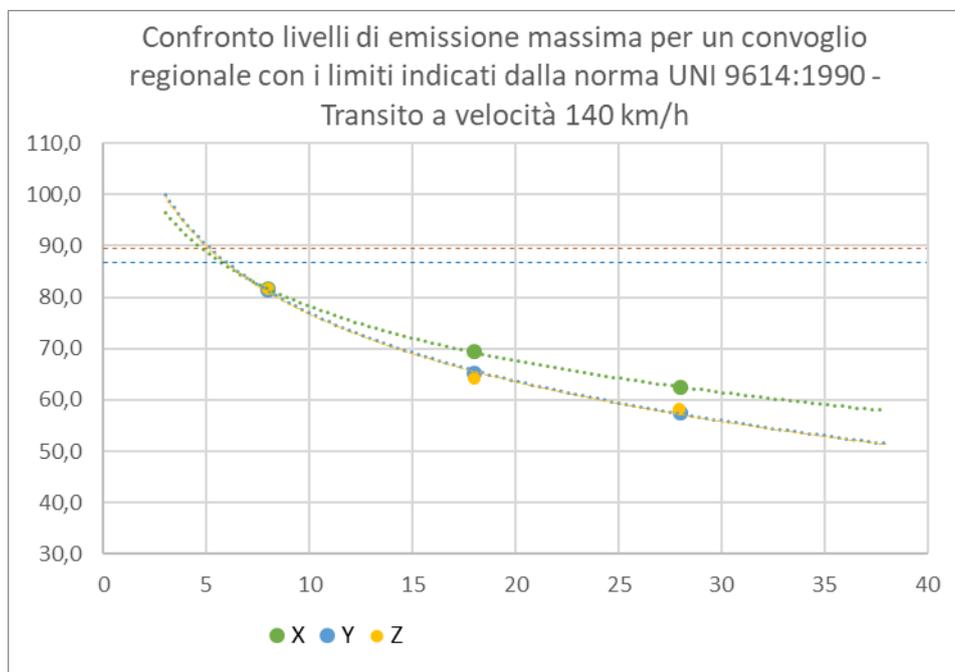


Figura 17-2 Confronto dei livelli di emissione massima riferiti al transito di un singolo convoglio ferroviario regionale a 140 km/h in funzione della distanza dall'asse del binario più esterno con i limiti indicati dalla UNI 9614:1990 in Appendice A4

Dal confronto tra il livello emissivo di origine ferroviaria secondo la sua legge di propagazione in funzione della distanza dall'asse della linea ferroviaria e i valori limite indicati dalla norma UNI 9614:1990 nell'appendice A4 per i singoli transiti ferroviari, si evince come:

- per un convoglio merci la fascia di potenziale disturbo per le abitazioni ha una ampiezza di circa 4 m dall'asse del binario più esterno sia per l'asse Z (limite 89,5 dB) sia per gli assi X e Y (86,7 dB);
- per un convoglio regionale, invece, la fascia di potenziale disturbo per le abitazioni ha una ampiezza di circa 5 m dall'asse del binario più interno per l'asse Z (limite 89,5 dB) e di 6m dall'asse per gli assi X e Y (limite 86,7 dB).

Stante i risultati soprariportati non si evincono condizioni di criticità su edifici.

17.3.3 Livello di emissione complessivo

Per la determinazione dei livelli di emissione complessivi si è fatto riferimento invece all'intero modello di esercizio previsto nell'arco delle 24 ore, distinguendo il numero di transiti nel periodo diurno e notturno, e considerando i valori emissivi medi di un convoglio merci

desunti dall'analisi dei dati sperimentali rilevati e corretti in funzione delle varie velocità di percorrenza previste sulla linea.

Il contributo energetico associato all'intero modello di esercizio è stato poi rapportato all'intero periodo diurno e notturno. Anche in questo caso le analisi hanno tenuto conto della propagazione all'interno degli edifici considerando un fattore cautelativo di amplificazione di +5dB per tener conto della propagazione nell'accoppiamento terreno-fondazioni.

Il modello di esercizio prevede nel periodo diurno il transito di 64 treni regionali alla velocità massima di 140 km/h e di 8 treni merci nel periodo notturno alla velocità massima di 55 km/h.

Posizione	Dist. da binario esterno	Lw,eq [dB] Diurno			Lw,eq [dB] Notturno		
		Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z
T1	8 m	56,1	56,1	56,1	48,0	48,2	48,0
T2	18 m	41,4	40,2	37,4	30,8	31,5	27,9
T3	28 m	34,4	32,5	31,4	23,8	23,8	21,9

Tabella 17-1 Livelli di accelerazione Lw,eq in dB all'interno degli edifici nel periodo diurno e notturno lungo gli assi X, Y e Z complessivamente attesi secondo il programma di esercizio previsto considerando i valori emissivi medi per la tratta di progetto

Considerando quindi i livelli di emissione complessivi, dall'applicazione del modello previsionale individuato, si evince:

- Il livello limite diurno di 77 dB per le abitazioni nel periodo diurno viene raggiunto internamente agli edifici ad una distanza di circa 4 metri dalla mezzera delle due linee ferroviarie;
- Il livello limite notturno di 74 dB per le abitazioni nel periodo notturno viene raggiunto internamente agli edifici ad una distanza di 3 metri dalla mezzera delle due linee ferroviarie.

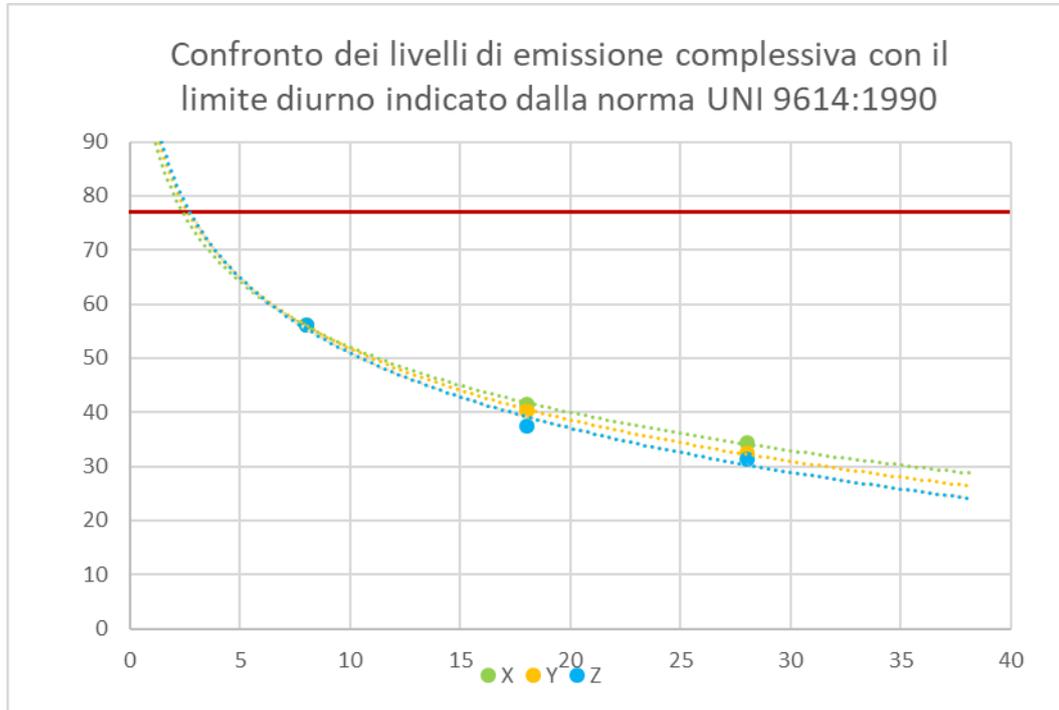


Figura 17-3 Confronto dei livelli di emissione complessiva all'interno degli edifici con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza dal binario secondo il modello di esercizio previsto – Periodo diurno

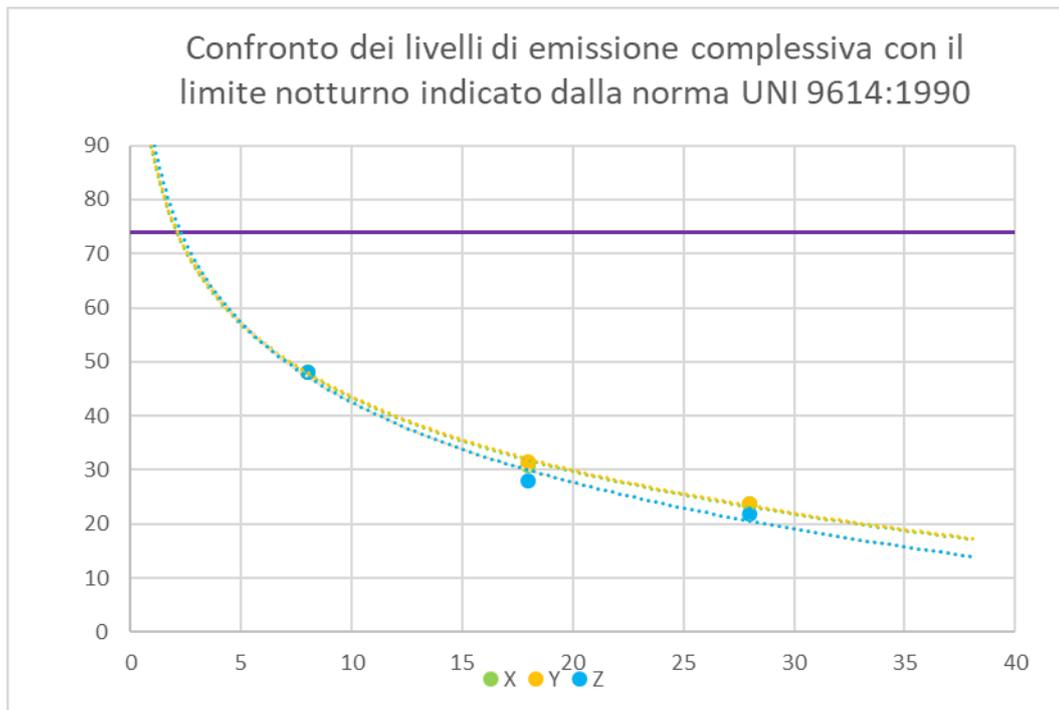


Figura 17-4 Confronto dei livelli di emissione complessiva all'interno degli edifici con i limiti UNI 9614:1990 in funzione della distanza dal binario secondo il modello di esercizio previsto - Periodo notturno

17.4 Individuazione delle potenziali aree critiche

La determinazione dei livelli equivalenti delle accelerazioni calcolate secondo il modello di esercizio futuro della linea ferroviaria oggetto di studio e riferiti al periodo diurno e notturno secondo quanto previsto dalla UNI 9614:1990, ha permesso di individuare le aree potenzialmente critiche sulla scorta del confronto con i valori indicati dalla norma UNI come riferimento per la valutazione del disturbo.

In merito alla condizione di massima emissione, sulla base di quanto esposto in precedenza, dall'applicazione dell'algoritmo di calcolo si evince come l'area di potenziale disturbo massimo all'interno degli edifici sia rappresentata da una fascia di ampiezza pari a 6 m dall'asse del binario più esterno, considerando la fascia più ampia tra quella relativa ai treni merci e quella relativa ai regionali. Dalle mappe acustiche (riportate negli elaborati RC0Y01R22N5IM0004001A÷045A) si evince una condizione di rispetto per tutti i ricettori non essendo presenti edifici all'interno della suddetta fascia.

La condizione di rispetto dei limiti indicati dalla norma UNI 9614:1990 per il disturbo da vibrazioni all'interno degli edifici è verificata anche nella condizione di emissione totale, ovvero considerando l'intero modello di esercizio previsto per la linea di progetto oggetto di verifica e rapportando i livelli emissivi indotti al periodo diurno e notturno.

Le analisi condotte hanno portato all'individuazione di una fascia critica di ampiezza pari a 4 metri dall'asse del binario più esterno e, dunque anche in questo caso non si evincono edifici al suo interno e quindi la presenza di aree critiche.