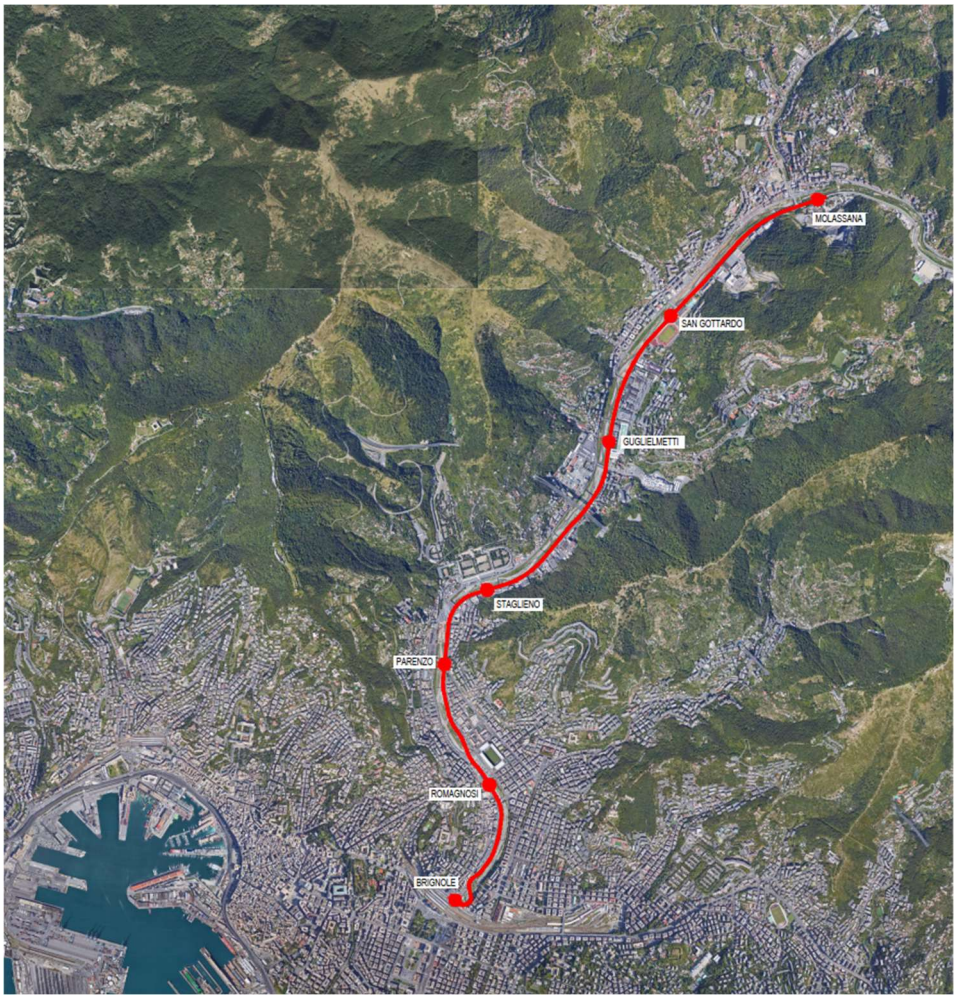
Comune di Genova

SKYMETRO

PROLUNGAMENTO DELLA METROPOLITANA IN VALBISAGNO

CUP B39J22001360001 CIG 9262977270

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA
(D.lgs. n. 36 / 2023)



STUDIO ACUSTICO E VIBRAZIONALE
RELAZIONE TECNICA STUDIO ACUSTICO E VIBRAZIONALE

Commessa	Fase	Lotto	Disciplina	WBS	Tipo	Numero	Foglio	Rev.
MGE1	PR	LV	AMB	COM	R	006	00	C

Rev.	Descrizione	Nome		Data
A	Emissione	Redatto	A. Lombardo	10/10/2023
		Verificato	A. Corvaja	10/10/2023
		Approvato	C. Ercolani	10/10/2023
		Autorizzato	P. Marchetti	10/10/2023
B	Emissione definitiva	Redatto	A. Lombardo	21/12/2023
		Verificato	A. Corvaja	21/12/2023
		Approvato	C. Ercolani	21/12/2023
		Autorizzato	P. Marchetti	21/12/2023
C	Revisione a seguito dei commenti ricevuti nella VIA	Redatto	A. Lombardo	20/02/2024
		Verificato	A. Corvaja	20/02/2024
		Approvato	C. Ercolani	20/02/2024
		Autorizzato	P. Marchetti	20/02/2024
D		Redatto		
		Verificato		
		Approvato		
		Autorizzato		

INDICE

1.	**PREMESSA**	**7**
2.	**STUDIO ACUSTICO**	**7**
2.1	**ITER METODOLOGICO**	**7**
2.2	**RIFERIMENTI NORMATIVI**	**8**
2.3	**CONCORSUALITÀ DELLE SORGENTI DI RUMORE PRESENTI SUL TERRITORIO**	**19**
2.4	**INDIVIDUAZIONE LIMITI DI IMMISSIONE**	**20**
2.4.1	RICETTORI NELLE FASCE DI PERTINENZA ACUSTICA	20
2.4.2	RICETTORI ESTERNI ALLE FASCE DI PERTINENZA ACUSTICA	22
2.5	**IL CENSIMENTO DEI RICETTORI**	**25**
2.5.1	AREE DI ESPANSIONE RESIDENZIALE	26
2.5.2	AREE NATURALI PROTETTE E PARCHI	30
2.6	**CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA ANTE OPERAM**	**37**
2.7	**ANALISI DEL RUMORE INDOTTO IN FASE DI ESERCIZIO**	**38**
2.7.1	MODELLO PREVISIONALE	38
2.7.2	DATI DI INPUT DEL MODELLO	39
2.8	**LA VALUTAZIONE DEL RUMORE IN FASE DI ESERCIZIO**	**46**
2.8.1	GLI INTERVENTI SUGLI EDIFICI	47
2.8.1.1	Aeratore/estrattore di aria	47
2.8.1.2	Sostituzione degli infissi	48
2.9	**CONCLUSIONI – STUDIO ACUSTICO**	**49**
3.	**STUDIO VIBRAZIONALE**	**52**
3.1	**PREMESSA STUDIO VIBRAZIONALE**	**52**
3.2	**RIFERIMENTI NORMATIVI**	**53**
3.2.1	LIMITI APPLICABILI NELL'AMBITO DEL PRESENTE STUDIO	57
3.3	**AREA DI STUDIO**	**58**
3.3.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	58
3.3.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	59
3.4	**INDAGINI VIBRAZIONALI**	**62**
3.4.1	RILIEVI DI VIBRAZIONI	62
3.4.2	METODOLOGIA DI ANALISI DEI DATI RILEVATI	64
3.4.3	SINTESI DEI DATI RILEVATI	65
3.5	**MODELLO PREVISIONALE**	**65**
3.5.1	LE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO	65
3.5.2	CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI	66
3.5.2.1	Interazione ruota rotaia	66
3.5.2.2	Velocità dei treni	68
3.5.3	LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO	68

3.5.3.1 La propagazione delle onde vibrazionali 68
3.5.3.2 La determinazione della funzione di trasferimento 70

3.6 LA VALUTAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE IN FASE DI ESERCIZIO 72
3.6.1 PREVISIONE DELL'IMPATTO IN FASE DI ESERCIZIO 72
3.6.2 INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE CRITICHE 72

4. CONCLUSIONI 73

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Fasce di pertinenza acustica di progetto 20
Figura 2. Stralcio del Piano Comunale di Classificazione Acustica del Comune di Genova nell'area della Val Bisagno 24
Figura 3. Stralcio del PUC di Genova - Distretto di trasformazione n. 22 28
Figura 4. Stralcio della scheda di dettaglio del Distretto di Trasformazione n.22 *Staglieno - Bobbio* 29
Figura 5. Parametri di calcolo adottati per la simulazione die livelli acustici 40
Figura 6. Schema della modellazione dei viadotti nel software di simulazione 41
Figura 7. Interfaccia per l'inserimento delle caratteristiche dei viadotti 42
Figura 8. Sezione impalcato a due binari 43
Figura 9. Stralcio Sezione a due binari nella modellazione acustica 43
Figura 10. Sezione impalcato Ponte Brignole 44
Figura 11. Sezione impalcato in corrispondenza dei marciapiedi di stazione nella modellazione acustica 44
Figura 12. Sezione impalcato in corrispondenza dei marciapiedi di stazione 45
Figura 13. Veduta aerea della Val Bisagno – Google Earth 58
Figura 14. Vista aerea dell'inquadramento generale dell'intervento oggetto di studio 59
Figura 15. Stralcio carta geomorfologica e geologica inizio intervento Brignole – Parenzo (rif. MGE1PDLGGEOCOMT00100) 60
Figura 16. Stralcio carta geomorfologica e geologica Parenzo – Guglielmetti (rif. MGE1PRLVGEOCOMR00100) 61
Figura 17. Stralcio carta geomorfologica e geologica fine intervento Guglielmetti – Molassana (rif. MGE1PRLVGEOCOMR00100) 61
Figura 18. Legenda carta geomorfologica e geologica (rif. MGE1PRLVGEOCOMR00100) 62
Figura 19. Localizzazione dei punti di misura 63
Figura 20. Rilievi in situ: localizzazione dei punti di monitoraggio delle vibrazioni rispetto al piano campagna e piano del ferro 64
Figura 21. Curve di attenuazione della Vsor ricavata dai rilievi nei punti VIB 1 e VIB 2 poste rispettivamente a 0,7 m e 6,8 m dal plinto, ponderate alle velocità di 20 km/h, 40 km/h e 60 km/h 71

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.	Zonizzazione Acustica Comunale: specifiche	9
Tabella 2.	Limiti acustici per le strade esistenti e assimilabili	13
Tabella 3.	Suddivisione in classi acustiche	15
Tabella 4.	Valori Limiti di Emissione	16
Tabella 5.	Valori Limiti di Immissione	16
Tabella 6.	Valori Limiti di Qualità	17
Tabella 7.	Limiti acustici in assenza di sorgenti concorsuali	21
Tabella 8.	Valori di soglia in presenza di sorgenti concorsuali	22
Tabella 9.	Limiti di immissione acustica del piano di zonizzazione acustica comunale	23
Tabella 10.	Aree Naturali e Parchi presenti nell'area di studio, punti di calcolo e fasce acustiche	35
Tabella 11.	Traffico di progetto per ogni binario: specifiche per fasce orarie	45
Tabella 12.	Traffico di progetto: consistenza totale per binario e fascia oraria	46
Tabella 13.	Tabella riassuntiva delle misure di rumore esterno dei veicoli di III generazione della metro	46
Tabella 14.	Ricettori con impatti residui in facciata	50
Tabella 15.	Valori soglia di vibrazione relativi al disturbo alle persone (UNI 9614:2017)	55
Tabella 16.	Rilievi in situ: sintesi dei valori di accelerazione in mm/s2 calcolati in corrispondenza dei punti di misura	65
Tabella 17.	Tipologia di terreno con specifiche	69

1. PREMESSA

Il presente rapporto contiene i risultati dello studio di impatto acustico e vibrazionale relativo all'intervento di prolungamento della linea metropolitana di Genova esistente dalla stazione di Brignole lungo la Val Bisagno. La nuova tratta comprende sei nuove stazioni ed è lunga circa 6,9 km.

La diramazione dall'esistente avviene ad est della stazione di Brignole, all'inizio dell'attuale tronchino di inversione dei treni. Qui si inseriscono due nuovi deviatoi che si distaccano dalla linea attuale, che è previsto proseguirà verso la stazione di Martinez attualmente in corso di realizzazione. La linea si sviluppa quindi lungo la Val Bisagno portandosi per un brevissimo tratto in sponda sinistra e passare poi con un'opera di scavalco del Torrente alla sponda destra. Da qui proseguirà fino alla stazione Romagnosi, subito a nord della quale il tracciato si porta di nuovo in sponda sinistra, attraversando il Torrente in corrispondenza della copertura esistente in corrispondenza dello stadio L. Ferraris, sfruttando l'ingombro delle strutture già realizzate. Da qui in poi la linea si tiene in sponda sinistra dove è prevista l'ubicazione delle stazioni Parenzo, Staglieno, Guglielmetti, San Gottardo e Molassana.

Le stazioni hanno una distanza media di circa 1,15 km e al termine della linea è previsto un tronchino necessario principalmente per il ricovero dei treni nelle ore di morbida e durante la notte.

In corrispondenza della stazione Molassana è previsto un polo intermodale, con parcheggi per auto private e stalli per l'attestazione di linee bus urbane ed extraurbane.

2. STUDIO ACUSTICO

2.1 Iter metodologico

La presente revisione dello studio acustico si è resa necessaria per verificare, recepire ed aggiornare quanto emerso nell'ambito della procedura di VIA.

L'articolo 2, comma 1, Art. 2 del DPR 459/98, che definisce il campo di applicazione del medesimo decreto, così recita: *"Il presente stabilisce le norme per la prevenzione ed il contenimento dell'inquinamento da rumore avente origine dall'esercizio delle infrastrutture delle ferrovie e delle linee metropolitane di superficie, con esclusione delle tramvie e delle funicolari."*

Ciò premesso, di seguito vengono riportare le fasi di lavoro in cui può essere schematizzato l'iter metodologico seguito:

- 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 dell'eventuale concorsualità del rumore prodotto dalle infrastrutture stradali presenti all'interno dell'ambito di studio.
- 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 nella fascia di pertinenza acustica della metropolitana (250 m per lato). Tali analisi sono state estese fino a 300 m per lato, per tener conto dei primi fronti edificati presenti al di fuori della fascia di pertinenza ferroviaria/metropolitana.

- Livelli acustici post operam. 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 e con quelli eventualmente ridotti per la presenza infrastrutture concorrenti così come previsto dai provvedimenti normativi. In particolare, l'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, ai fini della verifica di concorsualità, 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. Tale verifica è quindi esclusivamente limitata all'interno delle fasce di pertinenza acustica ferroviarie, ovvero all'interno dei 250 m (fascia B) dall'asse del binario più esterno.
- Individuazione degli interventi di mitigazione. In quest'ultima fase si individuano gli interventi di mitigazione necessari ad abbattere le eccedenze acustiche registrate rispetto ai limiti normativi. Dallo studio acustico non si evince la necessità di prevedere barriere antirumore dal momento che non si rilevano eccedenze di rumore presso i ricettori ad uso residenziale/commerciale ricadenti nell'area di studio. Si registrano, infatti, dei superamenti in facciata, all'esterno, solo presso alcune strutture scolastiche, per le quali sono stati previsti interventi diretti. In accordo al DPR 459/98, per questi ricettori è infatti assicurato il rispetto del limite interno a finestre chiuse, pari a 45 dB(A) Leq diurno, pertanto, non è necessaria la sostituzione di infissi, ma soltanto l'installazione di aeratori isofonici atti a ristabilire le condizioni di ventilazione, quindi a garantire il ricambio d'aria necessario.

  La scelta di ricorrere a interventi diretti è motivata dal fatto di evitare, in considerazione del rispetto di limiti sonori estremamente severi imposti per ricettori sensibili, un sovradimensionamento eccessivo delle barriere antirumore lungo l'infrastruttura con conseguente maggiore impatto paesaggistico sul territorio circostante.

Il presente documento è stato redatto dal Dott. Angelo Lombardo, iscritto all'Elenco Nazionale dei Tecnici Competenti in Acustica n. 12602 e verificato dall' Ing. Alfredo Corvaja, iscritto all'Elenco Nazionale dei Tecnici Competenti in Acustica n. 7280 (già iscritto nell'elenco dei Tecnici Competenti in Acustica Ambientale della Regione Lazio n. 606).

2.2 Riferimenti normativi

Legge Quadro 447/95

Nel 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:

Tabella 1. Zonizzazione Acustica Comunale: specifiche

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: • 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; • le aree in prossimità di strade di grande comunicazione, di linee ferroviarie, di aeroporti e porti; • 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.

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.

Il decreto stabilisce le norme per la prevenzione ed il contenimento dell'inquinamento da rumore avente origine dall'esercizio delle infrastrutture delle ferrovie e delle linee metropolitane di superficie, con esclusione delle tramvie e delle funicolari.
Le disposizioni di cui al presente decreto si applicano:

a. alle infrastrutture esistenti, alle loro varianti ed alle infrastrutture di nuova realizzazione in affiancamento a quelle esistenti;
b. alle infrastrutture di nuova realizzazione.

A partire dalla mezzeria dei binari esterni e per ciascun lato sono fissate fasce territoriali di pertinenza delle infrastrutture della larghezza di m 250 per le infrastrutture di cui all'articolo 2, comma 2, lettera a), e per le infrastrutture di nuova realizzazione di cui all'articolo 2, comma 2, lettera b), con velocità di progetto non superiore a 200 km/h.

Tale fascia deve a sua volta essere suddivisa in due parti:

- FASCIA «A»: pari a 100 m la più vicina alla sede ferroviaria
- FASCIA «B»: pari ad ulteriori 150 m più lontana da essa.

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

- Per scuole, ospedali, case di cura, e case di riposo il limite è di 50 dB(A) nel periodo diurno e di 40 dB(A) nel periodo notturno. Per le scuole vale solo il limite diurno;
- Per gli altri ricettori posti all'interno della fascia «A» il limite è di 70 dB(A) nel periodo diurno e di 60 dB(A) nel periodo notturno;
- Per gli altri ricettori posti all'interno della fascia «B» il limite è di 65 dB(A) nel periodo diurno e di 55 dB(A) nel periodo notturno;
- Oltre la fascia di rispetto «B» 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 (6-22) e notturno (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:

- 35 dB(A) di Leq nel periodo notturno per ospedali, case di cura, e case di riposo;
- 40 dB(A) di Leq nel periodo notturno per tutti gli altri ricettori;
- 45 dB(A) 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.

D.P.R. 142/04

In data 01 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 DPR 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

Ca - a carreggiate separate e tipo IV CNR

Cb - tutte le altre strade extraurbane secondarie

D - Strade urbane di scorrimento

Da - a carreggiate separate e interquartiere

Db - tutte le altre strade urbane di scorrimento

E - Strade urbane di quartiere

F - Strade locali

In particolare, per le infrastrutture appartenenti alle categorie A, B e Ca è individuata una fascia di rispetto: di ampiezza complessivamente pari a 250 m misurata a partire dall'infrastruttura stradale per ciascun lato dell'infrastruttura.

Tale fascia per le infrastrutture esistenti è a sua volta suddivisa in:

- Fascia "A": pari a 100 m dalla sede stradale;
- Fascia "B": pari ad ulteriori 150 m più lontana dalla sede.

Per le infrastrutture appartenenti alla categoria Cb è individuata una fascia di rispetto: di ampiezza complessivamente pari a 150 m misurata a partire dall'infrastruttura stradale per ciascun lato dell'infrastruttura.

Tale fascia per le infrastrutture esistenti è a sua volta suddivisa in:

- Fascia "A": pari a 100 m dalla sede stradale;
- Fascia "B": pari ad ulteriori 50 m più lontana dalla sede.

Per le altre tipologie di strada la fascia si riduce come segue:

- tipo Da e Db: fascia unica pari a 100 m
- tipo E ed F: fascia unica pari a 30 m

Per quanto concerne i limiti gli stessi sono stabiliti in maniera diversa in funzione del tipo di infrastruttura e a seconda che si tratti di infrastruttura di nuova realizzazione o di infrastruttura

esistente e di sue varianti. Nella tabella seguente vengono riportati i limiti per le infrastrutture esistenti e in relazione alle diverse fasce di pertinenza.

Tabella 2. Limiti acustici per le strade esistenti e assimilabili

TIPO (SECONDO C.D.S)	SOTTOTIPO AI FINI ACUSTICI (SECONDO NORME CNR 1980 E DIRETTIVE PUT)	AMPIEZZA FASCIA	SCUOLE*, OSPEDALI, CASE DI CURA E DI RIPOSO		ALTRI RICETTORI	
			DIURNO	NOTTURNO	DIURNO	NOTTURNO
A – autostrada		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
B – extraurbana principale		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
C – extraurbana secondaria	Ca (carreggiate a carreggiate separate e tipo IV CNR 1980)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
	Cb (tutte le altre strade extraurbane secondarie)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		50 (fascia B)			65	55
D – urbana di scorrimento	Da (carreggiate a carreggiate separate e inter-quartiere)	100	50	40	70	60
	Db (tutte le altre strade urbane di scorrimento)	100	50	40	65	55
E – urbana di quartiere		30	Definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in tabella C allegata al DPCM in data 14.11.1997 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 – locale		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 ricettori 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:

- 35 dB(A) - Leq notturno per ospedali, case di cura e case di riposo;
- 40 dB(A) - Leq notturno per tutti gli altri ricettori di carattere abitativo;
- 45 dB(A) - Leq diurno per le scuole.

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

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,

$$P = \sum R_i \left(Li - L_i^* \right) \qquad \text{(I)}.$$

nella quale:

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

$\left(Li - L_i^* \right)$ 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

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

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 dB(A) 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.

Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 14/11/1997 – Valori Limite delle Sorgenti Sonore

In data 1° Dicembre 1997 viene emanato il presente decreto, come strumento normativo atto a specificare i valori limite di emissione, di immissione, di attenzione e i valori di qualità in attuazione dell'art. 3, comma 1, lettera a), della legge 26 ottobre 1995, n. 447.

I valori sono applicati ai ricettori a seconda della classe di appartenenza secondo quanto riportato nella Tabella A allegata al decreto, che ricalca la suddivisione già introdotta dalla Legge 447 del 1995 e che si riporta di seguito:

Tabella 3. Suddivisione in classi acustiche

CLASSE I	Aree particolarmente protette: rientrano in questa classe le aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione: aree ospedaliere, scolastiche, aree destinate al riposo ed allo svago, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, ecc.
CLASSE II	Aree destinate ad uso prevalentemente residenziale: rientrano in questa classe le aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali e artigianali
CLASSE III	Aree di tipo misto: rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione, con presenza di attività commerciali, uffici, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici
CLASSE IV	Aree di intensa attività umana: rientrano in questa classe le aree urbane interessate da intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali e uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali, le aree con limitata presenza di piccole industrie.
CLASSE V	Aree prevalentemente industriali: rientrano in questa classe le aree interessate da insediamenti industriali e con scarsità di abitazioni.
CLASSE VI	Aree esclusivamente industriali: rientrano in questa classe le aree esclusivamente interessate da attività industriali e prive di insediamenti abitativi

Come **valori limite di emissione** (Art 2, definiti dalla legge 447/1995 come i *valori massimi di rumore che possono essere emessi da una sorgente sonora, misurati in prossimità della sorgente stessa*) per le sorgenti sia fisse che mobili, sono individuati i valori di Leq (A) della tabella B, di seguito riportata:

Tabella 4. Valori Limiti di Emissione

CLASSE	PERIODO DIURNO [6 – 22]	PERIODO NOTTURNO [22 - 6]
Classe I	45	35
Classe II	50	40
Classe III	55	45
Classe IV	60	50
Classe V	65	65
Classe VI	65	65

Come **valori limite di immissione** (Art 3, definiti dalla legge 447/1995 come i *valori massimi di rumore che possono essere immessi da una o più sorgenti sonore nell'ambiente abitativo o esterno, misurati in prossimità dei ricettori*) per le sorgenti sia fisse che mobili, sono individuati i valori di Leq (A) della tabella C, di seguito riportata:

Tabella 5. Valori Limiti di Immissione

CLASSE	PERIODO DIURNO [6 – 22]	PERIODO NOTTURNO [22 - 6]
Classe I	50	40
Classe II	55	45
Classe III	60	50
Classe IV	65	55
Classe V	70	60
Classe VI	70	70

Il decreto specifica che all'interno delle fasce di pertinenza acustica delle diverse infrastrutture (ferroviarie, stradali, aeroportuali, marittime), valgono i limiti di immissione specifici della fascia di pertinenza, fissati da opportuni decreti (Art 5). All'esterno delle proprie fasce di pertinenza, tutte le sorgenti concorrono al raggiungimento dei limiti assoluti di immissione.

Per quanto concerne i **valori limite differenziali di immissione** il decreto specifica che non si applicano alle infrastrutture ferroviarie, né stradali, né aeroportuali, né marittime (Art 4, comma 3).

Come **valori di attenzione** (Art 6, definiti dalla legge 447/1995 come i *valori di rumore che segnalano la presenza di un potenziale rischio per la salute umana o per l'ambiente*) sono individuati i valori dei livelli continui equivalenti di pressione sonora ponderata "A", riferiti al tempo a lungo termine (TL). Nel caso in cui qualora il tempo **TL fosse pari a 1 ora** i valori di attenzione si possono desumere dalla tabella C aumentando di 10 dB nel periodo diurno e di 5 dB nel periodo notturno. Se relativi ai tempi di riferimento diurno/notturno, invece, i valori limite coincidono con quelli della tabella C.

Il decreto specifica che all'interno delle fasce di pertinenza acustica delle diverse infrastrutture (ferroviarie, stradali, aeroportuali, marittime), tali valori di attenzione non hanno validità (Art 6, comma 3).

I **valori di qualità** (Art 7, definiti dalla legge 447/1995 come i *valori di rumore da conseguire nel breve, nel medio e nel lungo periodo con le tecnologie e le metodiche di risanamento disponibili)* sono indicati nella tabella D di seguito riportata:

Tabella 6. Valori Limiti di Qualità

CLASSE	PERIODO DIURNO [6 – 22]	PERIODO NOTTURNO [22 - 6]
Classe I	47	37
Classe II	52	42
Classe III	57	47
Classe IV	62	52
Classe V	67	57
Classe VI	70	70

Decreto del Ministero dell'Ambiente 16/03/1998 – Tecniche di Rilevamento e di Misurazione dell'Inquinamento Acustico

Il provvedimento, emanato in ottemperanza al disposto dell'art. 3 comma 1, lettera c) della L.447/95, individua le specifiche che devono essere soddisfatte dalla strumentazione di misura (Art. 2), i criteri e le modalità di esecuzione delle misure (indicate nell'allegato B al presente decreto).

In particolare, nell'allegato B, il decreto raccomanda di acquisire tutte le informazioni che possono condizionare la scelta del metodo, dei tempi e delle posizioni di misura, prima dell'inizio della misura.

I rilievi di rumorosità devono pertanto tenere conto delle variazioni sia dell'emissione sonora delle sorgenti che della loro propagazione. Devono essere rilevati tutti i dati che conducono ad una descrizione delle sorgenti che influiscono sul rumore ambientale nelle zone interessate dall'indagine. Se individuabili, occorre indicare le maggiori sorgenti, la variabilità della loro emissione sonora, la presenza di componenti tonali e/o impulsive e/o di bassa frequenza.

La metodologia di misura riportata rileva valori di (LAeq,TR) rappresentativi del rumore ambientale nel periodo di riferimento, della zona in esame, della tipologia della sorgente e della propagazione dell'emissione sonora. La misura deve essere arrotondata a 0,5 dB.

Per le misure in esterno:

Il microfono da campo libero deve essere orientato verso la sorgente di rumore; nel caso in cui la sorgente non sia localizzabile o siano presenti più sorgenti deve essere usato un microfono per incidenza casuale.

Il microfono deve essere montato su apposito sostegno e collegato al fonometro con cavo di lunghezza tale da consentire agli operatori di porsi alla distanza non inferiore a 3 m dal microfono stesso.

Le misurazioni devono essere eseguite in assenza di precipitazioni atmosferiche, di nebbia e/o neve; la velocità del vento deve essere non superiore a 5m/s. Il microfono, dotato di una cuffia antivento ed orientato verso la sorgente di rumore, deve essere posto ad una distanza di 1 m dalle facciate di edifici esposti ai livelli sonori più elevati e ad una quota da terra pari a 4 m.

Nel caso di edifici con facciata a filo della sede stradale, il microfono deve essere collocato a 1 m dalla facciata stessa.

Nel caso di edifici con distacco dalla sede stradale di spazi liberi, il microfono deve essere collocato nell'interno dello spazio fruibile da persone o comunità e, comunque, a non meno di 1 m dalla facciata dell'edificio.

L'altezza del microfono sia per misure in aree edificate che per misure in altri siti, deve essere scelta in accordo con la reale o ipotizzata posizione del ricettore.

Per le misure all'interno di ambienti abitativi:

Il microfono della catena fonometrica deve essere posizionato a 1,5 m dal pavimento e ad almeno 1 m da superfici riflettenti. Il rilevamento in ambiente abitativo deve essere eseguito sia a finestre aperte che chiuse, al fine di individuare la situazione più gravosa. Nella misura a finestre aperte il microfono deve essere posizionato a 1 m dalla finestra; in presenza di onde stazionarie il microfono deve essere posto in corrispondenza del massimo di pressione sonora più vicino alla posizione indicata precedentemente.

Si devono applicare i seguenti fattori correttivi nei seguenti casi, definiti e caratterizzati nel decreto stesso:

• componenti impulsive + 3 dB

• componenti tonali + 3 dB

• componenti in bassa frequenza (200 Hz e solo nel periodo notturno) + 3 dB

• presenza di rumore a tempo parziale -3 dB (da 15 min. a 1 ora) -5 dB (fino a 15 min.)

I criteri e le modalità di misura del rumore stradale e ferroviario sono invece indicati nell'allegato C al Decreto, mentre le modalità di presentazione dei risultati delle misure lo sono in allegato D al Decreto di cui costituisce parte integrante.

2.3 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 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 dB(A). Tale approccio può essere applicato a ricettori presenti sia all'interno sia all'esterno della fascia dell'infrastruttura principale.

Nell'area di progetto le sorgenti infrastrutturali che possono essere ritenute concorsuali sono rappresentate da:

- l'Autostrada A12, come infrastruttura stradale di classe A, quindi con due fasce di pertinenza A (da 0 a 100 m dall'asse) e B (da 100 a 250 m dall'asse)

- La ferrovia passante per la stazione di Brignole, con due fasce di pertinenza A (da 0 a 100 m dall'asse) e B (da 100 a 250 m dall'asse)

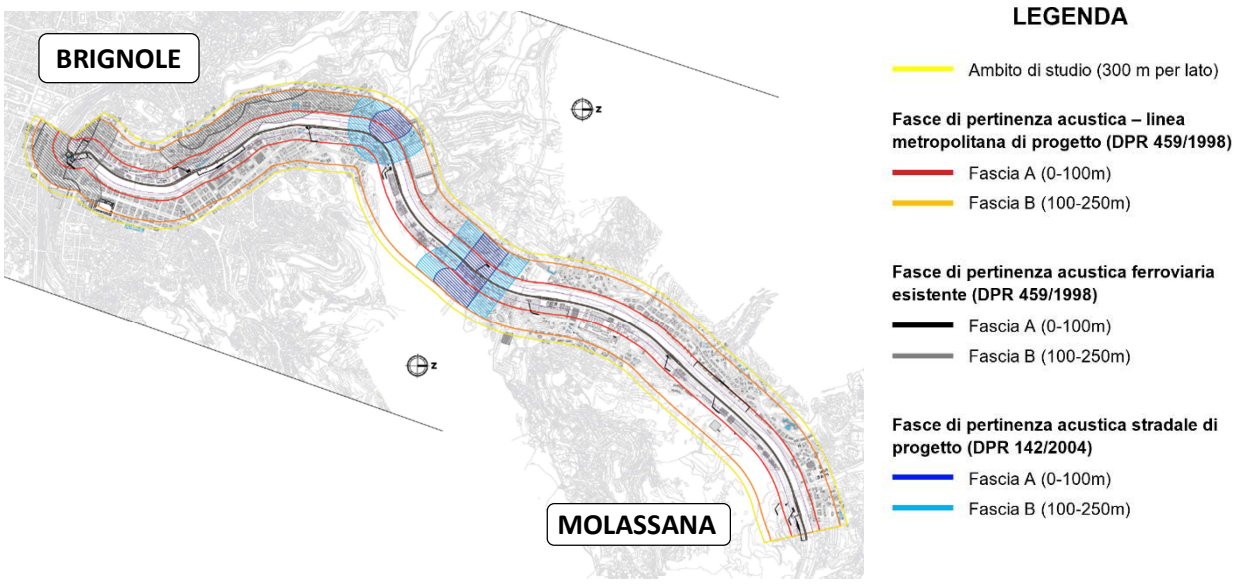


Figura 1. Fasce di pertinenza acustica di progetto

2.4 Individuazione limiti di immissione

2.4.1 Ricettori nelle fasce di pertinenza acustica

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.

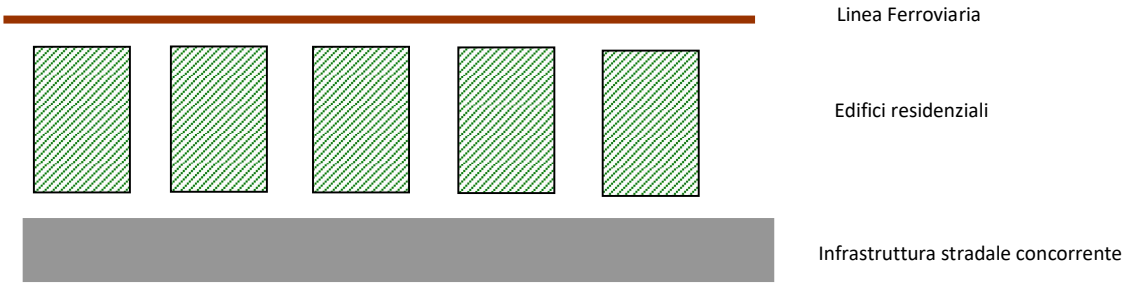
Come evidenziato nei riferimenti normativi, i limiti di riferimento variano in funzione del tipo di ricettore cui si fa riferimento e del numero di sorgenti presenti sul territorio che possono definirsi concorsuali con quella oggetto di analisi.

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 7. Limiti acustici in assenza di sorgenti concorsuali

TIPO DI RICETTORE	FASCIA A (0-100 M)		FASCIA B (100-250 M)	
	PERIODO DIURNO DB(A)	PERIODO NOTTURNO DB(A)	PERIODO DIURNO DB(A)	PERIODO NOTTURNO DB(A)
Residenziale	70.0	60.0	65.0	55.0
Produttivo	70.0	-	65.0	-
Terziario	70.0	-	65.0	-
Ospedale/Casa di Cura	50.0	40.0	50.0	40.0
Scuola	50.0	-	50.0	-
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 assumono 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 costituisce un ostacolo alla propagazione dell'uno o dell'altro contributo acustico e pertanto non vi è concorsualità effettiva.



Nel presente studio a favore di sicurezza tale aspetto non è stato considerato e sono state considerate le concorsualità indipendentemente dai fronti esposti.

Nel complessivo dei ricettori compresi nel corridoio di studio acustico, 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 metropolitana in questione, si applicano i valori limite sintetizzati nella Tabella 7 sopra 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.

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 dB(A) diurni e 60 dB(A) notturni, con la lettera "B" la fascia di pertinenza acustica caratterizzata dal valore limite e 65 dB(A) diurni e 55 dB(A) notturni.

Tabella 8. Valori di soglia in presenza di sorgenti concorsuali

FASCE DI PERTINENZA			VALORI DI SOGLIA DELL'INFRASTRUTTURA METROPOLITANA	
LINEA METROPOLITANA	PRIMA INFRASTRUTTURA CONCORSUALE	SECONDA INFRASTRUTTURA CONCORSUALE	DIURNO DB(A)	NOTTURNO DB(A)
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
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.

La riduzione del limite acustico in caso di concorsualità si applica anche al caso degli edifici sensibili utilizzando le stesse metodologie e applicando il medesimo principio cautelativo di assunzione del valore limite di riferimento più restrittivo. Nel caso di edifici scolastici e/o universitari si fa riferimento esclusivamente al periodo diurno, nel caso invece di edifici ospedalieri e/o case di riposo o di cura si fa riferimento ad entrambi i periodi temporali.

2.4.2 Ricettori esterni alle fasce di pertinenza acustica

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. In ottemperanza a quanto previsto dalla Legge Quadro 447/95 e dalla normativa regionale tutti i Comuni rientranti nell'ambito di studio sono dotati di classificazione acustica del territorio (PCCA).

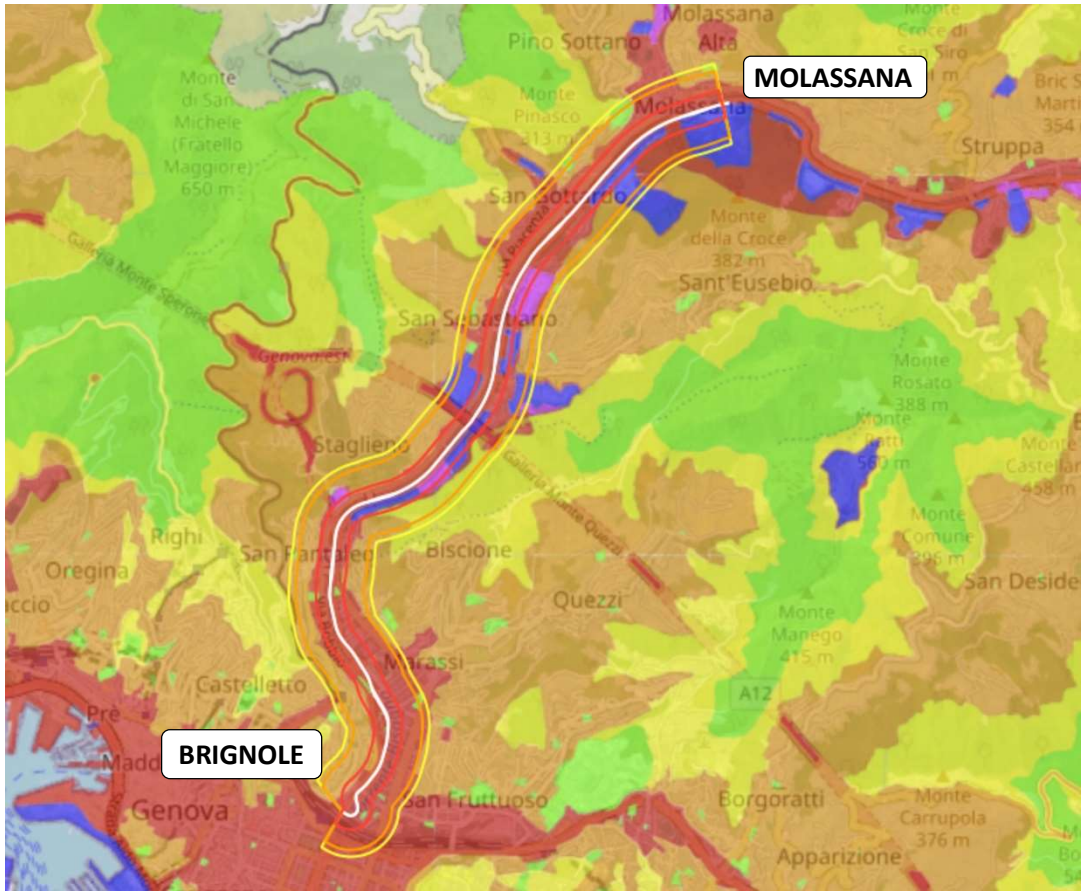
Il comune di Genova si è dotato di PCCA con delibera n.140 del 4/12/2000 del Consiglio Comunale e successiva approvazione con Delibera n. 234 del 24 Aprile 2002 della Giunta Provinciale.

Tabella 9. Limiti di immissione acustica del piano di zonizzazione acustica comunale

DESTINAZIONE D'USO TERRITORIALE		VALORI LIMITE ASSOLUTI DI IMMISSIONE	
		DIURNO (6:00÷22:00)	NOTTURNO (22:00÷6:00)
I	Aree protette	50	40
II	Aree residenziali	55	45
III	Aree miste	60	50
IV	Aree di intensa attività umana	65	55
V	Aree prevalentemente industriali	70	60
VI	Aree esclusivamente industriali	70	70

Si evidenzia che i limiti individuati dal piano di zonizzazione acustica comunale sono stati utilizzati per individuare i limiti che ciascun ricettore deve rispettare all'interno dell'ambito di studio acustico nella fascia compresa tra i 250 e i 300 metri.

Di seguito si riporta uno stralcio della zonizzazione acustica del Comune di Genova nel tratto in esame. Lo stralcio mette in evidenza come il nuovo tratto di metropolitana in progetto si collochi in una fascia di classe IV (aree di intensa attività umane) con tratte anche in classe V (aree prevalentemente industriali) e VI (aree esclusivamente industriali). Allontanandosi dal Torrente Bisagno, l'ambito di studio è caratterizzato in larga prevalenza da zone in classe III (aree miste) e risalendo dal fondovalle poche zone in classe II (aree residenziali), più lontano dalla nuova infrastruttura.



Classificazione acustica del territorio		
Classi di destinazione d'uso del territorio		
	Classe	Tipologia
VERDE	I	aree particolarmente protette
GIALLO	II	aree ad uso prevalentemente residenziale
E ARANCION	III	aree di tipo misto
ROSSO	IV	aree di intensa attività umana
VIOLA	V	aree prevalentemente industriali
BLU	VI	aree esclusivamente industriali

Figura 2. Stralcio del Piano Comunale di Classificazione Acustica del Comune di Genova nell'area della Val Bisagno

2.5 Il censimento dei ricettori

Nell'ambito delle analisi Ante Operam per la componente rumore è stato effettuato un dettagliato censimento dei ricettori.

Il censimento ha riguardato una fascia di 250 m per lato a partire dal binario esterno (fascia di pertinenza acustica ai sensi del DPR 459/98) in tutti i tratti di linea ferroviaria allo scoperto. L'indagine è stata estesa anche oltre tale fascia, fino a 300 metri, per l'indagine dei fronti edificati prossimi alla stessa.

È stata effettuata, in particolare, una verifica della destinazione d'uso ed altezza di tutti i ricettori. I risultati di tale verifica sono stati riportati, sulla cartografia numerica in scala 1:2000 (elaborato MGE1PRLVAMBCOMT01101-8C).

Nelle planimetrie di censimento summenzionate, in merito ai ricettori censiti sono state evidenziate mediante apposita campitura colorata le informazioni di seguito descritte:

Tipologia dei ricettori

- Residenziale;
- Asili, scuole, Università;
- Industriale, artigianale;
- Commerciale, servizi;
- Monumentale, religioso;
- Ruderi, dismessi, box, stalle e depositi;
- Pertinenza FS;
- Aree di espansione residenziale;
- Espropri/demolizioni.

Il censimento evidenzia nell'ambito di studio (semi-ampiezza pari 300 m) 2021 edifici, di cui 4 tipo ospedale, casa di cura/riposo, 37 ad uso scolastico, 1259 di tipo residenziale, 30 edifici adibiti a culto, 237 di tipo commerciale e servizi mentre i restanti 454 si dividono in edifici di tipo produttivo (industriale, artigianale) e di altro tipo (Dismessi, box, depositi, ecc.).

Altezza dei ricettori

Indicato come numero di piani fuori terra.

Sono state altresì indicate le facciate cieche (assenza di infissi) dei ricettori.

L'attività di verifica Ante Operam è stata quindi completata con la redazione di schede di dettaglio in cui sono state riportate per ciascun fabbricato le informazioni riguardanti la localizzazione, lo stato e la consistenza e la relativa documentazione fotografica.

Le schede sono riportate nel documento MGE1PRLVAMBCOMK00101.

Di seguito viene fornita una descrizione delle informazioni contenute nelle schede:

A) Dati generali

Codice ricettore individuato da un numero di quattro cifre XZZZ dove

X è un numero che indica la posizione del ricettore rispetto al binario

1 lato dispari rispetto la progressiva crescente di progetto (fascia ferroviaria A)

2 lato pari rispetto la progressiva crescente di progetto (fascia ferroviaria A)

3 lato dispari rispetto la progressiva crescente di progetto (fascia ferroviaria B)

4 lato pari rispetto la progressiva crescente di progetto (fascia ferroviaria B)

5 lato dispari rispetto la progressiva crescente di progetto (oltre 250 m)

6 lato pari rispetto la progressiva crescente di progetto (oltre 250 m)

ZZZ è il numero progressivo del ricettore

B) Dati localizzativi

- Comune
- Progressiva ferroviaria
- Distanza dalla linea ferroviaria in progetto valutata rispetto all'asse di tracciamento
- Tipologia linea

C) Dati caratteristici dell'edificio esaminato

- Numero dei piani
- Orientamento rispetto al binario
- Destinazione d'uso del ricettore

D) Caratterizzazione degli infissi

- Numero infissi fronte parallelo e/o obliqui

E) Altre sorgenti di rumore

F) Note

Si fa notare che aggiornamenti del tracciato ferroviario, posteriori all'attività di censimento dei ricettori, hanno determinato un disallineamento nella correlazione codice ricettore e la fascia acustica di progetto per alcuni ricettori, annotato nelle *Schede di censimento ricettori* (elab. MGE1PRLVAMBCOMK00101).

2.5.1 Aree di espansione residenziale

Ai sensi del DPR 459/98, mediante l'analisi dei piani di espansione urbanistica comunali, è stata eseguita una verifica delle aree di espansione (definite come ricettore nell'art.1, co.1, lett.e), che ricadrebbero all'interno delle fasce di pertinenza acustica dell'infrastruttura in progetto e alle quali andrebbero applicati i limiti dettati da dette fasce, eventualmente decurtati del contributo di concorsualità.

Il Comune di Genova è dotato di Piano Urbanistico Comunale (PUC) in cui sono individuati dei distretti di trasformazione. Tra questi sono stati selezionati quelli a carattere residenziale che ricadono all'interno dell'ambito di studio. Di seguito uno stralcio del PUC con i distretti individuati.

In particolare, è stato individuato il distretto di trasformazione n. 22 Staglieno – Bobbio (si vedano gli stralci di seguito).

In corrispondenza di tale area sono stati inseriti ricettori in campo libero disposti in modo da caratterizzare l'intera area, al fine di calcolarne i livelli sonori, assicurare il rispetto dei limiti di immissione fino a 4 m di altezza dal piano campagna e procedere alla mitigazione acustica sino a tale altezza. A carico del gestore dell'infrastruttura ferroviaria spetta difatti la mitigazione acustica sino a 4 metri da p.c., in analogia a quanto previsto dal DPR 142/04 relativo alle infrastrutture stradali. Per la parte eccedente, l'intervento è a carico del titolare della concessione edilizia.

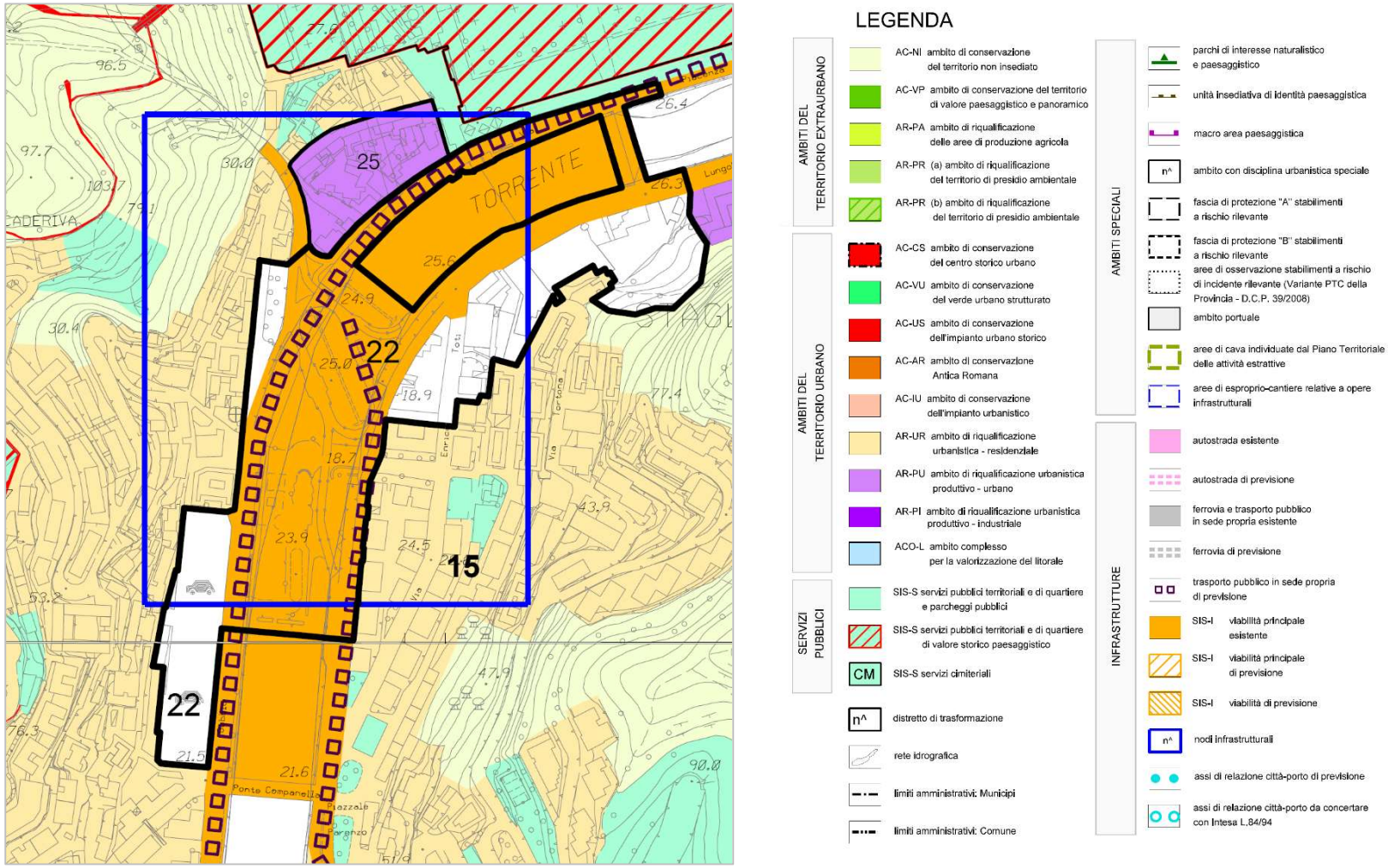


Figura 3. Stralcio del PUC di Genova - Distretto di trasformazione n. 22

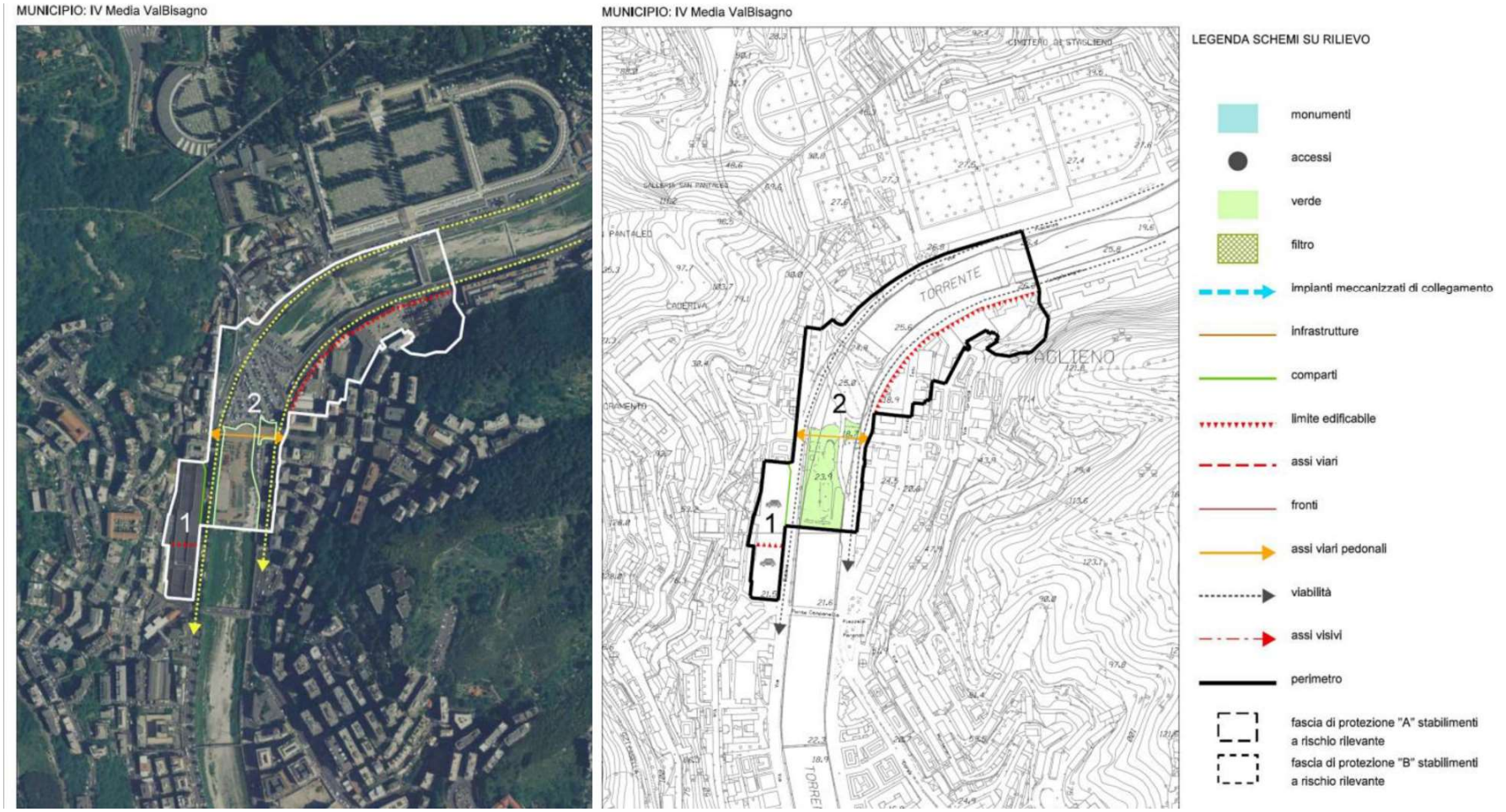


Figura 4. Stralcio della scheda di dettaglio del Distretto di Trasformazione n.22 *Staglieno - Bobbio*

Di seguito una tabella di riepilogo dei punti di calcolo immessi a caratterizzazione dell'ambito di trasformazione:

AMBITO DI TRASFORMAZIONE	PUNTO DI CALCOLO	FASCIA ACUSTICA
22 – Staglieno Bobbio	R10007	AB
	R20003	AA
	R40013	B
	R40016	BA

2.5.2 Aree naturali protette e parchi

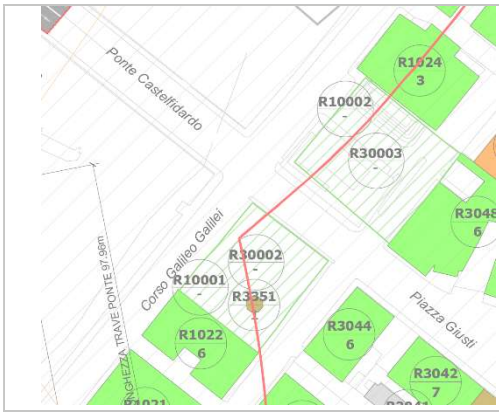
Per le aree naturalistiche e protette, in via cautelativa, deve essere garantito il rispetto dei limiti previsti dalle norme nel solo periodo diurno, in analogia a quanto viene richiesto per le scuole, in corrispondenza di punti significativi (zone maggiormente esposte e caratterizzate dalla presenza non saltuaria delle persone) da individuare all'interno di tali aree.

Dall'analisi del PUC del Comune di Genova sono state rilevati diversi parchi all'interno dell'ambito di studio. Per ognuno di questi sono stati inseriti nella simulazione acustica dei ricettori in campo libero disposti in modo da caratterizzare l'intera area, al fine di calcolarne i livelli sonori, assicurare il rispetto dei limiti di immissione fino a 2 m di altezza dal piano campagna e procedere alla mitigazione acustica sino a tale altezza.

Di seguito si riportano degli stralci della *Planimetria di censimento dei ricettori* (Elaborato MGE1PRLVAMBCOMK01101-8) con le campiture dei parchi/aree naturali individuate, facilmente localizzabili tramite la numerazione degli altri ricettori. Si riporta, altresì, una tabella di riepilogo di tutti i punti di calcolo inseriti per caratterizzare tali parchi.



R10001, R10002, R30002, R30003



R30001, R50001



R40001, R4002, R4003, R4005, R60001, R60002, R60003, R60004, R60005



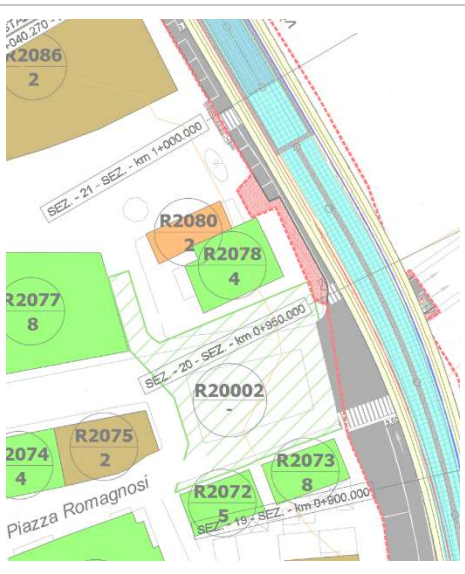
R20001, R40004



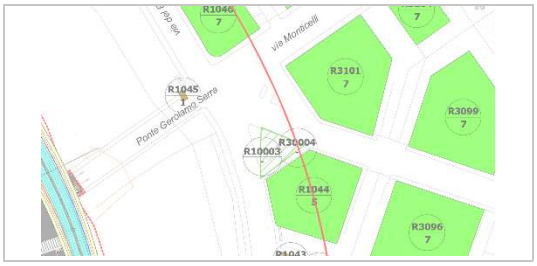
R40006, R40007, R60007



R20002



R10003, R30004



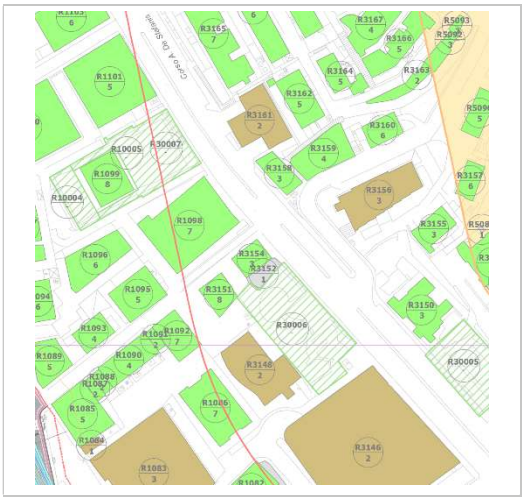
R40008, R60008



R40009, R40010, R40011, R40012, R60009, R60010, R60011, R600012



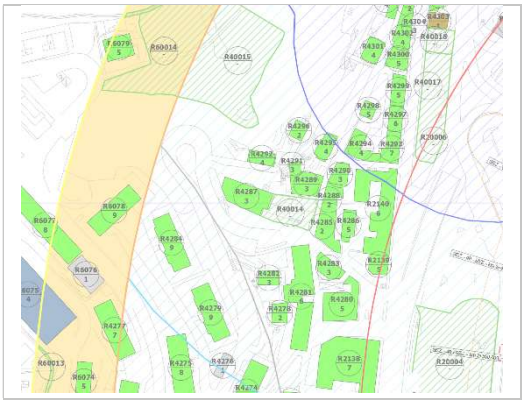
R10004, R10005, R30005, R30006, R30007



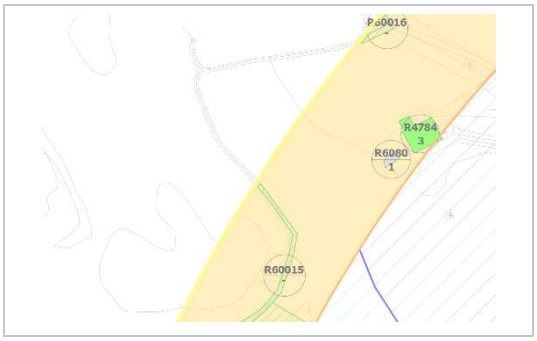
R30008, R30009, R50002



R20004, R20006, R40014, R40017, R40018, R40015, R60013, R600014



R60015, R60016



R10008, R30010, R50003, R50004, R50005



R40019, R40020, R60017, R60018, R60019



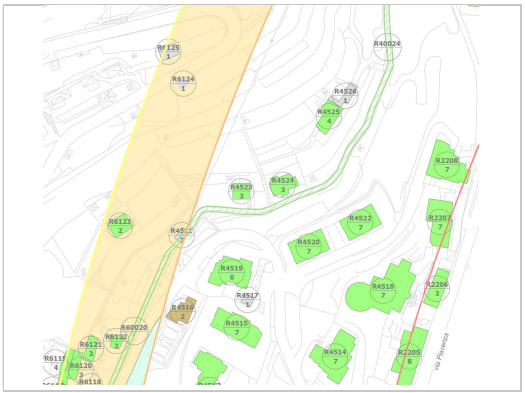
R10010, R40021



R40022, R40023, R50006



R40024, R60020



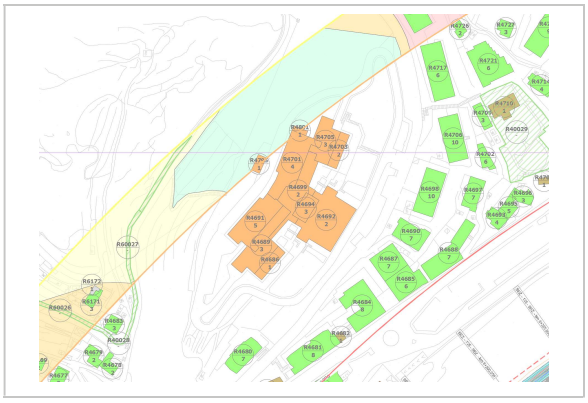
R40025, R60023, R60024



R40026, R40027, R60025



R40028, R40029, R60026, R60027



R20007, R40030, R40031, R60028, R60029



Tabella 10. Aree Naturali e Parchi presenti nell'area di studio, punti di calcolo e fasce acustiche

CODICE	ALTEZZA	DESTINAZIONE D'USO	FASCIA ACUSTICA DI PROGETTO	FERROVIA CONCORSUALE	STRADA CONCORSUALE
R10001	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	AB	x	-
R10002	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	AB	x	-
R10003	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	A	-	-
R10004	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	A	-	-
R10005	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	A	-	-
R10006	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	AB	-	x
R10008	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	AB	-	x
R10009	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	A	-	-
R10010	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	A	-	-
R20001	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	AB	-	x
R20002	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	A	-	-
R20004	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	A	-	-
R20005	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	AA	-	x
R20006	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	AB	-	x
R20007	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	AB	-	x
R30001	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	AA	-	x
R30002	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	A	-	-
R30003	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	x	-
R30004	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BB	x	-
R30005	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BB	x	-
R30006	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	A	-	-
R30007	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R30008	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R30009	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R30010	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40001	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40002	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40003	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R40004	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40005	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40006	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40007	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40008	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BB	x	-
R40009	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	x	-
R40010	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-

R40011	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	x	-
R40012	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	x	-
R40014	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	x	-
R40015	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	x	-
R40017	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40018	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BB	-	x
R40019	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BB	-	x
R40020	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	-	x
R40021	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	-	x
R40022	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	-	x
R40023	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40024	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BB	-	x
R40025	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	BA	-	x
R40026	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40027	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40028	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40029	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40030	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R40031	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R50002	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R50003	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R50004	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R50005	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R50006	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60001	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z2	-	-
R60002	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z2	-	-
R60003	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z2	-	-
R60004	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60005	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60006	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60007	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60009	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60009	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60010	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60011	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60012	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60013	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-

R60014	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60015	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60016	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60017	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60018	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60019	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60020	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60021	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60023	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z6	-	-
R60024	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60025	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	B	-	-
R60026	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60027	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z2	-	-
R60028	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-
R60029	+2 m da p.c.	Aree verdi e parchi	Z3	-	-

2.6 Caratterizzazione acustica ante operam

Al fine di caratterizzare il clima acustico nella situazione Ante Operam si può far riferimento alle misure della campagna di rilievi fonometrici effettuata appositamente per questo studio nel Maggio 2023.

I dettagli circa la localizzazione dei punti di misura e i risultati ottenuti sono riportati nel Report delle misure fonometriche (Elaborato MGE1PRLVAMBCOMK00200). Le misure fonometriche in campo sono state eseguite da un Tecnico Competente in Acustica Ambientale ai sensi della L.447/95 e D.Lgs. 42/17; in ottemperanza a quanto stabilito dal Decreto del Ministero dell'Ambiente 16/03/1998, il microfono, dotato di una cuffia antivento ed orientato verso la sorgente di rumore, è stato posto ad una distanza di 1 m dalle facciate degli edifici esposti ai livelli sonori più elevati e ad una quota da piano campagna pari a 4 m.

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa dei valori emersi dai rilievi fonometrici.

PUNTO DI MISURA	LEQ DIURNO [dB(A)]	LEQ NOTTURNO [dB(A)]
P01	65,4	56,2
P02	65,4	56,2
P03	65,4	56,2
P04	68,7	60,3
P05	68,4	61,9

PUNTO DI MISURA	LEQ DIURNO [dB(A)]	LEQ NOTTURNO [dB(A)]
P06	69,5	60,9
P07	64,4	54,5
P08	62,1	69,0
P09	51,4	54,2
P10	66,0	57,5

Le misure fonometriche sono state eseguite al solo fine di restituire una fotografia del clima acustico attuale. Come stabilito dal DPCM 14/11/97 (art. 4 comma 3), infatti, per le infrastrutture di trasporto, occorre che siano rispettati i valori limite assoluti di immissione relativi alle singole infrastrutture dei trasporti, all'interno delle rispettive fasce di pertinenza, nonché la relativa estensione, fissati con i rispettivi decreti attuativi (nel caso in esame, DPR 459/98).

2.7 Analisi del rumore indotto in fase di esercizio

2.7.1 Modello previsionale

L'impatto prodotto dalle infrastrutture metro - 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 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 8.2

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

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.

2.7.2 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 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 e dalle planimetrie, profili e sezioni di progetto.

Per quanto concerne lo standard di calcolo, è stato utilizzato quello delle Deutsche Bundesbahn, sviluppato nelle norme Shall 03. I parametri di calcolo che è necessario specificare, quali, ad esempio, il numero di riflessioni massime da considerare, la lunghezza del raggio sonoro oltre la quale il contributo energetico può essere trascurato, le condizioni di propagazione, sono mostrati in figura ed elencanti di seguito.

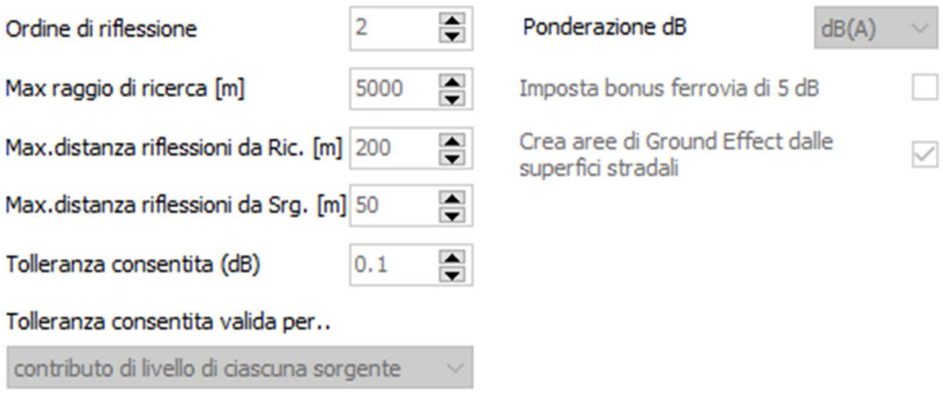


Figura 5. Parametri di calcolo adottati per la simulazione die livelli acustici

- passo di campionamento delle sorgenti sulla tratta: 10 m;
- quota della sorgente sul livello della piattaforma ferroviaria: 0.8 m;
- passo di campionamento del reticolo di calcolo lungo la coordinata x: 10 m:
- passo di campionamento del reticolo di calcolo lungo la coordinata y: 10 m;
- quota sul livello del terreno del grigliato di calcolo: 4 m;
- diffrazioni doppie sugli edifici: si;
- numero di riflessioni: 3;
- temperatura dell'aria: 15 °C;
- umidità relativa dell'aria: 60%;
- pressione atmosferica: 101.325 KPa.

Le simulazioni sono state eseguite considerando la facciata più esposta del ricettore, il punto di calcolo è collocato a 1m dalla facciata e tiene conto della riflessione della facciata stessa, mentre la distanza massima dai ricevitori entro cui vengono considerate le riflessioni è di 200m.

L'assegnazione dei coefficienti di assorbimento del terreno alle classi di uso del suolo, considerando per suoli assorbenti G=1, è stata basata sulle seguenti assunzioni:

- Foresta, aree agricole, parchi, brughiera (G=1).
- Aree residenziali con tessuto urbano discontinuo (G=0,5).
- Aree pavimentate, aree urbane, aree industriali, corpi d'acqua (G=0).

Il livello di pressione sonora calcolato è dato dalla somma dei contributi di tutte le sorgenti puntiformi in cui è stato scomposto il tratto di infrastruttura ferroviaria tenendo conto dell'attenuazione della potenza acustica causata da fenomeni quali:

- divergenza geometrica;
- assorbimento atmosferico;
- effetto del terreno;
- diffrazione da ostacoli;
- riflessioni da ostacoli artificiali.

Il software previsionale SoundPLAN implementa un algoritmo specifico per la modellazione dei viadotti che interessano la tratta metropolitana oggetto di studio.

La definizione del bridge utilizza la propria scheda indice. Attivare la casella di controllo ponte alla prima coordinata del ponte e inserire la distanza tra l'asse e il bordo del ponte (sinistra e destra dall'asse) e, se necessario, l'altezza di uno schermo sul ponte sopra la pendenza.

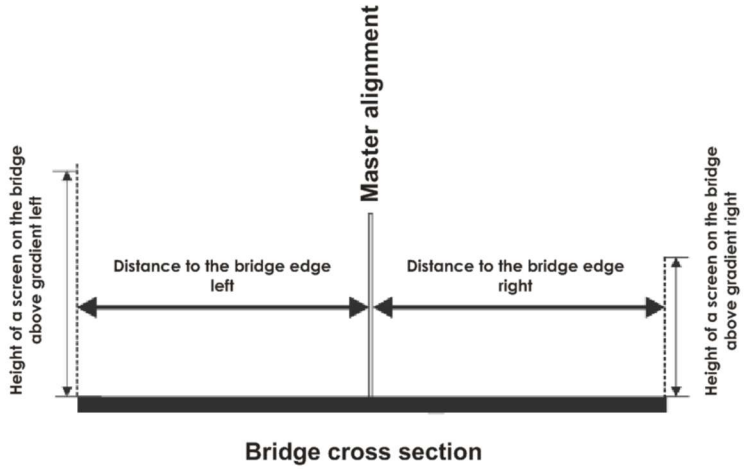


Figura 6. Schema della modellazione dei viadotti nel software di simulazione



Figura 7. Interfaccia per l'inserimento delle caratteristiche dei viadotti

Tutti i coefficienti correttivi sono previsti nelle impostazioni sopra riportate e sono stati modulati a seconda dei diversi tratti della linea di progetto per tenere in considerazione di quella che è la particolare conformazione dell'impalcato di progetto che per la sua natura geometrica costituisce un ostacolo alla propagazione del rumore prodotto dalla metropolitana in esercizio.

La sezione che caratterizza l'intera linea è denominata "SEZIONE TIPO DOPPIO BINARIO Rmin = 150m", riportata nella figura in basso. Essa è caratterizzata, per tutta la sua lunghezza ed in modo omogeneo, dall'impiego di materiale fonoassorbente in corrispondenza del carter interno che confina con la sede del convoglio metropolitano. Questa sua caratteristica acustica consente di assorbire parte dell'energia l'energia sonora incidente, riducendo così il livello di rumore prodotto ed evitando una perdita di efficacia per le riflessioni multiple che si generano tra le pareti dei vagoni e il carter stesso. E' stata, pertanto, considerata nel modello di simulazione della propagazione sonora.

Per quanto concerne le proprietà fonoassorbenti, i valori minimi dei coefficienti di assorbimento acustico α_s utilizzati nelle simulazioni acustiche, sono quelli riportati in tabella.

FREQUENZA [HZ]	125	250	500	1000	2000	4000
α_s	0,30	0,60	0,80	0,85	0,85	0,70

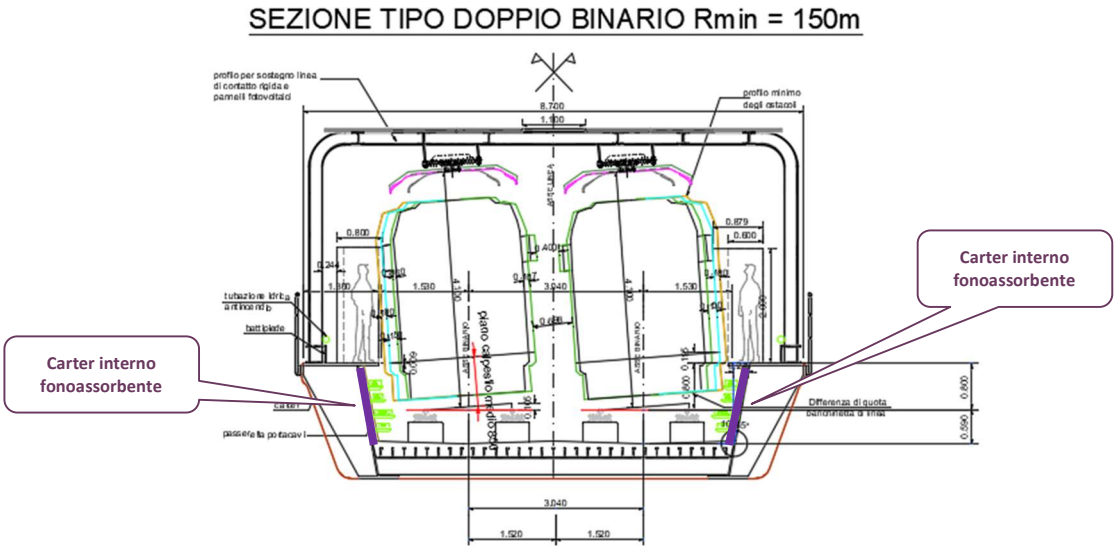


Figura 8. Sezione impalcato a due binari

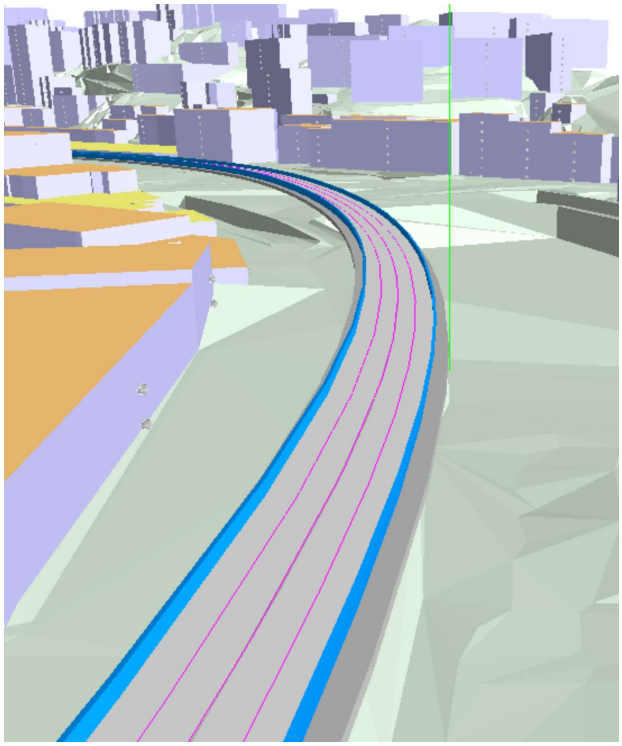


Figura 9. Stralcio Sezione a due binari nella modellazione acustica

La sezione "SEZIONE PONTE BRIGNOLE Rmin = 50m" è invece valida per nuovo ponte Brignole e la struttura di approccio allo stesso. Questa sezione a differenza di quella precedente non è caratterizzata dall'impiego di materiale fonoassorbente ma i cordoli laterali, sono stati considerati nel modello di simulazione perché anch'essi costituiscono un ostacolo alla propagazione del rumore.

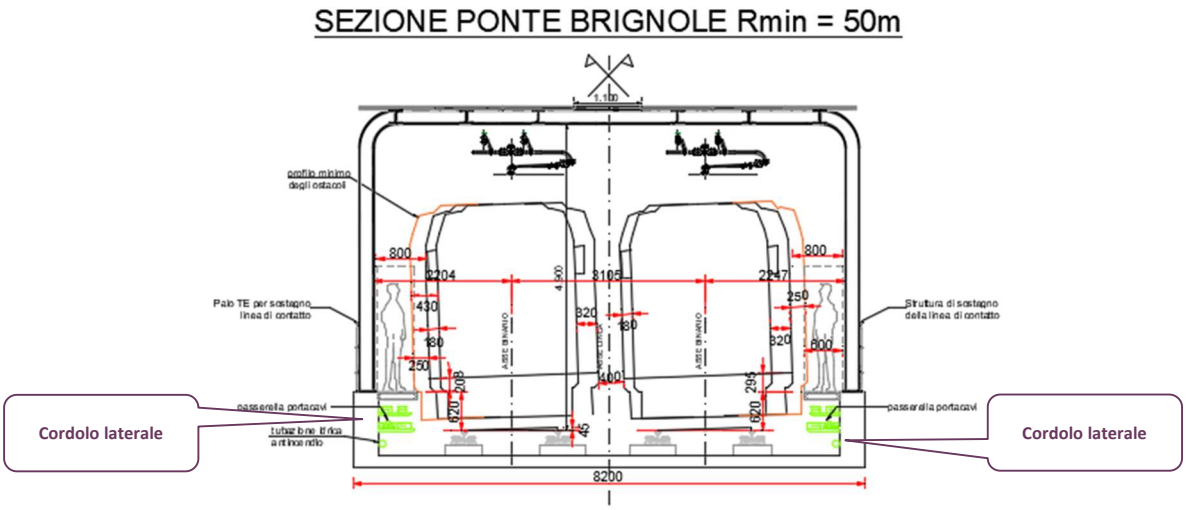


Figura 10. Sezione impalcato Ponte Brignole

Per completezza, si riporta anche la sezione d'impalcato in corrispondenza dei marciapiedi di stazione. In questo caso, oltre a quanto già considerato per la sezione "SEZIONE TIPO DOPPIO BINARIO Rmin = 150m", nella simulazione acustica si è tenuto conto della pensilina di stazione può configurarsi sia come un ostacolo alla propagazione del rumore ma anche come una superficie che riflette il raggio sonoro incidente.

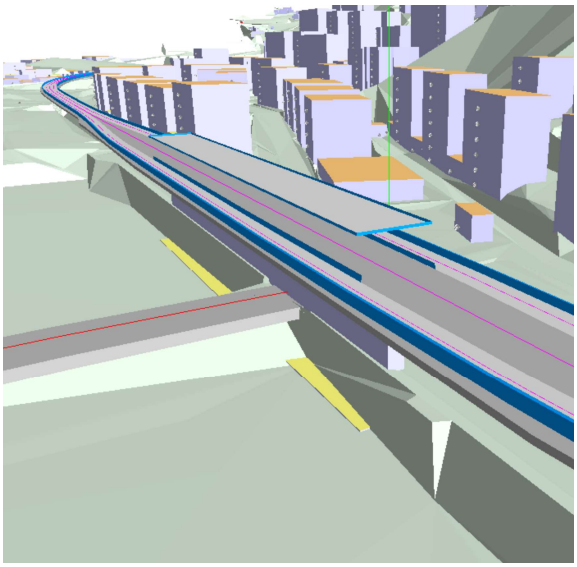


Figura 11. Sezione impalcato in corrispondenza dei marciapiedi di stazione nella modellazione acustica

Per tutti i dettagli sulle sezioni d'impalcato e loro collazione, si rimanda agli elaborati specialistici di competenza (elab. MGE1PRLVTRCCOMT0xx).

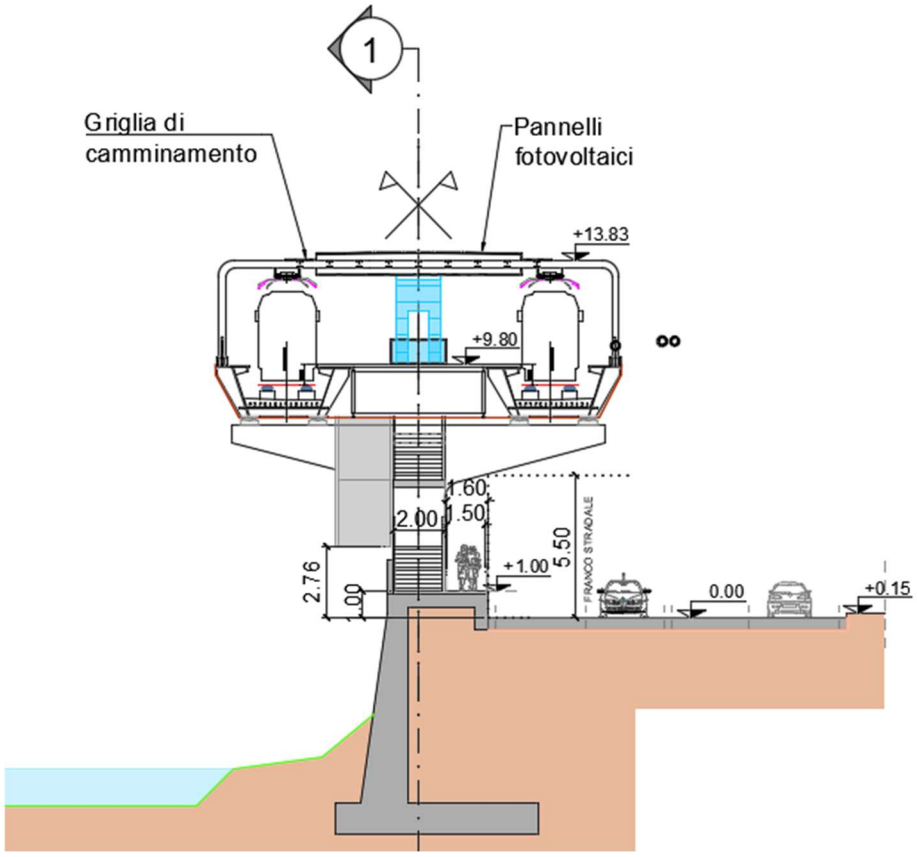


Figura 12. Sezione impalcato in corrispondenza dei marciapiedi di stazione

Per quanto riguarda il modello di esercizio sono stati considerati i seguenti dati di input, desunti dalla *Relazione tecnica di esercizio (*elab. MGE1PRLVESECOMR00100):

Tabella 11. Traffico di progetto per ogni binario: specifiche per fasce orarie

ora inizio	ora fine	durata periodo [h]	tipo periodo	cadenza treni [min]	cadenza treni [#/h]	numero treni nell'intervallo [#]
00:00	05:00	5,0	N	0	0	0
05:00	06:00	1,0	N	15	4	4
06:00	20:30	14,5	D	5	12	174
20:30	22:00	1,5	D	15	4	6
22:00	24:00	2, 0	N	15	4	8

Tabella 12. Traffico di progetto: consistenza totale per binario e fascia oraria

Binario	Periodo Diurno [6 – 22]	Periodo Notturno [22 – 6]
Brignole > Molassana	90	6
Molassana > Brignole	90	6

Come velocità di progetto è stata considerata in via cautelativa la velocità massima di tracciato di 70 km/h.

Per quanto concerne gli aspetti connessi alle emissioni dei rotabili, sono stati utilizzati i valori contenuti nel documento "Metropolitana di Genova – Veicolo di Terza Generazione – Specifica Generale di Veicolo" (Codice MGX1XX00002, fase CD), redatto da Ansaldo Breda e dal documento "*Report di Prova: Rumore interno ed esterno*", redatto da Hitachi Rail SpA nel 2015.

Tali documenti riportano le seguenti emissioni da prove sperimentali effettuate:

Tabella 13. Tabella riassuntiva delle misure di rumore esterno dei veicoli di III generazione della metro

VEICOLO IN MARCIA A 35km/h IN CAMPO APERTO RUMORE ESTERNO – HVAC ON **LeqA,Tp [dBA]**				
pos. @ d=7,5m c.b. h=1,2m p.d.f.	mis.1	mis.2	mis.3	Valore medio
Treno II Generazione	82.0	82.4	82.4	**82.3**
Treno III Generazione	80.9	81.4	81.7	**81.3**
ESITO OK				

Da questi valori è stato possibile risalire ai valori di emissione standard a 25 m di distanza e a 3,5 m di altezza dal piano del ferro a 100 km/h tramite il modello di simulazione SoundPLAN stesso.

2.8 La valutazione del rumore in fase di esercizio

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

Le valutazioni previsionali evidenziano l'impatto da rumore di origine ferroviaria senza superamenti dei limiti acustici. Fanno eccezione alcune strutture scolastiche, per i quali i limiti interni a finestre chiuse sono garantiti dagli infissi esistenti. Pertanto, non sono previsti ulteriori interventi di mitigazione alla sorgente o sulla via di propagazione. I valori dei livelli in facciata simulati per ogni ricettore, a ciascun piano, sono riportati nell'elaborato *Output del modello di simulazione – Livelli in facciata* (MGE1PRLVAMBCOMK00200). Nello specifico si tratta di 16 edifici a destinazione d'uso scolastica, di seguito indicati: R1016, R1107, R1109, R1110, R2068, R2080, R2106, R2116, R3286, R3320, R4211, R4689, R4691, R4694, R4699, R6210.

Per una visualizzazione cromatica dei livelli sonori lungo tutto il tracciato, sono state prodotte *Mappe Acustiche* (elab. MGE1PRLVAMBCOMT01201-3C) sia per il periodo diurno che per il periodo notturno, in scala numerica 1:5000, relative a una spaziatura della griglia di calcolo pari a 10 m lungo gli assi X e Y ad un'altezza da piano campagna pari a 4 metri, in analogia a quanto si fa per le Mappatura acustica (D.Lgs. n.194/2005).

2.8.1 Gli interventi sugli edifici

Ai sensi del DPR 459/98 qualora il raggiungimento del limite acustico di immissione non sia tecnicamente conseguibile, ovvero in base a valutazioni tecniche, economiche o di carattere ambientale gli interventi indiretti sull'infrastruttura risultino effettivamente sproporzionati o inadeguati rispetto agli obiettivi di mitigazione da raggiungere, si prevede la soluzione di intervento diretta sugli edifici in modo da ricondurre all'interno degli ambienti i livelli acustici entro i valori indicati dal succitato DPR secondo la destinazione d'uso dell'edificio e del periodo temporale di riferimento.

In questo caso, all'interno dei fabbricati dovrà essere assicurato il rispetto dei seguenti limiti:

- 35 dB(A) di Leq nel periodo notturno per ospedali, case di cura, e case di riposo;
- 40 dB(A) di Leq nel periodo notturno per tutti gli altri ricettori;
- 45 dB(A) di Leq nel periodo diurno per le scuole.

Tali valori dovranno essere misurati al centro della stanza, a finestre chiuse e a 1,5 m di altezza dal pavimento.

Nel caso di intervento diretto sull'edificio, in base all'esigenza di mitigazione e alle caratteristiche degli infissi già installati, si prospettano due possibilità :

a) Installazione aeratore/estrattore di aria

b) Sostituzione degli infissi esistenti + installazione aeratore/estrattore di aria

2.8.1.1 Aeratore/estrattore di aria

In alcuni casi può essere sufficiente a garantire il rispetto dei livelli acustici interni dell'edificio entro i limiti del DPR 459/98, mantenere chiusi gli infissi. Questo può, però, avere conseguenze sulla trasmissione di calore e sulla corretta ventilazione degli ambienti interni. Gli aspetti, infatti, che più frequentemente vengono infatti considerati come negativi, sono quelli relativi alla ventilazione ed al surriscaldamento dei locali nel periodo estivo. Ne consegue che, per ovviare a tali inconvenienti,

occorre cercare di ristabilire le condizioni di ventilazione che si realizzano mediante l'installazione di aeratori isofonici che garantiscono il ricambio d'aria necessario.

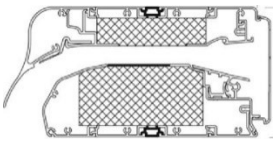
Gli aeratori/estrattori di aria sono composti da due griglie, una interna ed una esterna, che permettono il passaggio di aria dall'esterno verso l'intero (e viceversa) e quindi la ventilazione del locale. Le tipologie di aeratore/estrattore possono essere:

- non chiudibile (ventilazione passiva) con ricircolo di aria naturale in continuo per effetto della differenza di pressione esterno/interno e senza usare sistemi meccanici di ventilazione;
- autoregolanti con membrana mobile sulla griglia interna o esterna;
- comandati con sistema manuale o elettrico, se l'aeratore è posto molto in alto, o quando si desidera una ventilazione automatica.

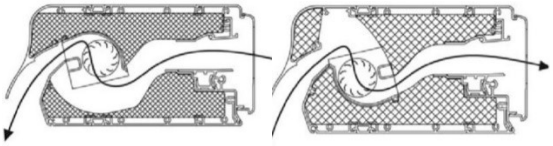
I sistemi di aerazione si distinguono, secondo il loro principio di funzionamento, nei seguenti tipi:

a) a ventilazione naturale;

b) a ventilazione forzata.



Aeratore a ventilazione naturale



Aeratore a ventilazione forzata

In linea generale l'aeratore/estrattore di aria viene installato nella zona alta del serramento per evitare correnti di aria ad altezza uomo o in alternativa sulla vetratura o sul cassonetto. Esistono anche tipologie di aeratori a parete che possono essere installati in qualsiasi punto della parete a prescindere dalla localizzazione dell'infisso.

2.8.1.2 Sostituzione degli infissi

Nel caso l'installazione di aeratori isofonici non sia sufficiente a garantire il rispetto dei livelli acustici interni entro i limiti di legge, si deve ricorrere alla sostituzione degli infissi che, in base all'esigenza di mitigazione e alle caratteristiche degli infissi già installati, può articolarsi nelle possibilità di seguito indicate, in ordine crescente di efficacia:

a) Sostituzione dei vetri con mantenimento degli infissi esistenti

b) Sostituzione completa della finestra

c) Realizzazione di doppie finestre

Con riferimento alla Norma UNI 8204 (oggi abrogata e non sostituita) 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 le soluzioni in grado di garantire un Rw compreso tra 20 e 27 dB(A); la classe R2 le soluzioni che garantiscono un Rw compreso tra 27 e 35 dB(A); la classe R3 tutte quelle soluzioni che offrono un Rw superiore a 35 dB(A). I serramenti esterni che offrono un potere fonoisolante minore di 20 dB(A) 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≤RW≤27 DB(A)
– 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≤RW≤35 dB(A)
– 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 dB(A)
– 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 modificare le condizioni di comfort abitativo degli alloggi insonorizzati, a tal proposito, dovrà essere sempre garantito il ricambio d'aria tramite l'installazione di aeratori isofonici sopra descritti.

2.9 Conclusioni – studio acustico

Come evidenziato nella tabella sotto, gli unici edifici che presentano delle eccedenze rispetto ai limiti normativi nello scenario Post Operam, sono costituiti da 16 strutture scolastiche. Per questi edifici è stata effettuata una verifica dei livelli di rumore interno, considerando un abbattimento cautelativo degli infissi esistenti pari ad almeno 20 dB. Da tale verifica, in accordo al DPR 459/98, emerge che per questi ricettori è rispettato il limite interno a finestre chiuse, pari a 45 dB(A) Leq diurno, pertanto, non si rende necessaria la sostituzione di infissi, ma soltanto l'installazione di aeratori isofonici atti a ristabilire le condizioni di ventilazione, quindi a garantire il ricambio d'aria necessario.

La scelta di ricorrere a interventi diretti è motivata dal fatto di evitare, in considerazione del rispetto di limiti sonori estremamente severi imposti per ricettori sensibili, un sovradimensionamento

eccessivo delle barriere antirumore lungo l'infrastruttura con conseguente maggiore impatto paesaggistico sul territorio circostante.

Nella seguente tabella si riportano i livelli di rumore in facciata per i ricettori fuori limite e la stima delle eccedenze rispetto ai limiti interni, nonché il tipo di intervento diretto necessario.
Nella fase Post Operam si approfondirà in dettaglio la necessità di intervenire sui ricettori sensibili oggetto di intervento diretto attraverso un'apposita campagna di monitoraggio ambientale al fine di valutare gli effettivi livelli acustici determinati dall'opera in esercizio.

Tabella 14. Ricettori con impatti residui in facciata

CODICE RICETTORE	PIANO	DIREZIONE	DESTINAZIONE D' USO	LIMITI LIVELLI IN FACCIATA [dB(A)]		LIVELLI IN FACCIATA POST OPERAM [dB(A)]		IMPATTI RESIDUI IN FACCIATA [dB]		IMPATTO RESIDUO INTERNO [dB]		TIPO DI INFISSI	AERATORI ISOFONICI
				D	N	D	N	D	N	D	N	-	[S/N]
R1016	piano 2	NW	Scuole	47	-	47.5	-	0.5	-	-	-	esistenti	x
R1016	piano 3	NW	Scuole	47	-	50.9	-	3.9	-	-	-	esistenti	x
R1016	piano 4	NW	Scuole	47	-	54.6	-	7.6	-	-	-	esistenti	x
R1107	piano 1	SW	Scuole	50	-	51.1	-	1.1	-	-	-	esistenti	x
R1107	piano 2	SW	Scuole	50	-	53	-	3	-	-	-	esistenti	x
R1107	piano 3	SW	Scuole	50	-	55.6	-	5.6	-	-	-	esistenti	x
R1107	piano 4	SW	Scuole	50	-	58.5	-	8.5	-	-	-	esistenti	x
R1109	piano terra	W	Scuole	50	-	51.3	-	1.3	-	-	-	esistenti	x
R1109	piano 1	W	Scuole	50	-	53	-	3	-	-	-	esistenti	x
R1109	piano 2	W	Scuole	50	-	55.1	-	5.1	-	-	-	esistenti	x
R1109	piano 3	W	Scuole	50	-	58	-	8	-	-	-	esistenti	x
R1110	piano terra	W	Scuole	50	-	50.9	-	0.9	-	-	-	esistenti	x
R2068	piano terra	E	Scuole	50	-	50.6	-	0.6	-	-	-	esistenti	x
R2068	piano 1	E	Scuole	50	-	52.3	-	2.3	-	-	-	esistenti	x
R2068	piano 2	E	Scuole	50	-	54.3	-	4.3	-	-	-	esistenti	x
R2068	piano 3	E	Scuole	50	-	57.1	-	7.1	-	-	-	esistenti	x
R2068	piano 4	E	Scuole	50	-	60.4	-	10.4	-	-	-	esistenti	x
R2080	piano 1	NE	Scuole	50	-	51.2	-	1.2	-	-	-	esistenti	x
R2106	piano terra	NE	Scuole	47	-	49.2	-	2.2	-	-	-	esistenti	x
R2106	piano 1	NE	Scuole	47	-	51.1	-	4.1	-	-	-	esistenti	x
R2106	piano 2	NE	Scuole	47	-	53.6	-	6.6	-	-	-	esistenti	x
R2106	piano 3	NE	Scuole	47	-	57.3	-	10.3	-	-	-	esistenti	x
R2106	piano 4	NE	Scuole	47	-	60.4	-	13.4	-	-	-	esistenti	x
R2106	piano 5	NE	Scuole	47	-	63.5	-	16.5	-	-	-	esistenti	x
R2116	piano terra	NE	Scuole	47	-	49.4	-	2.4	-	-	-	esistenti	x

R2116	piano 1	NE	Scuole	47	-	49.9	-	2.9	-	-	-	esistenti	x
R2116	piano 2	NE	Scuole	47	-	51.9	-	4.9	-	-	-	esistenti	x
R2116	piano 3	NE	Scuole	47	-	53.5	-	6.5	-	-	-	esistenti	x
R2116	piano 4	NE	Scuole	47	-	54.8	-	7.8	-	-	-	esistenti	x
R2116	piano 5	NE	Scuole	47	-	55.9	-	8.9	-	-	-	esistenti	x
R2116	piano 6	NE	Scuole	47	-	56.4	-	9.4	-	-	-	esistenti	x
R2116	piano 7	NE	Scuole	47	-	57.5	-	10.5	-	-	-	esistenti	x
R3286	piano 2	NW	Scuole	50	-	50.5	-	0.5	-	-	-	esistenti	x
R3286	piano 3	NW	Scuole	50	-	50.7	-	0.7	-	-	-	esistenti	x
R3320	piano 2	NW	Scuole	50	-	50.4	-	0.4	-	-	-	esistenti	x
R3320	piano 3	NW	Scuole	50	-	50.8	-	0.8	-	-	-	esistenti	x
R4211	piano terra	E	Scuole	50	-	50	-	0	-	-	-	esistenti	x
R4211	piano 1	E	Scuole	47	-	50.7	-	3.7	-	-	-	esistenti	x
R4211	piano 2	E	Scuole	47	-	51.4	-	4.4	-	-	-	esistenti	x
R4211	piano 3	E	Scuole	47	-	52.2	-	5.2	-	-	-	esistenti	x
R4689	piano 2	SE	Scuole	50	-	50.7	-	0.7	-	-	-	esistenti	x
R4691	piano 4	SE	Scuole	50	-	50.8	-	0.8	-	-	-	esistenti	x
R4694	piano 1	SW	Scuole	50	-	50.3	-	0.3	-	-	-	esistenti	x
R4694	piano 2	SW	Scuole	50	-	50.9	-	0.9	-	-	-	esistenti	x
R4699	piano 1	SE	Scuole	50	-	50.7	-	0.7	-	-	-	esistenti	x
R6210	piano 4	NE	Scuole	50	-	50	-	0	-	-	-	esistenti	x
R6210	piano 5	NE	Scuole	50	-	50.5	-	0.5	-	-	-	esistenti	x

3. STUDIO VIBRAZIONALE

3.1 Premessa Studio Vibrazionale

L'esercizio di una linea metropolitana è fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante che possono generare disturbo alla popolazione residente o a determinate attività umane, ma risulta estremamente improbabile che esse possano causare effettivi danni alle strutture.

Il disturbo alle persone, definito in letteratura come *annoyance*, dipende dall'intensità e frequenza dell'evento disturbante e dal tipo di attività svolta. *L'annoyance* deriva dalla combinazione di effetti che coinvolgono la percezione uditiva e la percezione tattile delle vibrazioni. Gli effetti sulle persone sono estesi all'intero corpo e possono essere ricondotti genericamente ad un aumento dello stress, con conseguente attivazione di ripetute reazioni di orientamento e di adattamento, e con eventuale insorgenza o aggravamento di malattie ipertensive.

Le vibrazioni possono in alcune situazioni, od in presenza di caratteristiche di estrema suscettività strutturale o di elevati/prolungati livelli di sollecitazione dinamica, causare danni agli edifici. 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*.

Per la valutazione delle soglie di accettabilità relative a tali effetti sono state elaborate norme tecniche nazionali (UNI) e internazionali (ISO), le quali, pur non avendo validità di legge, forniscono un riferimento per la valutazione dei fenomeni vibratori.

Il presente rapporto contiene i risultati dello studio relativo all'impatto vibrazionale prodotto dalla realizzazione del progetto di completamento della linea di prolungamento della metropolitana di Genova da Brignole nella Val Bisagno. L'iter metodologico seguito può essere schematizzato secondo le fasi di lavoro di seguito riportate:

- Analisi della normativa applicabile e individuazione dei valori di riferimento.
  Analisi delle norme applicabili su base sia nazionale che internazionale e individuazione della metodologia e valori assunti come riferimento.

- Caratterizzazione ante operam.
  Individuazione dei potenziali ricettori sensibili attraverso una indagine sul campo di censimento dei ricettori. A riguardo si è fatto riferimento al censimento ricettori svolto per lo studio acustico.

- Analisi misure di vibrazioni per infrastrutture analoghe. Sono state considerate le indagini sperimentali eseguite in corrispondenza della attuale linea in esercizio in prossimità della stazione di Brin, analoga per strutture a quella in esame e su cui transitano gli stessi convogli della linea di progetto. Le misure sono state finalizzate alla valutazione dell'entità del livello vibrazionale allo stato attuale indotto dal transito dei convogli.
- Valutazioni delle vibrazioni in fase di esercizio. in questa fase sono state prese in esame le strutture previste dal progetto; in particolare, si è sottolineato come il viadotto di progetto abbia una

sezione dei piloni che non comporta una trasmissione delle sollecitazioni vibratorie tale da superare i valori di riferimento negli edifici limitrofi.

- Individuazione delle aree critiche e degli interventi di mitigazione. Sulla base di un primo esame, non risulta necessario prevedere interventi di mitigazione per le vibrazioni sulla linea di progetto.

3.2 Riferimenti normativi

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 "*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.

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 integrante 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.

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 delle vibrazioni immesse nell'edificio dalla specifica sorgente oggetto di indagine (Vsor), quale valore pari al 95esimo percentile della distribuzione cumulata di probabilità della massima accelerazione ponderata $a_{w,max}$ misurata sui singoli eventi. Tale valore viene confrontato con una serie di limiti individuati per gli edifici a seconda della destinazione d'uso e dal periodo temporale di riferimento (diurno 6:00-22:00, notturno 22:00-6:00).

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

Le misure devono essere eseguite in conformità alla suddetta norma tecnica. In particolare, la durata complessiva è legata al numero di eventi del fenomeno in esame necessaria ad assicurare una ragionevole accuratezza statistica, tenendo conto non solo della variabilità della sorgente ma anche dell'ambiente di misura. Nel caso di infrastrutture ferroviarie, il singolo evento è costituito dal passaggio dell'intero singolo convoglio sul binario, che, quando esistano più binari paralleli, dà luogo ad accelerazioni ponderate più elevate. Il numero minimo di eventi da considerare è 15 (appendice A2: vibrazioni prodotte da traffico ferrotranviario).

Tabella 15. Valori soglia di vibrazione relativi al disturbo alle persone (UNI 9614:2017)

LUOGO	ACCELERAZIONE [M/S²]
Abitazioni (notte)	$3.6*10^{-3}$
Abitazioni (giorno)	$7.2*10^{-3}$
Luoghi lavorativi	$14.4*10^{-3}$
Ospedali, case di cura, ecc.	$2*10^{-3}$
Asili e case di risposo	$3.6*10^{-3}$
Scuole	$5.4*10^{-3}$

UNI 9916 "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 vibratori 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. La norma considera per semplicità gamme di frequenza variabili da 0.1 a 150 Hz. Tale intervallo interessa una grande casistica di edifici e di elementi strutturali di edifici sottoposti ad eccitazione naturale (vento, terremoti, ecc.) nonché ad eccitazioni causate dall'uomo (traffico, attività di costruzione, ecc.). In alcuni casi l'intervallo di frequenza delle vibrazioni può essere più ampio; tuttavia, le eccitazioni con contenuto in frequenza superiore a 150 Hz non sono tali da influenzare significativamente la risposta dell'edificio. L'Appendice A della UNI 9916 contiene una guida semplificata per la classificazione degli edifici secondo la loro probabile reazione alle vibrazioni meccaniche trasmesse attraverso il terreno. Nell'ambito di questa classificazione, un sistema dinamico è costituito dal terreno e dallo strato di base (magrone) sul quale si trovano le fondazioni oltre che la struttura medesima dell'edificio.

Le strutture comprese nella classificazione riguardano:

- tutti gli edifici residenziali e gli edifici utilizzati per le attività professionali (case, uffici, ospedali, case di cura, ecc.);
- gli edifici pubblici (municipi, chiese, ecc.);
- edifici vecchi ed antichi con un valore architettonico, archeologico e storico;

- le strutture industriali più leggere spesso concepite secondo le modalità costruttive in uso per gli edifici abitativi.

La classificazione degli edifici (Prospetto III) è basata sulla loro resistenza strutturale alle vibrazioni oltre che sulla tolleranza degli effetti vibratori sugli edifici in ragione del loro valore architettonico, archeologico e storico. I fattori dai quali dipende la reazione di una struttura agli effetti delle vibrazioni sono:

- la categoria della struttura
- le fondazioni
- la natura del terreno

La categoria di struttura (Prospetto II) è classificata in una scala da 1 a 8 (a numero crescente di categoria corrisponde una minore resistenza alle vibrazioni) in base ad una ripartizione in due gruppi di edifici, edifici vecchi e antichi o strutture costruite con criteri tradizionali (Gruppo 1) e edifici e strutture moderne (Gruppo 2). L'associazione della categoria viene fatta risalire alle caratteristiche tipologiche e costruttive della costruzione e al numero di piani.

Le fondazioni sono classificate in tre classi. La Classe A comprende fondazioni su pali legati in calcestruzzo armato e acciaio, platee rigide in calcestruzzo armato, pali di legno legati tra loro e muri di sostegno a gravità; la Classe B comprende pali non legati in calcestruzzo armato, fondazioni continue, pali e platee in legno; la Classe C infine comprende i muri di sostegno leggeri, le fondazioni massicce in pietra e la condizione di assenza di fondazioni, con muri appoggiati direttamente sul terreno.

Il terreno viene classificato in sei classi: rocce non fessurate o rocce molto solide, leggermente fessurate o sabbie cementate (Tipo a); terreni compattati a stratificazione orizzontale (Tipo b); terreni poco compattati a stratificazione orizzontale (Tipo c); piani inclinati, con superficie di scorrimento potenziale (Tipo d); terreni granulari, sabbie, ghiaie (senza coesione) e argille coesive sature (Tipo e) e materiale di riporto (Tipo f).

L'Appendice B della UNI 9916 contiene i criteri di accettabilità dei livelli delle vibrazioni con riferimento alla DIN 4150 e al Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 24 gennaio 1986 "*Norme tecniche relative alle costruzioni in zona sismica*." La parte 3 della DIN 4150 indica le velocità massime ammissibili per vibrazioni transitorie:

- sull'edificio (nel suo complesso)
- sui pavimenti: v < 20 mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione e le velocità massime ammissibili per vibrazioni stazionarie:
- sull'edificio (nel suo complesso): v < 5 mm/s in direzione orizzontale sull'ultimo piano
- sui pavimenti: v < 10 mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione.

Per velocità massima è da intendersi la velocità massima di picco. Essa è ricavabile dalla velocità massima r.m.s. attraverso la moltiplicazione di quest'ultima con il fattore di cresta F. Tale parametro

esprime il rapporto tra il valore di picco e il valore efficace. Per onde sinusoidali si assume F = 1.41; in altri casi si possono assumere valori maggiori. Nei casi più critici (ed es. esplosioni di mina) F può raggiungere il valore 6. La ISO 4866 fornisce infine una classificazione degli effetti di danno a carico delle strutture secondo tre livelli:

- *Danno di soglia*: formazione di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o accrescimento di fessure già esistenti sulle superfici in gesso o sulle superfici di muri a secco; inoltre, formazioni di fessure filiformi nei giunti di malta delle costruzioni in muratura di mattoni. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata, con frequenze maggiori di 4 Hz e velocità di vibrazione di 4÷50 mm/s, e per vibrazioni continue, con velocità 2÷5 mm/s.
- *Danno minore: formazione di fessure più aperte, distacco e caduta di gesso o di pezzi di intonaco dai muri;* formazione di fessure in murature di mattoni. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata con frequenze superiori a 4 Hz nel campo di velocità vibrazionale compreso tra 20÷100 mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di 3÷10 mm/s.
- *Danno maggiore: danneggiamento di elementi strutturali;* fessure nei pilastri; aperture di giunti; serie di fessure nei blocchi di muratura. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata con frequenze superiori a 4 Hz e velocità vibrazionale compresa tra 20÷200 mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di 5÷20 mm/s.

3.2.1 Limiti applicabili nell'ambito del presente studio

Ai fini del presente studio vibrazionale, finalizzato alla valutazione delle immissioni di vibrazioni indotte dal transito dei convogli ferroviari lungo la linea di progetto e alla stima dell'interferenza sui potenziali ricettori all'interno dell'area di studio considerata, sono stati considerati i criteri indicati dalla norma UNI 9614:2017 e quindi i valori soglia riportati in Tabella 1.

3.3 area di studio

3.3.1 Inquadramento territoriale

Nelle figure seguenti è rappresentata l'area geografica in cui si localizza l'intervento oggetto di studio.

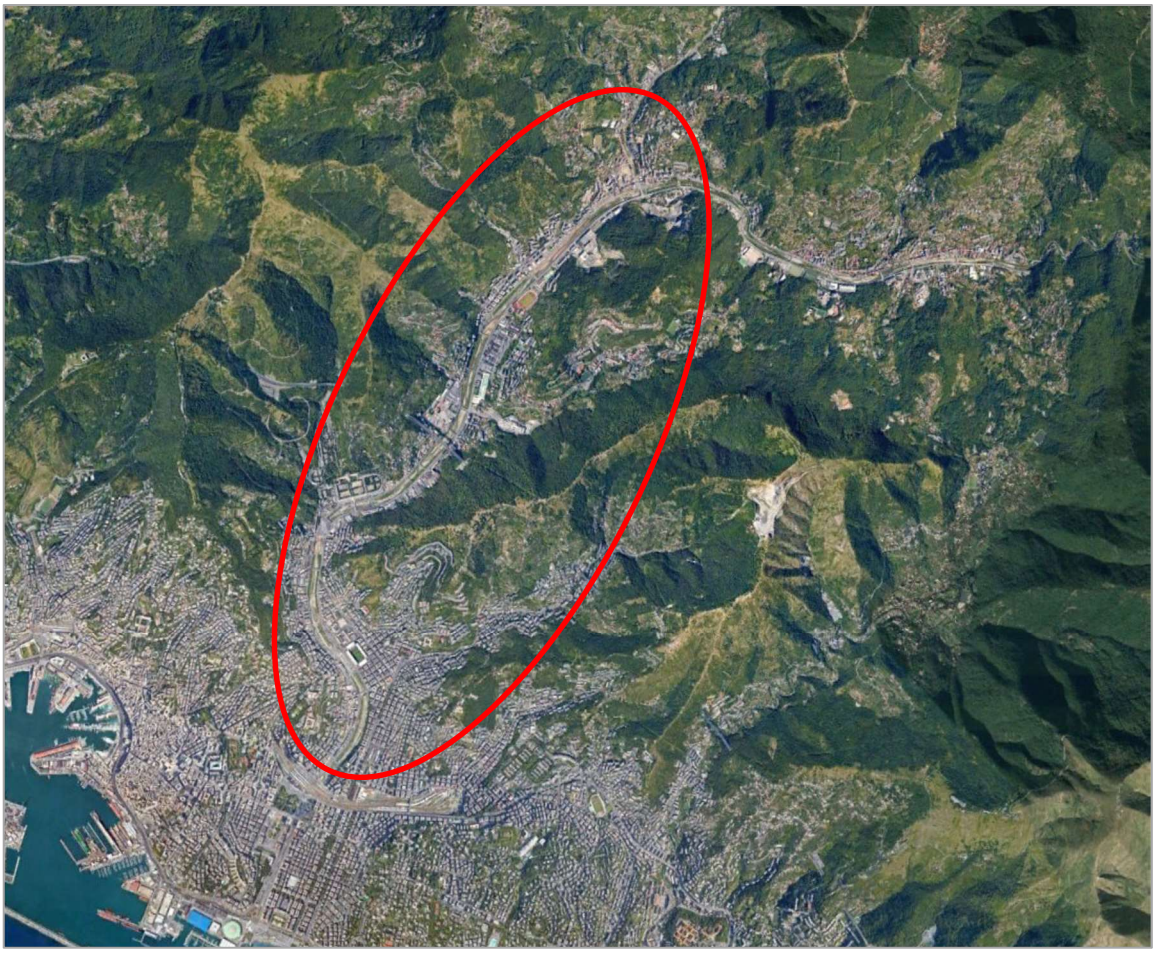


Figura 13. Veduta aerea della Val Bisagno – Google Earth

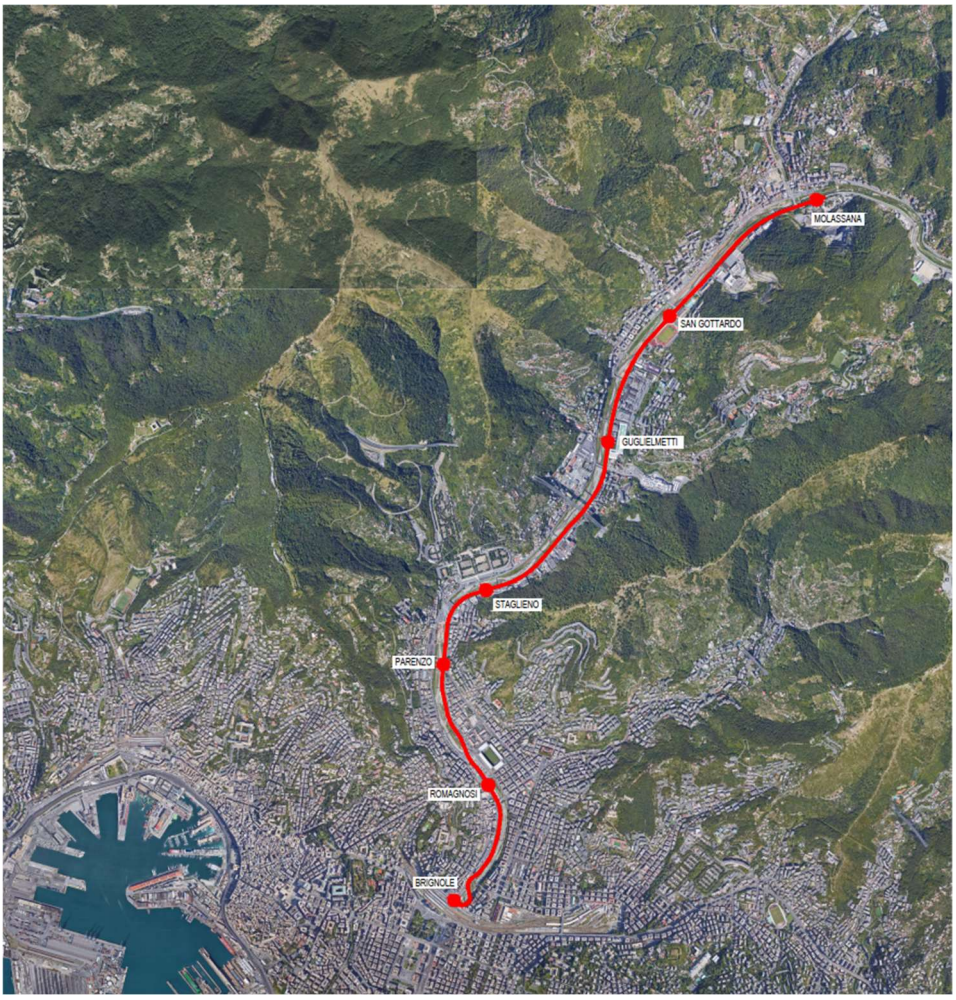


Figura 14. Vista aerea dell'inquadramento generale dell'intervento oggetto di studio

La zona oggetto di intervento si snoda lungo la Val Bisagno, nel tratto che da Brignole risale fino a Molassana. L'intero intervento ricade nel Comune di Genova, in un'area dapprima densamente urbanizzata e via via più rada. L'area è attraversata da importanti infrastrutture sia stradali che ferroviarie.

Il prolungamento della linea metropolitana proposto si sviluppa in direzione sudovest - nordest, parallelamente all'andamento del Torrente Bisagno; nel settore Sud si raccorda all'attuale stazione della metropolitana "Brignole", da dove si estende verso Nord-Est.

3.3.2 Inquadramento geologico

L'ambito geomorfologico è la piana alluvionale del Torrente Bisagno. La più antica formazione geologica della Val Bisagno è rappresentata dalle Argilliti di Montoggio, che dal punto di vista stratigrafico costituiscono la base del Flysch calcareo di Monte Antola e sono morfologicamente distinguibili perché originano blande pendenze, in contrasto con i ripidi pendii calcarei. L'assetto strutturale scistoso le rende fittamente scagliettate e tipicamente degradate in un detrito scaglioso a matrice argillosa per alterazione, nei livelli più superficiali. Le argilliti rappresentano una superficie

netta di discontinuità rispetto al soprastante ammasso calcareo e, insieme a questo, costituiscono l'Unità Tettonica Antola.
La Formazione di Monte Antola è il livello superiore dell'Unità tettonica Antola e comprende torbiditi calcareo marnose, marne e marne calcaree e, in subordine, argilliti talora scistose in strati decimetrici e bancate calcareo arenacee. Nell'ambito genovese prevale la componente calcarea e calcareo marnosa.
Le Argille di Ortovero sono sedimenti marini pliocenici composti da marne e marne argillose, o argille marnose di colore grigio e grigio azzurro, con intercalazioni sottili di livelli sabbiosi. Le Argille di Ortovero non sono mai visibili in affioramento poiché confinate e coperte nelle aree urbanizzate.
La zona di Brignole – posta alla base della dorsale rocciosa strutturata in calcari marnosi, su cui si snodano Via Montesano e Corso Monte Grappa plioceniche, che comprendono limi e argille e sabbiosi e livelli basali di brecce calcaree, tipicamente di colore grigio se sane, compatte, consistenti e sovraconsolidate.

Di seguito degli stralci della Carta Geologica d'Italia, foglio 213-230 Genova

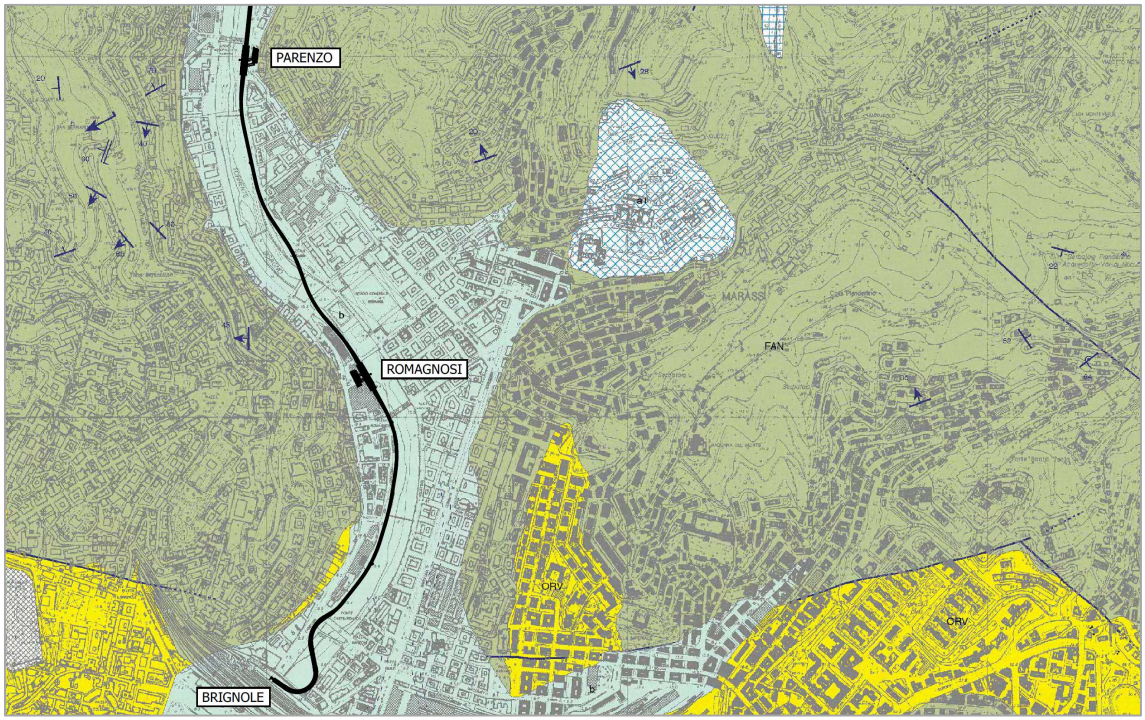


Figura 15. Stralcio carta geomorfologica e geologica inizio intervento Brignole – Parenzo (rif. MGE1PDLGGEOCOMT00100)

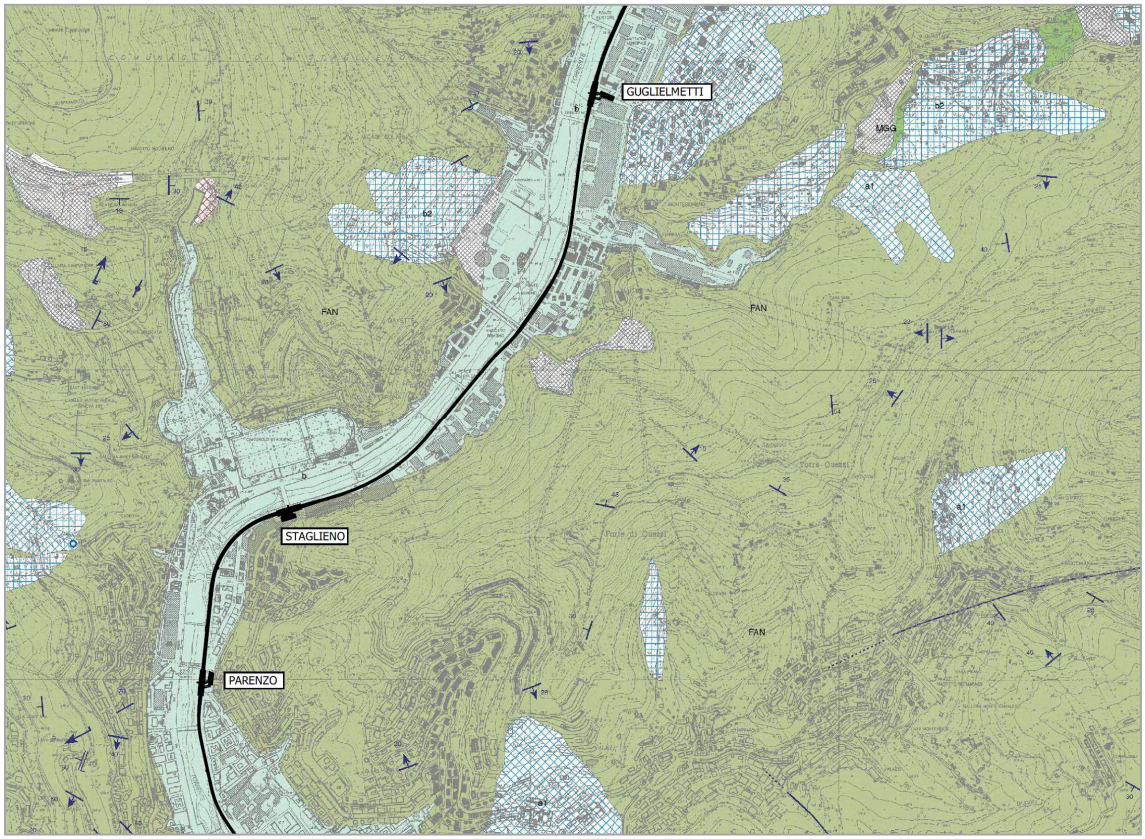


Figura 16. Stralcio carta geomorfologica e geologica Parenzo – Guglielmetti (rif. MGE1PRLVGEOCOMR00100)

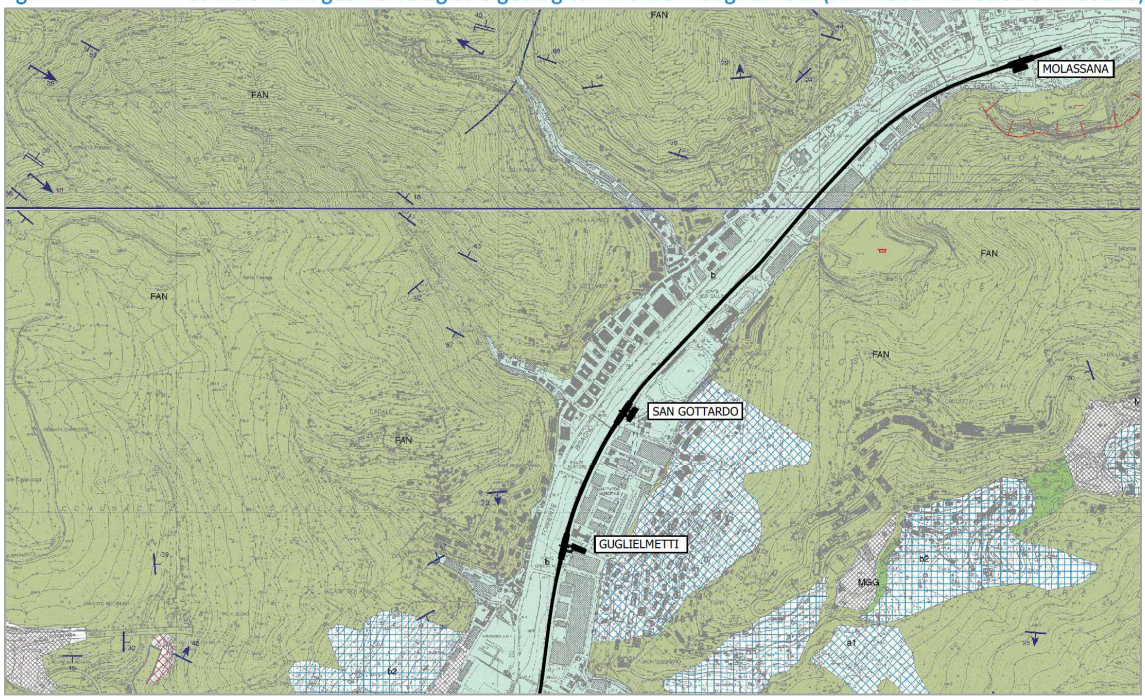


Figura 17. Stralcio carta geomorfologica e geologica fine intervento Guglielmetti – Molassana (rif. MGE1PRLVGEOCOMR00100)

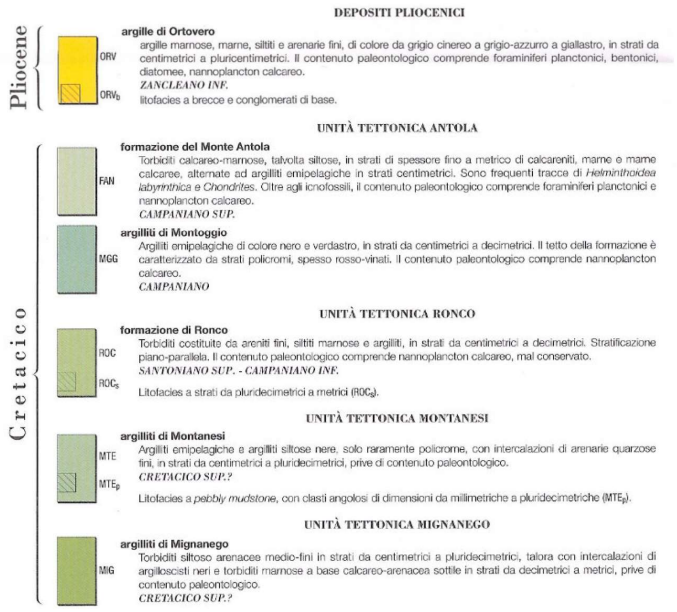


Figura 18. Legenda carta geomorfologica e geologica (rif. MGE1PRLVGEOCOMR00100)

Per ulteriori dettagli sulla geomorfologia del territorio si rimanda alla *Relazione Geologica* (elaborato MGE1PRLVGEOCOMR00100).

3.4 Indagini vibrazionali

3.4.1 Rilievi di vibrazioni

Al fine di valutare l'impatto della metropolitana di progetto dal punto di vista delle vibrazioni, sono state utilizzati dei rilievi vibrometrici in corrispondenza di una sezione in viadotto lungo la attuale linea metropolitana Brin – Dinegro analoga a quella di progetto per strutture e materiale rotabile. Tale attività è finalizzata alla caratterizzazione della propagazione delle vibrazioni immesse dal transito dei convogli in una condizione analoga a quella prevista per il progetto oggetto di studio essendo analoghe le condizioni al contorno, ovvero:

- Contesto geologico di riferimento;
- Tipologia dei convogli ferroviari;
- Opere civili ferroviarie sopraelevate.

Come detto le indagini sono state eseguite in due differenti punti. Ciascun punto è costituito da un accelerometro posizionato in corrispondenza della linea per un periodo di misura limitato e rappresentativo per la caratterizzazione della sorgente ferroviaria. Stante la poca disponibilità di aree disponibili per l'installazione della strumentazione di misura, le misure sono state concentrate in corrispondenza della fermata metro Brin, in prossimità di una pila in quanto essendo la linea sopraelevata, questa rappresenta l'unico mezzo di propagazione delle vibrazioni nel terreno.

I due punti sono così posizionati:

- Punto 1 (VIB.01): in corrispondenza della pila dell'infrastruttura metropolitana ad una distanza di 0,7 m dal plinto;
- Punto 2 (VIB.02): ad una distanza pari a 6,1 metri dal plinto della pila.

Ciascuna misura è costituita da un accelerometro in grado di rilevare le immissioni vibrazionali totali e specifiche dei transiti ferroviari lungo i tre assi X, Y e Z. Per ciascuna misura sono state eseguiti un campionamento pari a 1,5 ore, utile per la caratterizzazione delle sorgenti ferroviarie. Durante tale arco temporale sono stati rilevati numero totale di 28 transiti.

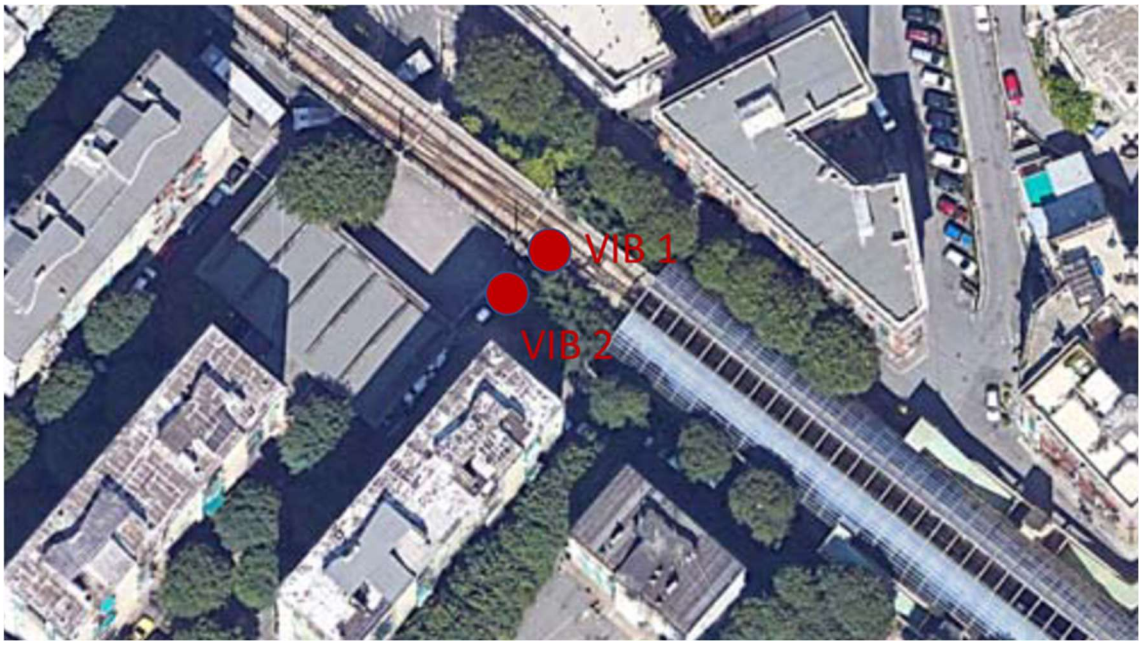


Figura 19. Localizzazione dei punti di misura

Le misure sono state eseguite secondo le modalità indicate dalla norma UNI 9614:2017. I vibrometri sono stati posizionati sul terreno in corrispondenza dell'asse ferroviario così come indicato nelle figure schematiche seguenti.

Non potendo installare la strumentazione in corrispondenza del piano del ferro, i due accelerometri sono stati posizionati sul terreno al piano campagna.

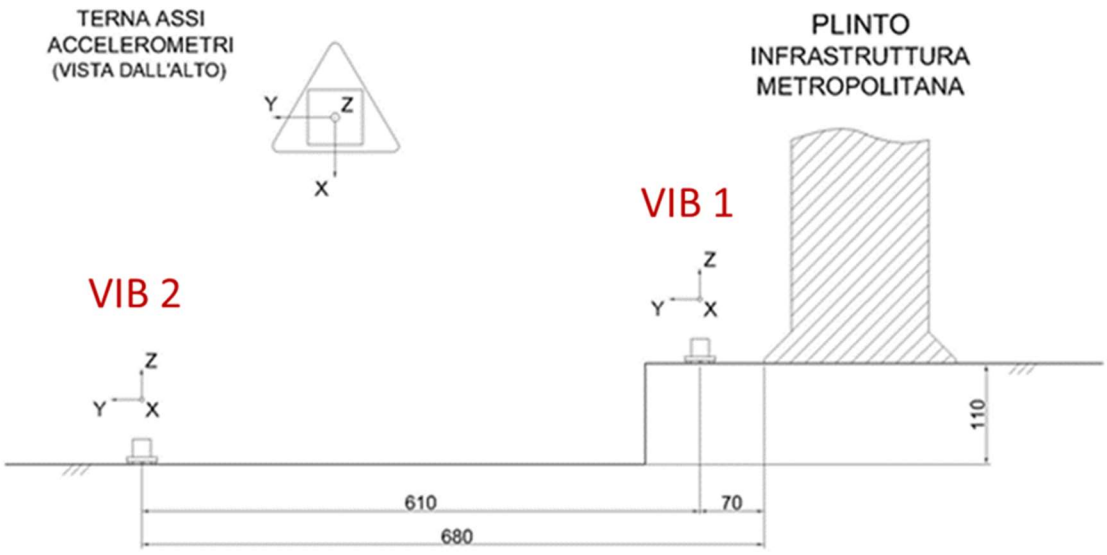


Figura 20. Rilievi in situ: localizzazione dei punti di monitoraggio delle vibrazioni rispetto al piano campagna e piano del ferro

3.4.2 Metodologia di analisi dei dati rilevati

Il metodo di analisi ed elaborazione utilizzato per la determinazione dei parametri di riferimento per la valutazione del disturbo è quello indicato dalla normativa UNI 9614:2017. L'elaborazione del segnale corrispondente ad ogni singolo evento prevede pertanto i seguenti passaggi:

- Filtraggio con filtro passa banda e con filtro di ponderazione Wm
  I valori rilevati dal singolo strumento vengono filtrati con un filtro passa banda, con caratteristiche conformi a quelle indicate dalla norma UNI 9614:2017, e successivamente con il filtro di ponderazione Wm.

- Calcolo del valore efficace della accelerazione assiale ponderata
  Per l'intera storia temporale del segnale ponderato viene calcolato l'andamento del tempo del valore efficace dell'accelerazione ponderata per ogni singolo asse cartesiano. Il tempo di integrazione è pari ad 1 secondo.

- Calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace $a_W(t)$
  Il calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace $a_W(t)$ viene eseguito istante per istante come combinazione a partire dalle tre accelerazioni assiali ponderate mediante l'equazione indicata dalla UNI 9614:2017 (par. 8.3).

- Individuazione degli eventi di origine ferroviaria
  A partire dai dati di traffico rilevati nel periodo di misura sono stati individuati gli eventi di origine ferroviaria e l'andamento temporale della $a_w(t)$ in un periodo rappresentativo del transito del convoglio.

- Calcolo della accelerazione massima ponderata $a_{W,max,j}$ e della massima accelerazione statistica $a_{W,95}$
  Tali valori sono stati calcolati secondo le modalità indicate ai paragrafi 8.4 e 8.5 della UNI 9614:2017. Tale valore è stato utilizzato per la determinazione della Vimm, ovvero della accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse.

- Calcolo della accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni residue Vres
  Dall'andamento della $a_W(t)$ nell'intero periodo di misura è stato determinato il contributo emissivo vibrazionale associato alle altre sorgenti caratterizzanti il sito di misura. Da tale analisi è stato calcolato il valore statistico delle vibrazioni presenti in assenza della sorgente ferroviaria (Vres).

- Calcolo della accelerazione ponderata massima statistica della sorgente Vsor
  Dai valori precedentemente calcolati della Vimm e Vres, si calcola il valore dell'accelerazione associata alla sorgente ferroviaria che nelle successive fasi di studio viene confrontato con i valori limite di riferimento indicati dalla norma UNI 9614:2017 per ciascun edificio secondo la destinazione d'uso.

3.4.3 Sintesi dei dati rilevati

Di seguito si riporta la sintesi dei valori ottenuti per ciascun transito nelle tre terne di ciascuna punto e i valori complessivi della Vimm, Vres e Vsor. Ne consegue che per ciascuna terna, i valori delle Vres, Vimm e Vsor risultano essere i seguenti.

Tabella 16. Rilievi in situ: sintesi dei valori di accelerazione in mm/s2 calcolati in corrispondenza dei punti di misura

	PUNTO 1 – VIB 1	PUNTO 2 – VIB 2
Vimm [mm/s^2]	6,45	1,87
Vres [mm/s2]	1,0	0,52
Vsor [mm/s2]	6,37	1,79

3.5 Modello previsionale

3.5.1 Le vibrazioni indotte in fase di esercizio

L'esercizio di una linea ferroviaria è fonte di sollecitazioni dinamiche nel terreno circostante. 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.

Le vibrazioni 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.

Nel caso specifico il territorio interessato dal progetto è fortemente antropizzato ed il progetto si sviluppa su un'aria collinare e presentano un comportamento abbastanza omogeneo in relazione al trasferimento di onde vibratorie.

3.5.2 Caratterizzazione della sorgente di vibrazioni

3.5.2.1 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 nonchè 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. Le imperfezioni superficiali della rotaia e della ruota sono la causa principale delle vibrazioni: le tipiche irregolarità superficiali delle ruote sono zone lisce (piatte) dovute alla frenatura. Le irregolarità della rotaia possono essere costituite 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. Altre cause di vibrazione sono le curve, accelerazioni/decelerazioni del treno, guida instabile dei veicoli, etc.

Le variazioni nella struttura di supporto delle rotaie dipendono dalla geometria, rigidità e spaziatura fra le traversine. una traversina può perdere il contatto con il ballast sottostante, oppure si può verificare che una traversina sia supportata dal ballast meglio di quelle circostanti: in questo caso essa genererà una maggiore resistenza al passaggio del treno. 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 %

Il tipico spettro di frequenza generato dal 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.

3.5.2.2 Velocità dei treni

La velocità del convoglio 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:

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

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 di 6 dB nei livelli di vibrazione e ciò in maniera indipendente dalla frequenza.

3.5.3 La propagazione delle vibrazioni nel terreno

3.5.3.1 La propagazione delle onde vibrazionali

L'attenuazione geometrica

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 propagazione delle onde nei terreni sciolti

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.

Tabella 17. Tipologia di terreno con specifiche

TIPO DI TRENO	DENSITA' [T/M^3]	VELOCITA' 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:

$A_t = 4{,}34 \cdot \Omega \cdot \eta \cdot x/c$

dove:

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

$c = (E/d)^{1/2}$

- 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:

$A_i = 20 \cdot \log[(1+d_c \cdot c_c / d_a \cdot c_a)/2]$

dove:

- d_c, d_a = densità dei suoli "c" e "a"
- c_c, c_a = velocità di propagazione nei suoli "c" e "a"

3.5.3.2 La determinazione della funzione di trasferimento

Le risultanze delle indagini in campo hanno consentito una conoscenza di tipo puntuale e più precisa delle modalità di propagazione delle vibrazioni nel terreno indotte dal transito di convogli lungo la linea metropolitana oggetto di studio.

In considerazione del contesto territoriale, geologico e infrastrutturale, per la costruzione del modello sperimentale sono stati utilizzati i dati rilevati dalle misure della campagna eseguita; si nota che, conoscendo la mutua distanza tra le postazioni, dai dati sperimentali è possibile estrapolare le funzioni di attenuazione che descrivono la propagazione nel terreno dell'onda vibrazionale in funzione della distanza. In considerazione dei terreni interessati dal tracciato di progetto, si è proceduto sia a valutazioni teoriche sulla propagazione, sia all'utilizzazione di una curva sperimentale di regressione per la trasmissione delle vibrazioni nel terreno con particolare riferimento al parametro Vsor.

Dall'analisi dei rilievi eseguiti, è stata determinata la funzione di trasferimento connessa alla propagazione delle vibrazioni nel sottosuolo rispetto al parametro Vsor indicato dalla norma UNI 9614:2017 quale riferimento per la valutazione del disturbo indotto dalle vibrazioni di origine ferroviaria.

A tale scopo sono stati considerati i valori determinati dalle indagini eseguite, seppur queste hanno rilevato le vibrazioni indotte da tutte le attuali tipologie di convogli transitanti sulla linea metropolitana contrariamente invece al modello di esercizio previsto che vede la sola presenza di veicoli di terza generazione (AMT 3). Tale assunzione introduce comunque un fattore cautelativo nella implementazione del modello sperimentale in quanto si considerano convogli di prima e seconda generazione (AMT 1 e AMT 2) meno prestazionali anche sotto il profilo vibrazionale.

Il modello sperimentale è stato poi successivamente tarato in funzione della velocità di esercizio secondo la metodologia indicata nel paragrafo precedente. Le misure sono state eseguite in prossimità della stazione ferroviaria e quindi ipotizzando una velocità di transito ridotta di circa 20 km/h.

L’esercizio futuro della tratta in studio prevede una variazione della velocità di esercizio che varia dai 70 km/h ai 10 km/h in base all’avvicinarsi o all’allontanarsi delle.

Sono state quindi individuati tre casi di studio rispetto ai quali sono state individuate le leggi di decadimento delle onde vibrazionali considerando i dati di accelerazione rilevati durante la campagna di misura (Vsor) e corretti in funzione di tre velocità tipologiche pari a 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h e 70 km/h.

Sono state individuate tre curve di attenuazione della Vsor con la rispettiva formula di decadimento per le tre velocità analizzate. In figura seguente si riportano le leggi di decadimento con le distanze della Vsor sulla scorta dei dati sperimentali.

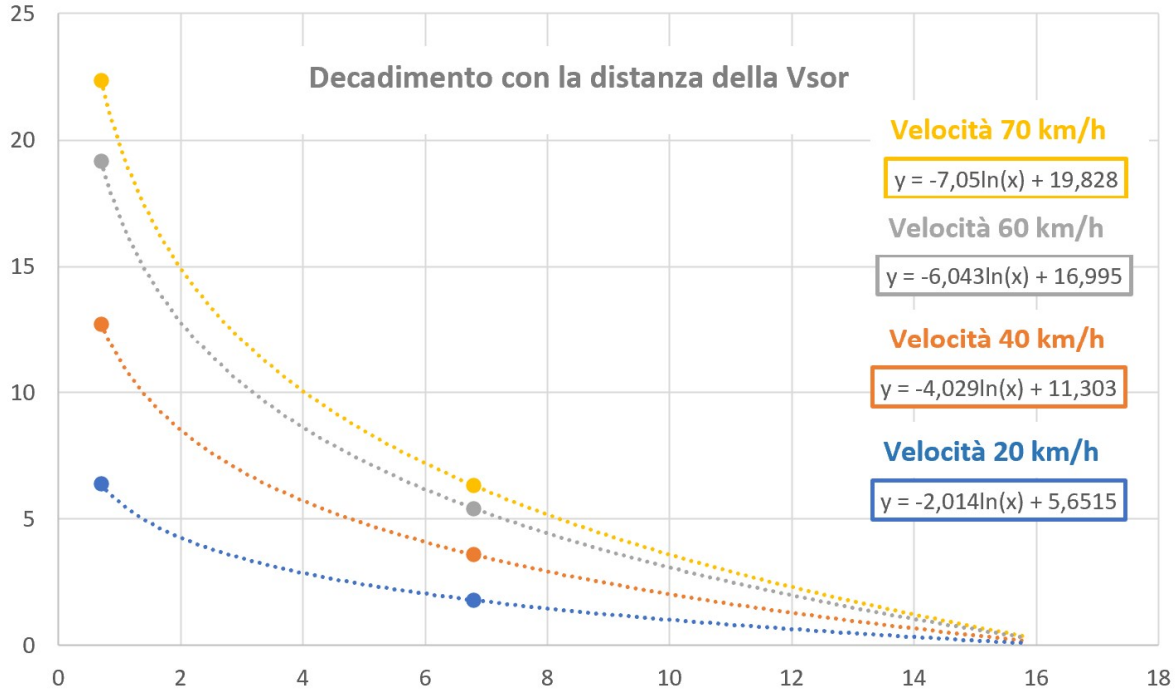


Figura 21. Curve di attenuazione della Vsor ricavata dai rilievi nei punti VIB 1 e VIB 2 poste rispettivamente a 0,7 m e 6,8 m dal plinto, ponderate alle velocità di 20 km/h, 40 km/h e 60 km/h

3.6 la valutazione delle vibrazioni indotte in fase di esercizio

3.6.1 Previsione dell'impatto in fase di esercizio

La norma UNI 9614, nella sua ultima versione 2017, introduce un differente criterio di valutazione del disturbo delle vibrazioni ferroviarie sui ricettori che si basa su valori di riferimento riferiti al valore massimo di accelerazione ponderata indotta da un singolo transito di un convoglio a prescindere dal modello di esercizio della linea oggetto di studio e quindi dalla frequenza di accadimento del fenomeno durante l'arco temporale delle 24 ore.

Mediante la curva di decadimento individuata nel paragrafo precedente attraverso i valori di accelerazione calcolati in corrispondenza dei punti di misura, sono state determinate le distanze alle quali si raggiungono i valori di riferimento della norma UNI 9614:2017. In virtù della tipologia di linea, tutta in viadotto, queste distanze sono da intendersi dalla base della pila sul piano campagna in quanto unico punto di contatto e di propagazione delle vibrazioni dell'infrastruttura.

La curva di attenuazione delle onde vibrazionali utilizzata nel modello previsionale si basa sui rilievi sperimentali eseguiti e connessi ai transiti ferroviari sulla attuale linea esistente costituiti da convogli di 1ª, 2ª e 3ª generazione. I dati emissivi rilevati sono stati poi corretti in funzione della velocità di progetto considerando tre condizioni di percorrenza pari a 20, 40 e 60 km/h. Questo perché come noto l'entità della vibrazione immessa dipende anche dalla velocità di percorrenza del convoglio. Ne consegue pertanto come le condizioni più critiche si avranno in corrispondenza di una velocità di transito maggiore, ovvero nel caso specifico in prossimità delle progressive per le quali si prevede una velocità di 60 km/h.

Adottando un approccio ulteriormente cautelativo, si considera tale caso applicato all'intera linea metropolitana. Verificata tale condizione in prossimità di tutte le pile, certamente a velocità inferiori i valori soglia saranno rispettati.

3.6.2 Individuazione delle potenziali aree critiche

Considerando quindi il modello previsionale nelle condizioni di velocità pari a 60 km/h, dall'applicazione della legge di decadimento individuata si determinano le diverse distanze alle quali vengono raggiunti i valori soglia indicati dalla norma UNI 9614:2017 in funzione della destinazione d'uso e periodo temporale di riferimento.

Si evidenzia nuovamente come i valori soglia indicati dalla norma UNI 9614 del 2017 si riferiscano al singolo transito e non al completo modello di esercizio della linea nel periodo temporale.

Dall'applicazione della curva di decadimento si evincono le seguenti distanze rappresentative dei valori soglia. Queste sono da intendersi riferite a partire dalla base della pila.

- Ambienti ad uso abitativo, periodo diurno (limite 7,2 mm/s^2): 6,0 m
- Ambienti ad uso abitativo, periodo notturno (limite 3,6 mm/s^2): 10,0 m
- Scuole ed Università (limite 5,4 mm/s^2): 7,7 m
- Ospedale, limitatamente agli ambienti di degenza (limite 2,0 mm/s^2): 12,5 m

Limitando l'analisi ai soli ricettori di prima fascia, ovvero quelli contermini la linea metropolitana, la verifica sul territorio a partire dal censimento dei ricettori dello studio acustico mette in evidenza come i ricettori prospicenti la linea di progetto siano prevalentemente residenziali. Tra vi sono alcune scuole, ma nessuna ricade nella fascia critica individuata per questo tipo di ricettori.

Considerando il valore soglia per il periodo notturno per i ricettori abitativi, in quanto più critico, non si evincono condizioni critiche per il disturbo da vibrazioni.

4. CONCLUSIONI

Lo studio acustico e vibrazionale è stato finalizzato alla valutazione previsionale del potenziale impatto acustico e vibrazionale sui ricettori localizzati lungo l'asse di progetto della linea ferroviaria oggetto di studio.

In riferimento al tema "Rumore", lo studio acustico ha messo in evidenza come il prolungamento della metropolitana ma non comporti un superamento dei livelli limite normativi per i ricettori di tipo residenziale/commerciale. Fanno eccezione 16 strutture scolastiche, per i quali, i limiti interni, a finestre chiuse, risultano garantiti dagli infissi esistenti. Pertanto, non si rende necessaria la sostituzione degli infissi, ma soltanto l'installazione di aeratori isofonici atti a garantire il ricambio d'aria necessario, né si prevedono interventi di mitigazione alla sorgente o sulla via di propagazione,

La scelta di ricorrere a interventi diretti è motivata dal fatto di evitare, in considerazione del rispetto di limiti sonori estremamente severi imposti per ricettori sensibili, un sovradimensionamento eccessivo delle barriere antirumore lungo l'infrastruttura con conseguente maggiore impatto paesaggistico sul territorio circostante.

Nella fase Post Operam si approfondirà in dettaglio la necessità di intervenire sui ricettori sensibili oggetto di intervento diretto attraverso un'apposita campagna di monitoraggio ambientale al fine di valutare gli effettivi livelli acustici determinati dall'opera in esercizio.

In riferimento invece alla tematica "Vibrazioni", lo studio è finalizzato alla verifica delle condizioni di esposizione alle vibrazioni indotte dall'esercizio della linea metropolitana sui ricettori posti in prossimità dei binari. Da un primo esame, non risulta necessario prevedere interventi di mitigazione per le vibrazioni sulla linea di progetto.

Si rimanda alle successive fasi di progettazione per uno studio più approfondito dell'impatto acustico e vibrazionale sui ricettori ricadenti nelle fasce di pertinenza della nuova infrastruttura.