



Anas SpA

Direzione Centrale Progettazione

ASR 18/07 AUTOSTRADA A3 SALERNO – REGGIO CALABRIA

LAVORI DI AMMODERNAMENTO ED ADEGUAMENTO AL TIPO 1^a DELLE NORME CNR/80
Dal km 153+400 al km 173+900
MACROLOTTO 3 – PARTE 2[^]

PROGETTO ESECUTIVO

CONTRAENTE GENERALE

ital SARC

IL RESPONSABILE DEL CONTRAENTE GENERALE

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

RTP: TECHNITAL S.p.A. (mandataria)
3TI PROGETTI ITALIA S.p.A.
PROMETEOENGINEERING.IT S.r.l.
STUDIO MELE ASSOCIATI S.r.l.
SOIL S.r.l.
SITECO S.r.l.



I RESPONSABILI DI PROGETTO

Dott. Ing. M. Raccosta
Ordine Ing. Verona n° A1665

Dott. Ing. S. Possati
Ordine Ing. Roma n° 20809

Dott. Ing. A. Focaracci
Ordine Ing. Roma n° 28894

Prof. Ing. M. Mele
Ordine Ing. Roma n° A10145

Dott. Ing. L. Albert
Ordine Ing. Milano n° 14725

Dott. Ing. A. Frascari
Ordine Ing. Bologna n° 7115/A

INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE *Dott. Ing. M. Raccosta*

IL GEOLOGO

Dott. Geol. Vittorio Federici
Ordine dei Geologi del Lazio n. 784

IL RESPONSABILE AMBIENTALE

Dott. Massimiliano Bechini

IL COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Ing. Giovanni Maria Cepparotti
Ordine Ing. Viterbo n. 392

VISTO: ANAS S.p.A. – IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Maurizio Aramini

PROGETTO STRADALE ASSE PRINCIPALE RELAZIONE TECNICA VIBRAZIONALE

CODICE PROGETTO

PROGETTO LV. PROG. N. PROG.

L0411B E 1301

NOME FILE

T00-IA07-AMB-RE02_A.dwg

REVISIONE

SCALA:

CODICE ELAB. T00IA07AMBRE02

A

D

C

B

A

REV.

EMISSIONE

20 Febbraio 2014

G. Follesa

R. Della Bella

P. Versace

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

ANAS S.P.A.
DIREZIONE CENTRALE PROGETTAZIONE

Autostrada A3 – Salerno Reggio Calabria.
Lavori di ammodernamento ed adeguamento al tipo 1/a delle norme CNR/80
dal km 153+400 al km 173+900 – MACROLOTTO 3° parte 2^

CUP: F21B960000100001

Relazione tecnica vibrazionale

INDICE

1	INTRODUZIONE VIBRAZIONI	4
1.1	Considerazioni complessive	6
1.2	Origine delle vibrazioni.....	7
1.3	Rugosità di superficie di tipo casuale.....	9
1.4	Analisi dei potenziali effetti negativi	11
2	QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO	13
3	INQUADRAMENTO GENERALE DELL' AREA DI STUDIO	18
3.1	Contesto geologico	19
3.2	Struttura dell'opera.....	20
3.3	Tipologia di bersaglio	20
3.4	Distanza del bersaglio dall'opera	21
4	STRUTTURA LOGICA DEL MODELLO DI ANALISI ADOTTATO	22
4.1	Sviluppo dei dati e procedura di analisi dei dati cartografici.....	23
4.2	Descrizione dei risultati ottenuti	24
4.2.1	Cantieri corso d'opera (fase di realizzazione).....	25
4.2.2	Fase post-operam (fase di esercizio)	31
4.3	Considerazioni conclusive	33
5	INDICAZIONE DI MASSIMA DELLE EVENTUALI AZIONI NECESSARIE AD UNA MITIGAZIONE DELLE VIBRAZIONI TRASMESSE	35
5.1	Modifica degli strati della pavimentazione	35
5.2	Sovrastrutture antivibranti.....	38
6.	BIBLIOGRAFIA	40

1 INTRODUZIONE VIBRAZIONI

La componente vibrazione, negli studi di impatto ambientale, presenta problematiche molto complesse, quali:

- le misurazioni del fenomeno vibrazionale lungo i tre assi ortogonali,
- la forte dipendenza dei risultati dal punto di misura,
- la scarsa conoscenza delle emissioni da parte delle sorgenti (veicoli leggeri e pesanti)
- la varietà dei modi di propagazione dell'energia meccanica nel terreno che la stessa sorgente può eccitare in relazione anche alla composizione del terreno stesso,
- la difficoltà di determinare la funzione di accoppiamento mutuo tra edifici e terreno,
- la grande diversità di risposta alle vibrazioni dei componenti edilizi,
- la mancanza di leggi che fissino i limiti ammissibili delle vibrazioni sulle strutture edilizie e sull'uomo.

Alla difficoltà oggettiva di poter descrivere la situazione della componente sul territorio prima della realizzazione dell'opera in progetto, si aggiunge anche la mancanza di modelli di previsione per le vibrazioni (come si intendono per la componente rumore) e la scarsa conoscenza delle opere di mitigazione, compresa una seria casistica di risultati ottenuti laddove sono state realizzate opere per la riduzione delle vibrazioni.

Inoltre bisogna anche considerare il seguente aspetto, di notevole importanza; una errata progettazione delle opere di contenimento delle vibrazioni può sortire inoltre l'effetto contrario con aumento, anche pericoloso, della componente per effetto della risonanza delle strutture investite dall'energia meccanica.

Per quanto riguarda il quadro generale di riferimento, per un completo studio del problema occorre tenere presente gli effetti delle vibrazioni di una certa entità che producono le seguenti conseguenze:

- vibrazioni che creano disturbo alle persone che le percepiscono come tremolio che si propaga lungo il corpo,
- vibrazioni che possono arrecare danno alle strutture edilizie con la formazione di crepe sull'intonaco, sul pavimento o con l'insorgere di danni più gravi,

- vibrazioni che possono indurre rumori indesiderati alle basse frequenze all'interno delle abitazioni, o rumori secondari quali tintinnio di oggetti.

In riferimento alle caratteristiche di propagazione nel suolo, è necessario distinguere il tracciato in superficie da quello in sotterraneo (vedi figura di seguito).

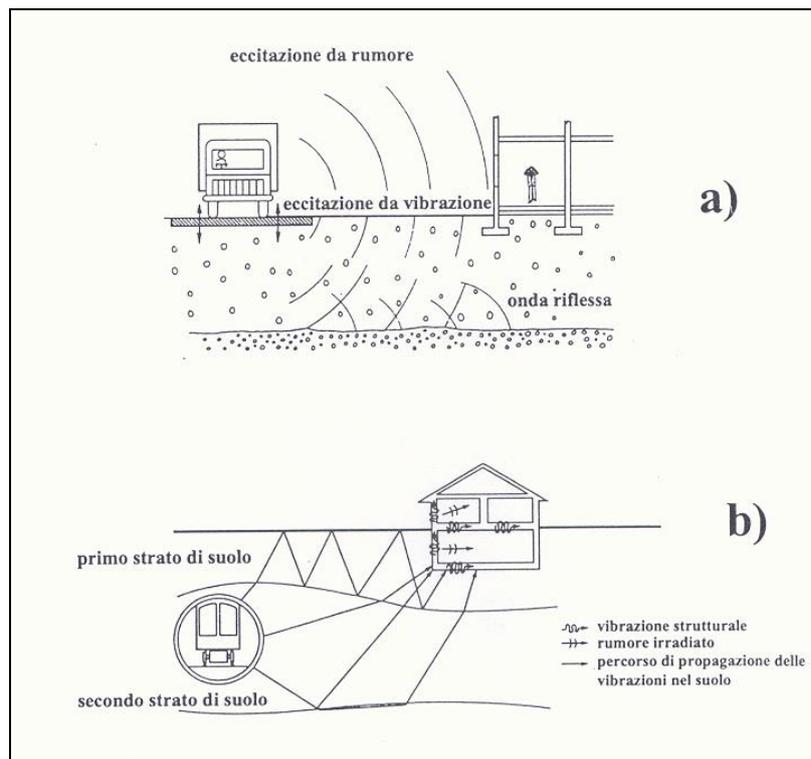


Figura 1: Vibrazioni dell'edificio eccitate dal rumore e dalle vibrazioni che si propagano sul terreno.
a) Sorgente in superficie. b) Sorgente in sottosuolo

La sorgente di vibrazione può eccitare modi diversi di vibrazione in relazione alla direzione, intensità e frequenza della forza trasmessa al terreno ed in relazione alle caratteristiche meccaniche del mezzo solido. Per le discontinuità e per la presenza delle stratificazioni del terreno, si possono propagare meglio uno o più modi.

La perturbazione elastica raggiungerà l'edificio attraverso le fondazioni producendo i propri effetti legati all'intensità che variano dal disturbando alle persone che occupano l'edificio al danno alle strutture (muri di tamponamento, divisori, ecc.). L'effetto sulle strutture e sulle persone dipende dal modo di propagazione ed in particolare dall'intensità della componente verticale ed orizzontale. L'attenuazione dell'onda elastica nel terreno è determinata dalle costanti elastiche e di smorzamento del terreno stesso, dal modo di propagazione e dal tipo di sorgente.

1.1 Considerazioni complessive

Uno studio di impatto ambientale dovrebbe considerare la previsione dei valori della componente vibrazione in fase di esercizio dell'infrastruttura di trasporto (stato post operam). Ma questo è possibile solo se si possiedono strumenti idonei di calcolo (in genere modelli) e si dispone di numerosi parametri fisici (dati iniziali di progetto).

I parametri fisici necessari per impostare un calcolo di previsione della componente sono numerosi; quelli più importanti sono i seguenti:

- Caratteristiche dello spettro di emissione della sorgente (auto, autocarro, camion etc.) in funzione del tipo di tracciato (galleria o rilevato).
- Variazione dello spettro di emissione del mezzo in funzione della velocità.
- Variazione del livello di vibrazione in funzione della distanza del ricettore dalla sorgente.
- Variazione del livello di vibrazione in funzione della tipologia delle fondazioni degli edifici da prendere in esame.
- Propagazione delle vibrazioni all'interno dei suddetti edifici.
- Trasformazione della vibrazione strutturale dell'edificio in rumore interno.

Lo studio di previsione delle vibrazioni può essere impostato correttamente se si dispongono dei valori relativi ai parametri sopra descritti tenendo conto che la maggior parte di essi sono di carattere puntuale e dipendono, quindi, dal luogo in cui è prevista l'opera soggetta a studio d'impatto.

Ma facciamo presente che:

- Lo spettro di emissione della sorgente (mezzo su gomma, etc.) può essere valutato solo sperimentalmente.
- La variazione dello spettro di emissione della sorgente in funzione della velocità può essere determinata solo sperimentalmente con prove specifiche; in alternativa è possibile elaborare opportunamente i dati ovviamente generali e non specifici, disponibili in letteratura.
- La variazione del livello di vibrazione in funzione della distanza del ricettore dalla sorgente può essere indagata per via sperimentale attraverso prove di trasmissione di sollecitazioni periodiche o impulsive nei terreni circostanti il tracciato della infrastruttura di trasporto. Ancora

non è disponibile una vasta casistica sperimentale che consenta di valutare teoricamente l'effetto di questo parametro partendo unicamente dalla caratterizzazione geologica del terreno.

- La variazione del livello in funzione della tipologia delle fondazioni dell'edificio in esame è possibile determinarla o con prove specifiche di risposta a sollecitazioni appositamente impresse al terreno o per via analitica noto il tipo di fondazione, il carico sul terreno e la costituzione del terreno stesso sul quale poggia l'edificio.
- La propagazione delle vibrazioni all'interno dell'edificio può essere prevista utilizzando metodologie consolidate in uso in ingegneria sismica per la valutazione numerica del comportamento dinamico degli edifici civili. Sono possibili sperimentazioni specifiche attraverso il rilievo, in diversi punti dell'edificio, delle accelerazioni indotte da sollecitazioni impulsive artificialmente prodotte o sfruttando quelle del traffico esistente. In realtà, vista la grande varietà delle dimensioni e delle tipologie degli edifici, tali rilevazioni hanno carattere e validità locale e non possono essere generalizzate se non mediando opportunamente i valori ottenuti dalle sperimentazioni.

1.2 Origine delle vibrazioni

Le vibrazioni, in generale, traggono origine da forze variabili nel tempo in intensità e direzione. Tali forze agiscono in specifici punti del suolo (sia in superficie sia in galleria) immettendo energia meccanica che si propaga nel terreno e che può essere riflessa da strati più profondi prima di giungere al ricettore.

Ricordando che il fenomeno vibratorio è connesso strettamente con il tipo di accoppiamento meccanico tra mezzo di trasporto e terreno, la reazione di quest'ultimo sulla sorgente impedisce la definizione in assoluto delle caratteristiche del generatore e che possono essere inserite autonomamente in uno schema di calcolo.

Per i trasporti la prima classificazione da effettuarsi è relativa al mezzo distinguendo i veicoli su gomma da quelli su ferro.

In linea di principio un veicolo su gomma con carico perfettamente bilanciato, con perfetta equilibratura delle ruote, che avanza su una strada perfettamente levigata, non produce vibrazioni. In pratica il manto stradale è tutt'altro che liscio usurandosi con il tempo; le ruote dei veicoli pesanti sono sbilanciate per effetto dell'usura non uniforme del pneumatico; le forze che il corpo del veicolo comunica alle ruote variano in intensità e direzione.

L'interazione ruota-strada può essere schematizzata con il diagramma di Fig. 3: il passaggio del veicolo sul dosso produce una forza di tipo impulsivo se il tempo di transito sulla discontinuità è inferiore al periodo di risonanza delle sospensioni. La ruota, così eccitata, oscillerà per alcuni periodi con frequenza pari a quella della sospensione esercitando sulla strada una serie di impulsi che si estendono per alcuni metri. Tale fenomeno produrrà, con il tempo, ulteriori danneggiamenti del manto stradale che si estenderanno su superfici sempre più vaste.

Tenendo conto del numero degli assi e del carico dinamico esercitato dal veicolo in movimento, l'azione delle forze eccitatrici è legata alla velocità ed al peso statico del veicolo stesso.

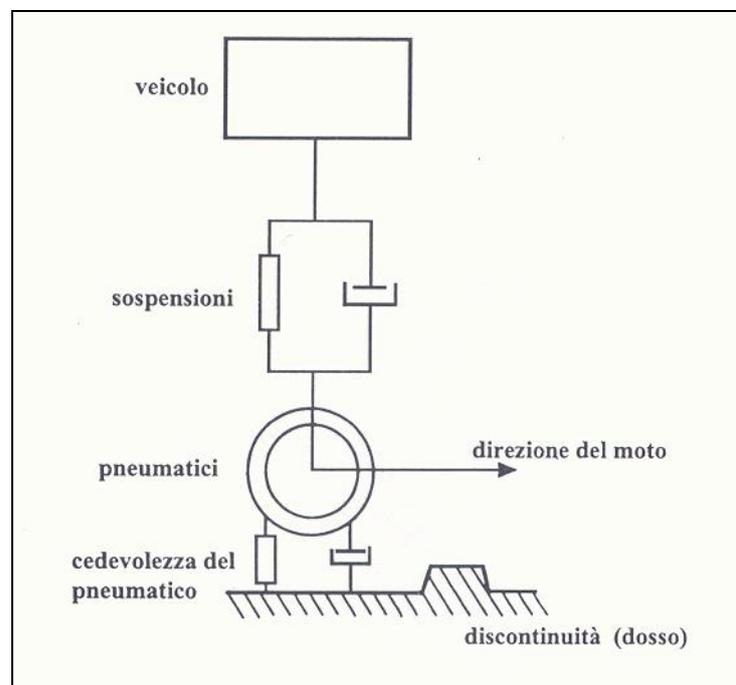


Fig. 3: Effetti dinamici di una discontinuità del manto stradale

Interessanti studi sono stati condotti sull'entità delle forze dinamiche esercitate sul terreno da veicoli commerciali di peso superiore alle 32 tonnellate. I carichi sono stati misurati con sensori inglobati entro il manto stradale ed i risultati delle misure hanno consentito di individuare le frequenze proprie di risonanza (tra 10 e 16 Hz) ed il rapporto tra carico dinamico sugli assi e carico statico. Tale rapporto, che mediamente è pari a 1.5, può raggiungere il valore massimo di 3.

L'ampiezza della forza dinamica sulla superficie di contatto può variare da 10 a 20 t.

L'accoppiamento tra veicolo e terreno dipende molto dallo strato sotto l'asfalto, per cui il livello di vibrazioni immesso nel terreno è di difficile modellizzazione.

Una prima semplificazione per un modello di previsione è quella di Rudder attraverso la quale si giunge ad una relazione semplificata per il calcolo del livello di accelerazione ad una determinata distanza dalla strada. Questo approccio è valido per un tipo di asfalto privo di buche e con uniforme

rugosità superficiale come può essere per le autostrade o le tangenziali oggetto del presente studio.

1.3 *Rugosità di superficie di tipo casuale*

Il livello di accelerazione a 2 m di distanza dal ciglio della strada può essere calcolato con la relazione:

$$L_o = -4.155 (PSR) + 17.2 \log(V) + 10 \log(W_G) + 52 \quad \text{dB re. } 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

dove:

PSR è un coefficiente legato alla densità spettrale di potenza della rugosità

V è la velocità in km/h

W_G è il peso lordo del veicolo in tonnellate

Il valore che si assume per PSR può variare da = 4,5 per un asfalto nuovo fino a circa 2,0 per un asfalto usurato. In linea di principio valori accettabili di PSR spaziano da 1 a 5 e forniscono variazioni di livello di accelerazione di ± 8 dB rispetto al valore medio di PSR pari a 3.

Il livello di accelerazione impresso al terreno è anche funzione del peso dei veicoli: si calcola che un camion di 20 t a 55 km/h con un fattore PRS=3 produce un livello di accelerazione di 82,8 dB ref. $1 \mu\text{m/s}^2$. Valori misurati di vibrazioni prodotte da un camion carico con due assi su diversi tipi di pavimentazione sono compresi 79 a 91 dB (ref. $1 \mu\text{m/s}^2$).

La formula sopra riportata evidenzia un aumento del livello di accelerazione di 3 dB per ogni raddoppio del peso mentre fornisce un incremento di 5.2 dB per ogni raddoppio della velocità.

La distribuzione in frequenza dell'energia vibratoria può essere ottenuta ricorrendo ad uno spettro medio del livello di accelerazione misurato in situazioni analoghe. Nella figura seguente si riporta, a titolo di esempio, lo spettro equivalente e massimo della componente verticale dell'accelerazione rilevato a 12 m dal ciglio di una strada statale peri urbana a due corsie.

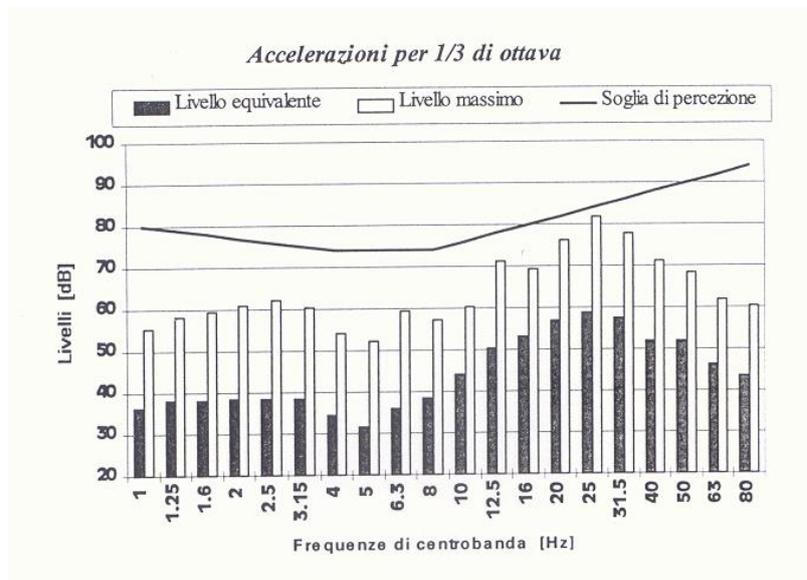


Fig. 4: Livello equivalente e livello massimo di accelerazione per bande di 1/3 di ottava e rilevato a 12m dal ciglio strada su terreno compatto. Durata del rilievo 10 min con traffico di 290 auto e 13 camion. Livelli globali pesati UNI 9614 $Leq_{w,eq} = 55.3$ dB; $L_{w,max} = 76.0$ dB

Origine delle vibrazioni dei veicoli in galleria: previsione dei carichi e delle risposte

Restando inalterato il concetto espresso per la generazione delle forze dinamiche a livello di contatto ruota-asfalto, non deve essere trascurato l'effetto del rumore sul rivestimento della galleria. Un elemento che condiziona l'accoppiamento del terreno con la sorgente di vibrazione è il carico del terreno sull'intera struttura in della galleria.

Per il calcolo di previsione delle vibrazioni indotte dal traffico nel sottosuolo si preferisce utilizzare degli spettri di vibrazione reali misurati sul rivestimento di gallerie stradali in esercizio. Nella Fig. 5 si riporta lo spettro equivalente dell'accelerazione misurato all'interno di una galleria naturale.

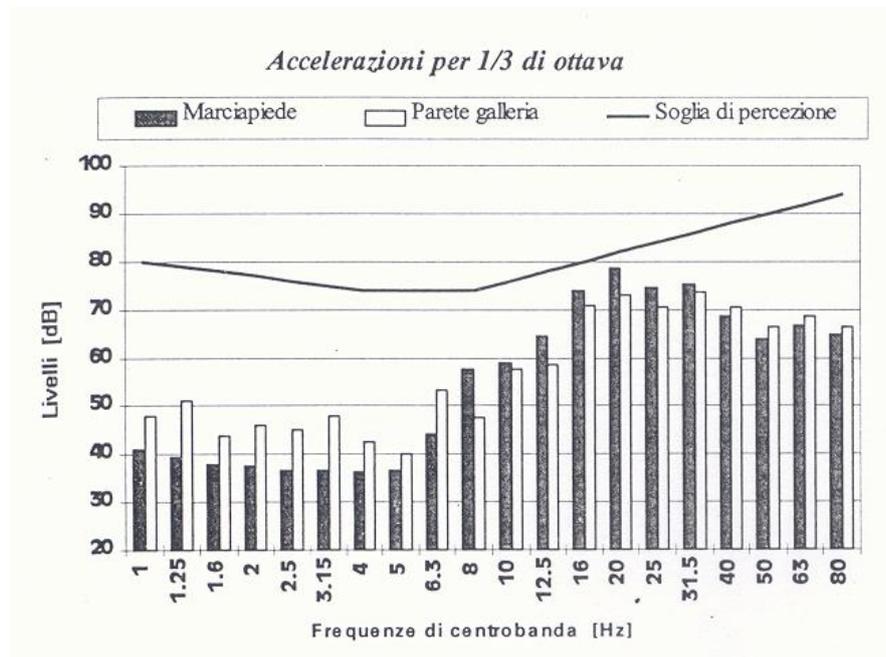


Fig. 5: Livello equivalente e livello massimo di accelerazione per bande di 1/3 di ottava e rilevato sul marciapiede e sulle pareti di una galleria durante il transito di un camion. Livelli pesati UNI 9614 $L_{w,max} = 74.0$ dB sul marciapiede; $L_{w,max} = 70.4$ dB sulla parete

1.4 Analisi dei potenziali effetti negativi

Per produrre un **effetto significativo**, le sorgenti di vibrazioni devono essere prossime agli edifici (in genere a non più di qualche decina di metri per la tipologia di geologia che caratterizza il territorio attraversato dall'infrastruttura in progetto).

Per quanto concerne gli effetti, le vibrazioni negli edifici possono costituire un disturbo per le persone esposte e, se di intensità elevata, possono arrecare danni architettonici o strutturali agli edifici stessi.

Il problema delle vibrazioni degli edifici assume sempre maggiore importanza sia in relazione alla diversa tipologia strutturale delle costruzioni moderne (strutture più leggere grazie all'utilizzo dei materiali con migliori caratteristiche di resistenza meccanica), sia in relazione al moltiplicarsi delle fonti di vibrazione, in special modo quelle generate dalle attività dell'uomo (quali infrastrutture di trasporto concorrenti nella stessa area). Sorgenti di vibrazione quali attività di cantiere e traffico stradale e ferroviario, possono essere causa di disturbo per gli abitanti di edifici oltre alla possibile causa di potenziali danni alle strutture, soprattutto in presenza di edifici particolarmente critici (per conformazione strutturale e/o per utilizzo).

In generale danni strutturali all'edificio nel suo insieme attribuibili a fenomeni vibratorii sono estremamente rari e quasi sempre derivano dal concorso di altre cause.

Affinché le vibrazioni possano arrecare danni strutturali è comunque necessario che le vibrazioni raggiungano livelli tali da comportare fastidio e disturbo agli abitanti.

Altre forme di danno riguardano livelli vibrazionali definiti "di soglia", che, senza compromettere la sicurezza strutturale degli edifici, ne possono determinare una riduzione del valore d'uso.

I danni di soglia si presentano sotto forma di fessure nell'intonaco, accrescimenti di fessure già esistenti, danneggiamenti di elementi architettonici.

Il problema è particolarmente sentito con riguardo alla conservazione degli edifici monumentali.

Le vibrazioni possono essere anche causa di danneggiamenti o malfunzionamenti di apparecchiature all'interno degli edifici. Particolare attenzione occorre prestare alla valutazione di tali effetti per edifici sensibili come gli ospedali dove, nelle sale operatorie, ad esempio, vibrazioni strutturali potrebbero comportare effetti negativi sulle attività da svolgere.

In generale la norma UNI 9916 pur non fornendo limiti ben definiti, evidenzia una guida relativa al metodo di valutazione degli effetti dei fenomeni vibratorii sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

- La norma classifica le definizioni di danno in funzione degli effetti che le vibrazioni provocano agli edifici secondo la seguente terminologia:
- danno di soglia: formazione di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o accrescimento di fessure già esistenti sulle superfici intonacate o sulle superfici di muri a secco; inoltre formazione di fessure filiformi nei giunti a malta delle costruzioni in mattoni e in calcestruzzo
- danno minore: formazione di fessure più aperte, distacco e caduta di gesso o pezzi di intonaco di muri a secco; formazione di fessure in blocchi di mattoni o di calcestruzzo
- danno maggiore: danneggiamento di elementi strutturali; fessure nelle colonne di supporto; apertura di giunti; serie di fessure nella muratura

2 QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

Per gli aspetti normativi di riferimento, si ricorda che a tutt'oggi non esiste in Italia una legge quadro sull'inquinamento da vibrazioni che fissa dei limiti della componente sul territorio, per cui si utilizzano, per le valutazioni dei potenziali impatti, i valori segnalati dalle norme internazionali ISO o da quelle nazionali DIN, UNI, etc.

Di seguito è riportato un breve elenco dei principali riferimenti normativi comunitari e nazionali, con sintesi dei rispettivi contenuti.

Normativa comunitaria

- *Direttiva Parlamento europeo e Consiglio Ue n. 2002/44/Ce :*
- *Esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti da vibrazioni - Testo consolidato*
- *DIN 4150-1: Rilevamento preliminare delle grandezze caratteristiche delle oscillazioni*
- *DIN 4150-2: Effetti sull'uomo negli edifici*
- *DIN 4150-3: Effetti sui manufatti*
- *ISO 4866: Vibrazioni meccaniche ed impulsi - Vibrazioni degli edifici - Guida per la misura delle vibrazioni e valutazione dei loro effetti sugli edifici*

Normativa nazionale

- *UNI 9614: Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo;*
- *UNI 9916: Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici;*
- *UNI 9513: vibrazioni ed urti – vocabolario*
- *DM 9/1/1996 "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche"*

Nella figura che segue viene riportato lo schema previsto dalla norma Din Standard 4150 tedesca in riferimento alla percezione psicologica dell'uomo relativamente alle vibrazioni strutturali.

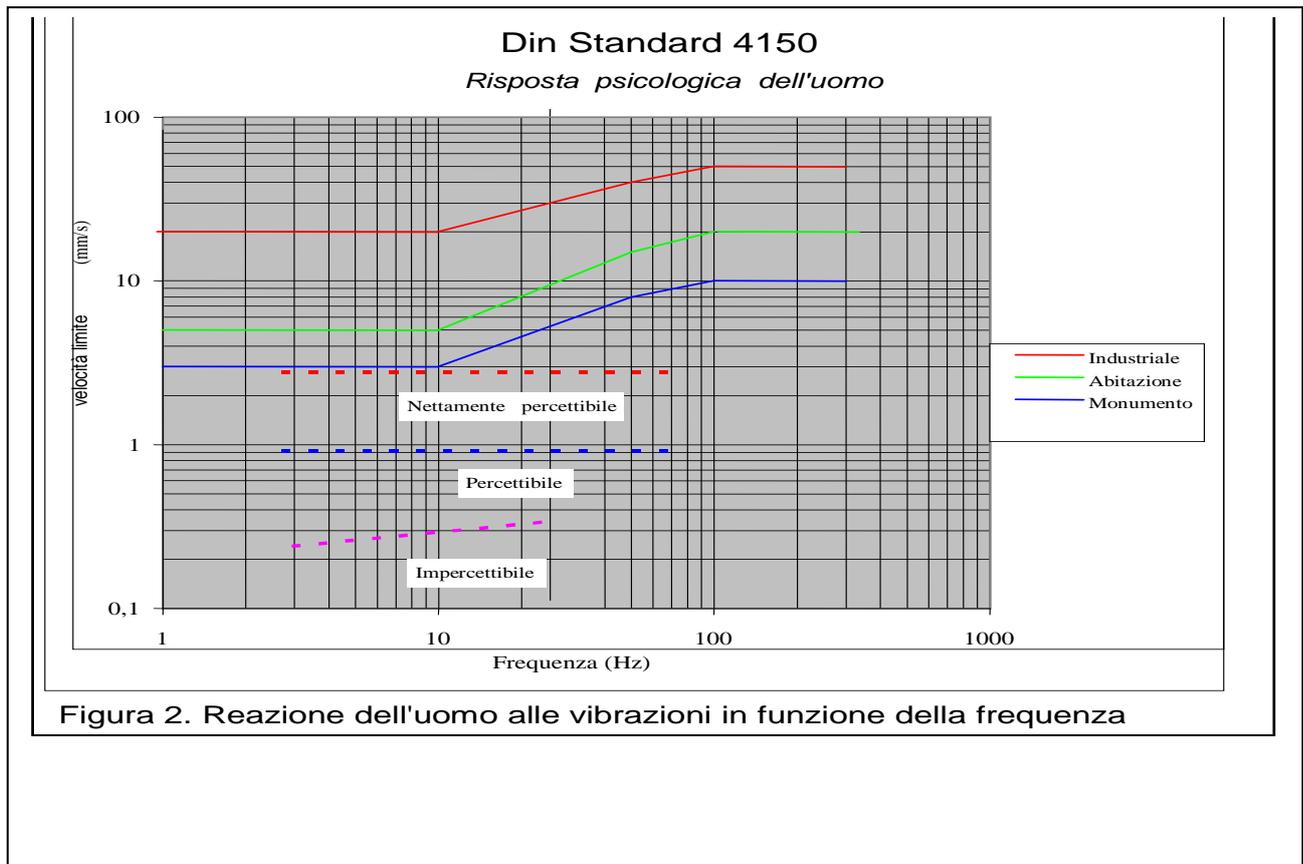


Figura 2. Reazione dell'uomo alle vibrazioni in funzione della frequenza

In tabella 1 sono riportate le definizioni delle 4 classi in relazione alle velocità della particella.

Classe di livello	Velocità (cm/s)	Sensibilità psicologica (reazione statistica nell'uomo)
1	> 0.30	Fastidiosa
2	> 0.10	Nettamente percettibile
3	> 0.03	Percettibile
4	< 0.03	Impercettibile

Tabella 1 – definizione delle classi di impatto ambientale (DIN 4150)

Per quanto concerne le “accelerazioni critiche”, si può considerare quanto indicato nella UNI 9614 che propone i seguenti valori di soglia delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza a cui fare riferimento.

Vengono considerate le seguenti tabelle riportate separatamente per asse Z e assi X e Y.

Destinazione d'uso	Accelerazione	
	m/s ²	dB
Aree critiche	5,0 10 ³	74
Abitazioni notte	7,0 10 ³	77
Abitazioni giorno	10,0 10 ³	80
Uffici	20,0 10 ³	86
Fabbriche	40,0 10 ³	92

Tabella 2 Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per l'asse Z (UNI 9614)

Destinazione d'uso	Accelerazione	
	m/s ²	dB
Aree critiche	3,6 10 ³	71
Abitazioni notte	5,0 10 ³	74
Abitazioni giorno	7,0 10 ³	77
Uffici	14,4 10 ³	83
Fabbriche	28,8 10 ³	89

Tabella 3 Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per l'asse Z (UNI 9614)

Tali valori sono riferiti a vibrazioni di livello costante con periodi di riferimento diurni compresi tra le 7:00 e le 22:00 e notturni tra le 22:00 e le 7:00. La UNI 9614 definisce una vibrazione di livello costante quando il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza, rilevato mediante costante di tempo “slow” (variabilità di 1 s), varia nel tempo in un intervallo di ampiezza inferiore a 5 dB.

Nel caso di vibrazioni di livello non costante (quando il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza, rilevato mediante costante di tempo "slow", varia nel tempo in un intervallo di ampiezza maggiore a 5 dB), il parametro fisico da misurare è l'accelerazione equivalente a_{w-eq} o il corrispondente livello in decibel, definiti dalla legge seguente:

$$a_{eq} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right] \quad \text{in m/s}^2 \text{ oppure in dB} \quad L_{w-eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{a_w(t)}{a_0} \right)^2 dt \right]$$

dove T è la durata del rilievo in secondi.

La norma UNI 9614 definisce le vibrazioni impulsive quando sono generate da eventi di breve durata costituiti da un rapido innalzamento del livello di accelerazione sino ad un valore massimo seguito da un decadimento che può comportare o meno, a seconda dello smorzamento della struttura, una serie di oscillazioni che tendono ad estinguersi nel tempo.

Per tale tipologia di vibrazioni, se il numero di eventi giornalieri N è non maggiore di 3, il valore dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza va confrontato con i limiti riportati nella seguente tabella.

Destinazione d'uso	Accelerazione			
	Asse Z		Assi X, Y	
	m/s ²	dB	m/s ²	dB
Aree critiche	5,0 10 ³	74	3,6 10 ³	71
Abitazioni notte	7,0 10 ³	76	5,010 ³	74
Abitazioni giorno	0,30	109	0,22	106
Uffici	0,64	116	0,46	113
Fabbriche	0,64	116	0,46	113

Tabella 4 Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per vibrazioni impulsive (UNI 9614)

Nel caso in cui il numero di impulsi giornaliero sia maggiore di 3, i limiti della precedente tabella, relativamente alle "Abitazioni giorno", alle "Fabbriche" e agli "Uffici" vanno ridotti in base al numero di eventi e alla loro durata. Non sono invece previste riduzioni in Aree critiche (ricettori sensibili,

ovvero ricettori ove sia indispensabile il mantenimento al minimo possibile il valore di accelerazione strutturale) e per le Abitazioni nel periodo notturno (per la salvaguardia del sonno).

I limiti si ottengono in tal caso dai precedenti (espressi in m/s^2) moltiplicandoli per un coefficiente F definito come:

Impulsi di durata inferiore ad un secondo $F = 1,7 N^{-0,5}$

Impulsi di durata superiore ad un secondo $F = 1,7 N^{-0,5} t^k$

con :

N = numero di impulsi

T = durata dell'evento

k = 1,22 costante per pavimenti in calcestruzzo

k = 0,32 costante per pavimenti in legno

Qualora i limiti così calcolati fossero minori dei limiti previsti per le vibrazioni di livello costante dovranno essere adottati come limiti questi ultimi valori.

Nel caso in cui le vibrazioni misurate superino i valori limite riportati nelle tabelle precedenti, i fenomeni vibratorii possono essere considerati oggettivamente disturbanti per le strutture e/o per un individuo presente all'interno. Il giudizio sull'accettabilità del disturbo può dunque essere emesso considerando la frequenza e la durata delle vibrazioni disturbanti.

3 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI STUDIO

La valutazione dell'impatto vibrazionale generato dai mezzi e dalle lavorazioni, sia in corso d'opera che nel periodo di vita dell'opera stradale, che potranno generare condizioni di criticità, deve basarsi su distinti elementi di valutazione.

Nel presente capitolo si provvederà sia alla presentazione dell'approccio operativo che alla descrizione delle considerazioni tecniche adottate sulla base del modello di valutazione utilizzato.

Nel caso di studio si identifica la necessità di valutare gli impatti vibrazionali collegati sia alla fase realizzativa dell'opera (associati alle lavorazioni più impattanti per tale matrice analizzata) che alla fase di utilizzo dell'opera.

Lo studio vibrazionale, essendo di natura previsionale rispetto a scenari futuri, deve in prima istanza identificare tutti gli aspetti o elementi che possano influenzare sia la genesi che la propagazione delle onde vibrazionali che saranno generate.

Dovranno inoltre essere identificati tutti i possibili bersagli che potranno subire gli eventuali effetti delle onde generate.

Si ritiene inoltre che l'efficacia di un modello previsionale come quello adottato in questo studio, debba basarsi su semplici e ben definiti elementi in base ai quali sviluppare il quadro previsionale grazie al quale progettare una adeguata rete di monitoraggio e controllo.

Tali considerazioni guidano a identificare i seguenti elementi caratteristici dell'opera in base ai quali sviluppare il modello previsionale.

- Geologia
- Struttura dell'opera
- Tipologia di lavorazioni
- Tipologia di bersaglio
- Distanza del bersaglio dall'opera

3.1 Contesto geologico

La geologia ricopre un ruolo di primaria importanza.

Le onde generate raggiungono i potenziali bersagli viaggiando attraverso il terreno, le cui caratteristiche elastiche e meccaniche determinano in modo sostanziale la capacità di trasmissione energetica del treno di onde generato.

Formazioni litoidi o sedimentarie si caratterizzano quindi per un comportamento assai diverso determinando una differente attenuazione dell'ampiezza del treno di onde con conseguente riduzione del grado di accelerazione rilevabile in corrispondenza del bersaglio. La litologia, influenzando la propagazione delle onde, influenza quindi anche la distanza alla quale gli effetti di questo risultano non riconoscibili.

Il tratto di autostrada in oggetto attraversa essenzialmente due tipi di terreni i litotipi carbonati delle Unità Carbonatiche dell'Appennino Meridionale e gli argilloscisti e calcescisti del complesso Liguride rappresentato da terreni ascrivibili all'unità del T. Frido.

Nel suo complesso l'ambiente in esame è quindi caratterizzato da due diversi paesaggi morfologici che rispecchiano una situazione piuttosto diffusa per l'intera catena dell'appennino centro meridionale, anche se in corrispondenza dell'Appennino Lucano il fenomeno è reso particolarmente evidente dal contrasto che si manifesta in uno spazio piuttosto ristretto tra i ripidi versanti dei contrafforti calcarei e le ondulate superfici del settore nord orientale.

La natura geologica dei terreni ha costretto l'asse stradale a ricercare ambiti di maggiore stabilità rappresentati dal sedime dei con di deiezione in grado di garantire un comportamento geomeccanico omogeneo nell'intorno del sedime stradale di progetto.

3.2 Struttura dell'opera

La struttura dell'opera, dovuta alla differente rigidità delle soluzioni tecniche adottate, influenza sia la genesi delle vibrazioni che la loro trasmissione al terreno.

Nello specifico l'intervento progettato prevede uno sviluppo:

- *Tratti autostradali in viadotto*
- *Tratti autostradali in galleria naturale*
- *Tratti autostradali in trincea/rilevato*

Esaminando le varie tratte del progetto si desume che le lavorazioni più impattanti da un punto di vista vibrazionale saranno le operazioni dei cantieri meccanizzati in particolare i lavori di infissione di palancole per vibroinfissione e data la natura dei suoli si ha possibilità di trasmissione delle vibrazioni agli edifici limitrofi soprattutto in quelle aree dove i ricettori sono molto vicini alla infrastruttura.

Le situazioni legate alle strutture specifiche, saranno valutate in modo puntuale attraverso degli indici di sensibilità all'aspetto vibrazioni, nel senso che si genereranno dei "pesi" per ciascuna caratteristica struttura in base all'influenza di questa sulla matrice vibrazioni.

3.3 Tipologia di bersaglio

Secondo un approccio generalmente condiviso e adottato anche per studi sulla componente rumore, i bersagli sono classificati secondo il seguente schema.

- *Edificio scolastico*
- *Edificio residenziale*
- *Edificio Industriale/commerciale*
- *Edificio con destinazione agricola o assimilabile*
- *Edificio di culto*
- *Edificio di tipo rudere*

Anche per questi viene proposto un livello di "sensibilità" atto a verificare quale indice ("peso") possa essere associato a ciascun elemento costruttivo in base alla potenziale risposta dello stesso alle sollecitazioni vibrazionali.

3.4 Distanza del bersaglio dall'opera

Trattandosi di onde sismiche, l'impatto di queste sul potenziale bersaglio è strettamente collegato all'energia dell'onda e quindi, a parità di contesto geologico e strutturale dell'opera, **è quindi direttamente correlato con la distanza tra il bersaglio e la sorgente** che ha generato l'onda stessa (asse della strada o distanza dalle strutture da realizzare).

Considerando che l'elemento energizzante lungo una strada è rappresentato dai mezzi che vi transitano, e che questi possono quindi essere considerati elementi "puntuali" e distribuiti lungo tutto il tracciato, la distanza tra il tracciato stesso ed il bersaglio si identifica come parametro di riferimento.

In modo analogo anche per le strutture che dovranno essere realizzate (ponti, viadotti, ecc) la distanza da questi rappresenterà un importante parametro di selezione.

Il "peso" in questo caso corrisponde semplicemente alla distanza della "sorgente lineare" (infrastruttura stradale) dal ricettore.

4 STRUTTURA LOGICA DEL MODELLO DI ANALISI ADOTTATO

L'identificazione dei bersagli che nei futuri scenari (fase realizzativa e fase gestionale) potranno risentire di effetti vibrazionali, si sviluppa secondo una procedura logica che tiene in considerazione tutti gli elementi ed aspetti descritti nei capitoli precedenti.

Applicando un modello logico legato alla “somma degli effetti” , secondo:

→ **ANALISI TIPOLOGIA DEL BERSAGLIO “CRITICO”** (ES: COSTRUZIONE CIVILE, COMMERCIALE, INDUSTRIALE)

PER EDIFICI CON TIPOLOGIA “CIVILE” ESISTE UNA CRITICITÀ E QUINDI OGGETTO DI VALUTAZIONE

PER COSTRUZIONI INDUSTRIALE/COMMERCIALI NON SUSSISTONO CRITICITA'

→ **ANALISI GEOLOGIA DEL TERRENO** (ES: SEDIMENTARIO, LITOIDE)

IN PRESENZA DI FORMAZIONI DI SERRA BONANGELO E DI GRISOLLA O ASSIMILABILE, **LA DISTANZA CRITICA DI VALUTAZIONE <65M** (COMPARAZIONE CON RILEVAZIONE DELLE VIBRAZIONI ANTE-OPERAM).

La natura geologica dei terreni ha costretto l'asse stradale a ricercare ambiti di maggiore stabilità rappresentati dal sedime dei con di deiezione in grado di garantire un comportamento geomeccanico omogeneo nell'intorno del sedime stradale di progetto.

DISTANZA > 65 M NON SUSSISTONO CRITICITA'

→ **ANALISI TIPOLOGICA DEL PROGETTO STRADALE** (VIADOTTO, GALLERIA, PONTI)

RILEVATO STRADALE: PER DISTANZE BERSAGLIO-INFRASTRUTTRA:

> 65M NON CRITICA

<65M POSSIBILE SITUAZIONE DI CRITICITÀ

VIADOTTO, GALLERIA, PONTI: PER DISTANZE BERSAGLIO-INFRASTRUTTRA

>65M NON CRITICITÀ

< 65M POSSIBILE CRITICITÀ

Si procede dunque alla identificazione dei possibili bersagli e del livello di criticità applicabile a ciascuno di essi.

Secondo tale schema, il “bersaglio critico” si definisce come quel ricettore che rientra nei criteri di valutazione del rischio e dunque potrebbe essere significativamente influenzato sotto l’aspetto della matrice vibrazioni e per cui pertanto se ne raccomanda la valutazione del rischio di dettaglio attraverso un monitoraggio. In tale criterio rientra la valutazione della “sensibilità del ricettore”, definita come il potenziale danno (strutturale e alle persone) in risposta alla sollecitazione vibrazionale ricevuta (pertanto un edificio maggiormente sensibile risulta essere quello che sollecitato dall’azione delle vibrazioni, risponde con un potenziale ritenuto significativo in termini di danno strutturale e alle persone.

4.1 Sviluppo dei dati e procedura di analisi dei dati cartografici

Le valutazioni per la definizione delle condizioni di criticità in base alle quali riuscire a “selezionare” i potenziali bersagli, sono state sviluppate analizzando le cartografie territoriali.

Si definiscono dunque inizialmente le seguenti basi cartografiche:

- *BASE TOPOGRAFICA DI RIFERIMENTO CON DEFINIZIONE DEI “BERSAGLI” (MANUFATTI DIFFERENZIATI PER TIPOLOGIA);*
- *BASE CARTOGRAFICA RELATIVA AL TRACCIATO DI PROGETTO;*
- *BASE CARTOGRAFICA CON INDICAZIONE DELLA TIPOLOGIA DI INTERVENTO PREVISTO CON RICONOSCIMENTO DELLE STRUTTURE DA REALIZZARE (RILEVATO, TRINCEA, VIADOTTO, GALLERIA, PONTE);*
- *CARTOGRAFIA GEOLOGICA.*
- *CARTOGRAFIA DELLE MISURE VIBRAZIONALI ANTE OPERA REALIZZATE.*

Si è quindi proceduto, adottando specifiche procedure di selezione e costruzione di database relazionati geografici, all’applicazione dello schema logico precedentemente indicato.

A tale proposito si evidenzia che le distanze utilizzate per la selezione dei potenziali bersagli sono state identificate sulla base della seguente logica:

Distanza di selezione bersagli sensibili (~65 m) – considerando la morfologia sia del contesto geologico che della struttura dell’opera (viadotto, galleria naturale, trincea, rilevato), si è posta come

R.T.P.

distanza quella massima alla quale sono stati posizionati i punti di misura vibrazionale nel monitoraggio Ante Operam. Tutte le rilevazioni strumentali non hanno fornito alcun elemento di criticità, non riscontrando alcun livello di interesse per l'aspetto vibrazioni, potendo quindi assumere che tutti i manufatti, anche in uno scenario futuro, posti a distanza maggiore, possano essere considerati come non critici e dunque non valutati. Pertanto la distanza massima alla quale tale valutazione è stata effettuata risulta pari proprio a ~65m.

In virtù del comportamento assai differente del terreno, ai fini puramente cautelativi, si è valutata come distanza di attenzione per i bersagli prossimi all'infrastruttura stradale il limite di 65.0m. Per definire tale distanza ci si è basati sulla distanza minima tra la postazione del punto di misura Ante Operam più prossima al rilevato (VI-02). Dunque tale distanza risulta essere la peggiore posizione possibile dei ricettori rispetto all'infrastruttura;

Inoltre dato che la progettazione prevede che in corrispondenza di queste strutture siano adottate soluzioni tecniche come palancolature (posizionate per vibroinfissione) e distruzione dei manufatti esistenti (tramite martellone), questi settori sono identificati come aree da porre sotto particolare osservazione. Per tale motivo si identificano come critiche le strutture poste ad una distanza inferiore a quella massima rispetto alle stazioni di misura Ante Operam realizzate (~65 m).

Secondo lo schema proposto tutti i bersagli posti oltre i 65 m sono stati considerati come non critici e dunque non oggetto di potenziale condizione di rischio vibrazionale per le strutture.

Dunque, il range di distanza del ricevitore dall'infrastruttura, entro il quale il presente studio analizza il potenziale impatto da vibrazioni, risulta essere compreso entro i primi 65m per tutta l'infrastruttura in progetto.

4.2 Descrizione dei risultati ottenuti

L'adozione del modello logico di cui sopra e descritto nei capitoli precedenti, consente di identificare i bersagli da ritenere potenzialmente critici.

L'analisi spaziale delle basi cartografiche adottate ha consentito di identificare i bersagli posti alle distanze limite adottate e commentate nel capitolo precedente.

Sulla base di quanto affermato in precedenza si desume che la criticità sussiste per tutti quei ricettori ubicati entro i 65m dal ciglio stradale. Tale distanza è da considerarsi significativa sia per le fasi di costruzione dell'opera che nelle fasi successivamente.

Segue tabella con identificazione dei ricettori potenzialmente disturbati suddivisi secondo tratto di progetto e destinazione d'uso. Inoltre nei paragrafi seguenti vengono riportati degli estratti planimetrici con individuazione delle aree/ricettori ritenuti critici ai fini vibrazionali.

Sono quindi stati considerati, come detto, i seguenti due scenari di interesse;

- *CORSO D'OPERA (fase di realizzazione)*
- *POST OPERAM (fase di esercizio)*

4.2.1 Cantieri corso d'opera (fase di realizzazione)

Di seguito saranno valutati i casi di attività di cantierizzazione, al fine di stabilire quali necessitino di un approfondimento relativamente alla propagazione dell'energia vibrazionale.

In particolare i casi che si possono presentare sono:

- Cantieri base
- Cantieri industriali/stoccaggio
- Fronte avanzamento lavori (FAL) – costruzione opere d'arte

In considerazione di quanto sopra esposto si ritiene che:

- I cantieri base sono caratterizzati prevalentemente da sorgenti fisse che non vengono considerate nello studio vibrazionale (centrali termiche, condizionatori, che non producono effetti vibrazionali); quanto ai mezzi mobili, invece, sono utilizzati prevalentemente mezzi leggeri, dal momento che il cantiere svolge solo funzioni logistiche e di dormitorio. Si ritiene pertanto che tali cantieri possano essere ritenuti trascurabili rispetto a questa componente ambientale;
- I cantieri industriali/stoccaggio hanno dotazioni similari a quelli dei campi base con una minore presenza di baraccamenti ed una maggiore superficie dedicata allo stoccaggio dei materiali e delle terre e rocce da scavo nonché dove necessari anche impianti di betonaggio. Dal punto di vista dell'impatto vibrazionale risultano poco significative eccezioni fatta per le viabilità di accesso a tali aree che potrebbero essere sede di intensi flussi di mezzi pesanti per il conferimento delle terre provenienti dagli scavi alle aree di deposito temporaneo in queste aree localizzate.
- Il fronte di avanzamento lavori (FAL) è quello che presenta potenzialmente le maggiori criticità per un eventuale danno agli edifici, a causa delle lavorazioni potenzialmente impattanti che possono essere messe in atto, mentre per quanto riguarda il disturbo alle persone, la durata relativamente

breve del passaggio del fronte limita il disagio al tempo strettamente necessario ad oltrepassare il ricettore durante l'avanzamento.

Le aree tecniche e le aree di lavorazione in generale sono viceversa sede di attività che producono vibrazioni riferibili a mezzi e macchine operatrici presenti sulle aree oltre che al flusso di mezzi pesanti che approvvigionano le aree con materiale necessario alle lavorazioni o caricano materiale proveniente dalle attività di scavo per conferirle ai depositi temporanei presso i cantieri operativi o campi base o direttamente a scarica.

Il progetto della cantierizzazione ha tenuto in debito conto di questi aspetti preferendo viabilità che non interessano centri urbani o aree protette.

L'ubicazione delle aree tecniche e delle aree di lavorazione sono invece direttamente legate alla localizzazione del progetto e dunque l'analisi degli impatti di tali aree sul sistema insediativo circostante dovranno essere opportunamente monitorate e sarà necessario prevedere tutti gli accorgimenti atti a ridurre il più possibile i tempi di quelle attività che maggiormente impattano sui ricettori circostanti.

Nel caso di livelli di vibrazione indotti dal transito dei mezzi d'opera si proporranno percorsi alternativi e qualora ciò non fosse possibile si prevederà l'utilizzo di mezzi meno impattanti sia come tipologia sia come capacità di carico.

Di seguito si riportano gli stralci cartografici che riportano le aree di cui si prevede il monitoraggio della componente vibrazionale.

In questo scenario (Corso d'opera), il modello proposto seleziona dei bersagli posti ad una distanza inferiore i 65 m rispetto alle "aree sorgente" associate in pianta ai settori ove saranno realizzate queste opere.

Ricettori potenzialmente disturbati dalle fasi di COSTRUZIONE dell'infrastruttura
Distanza massima critica dei recettori dalle opere da realizzare < 65m

Tipologia Opera	Agricolo	Chiesa	Industriale/commerciale	Residenziale	Rudere	Scuola
VIADOTTO				2		
GALLERIA NATURALE				1		
TRINCEA/RILEVATO				31		

Nel dettaglio sono stati identificati i seguenti ricettori residenziali vedi anche tavole ricettori T00IA06AMBPL01-06 (non sono stati considerati i "ruderi"):

Tratti autostradali in viadotto:
R197 / R198

Tratti autostradali in trincea/rilevato:
R6 / R7 / R8 / R44 / R45 / R46 / R52 / R53 / R54 / R61 / R71 / R130 / R131 / R132 / R133 / R135 / R143 / R147 / R148 / R149 / R180 / R181 / R182 / R183 / R184 / R193 / R197 / R198 / R207 / R211 / R212

Tratti autostradali in galleria naturale
R88

Ricettori potenzialmente disturbati dalle fasi di ESERCIZIO
Distanza massima critica dei recettori dalle opere da realizzare < 65m

LEGENDA:

-  TRATTI AUTOSTRADALI IN VIADOTTO
-  TRATTI AUTOSTRADALI IN GALLERIA NATURALE
-  TRATTI AUTOSTRADALI IN TRINCEA/RILEVATO

RICETTORI ACUSTICI

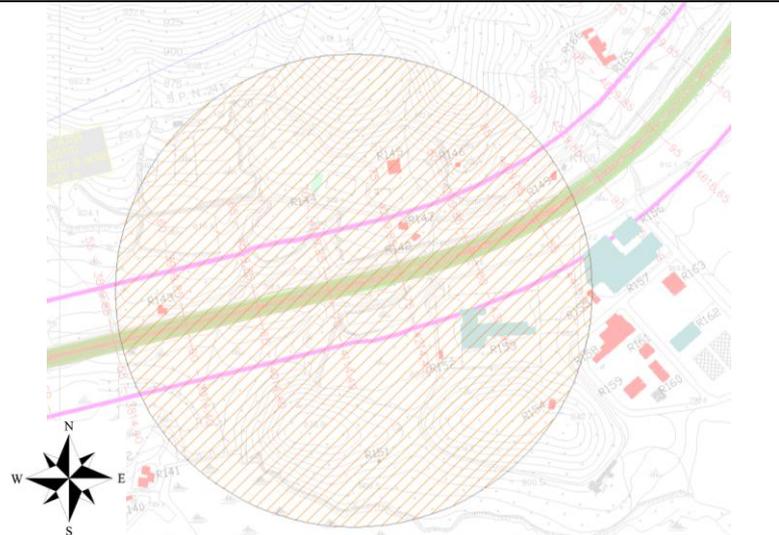
-  EDIFICIO RESIDENZIALE CIVILE
-  EDIFICIO PRODUTTIVO/INDUSTRIALE
-  EDIFICIO DIRUTO
-  EDIFICIO AGRICOLO O ASSIMILABILE
-  EDIFICIO SCOLASTICO
-  EDIFICIO IN COSTRUZIONE

RXXX CODICE RICETTORE ACUSTICO

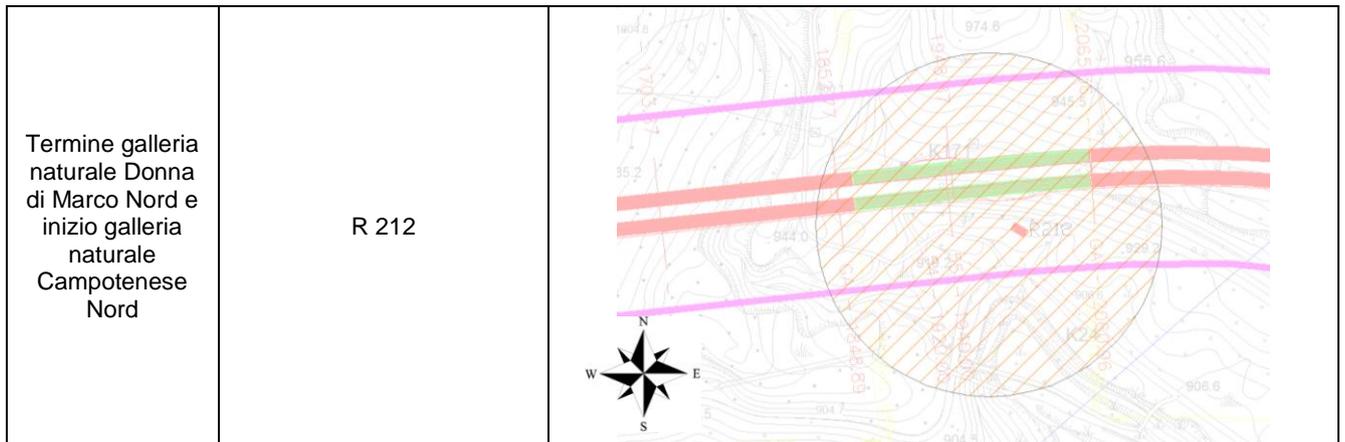
 Fascia pertinenza vibrazioni (65m)



Area "critica"	Ricettori	Identificazione area
Termine viadotto Jannello – inizio galleria naturale Jannello Nord	R 6,7,8 e limitrofi	
Località Piano La Corte Ternime galleria naturale Laria Sud	R 44,45,46 e limitrofi	
Località Molinaro	R 52,53,54 e limitrofi	

<p>Località Gallarizzo, Fiumicello</p>	<p>R 61,71 e limitrofi</p>	
<p>Termine Ponte Piano dell'Avena Nord e inizio Viadotto Battendiero III Nord</p>	<p>R 130,131,132,133,134,135 e limitrofi</p>	
<p>Termine Viadotto Battendiero III Nord e località Pantano</p>	<p>R 143,147,148,149 e limitrofi</p>	

<p>Viadotto Mancuso Nord</p>	<p>R 181,182,183,184 e limitrofi</p>	
<p>Viadotto Castagne Nord</p>	<p>R 193,197,198 e limitrofi</p>	
<p>Località Donna di Marco</p>	<p>R 207,211 e limitrofi</p>	



Per tali ricettori risulta significativo il potenziale impatto dovuto alla realizzazione delle opere in progetto e pertanto si consiglia di prevedere N°10 monitoraggi per almeno N°1 settimana in continuo, nei momenti in cui le lavorazioni in corso d’opera risultano prossime ai ricettori.

4.2.2 Fase post-operam (fase di esercizio)

Per lo scenario del *post operam* la condizione di criticità viene associata al solo traffico veicolare e quindi la selezione degli elementi critici viene condotta in base alla distanza dall’opera viaria.

L’adozione della condizione di criticità (quindi della rispondenza dei ricettori alle condizioni di criticità adottate), sulla base dei risultati delle misure Ante Operam condotte, (VI-01/VI-02/VI-03) viene adottata quando il ricettore si trovi entro una distanza di attenzione pari a 65 m.

Durante la fase di esercizio i livelli di esposizione a vibrazioni risultano essere sicuramente inferiori rispetto a quelli generati nelle fasi di costruzioni delle opere, in quanto il disturbo è generato dal solo traffico veicolare. Per tale motivazioni si sono identificati delle aree “critiche” comprensive di più ricettori.

Ricettori potenzialmente disturbati dalle fasi di ESERCIZIO
Distanza massima critica dei recettori dalle opere da realizzare < 65m

LEGENDA:

- TRATTI AUTOSTRADALI IN VIADOTTO
- TRATTI AUTOSTRADALI IN GALLERIA NATURALE
- TRATTI AUTOSTRADALI IN TRINCEA/RILEVATO

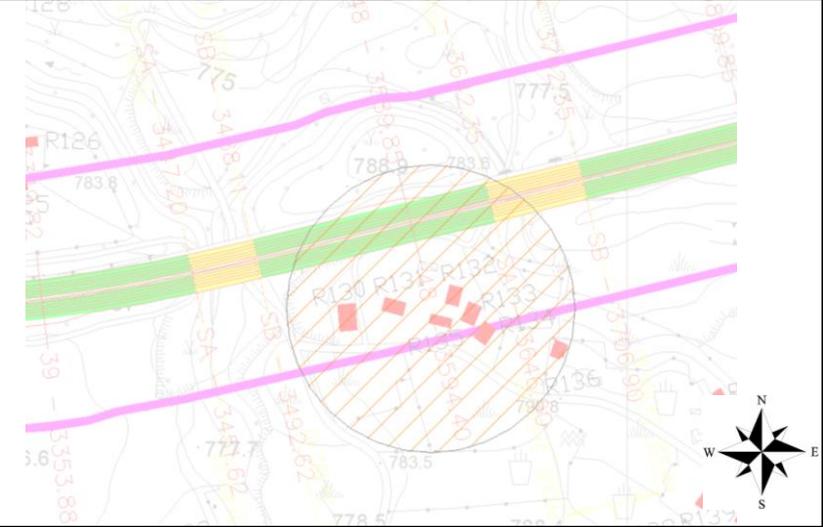
- RICETTORI ACUSTICI
- EDIFICIO RESIDENZIALE CIVILE
- EDIFICIO PRODUTTIVO/INDUSTRIALE
- EDIFICIO DIRUTO
- EDIFICIO AGRICOLO O ASSIMILABILE
- EDIFICIO SCOLASTICO
- EDIFICIO IN COSTRUZIONE
- RXXX CODICE RICETTORE ACUSTICO

- Fascia pertinenza vibrazioni (65m)



Area "critica"	Ricettori	Identificazione area
Termine viadotto Jannello – inizio galleria naturale Jannello Nord	R 6,7,8 e limitrofi	
Località Piano La Corte Ternime galleria naturale Laria Sud	R 44,45,46 e limitrofi	

R.T.P.

<p>Termine Ponte Piano dell'Avena Nord e inizio Viadotto Battendiero III Nord</p>	<p>R 130,131,132,133,134,135 e limitrofi</p>	
<p>Viadotto Mancuso Nord</p>	<p>R 181,182,183,184 e limitrofi</p>	

Per tali recettori si valuta come significativo il potenziale impatto dovuto alla realizzazione delle opere in progetto e pertanto si consiglia di prevedere almeno N°4 monitoraggi post operam presso su tali aree territoriali con tali ricettori critici, per un periodo di 1 settimana per 4 campagne di misura l'anno per i successivi 3 anni dalla realizzazione dell'opera.

4.3 Considerazioni conclusive

L'analisi di rischio si basa sulla possibilità che la realizzazione e l'esercizio dell'infrastruttura di progetto possano generare sollecitazioni alle strutture edificate insistenti nelle adiacenze della stessa.

Dall'analisi della struttura geologica del territorio, corrispondente ad una capacità di "trasmissione" della vibrazione dalla sorgente al ricettore e dallo studio dei risultati delle indagini effettuate come Ante Operam e in base all'analisi del progetto e alle scelte realizzative di cantiere proposte, sono

stati individuati i criteri di individuazione delle situazioni critiche da porre sotto attenzione, sul quale si basa lo studio previsionale.

Tale analisi ha portato a giudicare che ci possa essere un “effetto critico”:

- entro i primi 65m dall’infrastruttura, durante le fasi di costruzione dell’opera e post operam nell’l’esercizio dell’opera

Si ritiene utile prevedere per tutti i casi individuati, un piano di monitoraggio della componente vibrazioni che possa valutare la reale potenziale criticità delle opere da realizzare sulle infrastrutture edificate individuate.

Il monitoraggio proposto per ciascuno dei recettori individuati è dunque il seguente:

- **Corso d’opera**: monitoraggio in continuo su tali ricettori per tutta la durata della realizzazione delle opere individuate
- **Esercizio dell’infrastruttura**: monitoraggio per un periodo di 1 settimana per 4 campagne di misura l’anno per i successivi 3 anni dalla realizzazione dell’opera.

5 INDICAZIONE DI MASSIMA DELLE EVENTUALI AZIONI NECESSARIE AD UNA MITIGAZIONE DELLE VIBRAZIONI TRASMESSE

Le vibrazioni indotte agli edifici dal traffico stradale possono essere causa di fastidiose sensazioni fisiche sul corpo umano ed interferire, arrecando disturbo, con attività quali il sonno, la conversazione, il lavoro. Il fenomeno vibratorio inoltre produce rumori derivanti dal tremore indotto a finestre, muri e oggetti, nonché può essere di danni agli edifici stessi ed interferenze con le attività svolte da dispositivi e apparecchiature particolarmente sensibili posti all'interno degli edifici stessi.

La ISO e diversi paesi hanno pubblicato normative che possono costituire delle guida alla valutazione della risposta del corpo umano quando sottoposto a vibrazioni che interessino gli edifici nei quali il soggetto si trova. Si hanno precise informazioni riguardo al legame tra la risposta dell'essere umano alla sollecitazione vibratoria e le caratteristiche della vibrazione stessa in termini di livello, frequenza, direzione rispetto agli assi del corpo umano e durata del tempo di esposizione. Tuttavia le normative vigenti rappresentano principalmente un compromesso tra la scarsità di informazioni attualmente disponibili e la necessità di disporre di strumenti che uniformino le metodologie di valutazione, nonché di mitigazione, degli effetti delle vibrazioni.

Non poche incertezze si incontrano nell'applicazione delle norme sopra richiamate volendo valutare la sollecitazione cui si trova soggetto un individuo a causa delle vibrazioni indotte dal traffico stradale, per esempio per effetto del passaggio di un autobus in una strada adiacente all'edificio in cui il soggetto si trova. Ambiguità si riscontrano, per esempio, nel decidere se le vibrazioni indotte dagli autobus vadano considerate come vibrazioni intermittenti oppure come vibrazioni impulsive ricorrenti molte volte durante il giorno. Oppure problemi emergono quando si tratta di determinare l'intervallo di integrazione nel calcolo del valore efficace (rms) del segnale vibratorio.

I principali metodi utilizzati per la riduzione delle vibrazioni sono di seguito illustrati.

5.1 Modifica degli strati della pavimentazione

Tra i sistemi in grado di attenuare il disturbo provocato dalle vibrazioni assume sicuramente un ruolo di primissimo piano il controllo della regolarità della pavimentazione. L'ampiezza delle vibrazioni è infatti notevolmente influenzata dalla presenza di irregolarità discrete sulla pavimentazione e il miglioramento delle condizioni della superficie stradale costituisce il primo intervento da praticare nel caso di rilevanti episodi di disturbo da vibrazioni. Le vibrazioni delle strutture sono dominate da componenti di frequenza comprese tra 10 e 25 Hz, componenti che tipicamente sono indotte da veicoli pesanti che si trovano a transitare su irregolarità della superficie.

Ciò significa che fornire alla strada una superficie priva di irregolarità ed ondulazioni comporta una sensibile diminuzione delle vibrazioni strutturali.

I metodi di mitigazione presi dunque in esame sono rappresentati da modifiche strutturali della pavimentazione o da inserimento di elementi di schermatura adiacenti ad essa, e vengono di seguito elencati:

- irrigidimento della pavimentazione tramite sostituzione dello strato in conglomerato bituminoso con uno strato in conglomerato cementizio; studi effettuati mettono in evidenza come, a parità di terreno di sotto fondo, le pavimentazioni in conglomerato bituminoso garantiscano una minore attenuazione delle vibrazioni rispetto a quelle in conglomerato cementizio, quindi più rigide. Il maggiore effetto attenuatore di quest'ultime è evidente soprattutto in punti a breve distanza dalla sorgente di vibrazione (fino a 10 metri circa), e la differenza tra gli effetti prodotti dai due diversi sistemi costruttivi va diminuendo allontanandosi dalla zona di eccitazione.
- irrigidimento della pavimentazione tramite sostituzione dello strato in stabilizzato granulometrico con un strato di materiale legato a cemento; tale tipo di intervento consiste nella sostituzione del materiale di fondazione della pavimentazione (stabilizzato granulometrico) con un materiale di più elevate caratteristiche meccaniche, quale un misto cementato. La pavimentazione risultante è stata definita "semirigida" e prevede in superficie uno strato in conglomerato bituminoso. Il miglioramento dovuto all'irrigidimento, in termini di attenuazione del fenomeno vibratorio, è presente a tutte le frequenze. Lo smorzamento inoltre è decisamente maggiore per le accelerazioni verticali, con fattori di riduzione massimi pari a quasi il 50 % in corrispondenza della frequenza di 20 Hz.
- miglioramento delle condizioni del terreno di sottofondo; le qualità del terreno su cui è realizzata l'infrastruttura viaria, in termini di rigidezza e di proprietà di resistenza meccanica, hanno una grande responsabilità nel fenomeno di propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico. Il ruolo giocato dalle caratteristiche del terreno di sotto fondo è molto più importante rispetto a quello attribuibile al tipo di materiale utilizzato nella costruzione della strada stessa. In questa ottica, strade costruite su terreni soffici hanno molte più probabilità di trasmettere vibrazioni nelle vicinanze rispetto a quelle costruite su terreni dotati di maggiore compattezza. Una delle soluzioni prese in considerazione, come possibile misura di attenuazione delle vibrazioni, vede

l'aumento del livello di compattazione del terreno del sottofondo, con conseguente miglioramento delle capacità portanti del terreno. La realizzazione un simile trattamento è tuttavia ipotizzabile solo qualora le esigenze di smorzamento delle vibrazioni siano impellenti e le caratteristiche del sottosuolo del sito stesso possano permettere un simile intervento. Infatti questo tipo di soluzione risulta di difficile applicazione in ambito urbano, laddove il sottosuolo, anche a modeste profondità, è sede di svariati tipi di sottoservizi. I risultati che emergono da questo tipo di modifica mettono in evidenza una buona attenuazione delle vibrazioni, mediamente maggiore per le accelerazioni verticali (oltre il 50 %), che per quelle orizzontali (30 %). Tale intervento ha effetto crescente con la distanza dalla sorgente il disturbo: i fattori di riduzione infatti si presentano mediamente maggiori quanto più il punto di rilievo è distante dalla strada.

→ inserimento di una trincea in conglomerato cementizio a fianco della pavimentazione; l'uso di trincee come sistema di isolamento di fondazioni ha soprattutto lo scopo di intercettare ed arrestare le onde di Rayleigh, la cui propagazione avviene nella parte più superficiale del semispazio. L'inserimento di una barriera d'onda nel terreno crea di fatto una discontinuità nel terreno, altrimenti indisturbato.

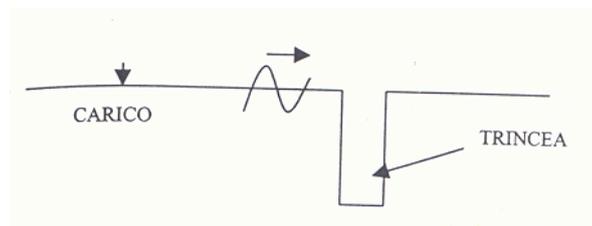


Fig. 6: Isolamento delle vibrazioni con trincee aperte

In generale le barriere d'onda possono essere costituite da scavi realizzati nel terreno e successivamente riempiti di materiale solido o fluido, oppure lasciati vuoti. L'introduzione di una trincea crea una zona protetta dove gli effetti delle vibrazioni, in termini di spostamenti, vengono attenuati tanto quanto più la trincea è profonda. Esperimenti (comunque discussi in letteratura) mettono in evidenza la particolare efficacia di questo metodo nell'abbattimento della componente verticale del disturbo; si rileva d'altra parte lo scarso effetto nell'attenuazione di vibrazioni provenienti da sorgenti a bassa frequenza. Gli studi parametrici affrontati sperimentalmente da vari autori portano a concludere che l'efficacia dell'uso di trincee per l'isolamento dalle vibrazioni è funzione del rapporto tra la profondità della trincea stessa e della lunghezza d'onda della vibrazione.

5.2 Sovrastrutture antivibranti

La propagazione delle onde nel sottosuolo, come più volte segnalato, è un fenomeno notevolmente complesso, sul quale influiscono parametri quali le caratteristiche del terreno attraversato, la presenza o meno di strati costituiti da diversi materiali che modificano il percorso delle onde, causando veri e propri fenomeni di rifrazione e riflessione in corrispondenza di ogni discontinuità.

Spesso si è cercato di arrestare la trasmissione delle vibrazioni generate da traffico stradale o ferroviario agendo sulle proprietà smorzanti dei materiali costituenti la sovrastruttura, talora studiando pavimentazioni particolari nelle quali ai materiali stradali tradizionali vengono associati materiali non convenzionali al fine di ottenere vere e proprie strutture antivibranti.

In base a questo criterio sono stati realizzati alcuni interventi di mitigazione:

- stesura di uno strato di 20 cm di conglomerato bituminoso modificato, steso sopra uno strato in tout venant, interposto tra la struttura portante della pavimentazione, costituita da uno strato di usura in lastricato supportato da una pavimentazione in cls armato gettata su una fondazione tradizionale in doppio strato (misto cementato e misto granulare non legato) ed il terreno di sottofondo.
- realizzazione di una serie di strati in conglomerato bituminoso drenante con interposto tessuto in fibra di vetro.
- Gli autori di tali sistemi di mitigazione, effettuati a Firenze tra il 1996 ed il 1997 a salvaguardia di edifici storici, sostengono che l'efficacia degli interventi è stata confermata dai risultati delle misure di monitoraggio a tutt'oggi effettuate.
- Interposizione di elementi elastici; un esempio di questo particolare tipo di intervento consiste nel realizzare uno strato di isolamento della pavimentazione dal terreno attraverso cuscinetti in neoprene interposti tra la pavimentazione vera e propria e una griglia di travi in c.a. a contatto con il terreno. La sovrastruttura così realizzata ha un comportamento simile a quello di una piastra dotata di rigidità flessionale e torsionale, per la quale il contatto con il terreno si realizza tramite vincoli a smorzatori e molle. Il pacchetto descritto, se opportunamente dimensionato, ha la funzione di filtro tra il veicolo e il terreno.

L'interposizione di elementi in c.a.p. su appoggi in gomma è un metodo che si ritrova applicato nel progetto di una pavimentazione realizzata a Roma nel 1970 a salvaguardia della Farnesina. In questo caso la pavimentazione è realizzata tramite piastre prefabbricate su cui è steso il conglomerato bituminoso e poggia su una struttura costituita da grandi travi in c.a.p. su appoggi in gomma; il tutto è separato dalla fondazione attraverso una soletta in cemento armato.

Tale opera, onerosa e di un certo impegno, viene portata ad esempio per la riduzione delle vibrazioni generate dai mezzi di trasporto in gomma nell'attraversamento in sotterraneo di agglomerati urbani.

→ Uso di materiali non convenzionali

Un esempio di sovrastruttura realizzata invece con materiali stradali associati a materiali definiti "non convenzionali" si trova in provincia di Bari, a salvaguardia di un'area di interesse storico-archeologico. La fondazione su cui si poggia la pavimentazione flessibile si compone di:

- ✓ uno strato in terra dello spessore di 40 cm fasciato con fogli di geotessile; a questo strato i progettisti dell'intervento affidano il ruolo di ripartitore dei carichi, mentre ravvisano per il geotessile un ruolo antivibrante, ipotizzando che ripartisca le azioni verticali e assorba quelle tangenziali;
- ✓ al di sotto del materasso in terra si ha uno strato di sabbione monogranulare auto-compattante che, sempre nelle intenzioni dei progettisti, conferisce alla struttura maggiore resistenza dinamica e protegge lo strato in sughero sottostante;
- ✓ alla base dell'intera sovrastruttura è presente uno strato in sughero dello spessore di 8 mm.

6. BIBLIOGRAFIA

- Traffico e Ambiente “Inquinamento chimico, acustico e da vibrazioni prodotto dai mezzi di trasporto su gomma e su rotaia: dalle sorgenti di inquinamento alla pianificazione del territorio” – Atti del Convegno Nazionale di Trento del 21-25 febbraio 2000
- Transportation Noise - Paul Nelson ed. Butterworths
- Road Humps and Ground-Borne Vibrations" - TRL Traffic Advisory Leaflet 8/96 -1996
- Hanazato T., Ugai K., Mori M., Sakaguchi R. - "Three-Dimensional Analysis of Traffic-Induced Ground Vibrations" - ASCE Journal of Geotechnical Engineering - 1991
- Lysmer J., Kuhlemeyer R.L. - "finite Dynamic Model for Infinite Media" – Journal of the Engineering Mechanics Div. - 1969
- Al-Hunaidi M.O., Rainer J.H.- "Remedial Measures for Traffic-Induced Vibrations at a Residential Site" - Canadian Acoustics (Vol. 19, No.2), 1991
- Al-Hunaidi M.O., Tremblay M. - "Traffic-Induced Vibrations in Montréal" - Canadian Journal of Civil Engineering - 1996
- Chambers J., Pidwerbesky B. - "Traffic Induced Vibrations in Residences" - University of Canterbury, New Zealand - 1996
- Watts G.R. - "The Generation and Propagation of Vibration in Various Soils Produced by Dynamic Loading of Road Pavements
- Domenichini L., Crispino M., D'Apuzzo M., Ferro R. – Vibrazioni indotte dal traffico stradale – Quaderni AIPCR del XXIII Convegno Nazionale Stradale
- Colonna P., Pisciotta M. – Analisi teorica-sperimentale del comportamento vibrazionale delle sovrastrutture flessibili realizzate con materiali non convenzionali – Atti Congresso Ancona 1996