

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 1 di 39	Rev. 0

Metanodotto Sestri Levante – Recco DN 400 (16”), DP 75 bar ed opere connesse

**STUDIO PREVISIONALE SULLE VIBRAZIONI
PRODOTTE DURANTE LA REALIZZAZIONE DELLE OPERE TRENCHLESS
IN PROGETTO**

Annesso D al Doc. SPC LA-E-83075 – Approfondimenti Tematici

0	Emissione per integrazioni SIA	Pace	Nisii	Brunetti	mag '20
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 2 di 39	Rev. 0

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
1.1	Scopo del lavoro	4
2	CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E GEOFISICHE DELLE FORMAZIONI INTERESSATE DAI LAVORI	5
3	CARATTERISTICHE DELLE VIBRAZIONI	8
3.1	Concetti generali	8
3.2	Effetti delle vibrazioni sugli edifici	12
3.3	Richiamo concettuale al coefficiente di attenuazione	14
4	CARATTERISTICHE DELLE MACCHINE OPERATRICI	16
5	NORMATIVE DI RIFERIMENTO	24
6	ESEMPI DI REGISTRAZIONE DI VIBRAZIONI DOVUTE A MACCHINE OPERATRICI	29
6.1	Esempio 1: Registrazione delle vibrazioni durante una perforazione a roto-percussione per ricerca di acqua	29
6.2	Esempio 2: Vibrazioni generate da martello demolitore su roccia in vicinanza di edifici	33
7	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	38

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 3 di 39	Rev. 0

1 INTRODUZIONE

La presente relazione è stata redatta in risposta alla richiesta della Regione Liguria (prot. n. 318357 del 5 novembre 2019) di fornire uno studio previsionale in merito ai potenziali impatti indotti dalle vibrazioni associate all'attività di perforazione dei tratti trenchless, del progetto denominato "Metanodotto Sestri Levante – Recco DN400 (16"), DP 75 bar ed opere connesse".

L'opera in progetto ricade in regione Liguria e interessa il territorio della Città Metropolitana di Genova, si articola in una serie di interventi i principali dei quali riguardano la posa della nuova condotta DN 400 (16") che da Sestri Levante raggiunge Recco, per complessivi 48,200 km.

L'opera è infine completata dalla realizzazione di n. 3 linee secondarie, di diametro variabile da DN 200 (8") a DN 400 (16"), funzionalmente connesse alla linea principale, che assicureranno il collegamento tra la nuova struttura di trasporto e le diverse utenze presenti sul territorio attraversato, di un sistema di esclusione e by-pass impianto (IS) e dalla dismissione di due tratti, il Met. Der. per Sestri Levante DN400/250 (16"/10") e la Variante Nuovo Stacco AMGA Calcinara DN200 (8")..

In Tab. 1/A e Tab 1/B sono riportate le denominazioni dei metanodotti, i diametri delle condotte, le pressioni nominali del gas in esercizio e le lunghezze di ciascun tracciato.

Tab. 1/A: progetto Metanodotto Sestri Levante – Recco ed opere connesse

Denominazione metanodotti	Diametro	Pressione (bar)	Lunghezza (km)
Metanodotto Sestri Levante-Recco	DN 400 (16")	75	48.200
Collegamento a Derivazione per Sestri Levante	DN 250 (10")	75	0.060
Variante Nuovo Stacco AMGA Calcinara	DN 200 (8")	24	0.075
Collegamento IMP di Sori a Der. Recco e Italgas Sori	DN 400 (16")	24	1.935
Sistema esclusione e by-pass impianto (IS)			0.335

Tab. 1/B: Tratti in dismissione

Denominazione metanodotti	Diametro	Pressione (bar)	Lunghezza (km)
Metanodotto Derivazione per Sestri Levante	DN 400/250 (16"/10")	70	1,070
Variante Nuovo Stacco AMGA Calcinara	DN 200 (8")	24	1,830

Le definizioni dei tracciati delle condotte in progetto riportate in Tab. 1/A sono state presentate nella documentazione di Studio di Impatto Ambientale (vedi SPC.LA-E-83010). Per l'individuazione delle caratteristiche generali e di dettaglio dei progetti, non considerate nel presente studio, si rimanda allo Studio di Impatto Ambientale.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 4 di 39	Rev. 0

Nell'ambito delle opere necessarie alla realizzazione del progetto, si prevede di utilizzare le tecnologie Microtunnelling e Raise-Boring per superare alcune criticità progettuali, tramite opere a sviluppo sotterraneo che comportano l'utilizzo di mezzi di scavo che interferiscono direttamente con il sottosuolo.

1.1 Scopo del lavoro

Nel presente capitolo viene stimata l'intensità delle vibrazioni che saranno prevedibilmente generate durante le fasi di avanzamento delle frese nei microtunnels e durante la perforazione e l'alesatura dei pozzi dei raise boring, con particolare riferimento alla possibilità che queste possano recare danno agli edifici situati in prossimità delle aree di lavoro.

Lo studio è stato effettuato sulla base delle indagini geofisiche svolte nei siti interessati dalle suddette opere che ha consentito di valutare le caratteristiche dinamiche dei terreni che saranno attraversati e di altri studi inerenti ("Previsione e misura delle vibrazioni dovute a cantieri edili" - Censini e Goretti 2000)

Lo studio comprende anche le normative di riferimento per la classificazione della pericolosità delle vibrazioni in funzione delle caratteristiche delle stesse e della tipologia di edifici soggetti alle vibrazioni.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 5 di 39	Rev. 0

2 CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E GEOFISICHE DELLE FORMAZIONI INTERESSATE DAI LAVORI

Le indagini geofisiche a rifrazione, eseguite in corrispondenza dei siti interessati dalle opere trenchless in progetto, hanno consentito di ricostruire le tomografie sismiche del sottosuolo dalle quali si riscontra una situazione generalmente caratterizzata dalla presenza di tre strati, di spessore variabile da sito a sito.

La descrizione di dettaglio delle indagini indirette effettuate ed i risultati ottenuti sono presentati nella relazione geologica (SPC_LA-E-83016) e nel relativo allegato 7.

Con riferimento al piano campagna generalmente si riviene:

- uno strato superficiale molto allentato, con velocità sismiche inferiori a 700-800 m/sec, capace di attenuare fortemente le vibrazioni;
- uno strato intermedio, con velocità sismiche variabili tra 700-800 e 1600-1800 m/sec, in cui le vibrazioni si propagano discretamente con smorzamento delle alte frequenze;
- una formazione compatta, con velocità che talora raggiungono anche più di 3.000 m/sec, in cui l'attenuazione è modesta ed anche la frequenza prevalente è molto elevata.

Tali velocità sono direttamente correlabili con i moduli di elasticità dei materiali e, quindi, la propagazione e l'attenuazione delle vibrazioni è legata alla diversa elasticità degli stessi.

Le opere superficiali, come trincee o sbancamenti in senso lato, compresi quelli situati nelle zone di imbocco delle opere trenchless, interessano generalmente le coltri eluvio colluviali, il detrito di falda e/o lo strato superficiale e molto alterato del substrato formazionale, cioè i terreni caratterizzati dalla minore tra le velocità di trasmissione dell'onda elastica rilevati durante la campagna di indagine geofisica. La bassa elasticità di questi materiali, non consente di propagare efficacemente le vibrazioni generate dai macchinari operanti, e quindi l'ampiezza di tali vibrazioni si riduce significativamente in già in un intorno limitato

Le opere profonde, invece, potranno interessare anche le formazioni più compatte in cui le vibrazioni generate possono trasmettersi verso le aree circostanti per un raggio più ampio grazie alla maggiore elasticità (ed anche a causa della maggiore resistenza al taglio) delle rocce interessate.

Lo studio "*Previsione e misura delle vibrazioni dovute a cantieri edili*" (Censini e Goretti 2000), citato in premessa riferisce del monitoraggio vibrazionale effettuato su un cantiere nel quale delle palancole sono infisse nel terreno per l'azione di un maglio battente.

È opportuno evidenziare che questa metodologia di infissione è particolarmente impattante dal punto di vista vibrazionale perché l'energia di una massa battente (maglio) viene trasferita alla palancola impulsivamente, con l'impatto della massa battente sulla cuffia che protegge la testa della palancola. Le energie in gioco sono di circa due/tre ordini di grandezza superiori a quelle utilizzate per l'acquisizione dei dati geofisici (il principio di conservazione della quantità di moto impone che il maglio abbia un peso superiore a quello della palancola da infiggere, più quello della cuffia di protezione della testa della palancola).

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fig. 6 di 39	Rev. 0

L'immagine in Fig. 2/A riporta i livelli della vibrazione indotta dall'affondamento della punta della palancola nel terreno, registrati a varie distanze e per varie profondità, interpolati con curve ad andamento logaritmico che evidenziano la diminuzione dell'ampiezza segnale con la distanza (smorzamento).

Ciascuna curva evidenzia che lo smorzamento diminuisce con la profondità in correlazione alle caratteristiche del terreno che variano secondo la stratigrafia riprodotta in Fig. 2/B.

A conferma di quanto indicato in precedenza si nota che:

- lo smorzamento tende a diminuire con la profondità e la distanza;
- lo smorzamento maggiore avviene in superficie, dove i terreni di copertura sono meno densi (linea e croci blu riferita alle registrazioni effettuate a – 2 m da p.c.).

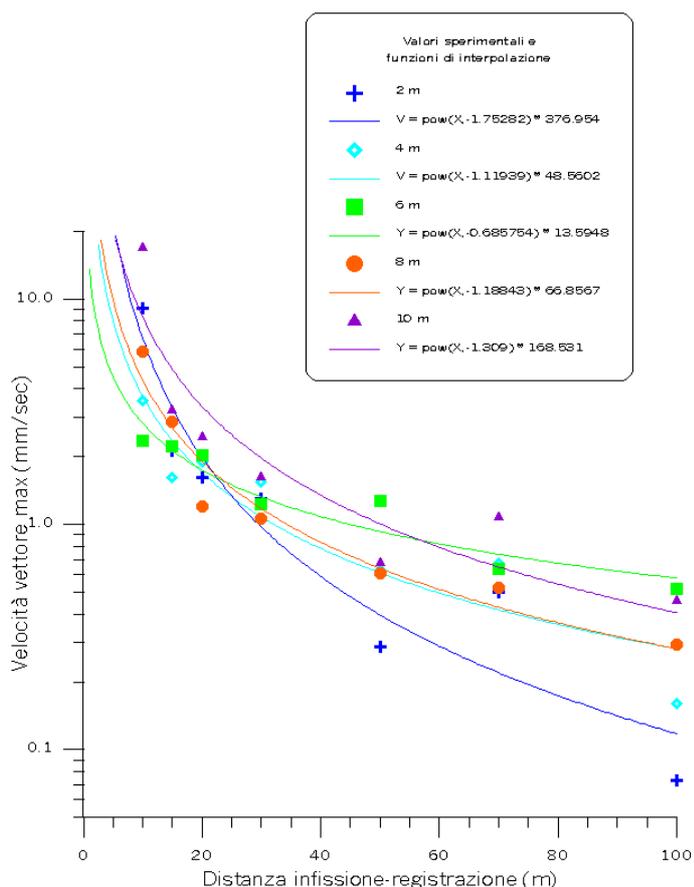


Fig. 2/A: Grafico della variazione della velocità con la distanza per effetto dello smorzamento operato dai terreni presenti a varie profondità durante l'infissione delle palancole



PROGETTISTA



UNITÀ
000

COMMESSA
023089

LOCALITÀ

Regione Liguria

SPC. LA-E-83022

PROGETTO

Metanodotto Sestri Levante – Recco

Fg. 7 di 39

Rev.
0

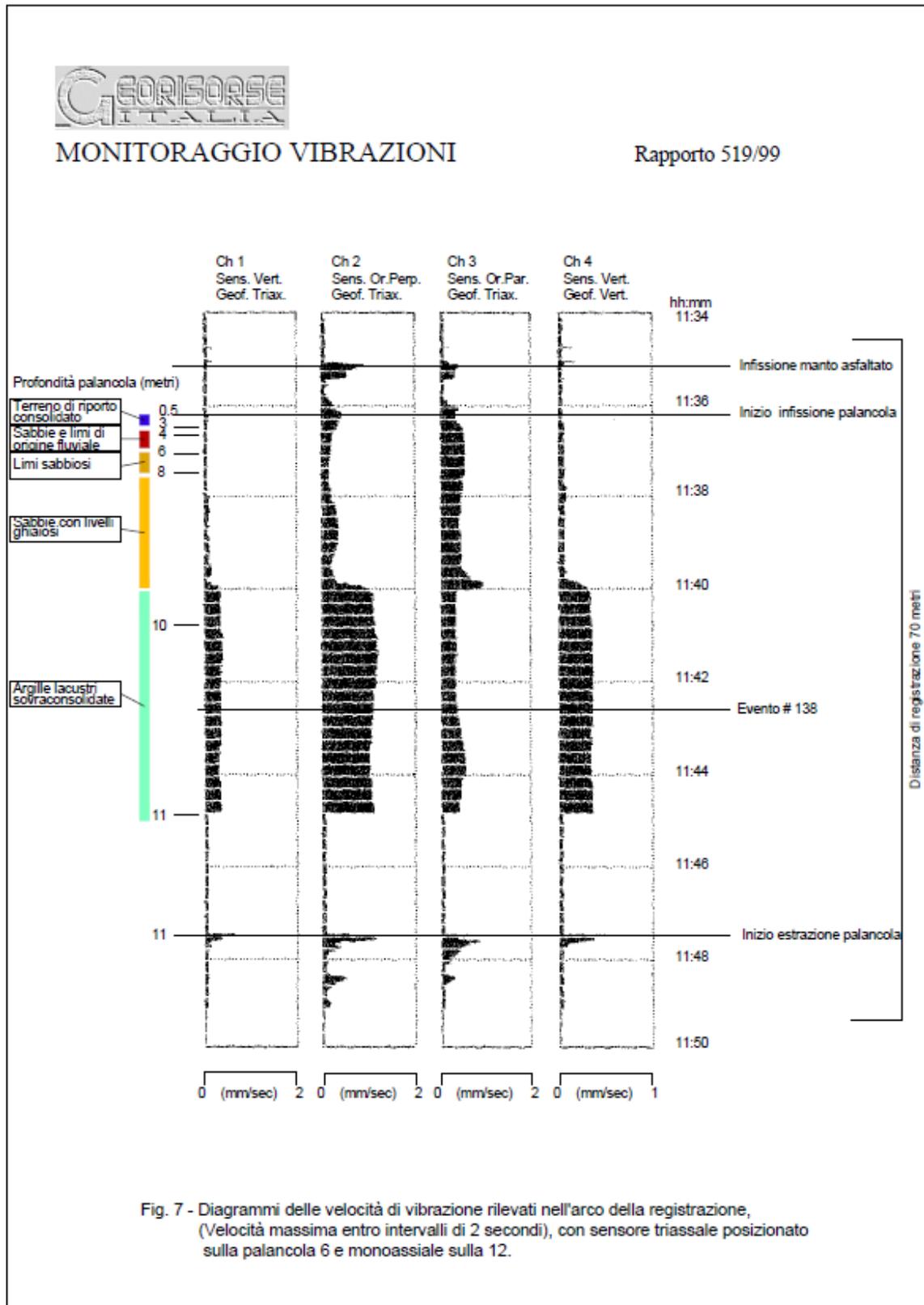


Fig. 2/B: Stratigrafia dell'area monitorata durante l'infissione delle palancole

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 8 di 39	Rev. 0

3 CARATTERISTICHE DELLE VIBRAZIONI

Le vibrazioni originate da un punto “sorgente” sono trasmesse dal mezzo attraversato che ne modifica progressivamente le caratteristiche originarie di ampiezza e frequenza, in funzione delle caratteristiche di elasticità del mezzo stesso, della distanza tra la sorgente ed il punto di misura, dell’ampiezza del segnale emesso e del suo contenuto di frequenze.

3.1 Concetti generali

Le vibrazioni sono onde che trasportano energia e si propagano sia per alternanza di compressione-trazione del materiale nella direzione del moto, sia per alternanza direzionale delle tensioni trasversali alla direzione del moto.

Il modello fisico nel quale sono definite le equazioni del moto ondulatorio è valido nell’ipotesi che il terreno si comporti come un semispazio elastico, omogeneo, continuo e isotropo.

È necessario essere consapevoli che queste assunzioni sono tanto necessarie per trattare analiticamente il fenomeno ondulatorio, quanto aleatorie nella loro applicazione ai terreni ed alle rocce alle quali queste caratteristiche possono essere applicate solo in prima approssimazione. Una conseguenza di tale approssimazione riguarda una certa dispersione dei dati delle misurazioni, anche se queste sono effettuate in condizioni controllate, come nel caso dei monitoraggi riportati di seguito.

Sulla base di queste ipotesi le onde elastiche possono essere distinte in:

- onda di compressione (onde P) a propagazione radiale nel semispazio sferico;
- onda di taglio (onde S): a propagazione radiale nel semispazio sferico;
- onda di superficie (onde Rayleigh e Love): a propagazione radiale lungo la superficie del terreno.

La Fig. 3.1/A mostra l’andamento dei fronti d’onda emessi da una sorgente energizzante il suolo e mostra la percentuale di energia totale che viene trasmessa da ciascun gruppo di onde.

Quando la sorgente è superficiale le onde P e S si propagano, secondo fronti d’onda emisferici e le onde R secondo fronti d’onda cilindrici; il loro contenuto energetico diminuisce con la distanza dalla sorgente, dovendosi distribuire su superfici sempre più ampie, e con esso anche l’ampiezza dello spostamento indotto nel mezzo (smorzamento geometrico)

Nella parte inferiore della figura sono schematizzate le ampiezze delle onde ed il loro segno rispetto al fronte d’onda: le onde P hanno sempre dello stesso segno e variano poco lungo il medesimo fronte d’onda; l’ampiezza delle onde S varia in ampiezza e segno. Per le onde R la componente verticale ha segno costante, quella orizzontale cambia segno con la profondità. È significativo notare che l’ampiezza delle onde R decade rapidamente con la profondità: alla profondità di circa a 1.5λ (λ =lunghezza d’onda) è pari a circa il 1/10 di quella in superficie).

La Fig. 3.1/B conferma che la maggior parte dell’energia di una sorgente applicata alla superficie libera del suolo, si propaga sotto forma di onde superficiali: le onde di Rayleigh arrivano in ritardo rispetto alle onde P ma hanno un contenuto energetico decisamente maggiore (rappresentato tramite le aree evidenziate in rosso).

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 9 di 39	Rev. 0

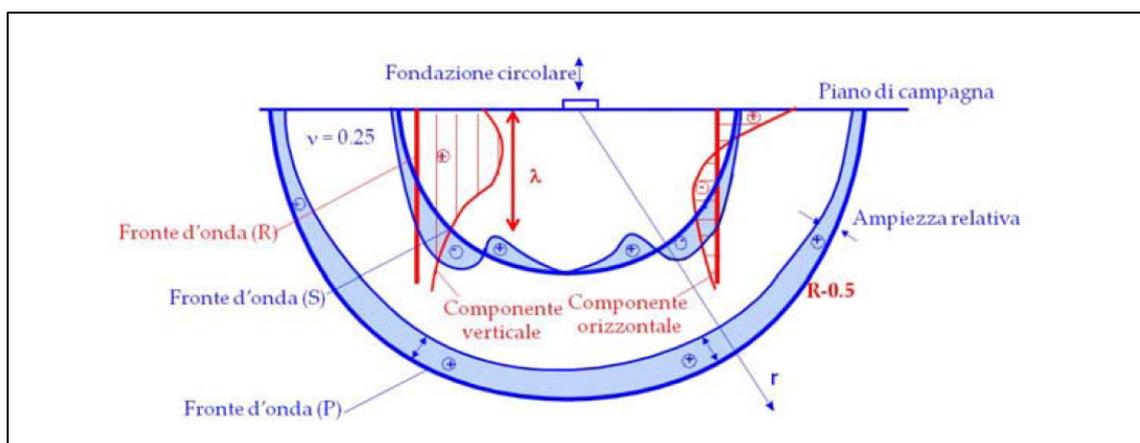
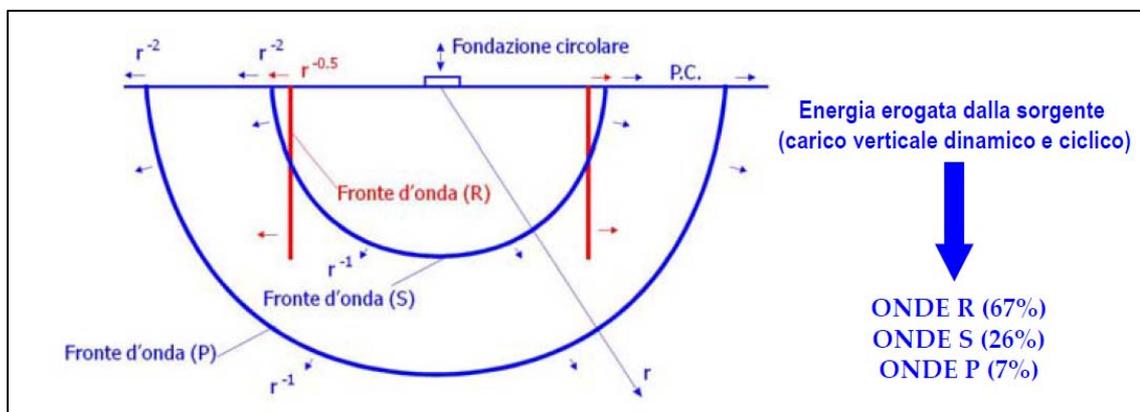


Fig. 3.1/A: Distribuzione delle onde di spostamento, in un semispazio ideale, prodotte da una sorgente energizzante il suolo. Sopra: forma dei fronti d'onda con la percentuale di energia totale che viene trasmessa da ciascun gruppo di onde. Sotto: ampiezza e segno delle onde rispetto al fronte.

La maggior parte dell'energia viene trasmessa dall'onda R, anche perché questa si muove sulla superficie del semispazio lungo la quale gli effetti dissipativi dell'atmosfera sono trascurabili rispetto a quelli del suolo.

Dalla Fig. 3.1/A si evince anche che la riduzione dell'ampiezza di spostamento ad una distanza r dalla sorgente, è proporzionale a $1/r^2$ per le onde P ed S e solo a $1/r^{0.5}$ per le onde R. Le onde di superficie sono quindi le più pericolose per le strutture perché trasportano più energia e si smorzano a maggiore distanza dalla sorgente diventando predominanti su quelle di volume).

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 10 di 39	Rev. 0

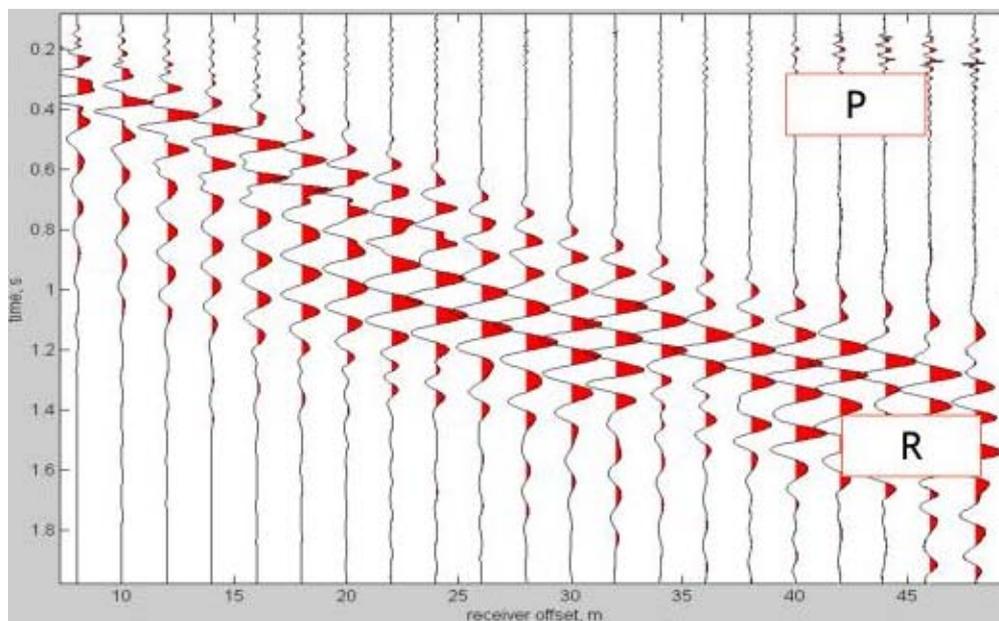


Fig. 3.1/B: Registrazione di un sismogramma con evidenziati i treni d'onda P ed R

Le vibrazioni che si propagano attraverso un mezzo elastico possono essere caratterizzate con tre grandezze di base:

- il vettore spostamento, $s = (s_x \ s_y \ s_z)$, Unità di misura= m;
- il vettore velocità, $v = (v_x \ v_y \ v_z)$, Unità di misura= m/s;
- il vettore accelerazione, $a = (a_x \ a_y \ a_z)$, Unità di misura= m/s².

Ciascuna di queste grandezze è trasformabile nelle altre per derivazione o integrazione ma, per l'acquisizione dei dati, è preferibile utilizzare uno strumento di rilevazione specifico.

Le normative di riferimento considerano generalmente i seguenti parametri:

- la velocità massima di vibrazione V_{max} (in mm/sec);
- la frequenza del segnale corrispondente al picco di V_{max} .

È noto che, a parità di accelerazione fornita al sistema vibrante, la velocità di vibrazione diminuisce drasticamente all'aumentare della frequenza. A titolo di esempio, la Tab 3.1/A riporta i valori dell'ampiezza della velocità di vibrazione in funzione della frequenza per due diversi valori dell'accelerazione fornita alla sorgente, e la Fig. 3.1/C, ne mostra l'andamento grafico.

La formula (2) al paragrafo seguente (3.2) definisce come l'energia dissipata dall'onda per percorrere un certo tratto di spazio, sia inversamente proporzionale alla frequenza; ne consegue che l'energia trasportata da alte frequenze di vibrazione è dissipata più rapidamente rispetto alla medesima energia trasportata da onde a bassa frequenza. Da ciò deriva che la pericolosità di una vibrazione diminuisce fortemente all'aumentare della frequenza del segnale ed anche le normative di riferimento recepiscono il fenomeno

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 11 di 39	Rev. 0

attribuendo limiti di pericolosità superiori per le vibrazioni caratterizzate da alte frequenze rispetto ai limiti imposti per le basse frequenze.

Da quanto esposto, deriva la necessità di caratterizzare la sorgente che genera le vibrazioni, non solo per la potenza che può utilizzare, ma anche per la frequenza dei segnali che genera; ad esempio: se un vibromaglio infigge una palancola utilizzando 30 impulsi al secondo, la frequenza dominante del segnale registrato sarà dell'ordine di 30Hz o superiore, a causa dei probabili fenomeni di interferenza. Analogamente, un martello demolitore produrrà impulsi alla frequenza con cui replica i suoi colpi.

Tab 3.1/A: velocità di vibrazione in funzione della frequenza

Frequenza Hz	4	10	15	20	25	30	40	50	100	200
Velocità di vibraz. mm/s per 0,2 g	78,1	31,2	20,8	15,6	12,5	10,4	7,8	6,2	3,1	1,6
Velocità di vibraz. mm/s per 1 g	390,3	156,1	104,1	78,1	62,5	52,0	39,0	31,2	15,6	7,8

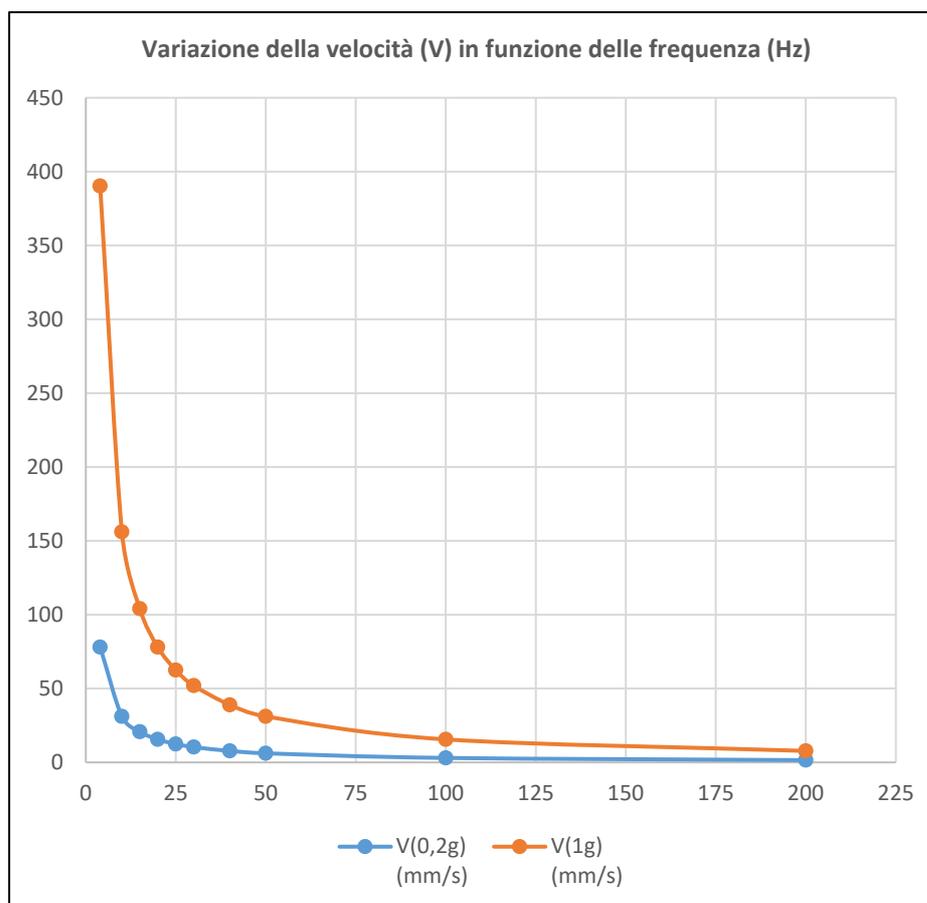


Fig. 3.1/C: Variazione dell'ampiezza della velocità di vibrazione in funzione della frequenza per due diversi valori dell'accelerazione fornita alla sorgente

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 12 di 39	Rev. 0

Nel capitolo 4 si tratteranno specificatamente le caratteristiche generali dei mezzi e degli utensili che vengono utilizzati per lo scavo dei minitunnel e dei pozzi per *raise boring* per evidenziare le caratteristiche delle vibrazioni che questi possono produrre.

3.2 Effetti delle vibrazioni sugli edifici

Le strutture raggiunte dalle vibrazioni propagate attraverso il suolo, si comportano come un mezzo ulteriore che le trasmette dalla base alla sommità, e quindi anche l'altezza della struttura rientra tra i parametri che è necessario considerare nella valutazione dei potenziali effetti di un fenomeno vibratorio.

L'effetto di una sollecitazione variabile nel tempo dipende dalle seguenti caratteristiche delle onde:

- ampiezza: (a parità degli altri parametri) ad una maggiore ampiezza dell'onda vibrazionale consegue un maggior danno nella struttura;
- durata: (a parità degli altri parametri) ad una maggior durata della sollecitazione consegue un maggior danno a causa del decadimento prestazionale dei materiali soggetti a carichi ciclici (fatica).
- frequenza: il rischio di danno è tanto più elevato quanto più la frequenza è prossima alla frequenza propria della struttura (risonanza).

L'effetto dell'interazione tra vibrazione e struttura dipende quindi, sia dall'energia trasmessa dalla vibrazione, sia dalle caratteristiche di rigidità della struttura stessa.

Per quanto riguarda l'effetto dell'interazione tra le vibrazioni e gli edifici situati in prossimità della sorgente, entrano in gioco diverse componenti, alcune delle quali dipendono dall'edificio stesso.

Le componenti di attenuazione/amplificazione delle vibrazioni sono:

- attenuazione per dissipazione interna del terreno;
- attenuazione geometrica, in relazione al tipo di sorgente e di onda;
- attenuazione dovuta a ostacoli o discontinuità del terreno;
- attenuazione dovuta all'accoppiamento terreno-fondazione;
- attenuazione dovuta alla propagazione in direzione verticale nel corpo dell'edificio;
- amplificazione determinata dai solai.

Tabella 3.2/A: Periodi propri di vibrazione per le strutture degli edifici con altezza < 30 m

Tipici periodi propri di vibrazione per le strutture degli edifici con altezza < 30 m	
edifici residenziali, di altezze modeste	0.1 - 0.3 sec
strutture in c.a. con nuclei di controvento	0.1 - 0.5 sec
strutture in acciaio con controventi	0.1 - 0.5 sec
strutture in c.a. senza nuclei di controvento	0.3 – 1.0 sec
camini in acciaio	1.0 - 1.5 sec
telai in acciaio non controventati	< 2 sec

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 13 di 39	Rev. 0

Per quanto tali caratteristiche siano complesse da determinare analiticamente, nel loro insieme concorrono alla definizione del periodo proprio di vibrazione dell'edificio. In generale, le strutture degli edifici, per altezze < 30 m, hanno periodi propri di vibrazione nell'ordine dei valori riportati nella tabella 3.2/A:

Se si escludono i terremoti, che essendo sorgente di vibrazioni con elevati livelli energetici e producendo frequenze che rientrano nei campi sopra individuati, risultano molto pericolosi per le strutture, è molto raro che delle vibrazioni prodotte da fonti esterne all'edificio rientrino in questi intervalli di periodi, con livelli energetici elevati.

L'edificio può subire danni quando i materiali con i quali è costruito sono sottoposti ad una tensione superiore alla loro rispettiva soglia di resistenza a trazione. Dati i notevoli valori di resistenza a compressione dei materiali generalmente utilizzati nelle costruzioni, è difficile che si manifestino lesioni per superamento della soglia di resistenza a compressione del materiale (eccetto, come si è detto, nel caso di vibrazioni di eccezionali entità come quelle conseguenti ad un sisma).

Le lesioni subite dagli edifici possono essere distinte in estetiche e strutturali in relazione al livello di danneggiamento subito: un livello di vibrazione in grado di provocare danni solo agli intonaci o alle tamponature, non mette a rischio la sicurezza della struttura portante. Per questo le normative rivolte alla salvaguardia degli edifici (cfr cap. 5), che individuano valori vibrazionali di riferimento finalizzati alla prevenzione di danni estetici, risultano essere ampiamente cautelative nei confronti dei danni strutturali. Tali norme fanno riferimento a sorgenti vibrazionali prevalentemente di origine antropica mentre la sicurezza degli edifici nei confronti delle vibrazioni di origine sismica è tutelata da un'altra categoria di normative: le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC).

Per comprendere quanto sarà descritto nei capitoli seguenti in merito alla fratturazione di scaglie di roccia durante le trivellazioni di vario tipo, è opportuno rammentare che i terremoti si generano dalla fratturazione di settori di crosta terrestre che possono avere dimensioni nell'ordine dei chilometri quadrati. È comprensibile quindi, che l'energia liberata durante un evento sismico possa avere effetti devastanti sulle strutture, anche a notevoli distanze dalla sorgente, mentre l'energia liberata dalla rottura di qualche centimetro quadrato di roccia ha effetti irrilevanti, già a brevissima distanza.

Le teste fresanti sono dotate di un numero variabile di utensili che dipende prevalentemente dal diametro e dalle caratteristiche della roccia, ma anche se gli utensili che lavorano "insieme" sul fronte dello scavo staccassero contemporaneamente il loro frammento l'area complessiva di distacco passerebbe dalla scala dei centimetri quadrati a quella dei decimetri quadrati, quindi assolutamente non comparabile con un evento sismico anche di modesta entità.

È, quindi, importante ribadire che esiste una elevata differenza di scala tra le vibrazioni sismiche e quelle di origine antropica¹ e che, in entrambi i casi, il pericolo di danneggiamento di un edificio deriva più dall'attivazione di eventuali fenomeni di risonanza in corrispondenza di particolari frequenze, che dall'ampiezza della vibrazione a cui lo stesso edificio potrebbe essere soggetto su frequenze lontane da quelle caratteristiche.

¹ compreso l'uso di esplosivo a scopo minerario

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 14 di 39	Rev. 0

3.3 Richiamo concettuale al coefficiente di attenuazione

Per comprendere l'analisi sismica realizzata, è utile fare un breve cenno su quello che esprime il parametro dell'attenuazione.

Quando un'onda elastica attraversa un mezzo, la sua energia meccanica viene progressivamente convertita in calore a causa di attriti e viscosità tra le particelle: la presenza di porosità, fratture, acqua, gas, determina un decadimento dell'energia dell'onda sismica modificandola in frequenza ed in ampiezza.

È noto che il terreno non è un mezzo perfettamente elastico e questa caratteristica può variare significativamente tra i vari tipi di terreno ed ancora di più tra terreno e vari tipi di roccia.

Dalla qualità del terreno Q , dipende la perdita relativa di energia E per dissipazione anelastica di ogni ciclo d'onda, secondo la seguente relazione:

$$\frac{1}{Q} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (1)$$

nella quale

$\Delta E \leq 0$ è la frazione di energia dispersa per ciclo d'onda, nell'ipotesi $|\Delta E| \ll E$

I terreni più "rigidi" trasmettono le vibrazioni meglio di quelli più "soffici" e le qualità anelastiche del terreno influiscono diversamente anche sullo spettro di frequenza delle vibrazioni trasmesse.

Dalla definizione di ΔE , e definendo $\Delta E(R)$ come l'energia spesa dall'onda a percorrere in un tratto di lunghezza ΔR in direzione radiale rispetto alla sorgente, tale che:

$$\frac{\Delta E}{\lambda} = -\frac{\Delta E(R)}{\Delta R} \quad (2)$$

dove λ indica la lunghezza d'onda, si ottiene:

$$\frac{\Delta E(R)}{E} = \frac{\Delta E \Delta R}{\lambda E} = \frac{2\pi}{Q\lambda} \Delta R = \eta \Delta R \quad (3)$$

Dove η è il coefficiente di attenuazione.

Dall'equazione (3) appare chiaro come all'aumentare del fattore di qualità² diminuisce l'energia dissipata dall'onda nel mezzo e conseguentemente diminuisce il fattore di attenuazione.

La Fig. 3.2/A mostra un esempio grafico del fenomeno di smorzamento viscoso nel quale l'ampiezza si riduce nel tempo. Il grafico è presentato nel dominio del tempo ma il

² Intuitivamente correlato alla compattezza del terreno o della roccia

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 15 di 39	Rev. 0

comportamento dell'oscillatore smorzato è analogo anche nel dominio dello spazio (distanza dalla sorgente).
L'entità dello smorzamento dipende inversamente dall'elasticità del mezzo che trasmette le vibrazioni.

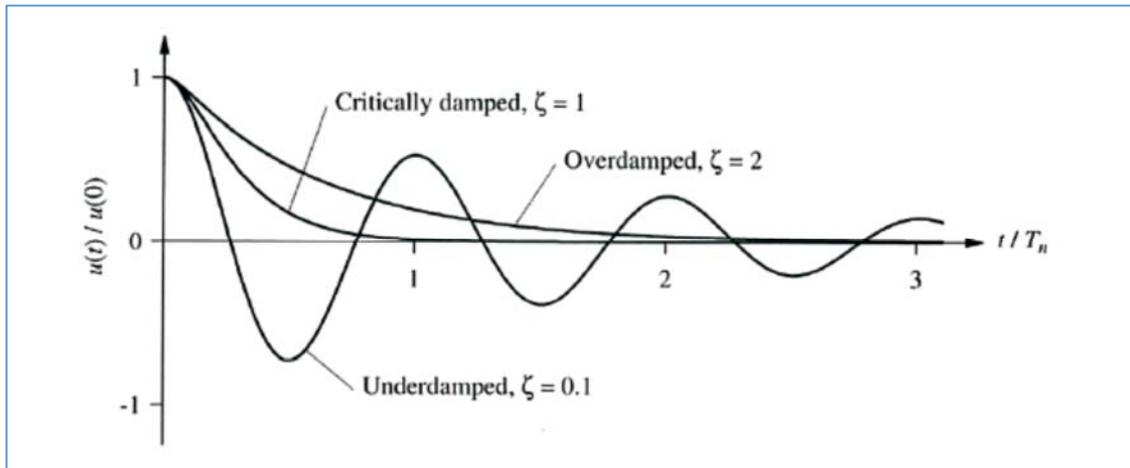


Fig. 3.2/A: Esempio di smorzamento viscoso

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 16 di 39	Rev. 0

4 CARATTERISTICHE DELLE MACCHINE OPERATRICI

Da sempre l'uomo si ingegna per produrre attrezzi idonei per convertire l'energia in lavoro, progettando strumenti e macchine sempre più efficienti. L'efficienza è data dal rapporto tra l'energia spesa ed il lavoro compiuto; nel caso delle macchine da scavo l'efficienza può essere espressa in termini di energia necessaria a rimuovere, dal fronte di scavo, una certa quantità di materiale. Gli utensili e le macchine da scavo sono progettati per massimizzare l'energia impiegata per frammentare la roccia e minimizzare la quantità di energia trasferita al corpo roccioso come onda vibrazionale e dispersa in forma di calore.

Il processo di frammentazione della roccia da parte della testa di taglio è un processo dissipativo di energia, che coinvolge due modalità di frammentazione della roccia: comportamento fragile, nel quale l'energia è trasferita alla roccia per superare la sua resistenza a trazione e il comportamento duttile nel quale l'energia è trasferita alla roccia per superare la sua resistenza al taglio e/o alla compressione. Con un aumento della pressione confinata, il comportamento alla rottura della roccia passa da una modalità fragile a una modalità semi-fragile e duttile, che richiede più energia per rompere la roccia. Le macchine operatrici tendono quindi a non applicare grosse pressioni sul fronte di scavo e frantumare piuttosto che a tagliare la roccia.



Fig. 4/A: Esempio di testa fresante di microtunnel

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 17 di 39	Rev. 0

Le macchine operatrici solitamente utilizzate per gli scavi in sotterraneo sono dotate di molteplici utensili che lavorano sulla stessa macchina. Nella Fig. 4/A si può vedere la testa perforante di una piccola macchina per microtunnel (circa 2 m di diametro) in cui si distinguono 18 dischi taglienti ed 8 scalpelli trasversali. Se il diametro aumenta, anche il numero degli utensili aumenta.

È importante sottolineare che il processo di asportazione della roccia per mezzo di utensili a disco si basa, sostanzialmente, sulla formazione ed il distacco di scaglie (chips) tra solchi adiacenti creati dal passaggio degli utensili rotolanti. Questo meccanismo di rottura è funzione delle proprietà meccaniche della roccia.

In questo senso, l'azione dei dischi durante la fase di rotolamento può essere ricondotta ad un sistema di tre forze composto da una componente normale alla superficie della roccia, una componente trasversale con direzione circolare coincidente con quella della traiettoria del disco ed una componente laterale diretta ortogonalmente al piano dell'utensile; la forza normale varia in continuazione a causa dell'azione di rotolamento del disco, per cui ogni utensile, lungo la sua traiettoria, effettua una percussione nella fase di indentazione ed una pressione per portare a rottura le scaglie di roccia sul fronte. La penetrazione del disco dipende dalle caratteristiche della roccia, dalla tipologia e dimensione del disco e dalla pressione fornita ad ogni utensile. Tipicamente nello scavo con TBM, si ottengono penetrazioni per giro della testa che variano da qualche millimetro a 15 mm; tale fenomeno è interpretabile come il continuo avvicendamento di due fasi specifiche:

- indentazione della roccia al di sotto dell'utensile;
- formazione di fratture tra solchi adiacenti, che determinano il distacco delle scaglie di roccia.

Il detrito formato include, quindi, sia roccia polverizzata prodotta nel processo di indentazione, sia scaglie appiattite (5 ÷ 15 mm di spessore), con lunghezza dell'ordine della spaziatura tra i dischi e larghezza due/tre volte maggiore dello spessore, dovute all'interazione tra le traiettorie dei dischi, concentriche, ma non coincidenti. (Fig. 4/B - Cho et al., 2013). La Fig. 4/C (dal sito di Herrenknecht, leader nella produzione di macchinari per opere trenchless), mostra le parti del "cutter", evidenziando la circonferenza esterna con funzione di taglio (cutting ring) ed un allargamento più interno con funzione dislocante.

L'azione di molti utensili, rotanti sul proprio asse e contemporaneamente attorno all'asse centrale della fresa, genera un elevato numero di punti di rottura della roccia sul fronte di avanzamento e produce scaglie di piccole dimensioni. Tanto l'impatto dell'utensile nella fase di indentazione, quanto la rottura della scaglia di roccia sono una sorgente di vibrazione. Il numero delle sorgenti può quindi essere intuitivamente correlato al numero delle scaglie prodotte e l'ampiezza dell'onda prodotta da ciascuna rottura, può essere correlata alla dimensione delle stesse. Conseguentemente, il segnale trasmesso alla roccia circostante sarà un treno di onde caratterizzato da componenti a frequenza elevata³, e dalla risultante dalla sommatoria dei molteplici impulsi emessi da ciascun utensile ad ogni rotazione della fresa. Poiché l'azione dei singoli utensili produce frammenti piccolissimi di roccia, l'intensità della vibrazione da loro emessa sarà estremamente modesta.

³ Rispetto a quelle caratteristiche degli edifici

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 18 di 39	Rev. 0

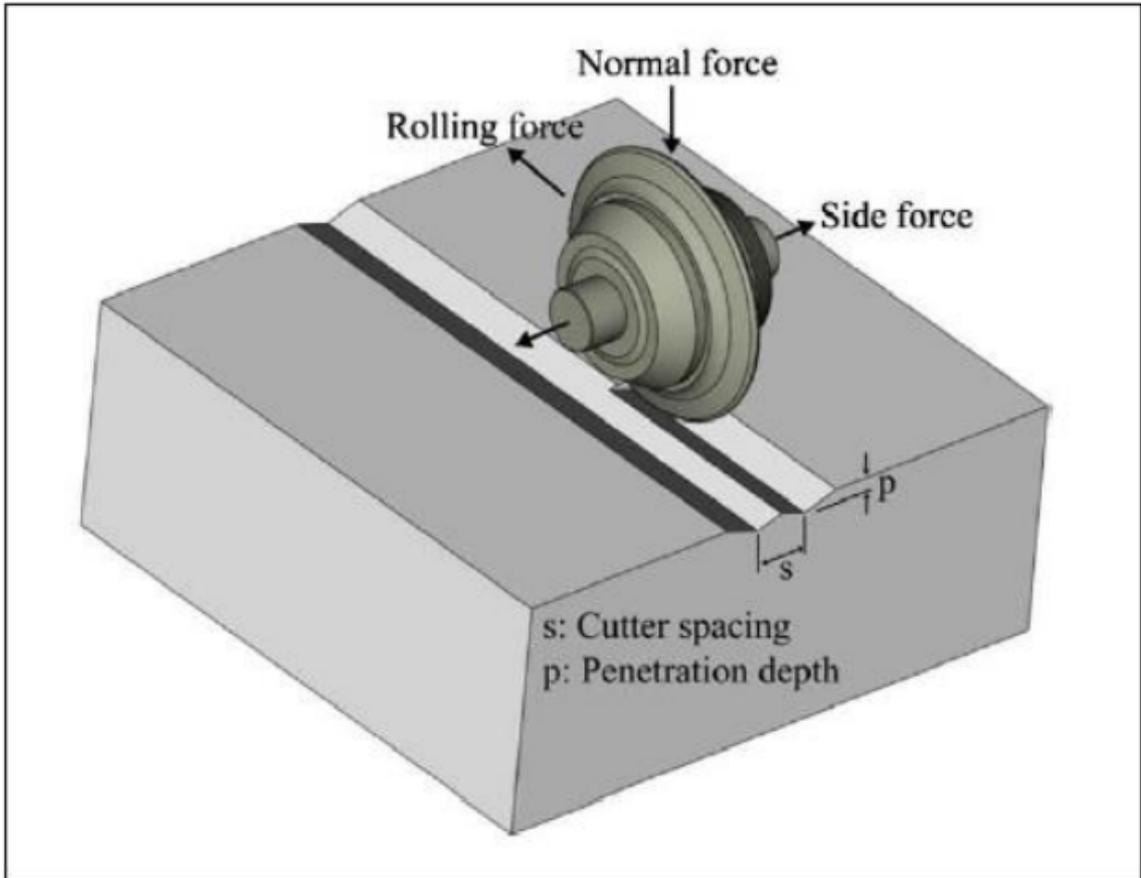


Fig. 4/B: Schema di lavoro dei dischi operanti sulla testa della fresa del microtunnel

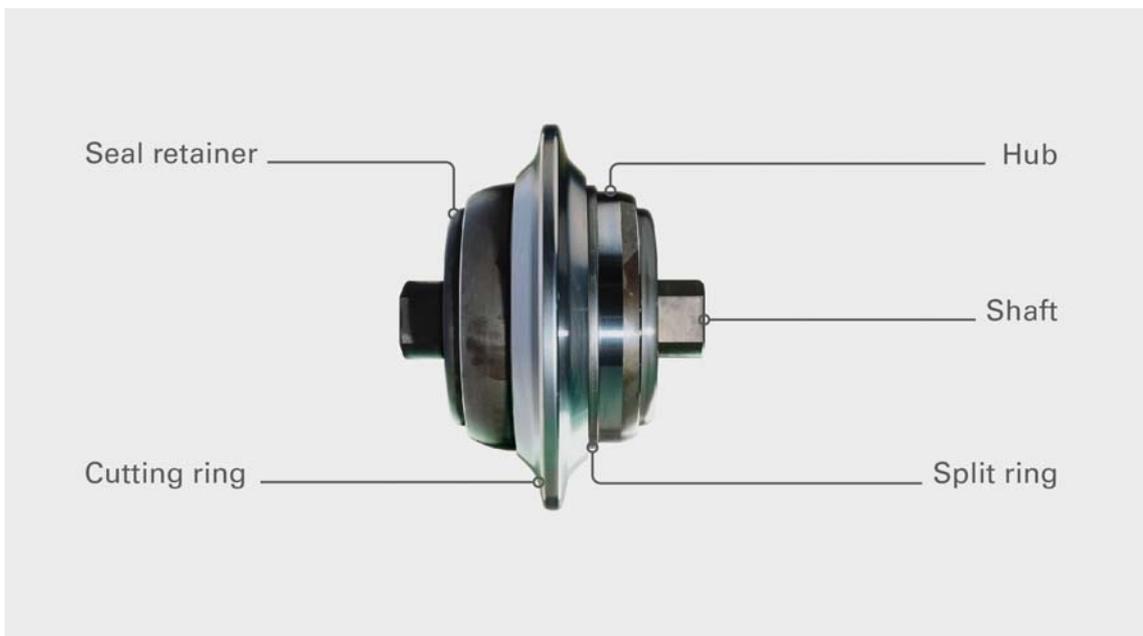


Fig. 4/C: Esempio di disco tagliente operante sulla testa della fresa del microtunnel

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 19 di 39	Rev. 0

Complessivamente la fresa produce vibrazioni di ampiezza sicuramente maggiore di quelle prodotte da ciascun utensile perché le vibrazioni prodotte in ciascun punto si sommano interferendo tra loro ⁴. Non è però realistico ipotizzare che tutti gli utensili, rotanti a velocità differenti, perché distribuiti su raggi diversi⁵, producano vibrazioni con fase del tutto coerente o opposta sulle stesse frequenze. La composizione della vibrazione complessiva potrebbe essere ipotizzata come una sommatoria in cui, statisticamente, gli effetti costruttivi e distruttivi dell'interferenza si bilancino su un valore medio.

È opportuno segnalare, che le frese operano con basse velocità di rotazione (15-20 giri/minuto) che consentono all'utensile di indentarsi quasi staticamente superando la resistenza a compressione del materiale da scavare grazie alla pressione che sono in grado di esercitare i martinetti oleodinamici contro le strutture di contrasto concentrata sulla stretta sezione dei taglienti; le fessure si propagano tra solco e solco.

Al contrario le attrezzature di scavo per impatto⁶ sono oggetti di dimensioni molto più modeste, relativamente leggeri, che frantumano il materiale trasferendo al fronte di scavo l'energia cinetica di una massa piccola ma dotata di velocità elevata.

Nel primo caso le vibrazioni sono prodotte soprattutto dalla rottura della roccia, nel secondo dall'impatto dell'utensile.

Nei precedenti paragrafi si è proposta una valutazione qualitativa delle vibrazioni prodotte da una trivellazione, basata sulla modesta dimensione dei frammenti e della loro superficie di distacco; nei capitoli seguenti si forniranno degli esempi di monitoraggio effettuati per valutare i potenziali effetti sugli edifici di vibrazioni prodotte durante perforazioni realizzate con tecnologie ad elevato trasferimento energetico ⁷.

Non potendo prevedere analiticamente l'entità delle vibrazioni prodotte una determinata attrezzatura di trivellazione a causa del numero e della variabilità dei fattori che ne influenzano l'avanzamento, si può affermare che i limiti di distanza di sicurezza dagli edifici relativi all'uso di un martello fondo foro siano ampiamente cautelativi per tecnologie meno impattanti quali i microtunnel o i *thrust boring*.

Si conclude sottolineando che minimizzare il disturbo della roccia circostante e sul fronte del foro, facilita il passaggio del corpo della macchina operatrice e del rivestimento definitivo. La generazione di forti vibrazioni infatti, può, aumentare la fratturazione della roccia circostante lo scavo e, conseguentemente, il rischio di potenziali cedimenti della calotta o di altre parti del tunnel. Se questo avvenisse, il materiale "sforrellato" potrebbe interferire con l'avanzamento della macchina o con quello dei conci, aumentando la forza di spinta necessaria alla progressione dello scavo fino al limite della resistenza a compressione assiale dei conci e/o al blocco della macchina. Sebbene questi rischi possano essere minimizzati con opportune precauzioni progettuali (es: stazioni di spinta

⁴ Per ciascuna delle frequenze emesse, quando la vibrazione si somma in corrispondenza di fase, l'ampiezza della vibrazione aumenta (interferenza costruttiva) quando si somma in opposizione di fase l'ampiezza si riduce (interferenza distruttiva) Nel caso particolare di interferenza tra due segnali della stessa frequenza ed ampiezza iniziale, se interferiscono in fase l'ampiezza del segnale originale raddoppia, se in opposizione di fase il segnale si annulla

⁵ Senza considerare le disomogeneità del fronte di scavo

⁶ Martelli idraulici o martelli a roto percussione

⁷ Cfr nota precedente

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 20 di 39	Rev. 0

intermedia), è evidente quanto minimizzare il disturbo della roccia da attraversare possa concorrere alla buona riuscita dell'opera.

Le vibrazioni eccessive possono comportare problematiche anche per la macchina operatrice che le genera e le riceve contemporaneamente, aumentando l'usura ed il rischio di rotture delle parti meccaniche, quindi è anche un interesse dell'impresa esecutrice operare limitandone l'entità

Queste tecnologie *trenchless*, quindi, tendono a frantumare la roccia riducendo al massimo le vibrazioni all'esterno.

Tecnologia Raise boring

La tecnologia *raise boring* consiste in un pozzo poco inclinato sulla verticale che raggiunge una galleria orizzontale e, nel campo dei lavori di costruzione delle condotte consente di superare delle forme morfologiche molto acclivi e con dislivelli importanti non altrimenti superabili per motivi tecnici o ambientali.

Per la realizzazione del foro pilota dei *raise boring* e per l'alesatura dello stesso al fine di realizzare il pozzo inclinato che caratterizza la tecnologia costruttiva, vengono utilizzati degli strumenti che frammentano la roccia concentrando su aree ristrette, come la punta dei denti, la forza di rotazione e la spinta/trazione delle aste di perforazione: la spinta nel caso del tricono (Fig. 4/D) che si usa per realizzare il foro pilota o la trazione per gli alesatori (Fig. 4/E) che vengono utilizzati per allargare il foro pilota e portarlo alla dimensione previste dal progetto.

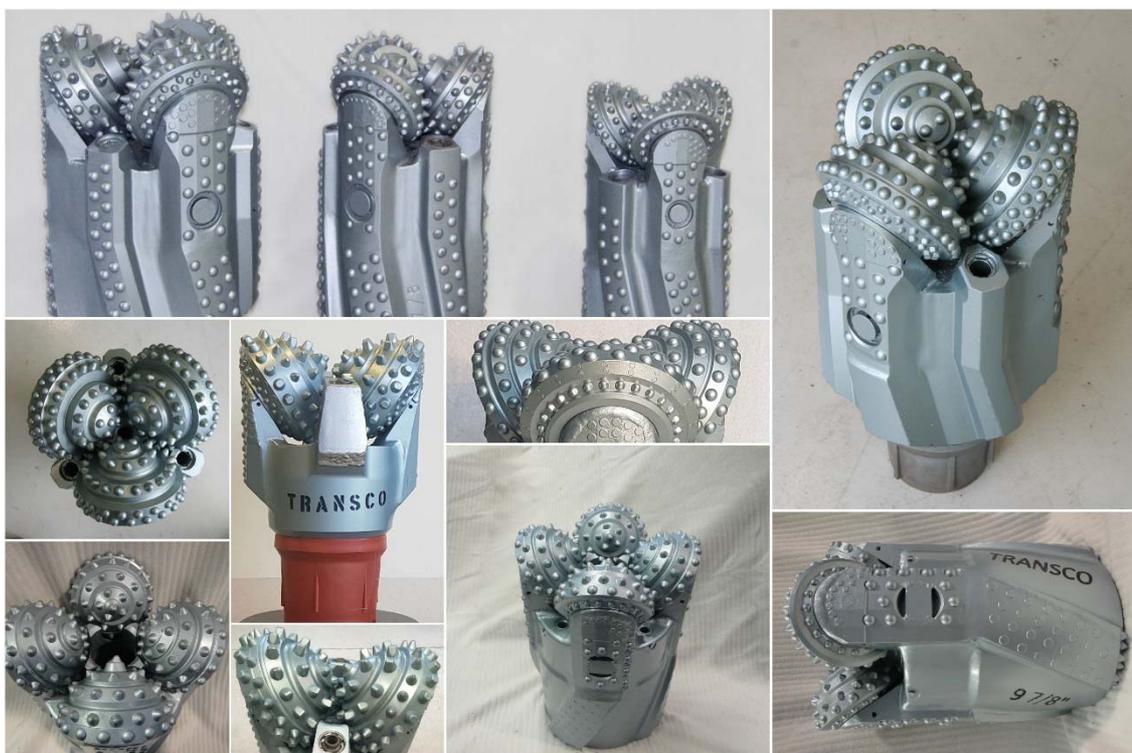


Fig. 4/D: Esempi di rock bits (triconi e quadriconi) utilizzati per la realizzazione del foro pilota

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 21 di 39	Rev. 0

Dalle due immagini risulta evidente che l'elevato numero dei denti rotanti porta ad un elevatissimo numero di punti di rottura della roccia, generando frammenti minuti e provocando vibrazioni con frequenza elevata e ampiezza bassa.

La Fig. 4/F mostra la distribuzione dei punti di pressione sul fronte di scavo prodotta da un alesatore dotato di 4 coni nel corso di una rotazione completa. L'immagine è stata tratta dalla presentazione di una società australiana che produce attrezzature di perforazione e che ha progettato un quarto cono, con una disposizione dei denti diversa da quella dei tre coni standard, in modo da coprire il fronte di scavo con una maggiore continuità rispetto all'utilizzo replicato di uno dei tre coni standard. Al di là di ogni valutazione sul rapporto costi/benefici di tale soluzione, dall'immagine risulta evidente come la densità dei punti di pressione comporti la generazione di vibrazioni a frequenza elevata.



Fig. 4/E: Esempio di alesatore utilizzato per portare il foro pilota al diametro di progetto

È opportuno rimarcare che la fratturazione delle schegge di roccia avviene più per il superamento della resistenza a compressione localizzata della roccia, che per l'impatto dei singoli denti; quindi l'energia prodotta dalla rottura delle schegge di roccia dipende più dalla dimensione delle superfici di rottura che dall'urto dell'utensile nella fase di indentazione.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 22 di 39	Rev. 0

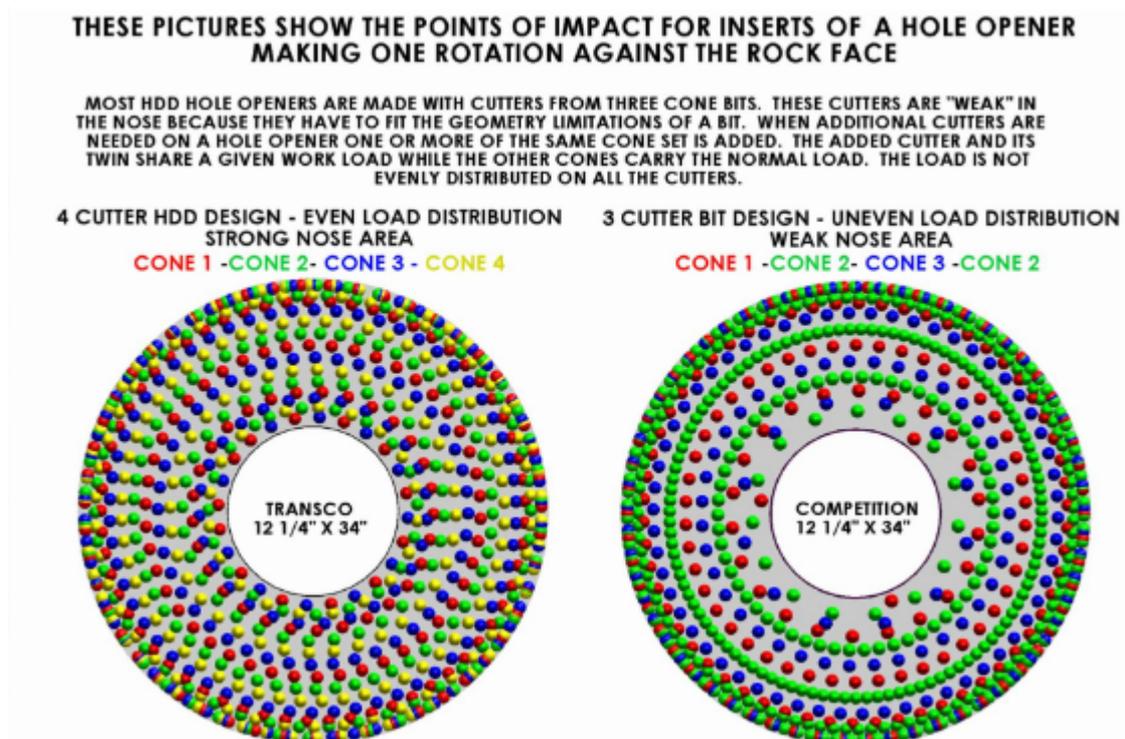


Fig. 4/F: Distribuzione dei punti di pressione sul fronte di scavo prodotta da un rock bit realizzato con 4 coni, nel corso di una rotazione completa dello strumento. Il quarto è un cono di nuova progettazione finalizzato a coprire i vuoti che rimangono quando si costruisce un quadricono, replicando uno dei tre coni con disegno standard.

Le precedenti considerazioni riguardano anche lo scavo del breve tratto di galleria che, nella tecnologia *raise-boring*, consente di assemblare con gli alesatori le aste del foro pilota, in una prima fase e, dopo l'installazione della condotta nel foro, di montare la curva stampata alla base del pozzo inclinato. Per realizzare la galleria non è possibile utilizzare frese TBM ed è necessario ricorrere a tecnologie tradizionali, come la fresa puntuale (*roadheader*) montata su un braccio brandeggiante (Fig. 4/G). La struttura è morfologicamente simile ai coni precedentemente descritti: uno o due corpi rotanti, ciascuno dei quali dotato di un elevato numero di denti, disposti su un percorso a spirale. In questo caso, la fase di indentazione nel fronte di scavo avviene con maggiore impatto rispetto alle frese: l'utensile percuote la superficie del fronte di scavo con un angolo finalizzato alla abrasione di scaglie di piccole dimensioni e gira più velocemente rispetto alla fresa del minitunnel.

L'elevato numero di denti produce comunque delle alte frequenze (Fig. 4/H).

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 23 di 39	Rev. 0

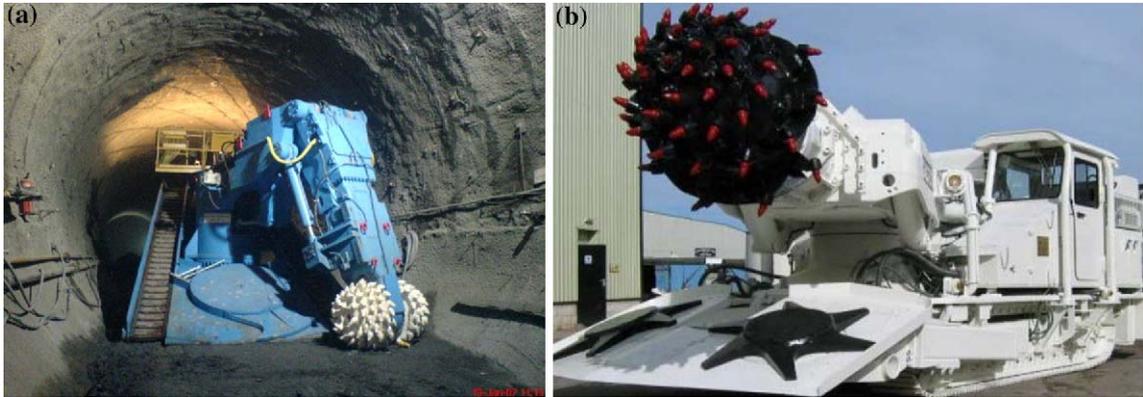


Fig. 4/G: Esempio di fresa puntuale (roadheader) a) Trasversale; b) Assiale



Fig. 4/H: Fresa puntuale trasversale in azione

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 24 di 39	Rev. 0

5 NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Tutte le normative che trattano il problema dell'interazione tra le vibrazioni e gli edifici, prendono in considerazione il livello del picco massimo di velocità registrata al livello delle fondazioni dell'edificio e la sua frequenza.

In Italia, la normativa da seguire è la UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici" del 2004. (UNI 9916, 2004). Si tratta di una revisione tecnica della norma UNI 9916 del 1991, rispetto alla quale ogni singolo argomento è stato ampliato e dettagliato e al quale sono stati aggiunti alcuni valori di riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.

Questa norma fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii, in modo tale da permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed alla integrità architettonica. In generale, si applica a tutte le tipologie di edifici di carattere abitativo, industriale e monumentale, mentre ciminiere, ponti e strutture sotterranee, come gallerie e tubazioni, non sono considerate dalla presente normativa.

Per una corretta esecuzione delle misurazioni, premessa necessaria per giungere a descrivere completamente il fenomeno e valutare quindi la possibilità che esso produca danni, è necessario tenere conto dei seguenti fattori:

- meccanismo di eccitazione e trasmissione;
- durata del fenomeno;
- natura deterministica o aleatoria del fenomeno;
- distribuzione spettrale dell'energia.

In generale, la risposta di un edificio o dei suoi elementi strutturali sottoposti ad una vibrazione e quindi il danno potenziale che questa può produrre, dipendono, oltre che dal contenuto spettrale dell'eccitazione stessa, dalle caratteristiche dinamiche dell'edificio. Sarebbe dunque necessario ottenere una documentazione completa sull'edificio, prima di dare una valutazione del rischio di danno connesso con il fenomeno vibratorio in esame.

In particolare, l'attenzione dovrebbe essere concentrata sui seguenti aspetti:

- caratteristiche costruttive dell'edificio;
- stato di conservazione;
- caratteristiche delle fondazioni ed interazione con il terreno.

Tuttavia, in relazione agli obiettivi dell'indagine, lo studio della risposta degli edifici può essere affrontato in maniera più o meno approfondita e il livello di dettaglio della conoscenza degli aspetti sopra elencati può essere, quindi, più o meno accurato.

Il medesimo discorso può essere affrontato per il terreno che si frappone tra la sorgente e l'edificio, nonostante esso risulti essere di primaria importanza per analizzare la risposta della struttura.

La normativa tedesca DIN 4150-3 considera tre classi di edifici:

- edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili;
- edifici residenziali e costruzioni simili;

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 25 di 39	Rev. 0

- costruzioni che non appartengono alle prime due categorie e sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici).

La norma prevede la misurazione ed il controllo del livello di vibrazione sia in fondazione (per tutte e tre le componenti), che ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato per quanto riguarda le componenti orizzontali della velocità.

Tali misurazioni forniscono un quadro della risposta globale dell'edificio; sono inoltre necessarie misurazioni relative alla risposta dei solai ai singoli piani, che possono essere limitate alla misurazione della componente verticale della velocità registrata al centro del solaio. I valori di riferimento, relativi alle vibrazioni di breve durata (cioè tali da escludere problemi di fatica e amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata) sono riportati in Tab. 5/A.

Tab. 5/A: valori di riferimento delle vibrazioni di breve durata

Categoria	Tipo di struttura	Velocità di vibrazione (mm/s)			
		Misura alla fondazione			Misura al pavimento dell'ultimo piano
		Campi di frequenza (Hz)			Tutte le frequenze
		<10	10 ÷ 50	50 ÷ 100*	
1	Edifici industriali e commerciali	20	20-40	40-50	40
2	Edifici residenziali	5	5-15	15-20	15
3	Strutture particolarmente sensibili (es. monumenti)	3	3-8	8-10	8

*Per frequenze superiori ai 100 Hz si possono applicare i valori riportati in questa colonna
linea 1 è aumentata di un fattore 2 per strutture civili

In presenza di vibrazioni continue, che possano indurre fenomeni di fatica o amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata, i valori di riferimento per le componenti orizzontali del moto sono indicati nella Tab. 5/B, e sono indipendenti dal contenuto in frequenza del segnale.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 26 di 39	Rev. 0

Tab. 5/B: valori di riferimento per le componenti orizzontali del moto

Classe	Tipo di edificio	"Peak component particle velocity" nell'intervallo di frequenza dell'impulso predominante		
		Da 4 Hz a 15 Hz	Da 15 Hz a 40 Hz	Da 40 Hz a 250 Hz
1	Strutture a telaio o rinforzate. Edifici industriali e commerciali	50 mm/s		
2	Strutture non rinforzate. Edifici residenziali o piccoli edifici commerciali	Varia linearmente da 15 mm/s ($f=4$ Hz) fino a 20 mm/s ($f=15$ Hz)	Varia linearmente da 20 mm/s ($f=15$ Hz) fino a 50 mm/s ($f=40$ Hz)	50 mm/s
Nota 1 I valori indicati sono alla base dell'edificio. Nota 2 Per la classe 2, a frequenze minori di 4 Hz, non si deve superare uno spostamento massimo di 0,6 mm (da zero al picco).				

La normativa inglese - BS (British Standard) 7385, a differenza della precedente, tratta solo il caso di vibrazioni trasmesse dal terreno; in altre parole, le vibrazioni generate da sorgenti poste all'interno dell'edificio, non sono contemplate.

I valori di riferimento forniti dalla norma, relativi a misurazioni in fondazione e riportati in Tab.5/C sono applicabili solo a edifici bassi (fino a 3 piani) e riguardano vibrazioni transitorie che non danno luogo a risonanza nella struttura. In caso di risonanza, tali valori devono essere ridotti del 50%.

Per frequenze minori di 4 Hz la norma richiede di verificare che lo spostamento non superi 0,6 mm (da zero al picco). (BS 7385, 1993)

Tab. 5/C: valori di riferimento della norma BS

Classe	Tipo di edificio	"Peak component particle velocity" nell'intervallo di frequenza dell'impulso predominante		
		Da 4 Hz a 15 Hz	Da 15 Hz a 40 Hz	Da 40 Hz a 250 Hz
1	Strutture a telaio o rinforzate. Edifici industriali e commerciali	50 mm/s		
2	Strutture non rinforzate. Edifici residenziali o piccoli edifici commerciali	Varia linearmente da 15 mm/s ($f=4$ Hz) fino a 20 mm/s ($f=15$ Hz)	Varia linearmente da 20 mm/s ($f=15$ Hz) fino a 50 mm/s ($f=40$ Hz)	50 mm/s
Nota 1 I valori indicati sono alla base dell'edificio. Nota 2 Per la classe 2, a frequenze minori di 4 Hz, non si deve superare uno spostamento massimo di 0,6 mm (da zero al picco).				

La Normativa Svizzera SN 640312 riguarda le vibrazioni provocate durante le costruzioni dallo scoppio di mine, dalle attività di macchine di cantiere e dal traffico su strada e

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 27 di 39	Rev. 0

ferroviario. La norma non è applicabile alle vibrazioni di frequenza minore di 8 Hz e non riguarda gli effetti indiretti delle vibrazioni quali, ad esempio, eventuali cedimenti del terreno su cui poggia l'edificio.

La grandezza di riferimento è la "*peak particle velocity*", cioè il picco nel tempo del modulo del vettore velocità.

I valori di riferimento sono forniti in funzione della frequenza dominante della vibrazione, determinata dall'analisi spettrale della componente del vettore velocità con ampiezza maggiore. In Tab. 5/D sono indicati i valori di riferimento, al di sotto dei quali, anche i piccoli danni sono poco probabili.

Tab. 5/D: valori di riferimento "peak particle velocity"

Classe	Tipo di costruzione	Esposizione	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s		
			Posizioni di misura ^{*)}		
			Da 8 Hz fino a 30 Hz ^{*)}	Da 30 Hz fino a 60 Hz	Da 60 Hz fino a 150 Hz
A	Costruzioni molto poco sensibili (per esempio ponti, gallerie, fondazioni di macchine)	Occasionale Frequente Permanente	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C
B	Costruzioni poco sensibili (per esempio edifici industriali in cemento armato o metallici) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C
C	Costruzioni normalmente sensibili (per esempio edifici d'abitazione in muratura di cemento, cemento armato o mattoni, edifici amministrativi, scuole, ospedali, chiese in pietra naturale o mattoni intonacati) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	15 6 3	20 8 4	30 12 6
D	Costruzioni particolarmente sensibili (per esempio monumenti storici e soggetti a tutela) case con soffitti in gesso, edifici della classe C nuovi o ristrutturati di recente	Occasionale Frequente Permanente	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà
^{*)} Le posizioni di misura devono essere scelte sugli elementi rigidi della struttura portante o dove sono attesi i maggiori effetti delle vibrazioni.					

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 28 di 39	Rev. 0

Le soglie sono applicabili ai tipi di costruzioni descritte.

Sono considerati i casi di vibrazioni:

- occasionali (numero di oscillazioni eccedenti il 70% del valore di velocità di riferimento maggiore di 1000 eventi vibratorii);
- frequenti (numero di oscillazioni compreso tra 1000 e 100000);
- permanenti (numero di oscillazioni maggiori di 100000).

Tra le suddette normative, quella che riguarda più direttamente l'effetto delle vibrazioni sugli edifici risulta essere quella Svizzera (SN 640312) la quale prende in considerazione la ripetitività del fenomeno per portare a dei limiti di ammissibilità.

La presenza di questi cantieri, in zone prossime ad abitazioni o altri edifici sensibili, non può essere considerata permanente; tuttavia, in fase di valutazione del rischio, può essere prudente utilizzare questa condizione.

Le normative che trattano del problema di interazione tra vibrazioni e edifici, prendono tutte in considerazione il livello del picco massimo di velocità registrato al livello delle fondazioni dell'edificio e la sua frequenza.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 29 di 39	Rev. 0

6 ESEMPI DI REGISTRAZIONE DI VIBRAZIONI DOVUTE A MACCHINE OPERATRICI

In questo capitolo sono presentati due esempi di monitoraggi effettuati in situazioni in cui i macchinari operanti trasmettono al terreno una energia elevata.

Il primo esempio si riferisce al monitoraggio effettuato durante la perforazione di un pozzo per ricerca d'acqua, realizzato mediante un martello fondo foro; il secondo riguarda l'utilizzo di un martello demolitore per simulare l'effetto della realizzazione di micropali in roccia prima che fosse attivato il cantiere.

6.1 Esempio 1: Registrazione delle vibrazioni durante una perforazione a roto-percussione per ricerca di acqua

La macchina di perforazione impiegata, presenta le seguenti caratteristiche:

- tipo: Martello a roto-percussione a fondo foro HYPER 41 (Bulroc UK);
- diametro: 152 mm;
- numero di colpi al secondo: 18 cps;
- energia del singolo colpo: 345 J.

Le registrazioni delle vibrazioni sono state effettuate mediante tre sensori velocimetrici verticali, con risposta in frequenza da 4.5 a 500 Hz ed in grado di fornire un segnale di 20 mV/mm/sec di velocità di vibrazione.

Per l'acquisizione dati è stato usato il sistema DAQ-LINK III, in grado di gestire fino a 24 sensori contemporaneamente, e di convertire il segnale elettrico in un segnale digitale a 24 bit.

I suddetti sensori sono stati posizionati in maniera solidale (mediante tasselli ad espansione) lungo il muro di cinta della proprietà interessata dalla perforazione, a distanze di 6.8, 11.2 e 22.5 m. (vedi Fig. 6.1/A)

Le registrazioni hanno permesso di caratterizzare il fenomeno vibratorio, sia in termini di frequenza di colpi per secondo, sia in termini di ampiezza dei segnali. Durante la perforazione dei primi 6 metri, sono stati acquisiti 12 eventi vibratorii, ognuno di 2 secondi di durata, come da elenco in Fig. 6.1/B.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 30 di 39	Rev. 0

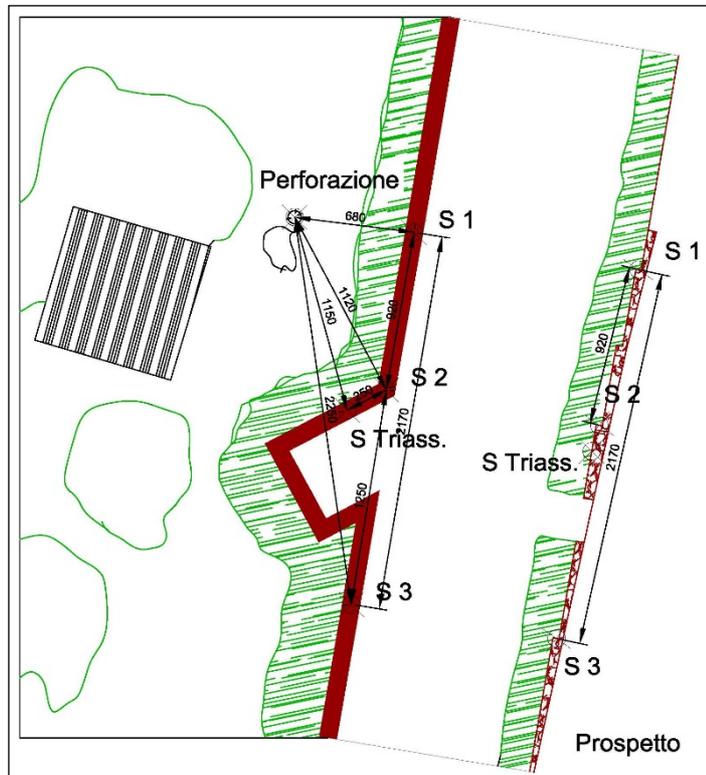


Fig. 6.1/A: ubicazione dei sensori lungo il muro di cinta della proprietà interessata dalla perforazione a distanze di 6.8, 11.2 e 22.5 m

Index	Start ID	Start Date	Start Time	Start Delay	Comment
1	17929	13 nov 2015	10:39:50	1.90	test Orbetello Profondità 0.5 m
2	17930	13 nov 2015	10:42:39	34.30	test Orbetello Profondità 0.7 m
3	17931	13 nov 2015	10:44:23	23.50	test Orbetello Profondità 1.0 m
4	17932	13 nov 2015	10:49:32	2.40	test Orbetello Profondità 1.3 m
5	17933	13 nov 2015	10:50:59	2.80	test Orbetello Profondità 2.0 m
6	17935	13 nov 2015	10:52:19	3.80	test Orbetello Profondità 2.5 m
7	17936	13 nov 2015	10:53:32	0.90	test Orbetello Profondità 3.2 m
8	17937	13 nov 2015	10:58:01	35.80	test Orbetello Profondità 3.6 m
9	17938	13 nov 2015	11:00:22	11.40	test Orbetello Profondità 4.2 m
10	17939	13 nov 2015	11:01:33	3.80	test Orbetello Profondità 4.8 m
11	17940	13 nov 2015	11:03:12	2.10	test Orbetello Profondità 5.2 m
12	17942	13 nov 2015	11:05:14	58.50	test Orbetello Profondità 6.2 m

Fig. 6.1/B: elenco della registrazione dei 12 eventi vibratorii acquisiti, ciascuno per 2 secondi, durante la perforazione dei primi 6 metri

Dell'evento evidenziato (n. 4 relativo alla profondità di 1,3 m dal p.c) si riportano, nella Fig. 6.1/C i sismogrammi relativi ai 3 punti di monitoraggio e l'analisi correlata.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 31 di 39	Rev. 0

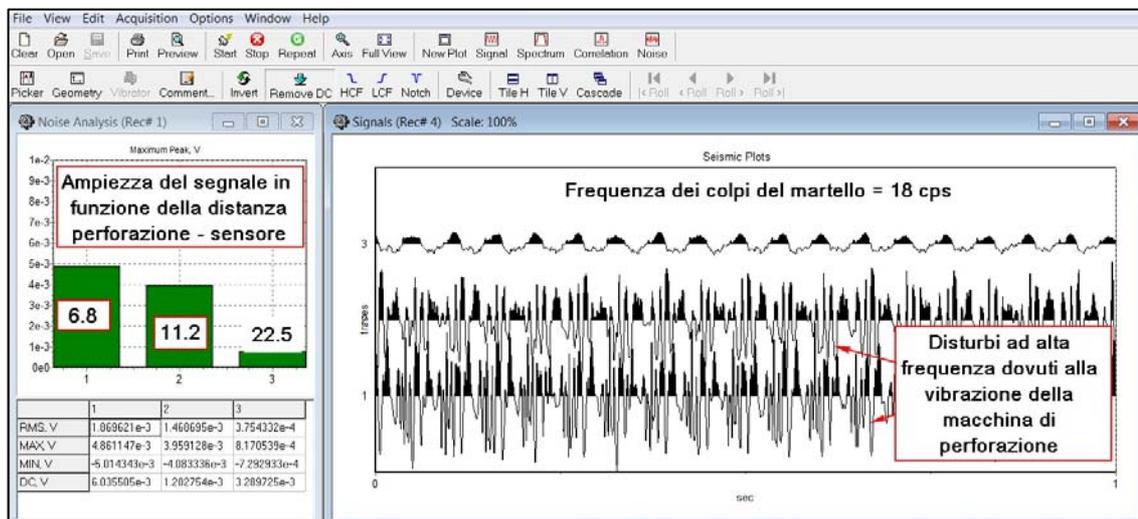


Fig. 6.1/C: Sismogrammi e relativa analisi della registrazione n. 4 relativa alla profondità di 1.3 m dal p.c. evidenziata in Fig. 6.1/B

Di ogni sismogramma è stata presa in considerazione, come valore di picco, la media dei valori massimi e minimi espressa in mV.

Questi valori sono stati convertiti in valori di velocità, tenendo conto della costante dei sensori, cioè:

$$1.0 \text{ mm/sec} = 20 \text{ mV}$$

Si evidenzia che l'intensità misurata è relativa alla sola componente verticale, mentre il valore che si deve considerare nell'analisi di pericolosità, è il modulo del vettore la cui orientazione dipende da molteplici fattori, primo fra tutti la direzione di allineamento tra sorgente di vibrazione e punto di registrazione.

Per valutare l'effettiva ampiezza del fenomeno vibratorio, un secondo sistema di monitoraggio (ABEM Vibralock) è stato installato nel punto del geofono intermedio. Il secondo strumento fornisce le analisi puntuali della vibrazione nelle tre direzioni, ma non ne consente la registrazione nel tempo (sismogramma).

Con questo strumento sono state eseguite varie registrazioni e i dati ottenuti hanno permesso di stabilire un fattore di correlazione tra il Vettore massimo e la Componente verticale, trovando un rapporto di 2.78, a conferma che la direzione di propagazione delle vibrazioni era sostanzialmente orizzontale.

I risultati del monitoraggio sono stati interpolati con una funzione di tipo esponenziale negativo del tipo:

$$V_{\max} = \text{Distanza}^{-\text{Coeff.Att}} \times C$$

Ottenendo il seguente risultato: $V_{\max} = X^{1.6782} \times 15.824$

Dove V_{\max} , è il valore scalare dell'ampiezza massima del vettore velocità atteso ad una determinata distanza dalla sorgente di vibrazione (X), e il Coefficiente di Attenuazione è l'esponente negativo del parametro distanza (quindi l'intensità delle vibrazioni decresce in maniera esponenziale con la distanza), mentre C è una costante legata alle

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 32 di 39	Rev. 0

caratteristiche di resistenza della roccia moltiplicata per l'energia del sistema che origina le vibrazioni.

La funzione ottenuta partendo dai dati sperimentali è riportata nel diagramma in Fig.6.1/D, dove si può vedere che già a 10 m di distanza, i valori di velocità di vibrazione sono costantemente inferiori a 1.0 mm/sec.

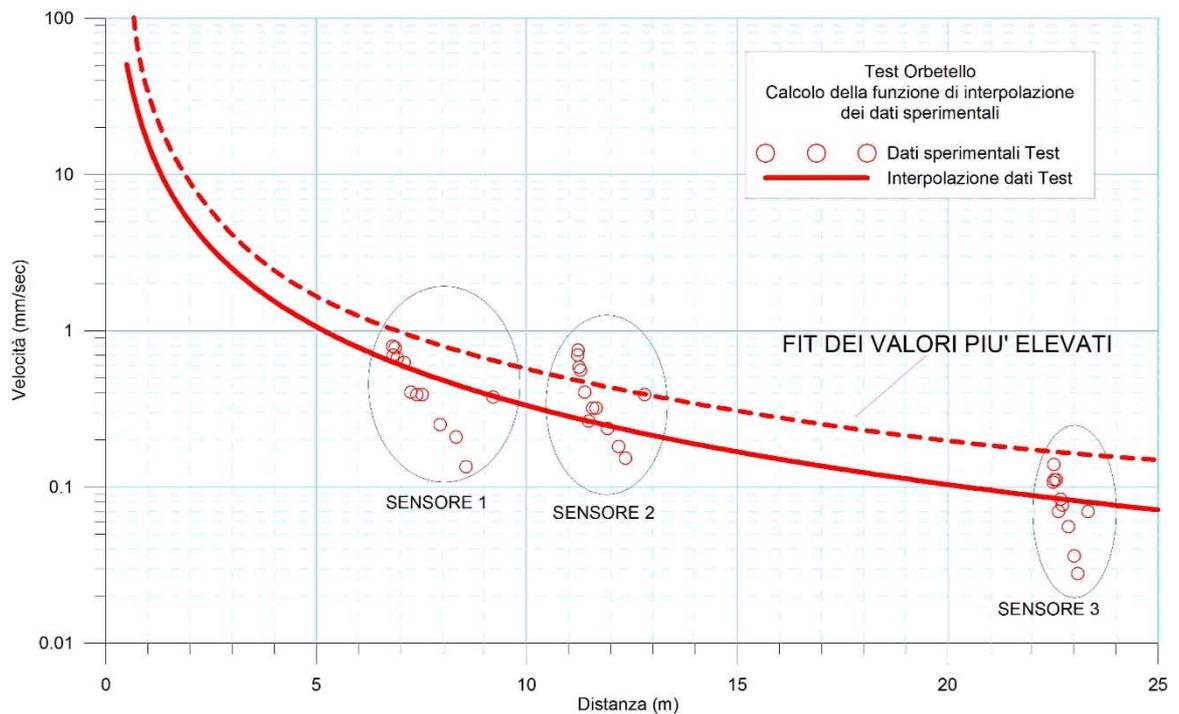


Fig. 6.1/D: Dati sperimentali e relative curve di interpolazione logaritmica delle quali si desume che i valori di velocità di vibrazione sono inferiori a 1.0 mm/sec già a meno di 10 m di distanza dalla sorgente

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 33 di 39	Rev. 0

6.2 Esempio 2: Vibrazioni generate da martello demolitore su roccia in vicinanza di edifici

In occasione del progetto di consolidamento di un muro, per il quale era prevista la realizzazione di micropali da intestare in roccia, è stato effettuato un test per valutare i potenziali effetti della realizzazione dei micropali sui fabbricati limitrofi alla zona di intervento (7 dicembre 2015).

Non essendo possibile effettuare test preventivi nel sito interessato dal progetto con gli stessi mezzi che sarebbero stati usati in fase di cantiere, si è deciso di generare delle vibrazioni con uno strumento di energia nota e ripetibile e di effettuare, prima, un test in un'area nota per la quale fossero conosciute anche le caratteristiche dissipative dei terreni e poi, un monitoraggio specifico nel sito interessato dal progetto.

Per l'area test si è utilizzata la zona in cui è stato effettuato il monitoraggio presentato nell'esempio precedente, nella quale era stato effettuato il monitoraggio dello scavo di un pozzo utilizzando un martello a fondo foro, analogo a quello prevedibilmente usato per realizzare i micropali nel sito del progetto.

Come sorgente delle vibrazioni è stato utilizzato un martello demolitore Hilti mod. TE 1500 AVR, in grado di generare impulsi con frequenza di 27 colpi per secondo e con 30J di energia per ogni singolo di impatto. Prima di effettuare le registrazioni, la punta del martello demolitore è stata infissa fino al limite dell'avanzamento, in modo da poter assumere che tutta l'energia del sistema sia dispersa in forma di vibrazione, non essendo più dissipata per far avanzare la punta nella roccia.

La prova è stata eseguita posizionando tre sensori nei punti indicati nella planimetria riportata in Fig. 6.2/A (uno sulla proprietà B e due sulla proprietà A), generando vibrazioni nei punti indicati lungo il muro oggetto del progetto di consolidamento.

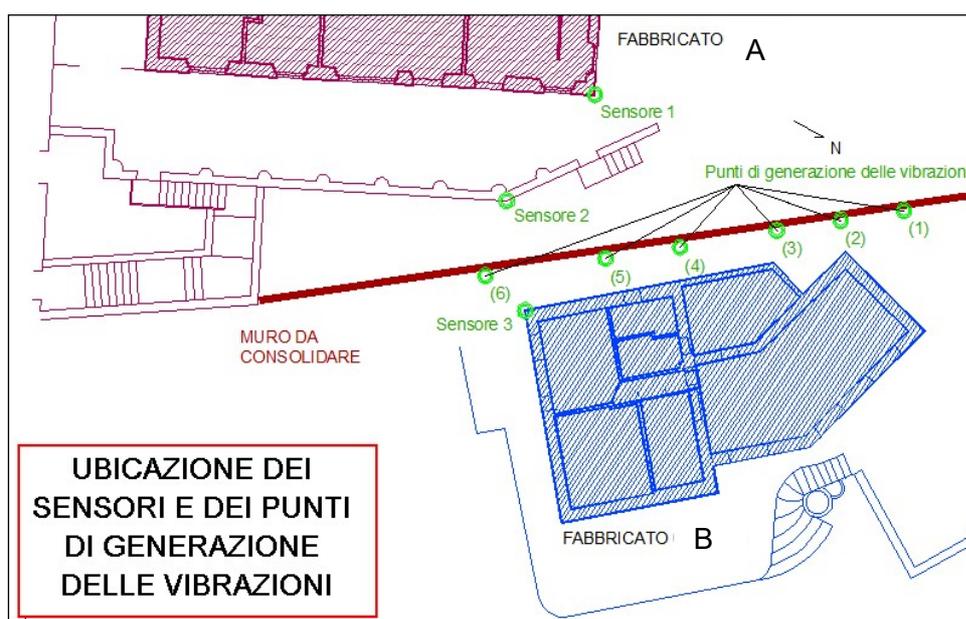


Fig. 6.2/A: Planimetria dell'area di monitoraggio ed ubicazione dei tre sensori e dei punti di energizzazione

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 34 di 39	Rev. 0

Per ogni punto di generazione delle vibrazioni sono state effettuate più registrazioni in modo da avere una maggiore validità statistica.

Nell'immagine in Fig. 6.2/B si riportano i sismogrammi relativi alla registrazione n. 23 ed alle vibrazioni generate nel punto 6.

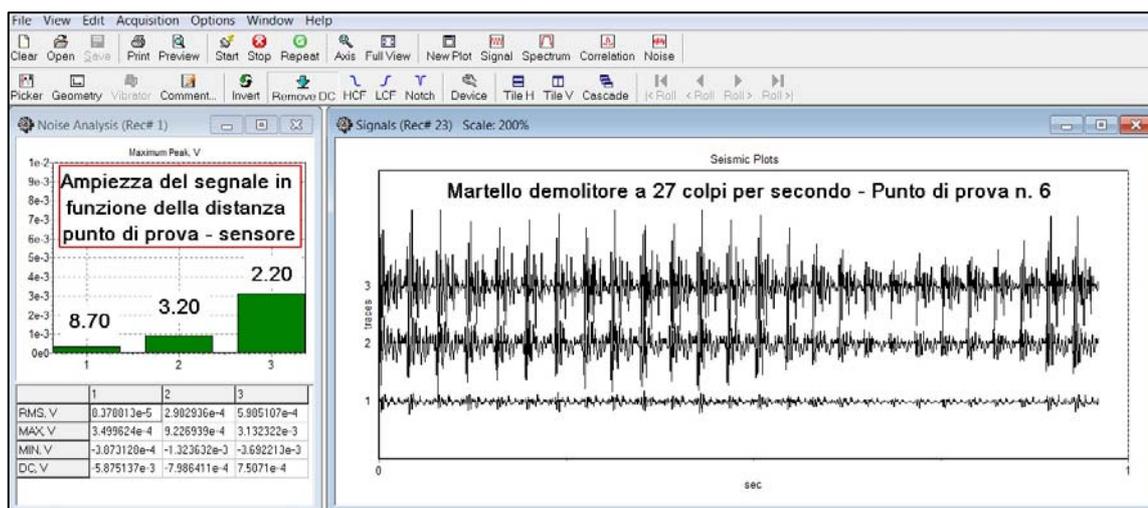


Fig. 6.2/B: Esempio delle registrazioni effettuate: Sismogrammi relativi alla registrazione n. 23 ed alle vibrazioni generate nel punto 6

Per ottenere il valore scalare massimo della velocità di vibrazione, tutti i dati sono stati processati come nell'esempio citato al capitolo precedente, cioè moltiplicando i valori del segnale elettrico (in mV) per il coefficiente di conversione in mm/sec ($1\text{mm/sec} = 20\text{mV}$) e per il rapporto tra vettore registrato ed il rapporto tra le componenti orizzontale e verticale, misurato nel corso del precedente monitoraggio (2.78).

Poiché il martello a fondo foro della perforatrice per realizzare il pozzo o i micropali in progetto, trasmette alla roccia un'energia molto superiore a quella che è possibile generare tramite il martello demolitore usato per il test, è stato necessario trovare un rapporto di correlazione.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 35 di 39	Rev. 0

Tab. 6.2/A: Informazioni sull'energia di impatto a disposizione della perforatrice

Parametri del sistema di perforazione							Parametri derivati				
massa del pistone e della punta da 152 mm	diámetro del pistone	diámetro della cavità interna	area della corona circolare	pressione aria compressa		numero di colpi	forza esercita sulla massa del pistone e punta	accelerazione prodotta sulla massa pistone + punta	tempo di applicazione della Forza un infinitesimo prima dell'impatto	velocità di impatto	energia impatto
Kgp	mm	mm	cm ²	Bar	N/cm ²	n/sec	N	m/sec ²	sec	m/sec	J
20,15	76,02	31,6	37,5	12	120	18	4505,50	223,6	0,026	5,8	334,7

L'impresa esecutrice del pozzo nell'area test ha fornito le informazioni sull'energia di impatto a disposizione della perforatrice, come riportato in Tab. 6.2/A.

Riassumendo: le energie fornite dai due differenti sistemi sono:

334.7 J per il martello a fondo foro;
30 J per il martello demolitore Hilti.

il loro rapporto è pari a 11.5

Applicando tale rapporto come fattore moltiplicativo, ai dati ottenuti tramite il martello demolitore, sono stati ottenuti i valori riportati nel grafico di Fig. 6.2/C:

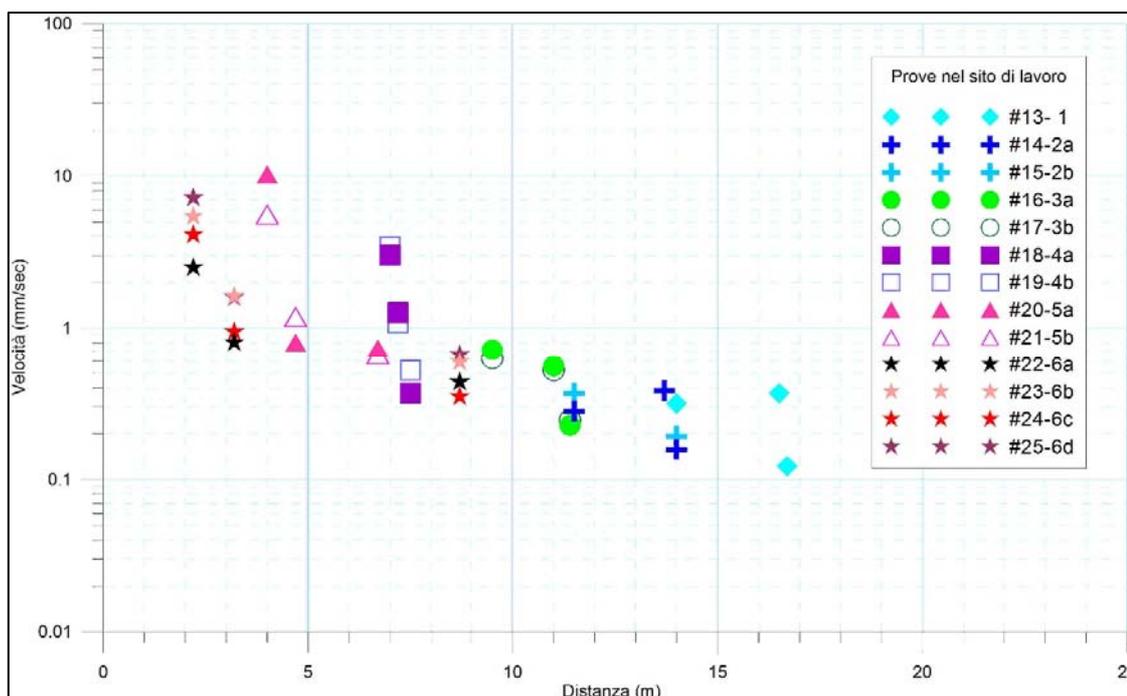


Fig. 6.2/C: Dati relativi all'azione del martello demolitore moltiplicati per il coefficiente 11.5 al fine di simulare l'azione del martello a fondo foro

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 36 di 39	Rev. 0

Nel grafico in Fig. 6.2/D sono riportati i dati delle prove effettuate nel sito test ed in quello del progetto e mostrano una discreta correlazione, confermando la validità della procedura seguita e la possibilità di estendere al sito del progetto, la curva di dissipazione ottenuta nel sito Test.

Questa funzione è riportata in Fig. 6.2/E dalla quale risulta che l'esecuzione di micropali mediante il sistema di scavo a percussione con martello a fondo foro, può comportare il rischio di provocare delle lesioni agli edifici posti in adiacenza alla zona di lavoro:

- entro una distanza di circa 3.5 m dalla sorgente potrebbero verificarsi lesioni di carattere strutturale (fessure e distacco di parti di intonaco);
- entro una distanza di quasi 6 m dalla sorgente potrebbero verificarsi lesioni di carattere estetico (micro-fessure negli intonaci).

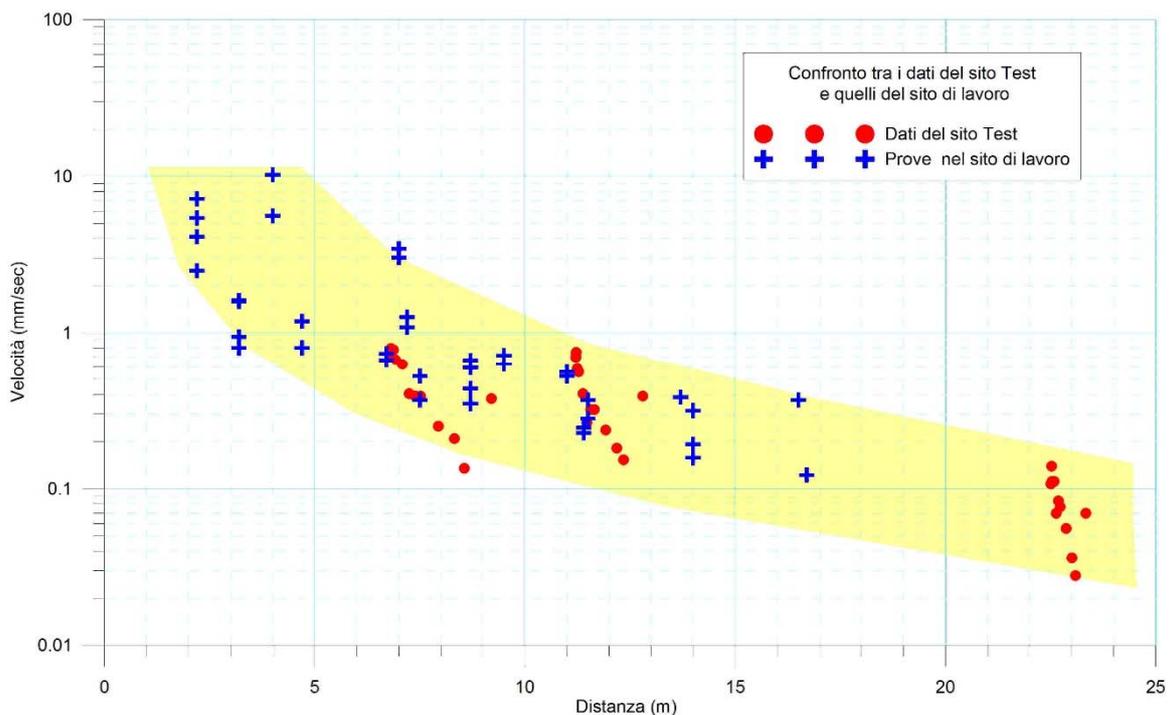


Fig. 6.2/E: Confronto grafico dei dati ottenuti nel sito in cui è previsto di realizzare i micropali (crochette blu) e nel sito Test (pallini rossi)

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 37 di 39	Rev. 0

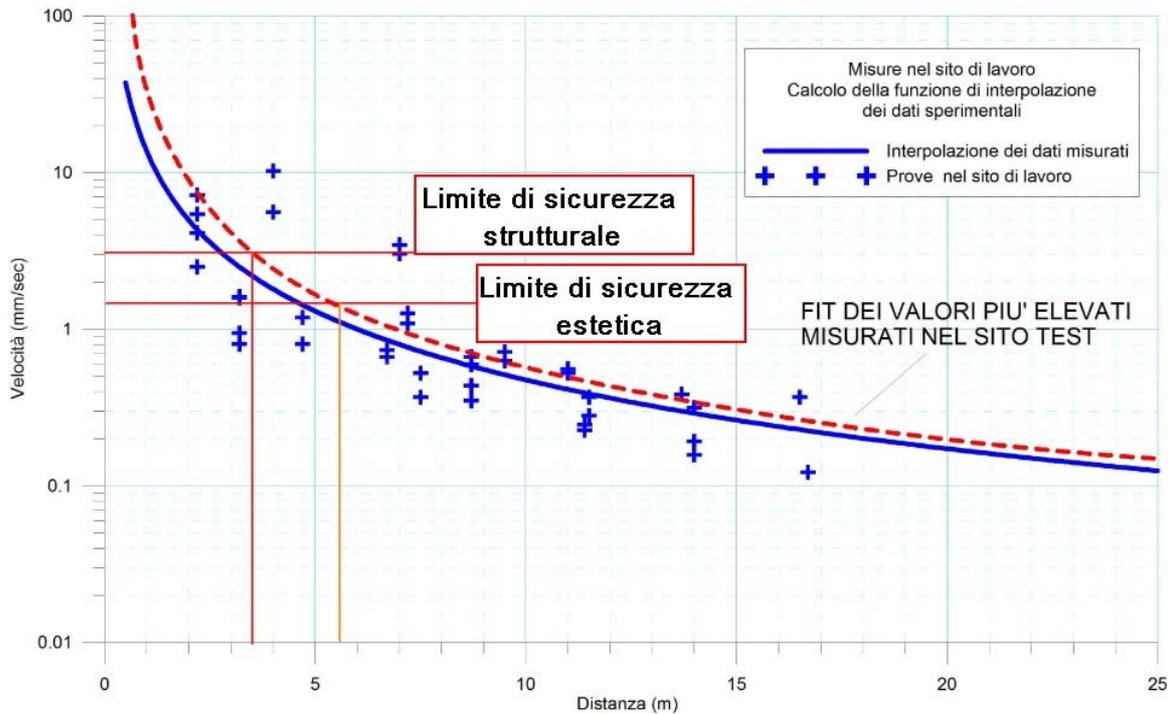


Fig. 6.2/F: Curva di smorzamento dell'ampiezza della velocità di vibrazione con la distanza dalla sorgente di emissione con evidenziati i limiti di sicurezza strutturale ed estetica.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 38 di 39	Rev. 0

7 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio evidenzia come la vibrazione prodotta da una sorgente energizzante si attenua e si smorza con la distanza dall'origine, in funzione delle caratteristiche dei terreni attraversati (Fig. 2/A) e come, a parità dell'energia fornita dalla sorgente (accelerazione), l'ampiezza della velocità di vibrazione diminuisca rapidamente con l'aumentare della frequenza (Fig. 3.1/A).

Si è visto, inoltre, che la sensibilità degli edifici all'azione delle vibrazioni dipende molto dal contenuto di frequenze della vibrazione stessa che è tanto più pericolosa quanto più si avvicina alla frequenza propria della struttura coinvolta.

Sono stati descritti gli utensili comunemente utilizzati per realizzare le opere trenchless in progetto, evidenziando che la loro conformazione è finalizzata a produrre scaglie di piccola pezzatura per ottimizzare sia la produttività dell'avanzamento, sia la rapidità nella rimozione e nell'allontanamento dei frammenti. Un accorgimento progettuale utile ad incrementare l'efficienza degli utensili è, infatti, quello di aumentare il numero dei punti di contatto con la roccia per coprire al meglio la superficie del fronte di avanzamento e ripartire le forze sul fronte, minimizzando le sollecitazioni sui singoli denti (vedi Fig. 4/A e Figg. 4/D, 4/E, 4F).

È opportuno notare che, anche se ad una elevata qualità della roccia corrisponde una elevata velocità di trasmissione della vibrazione ed una minore capacità di attenuazione, quanto maggiore è la qualità della roccia integra (generalmente quantizzata in termini di resistenza a compressione monoassiale), tanto minore è la dimensione dei denti dell'utensile (per evitare che questi si spezzino piuttosto che rompere la roccia). Inoltre, un numero elevato dei punti di contatto, provoca una riduzione della dimensione delle superfici di distacco dei frammenti e l'emissione di vibrazioni di ampiezza molto modesta con elevata frequenza. Pertanto, utensili utilizzati nella realizzazione dei minitunnel o dei pozzi *raise boring*, generano vibrazioni di frequenza più elevata rispetto a quelle considerate potenzialmente pericolose per gli edifici (che le Normative vigenti indicano generalmente inferiori 10Hz).

Per quantificare il fenomeno dello smorzamento delle vibrazioni con la distanza dalla sorgente, sono stati portati ad esempio due monitoraggi effettuati in condizioni di elevata energia della sorgente, dai quali risulta che la realizzazione di micropali scavati in roccia con martello a fondo foro, potrebbe risultare critica nei confronti di eventuali edifici presenti in adiacenza all'area di intervento, fino ad una distanza di circa 6 m dalla sorgente (Fig. 6.2/E).

Si evidenzia che la normativa relativa alla progettazione dei metanodotti in oggetto prevede che la condotta sia posta ad una distanza planimetrica di almeno 13,5 m dagli edifici, una distanza più che doppia rispetto a quella massima per la quale sono potenzialmente possibili danni estetici agli edifici, se fosse in azione un martello perforatore a fondo foro, e circa quattro volte maggiore rispetto a quella per la quale sarebbero potenzialmente possibili danni strutturali.

Considerando che a fronte delle elevate energie trasmesse al terreno dai colpi del martello a fondo foro, non risultano a rischio gli edifici posti a distanza superiore a 6 m dalla sorgente, è possibile affermare che le vibrazioni prodotte con l'utilizzo delle tecnologie microtunnelling e *raise boring* non possono arrecare danni agli edifici limitrofi.

	PROGETTISTA 	UNITÀ 000	COMMESSA 023089
	LOCALITÀ Regione Liguria	SPC. LA-E-83022	
	PROGETTO Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 39 di 39	Rev. 0

Infatti, l'ampiezza di tali vibrazioni è prevedibilmente inferiore di almeno un ordine di grandezza rispetto a quelle prodotte dal martello a fondo foro e la distanza dagli edifici è ampiamente di sicurezza rispetto a quella rivelatasi potenzialmente insicura nel sito di monitoraggio.