

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 1 di 58	<b>Rev.</b> 0

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

**VALUTAZIONE DELLE INTERFERENZE POTENZIALI  
INDOTTE DAI LAVORI DI COSTRUZIONE  
Castello dei Fieschi – Loc. Monte Tugio**

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

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 2 di 58	<b>Rev.</b> 0

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>4</b>
1.1	Scopo del lavoro	4
1.2	Termini e definizioni	5
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE DELL'AREA INTERESSATA DAI LAVORI</b>	<b>6</b>
2.1	Analisi preliminare del sito di interesse storico-archeologico	6
2.2	Analisi geologica e geomorfologica del sito	7
2.2.1	Inquadramento geologico	7
2.2.2	Assetto strutturale e geomorfologico locale	7
2.2.3	Caratterizzazione geofisica	9
2.3	Selezione della metodologia di attraversamento	10
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA THRUST BORING PER L'ATTRAVERSAMENTO IN SOTTERRANEO DEL SITO</b>	<b>12</b>
3.1	Aspetti generali della tecnica	12
3.2	Caratteristiche delle macchine operatrici	14
<b>4</b>	<b>ANALISI STRUTTURALE DEI RESTI ARCHEOLOGICI</b>	<b>18</b>
4.1.1	Valutazione preliminare di suscettibilità alle vibrazioni	23
4.1.2	Altre cause di rischiosità presenti non correlate alle attività di costruzione	24
4.1.3	Prime valutazioni sulle geometrie del progetto di trivellazione	24
<b>5</b>	<b>NORMATIVE DI RIFERIMENTO PER IL MONITORAGGIO VIBRAZIONALE</b>	<b>26</b>
5.1	Premessa	26
5.2	Concetti generali sulle vibrazioni	26
5.3	Principali normative	28
<b>6</b>	<b>INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEI RISCHI</b>	<b>33</b>
6.1	Mitigazione dei rischi connessi alla trivellazione	33
6.1.1	Mitigazioni in fase di progetto	34
6.1.2	Mitigazioni in fase di appalto	34
6.1.3	Mitigazioni in fase esecutiva	34

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 3 di 58	<b>Rev.</b> 0

6.2	Mitigazione dei rischi connessi alla realizzazione del pozzo di spinta	35
6.3	Mitigazione dei rischi dovuti a cause naturali	36
6.4	Mitigazione dei rischi con interventi di monitoraggio	36
6.5	Mitigazione dei rischi con interventi di emergenza	36
7	<b>PROPOSTA DI INTERVENTI DI MONITORAGGIO</b>	38
7.1	Monitoraggio geometrico	38
7.1.1	Monitoraggio in fase di ante opera	39
7.1.2	Monitoraggio in fase di corso d'opera	39
7.1.3	Monitoraggio post opera	40
7.2	Monitoraggio suppletivo	40
8	<b>CONCLUSIONI</b>	42
	<b>ANNESSE 1: ESEMPI DI REGISTRAZIONI DI VIBRAZIONI DOVUTE A MACCHINE OPERATRICI</b>	45
	Esempio 1: Registrazione delle vibrazioni durante una perforazione a roto-percussione per ricerca di acqua	45
	Esempio 2: Vibrazioni generate da martello demolitore su roccia in vicinanza di edifici	49
	A1-1 Considerazioni conclusive della relazione “Studio previsionale sulle vibrazioni prodotte durante la realizzazione delle opere trenchless in progetto” -SPC-L-83022	53
	<b>ANNESSE 2: SUSCETTIBILITÀ DEL CORPO UMANO ALLE VIBRAZIONI</b>	55
	• A2-1 Le frequenze naturali del corpo umano	57

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 4 di 58	<b>Rev.</b> 0

## 1 INTRODUZIONE

Nel contesto del progetto denominato “Metanodotto Sestri Levante – Recco DN400 (16”), DP 75 bar ed opere connesse” un tratto del tracciato di progetto si sviluppa sulla cresta del Monte Tugio sulla cui cima, alla progressiva km 39.440 sono presenti i resti archeologici di una postazione di avvistamento fortificata.

L’area è ritenuta di interesse storico-archeologico (SME) ed è individuata dal PTCP regionale come: “*tracce del Castello dei Fieschi*”.

In adiacenza al manufatto storico sono presenti dei fabbricati e impianti di telecomunicazione, dai quali il tracciato deve rispettare le distanze previste dalla normativa vigente; la morfologia acclive dei versanti circostanti preclude ogni possibilità che il tracciato aggiri la struttura storica.

Il progetto prevede di utilizzare una tecnologia trenchless per evitare qualunque interferenza diretta con i resti del castello medioevale passando al di sotto dei ruderi con un ampio franco di sicurezza.

Il sito è stato oggetto di indagini archeologiche dirette richieste dalla SABAP Liguria ad integrazione della VI Arch, nell’ambito della procedura di SIA (MBAC-SABAP-LIG. 22960 del 14/10/2019).

A completamento delle indagini archeologiche effettuate sul campo nel gennaio 2020, al fine di avere un quadro il più possibile esaustivo sulle potenziali interferenze dirette e/o indirette tra le attività in progetto ed il manufatto storico, la Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per la città Metropolitana di Genova e le Province di Imperia, La Spezia e Savona ha richiesto un approfondimento relativo all’individuazione delle tecnologie e delle procedure operative più opportune per realizzare la condotta in progetto garantendo la stabilità e l’integrità dei resti archeologici durante i lavori di costruzione ed in particolare nel corso della trivellazione.

### 1.1 Scopo del lavoro

Scopo del presente lavoro è:

- riferire delle analisi tecniche effettuate per stabilire la metodologia ottimale per realizzare la condotta evitando l’interferenza con i resti archeologici e garantendone la sicurezza durante i lavori;
- analizzare i rischi connessi all’esecuzione di lavori nelle zone limitrofe all’area da tutelare ed individuare i possibili interventi di mitigazione;
- proporre una metodologia di monitoraggio in corso d’opera in grado di:
  - verificare l’efficacia delle precauzioni previste per la massima mitigazione dei rischi connessi alle attività di costruzione;
  - consentire la modulazione ottimale dei parametri di perforazione in funzione della distanza dall’opera da proteggere e dei risultati delle attività di monitoraggio;
  - attivare gli eventuali interventi di protezione aggiuntivi qualora se ne riscontrasse l’utilità.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 5 di 58	<b>Rev.</b> 0

La presente relazione rimanda allo “Studio previsionale sulle vibrazioni prodotte durante la realizzazione delle opere trenchless in progetto” SPC. LA-E-83022 nel quale viene stimata l'intensità delle vibrazioni prevedibilmente generate durante le fasi di avanzamento di alcune tecnologie trenchless, con particolare riferimento alla possibilità che queste possano recare danno agli edifici situati in prossimità dei lavori.

Lo studio citato comprende anche dei riferimenti alle normative per la classificazione della pericolosità delle vibrazioni in funzione delle caratteristiche delle stesse e della tipologia di edificio soggetto alle vibrazioni.

## 1.2 Termini e definizioni

Si anticipano in questo paragrafo alcune definizioni tratte dalla norma italiana UNI 9916 “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici” del 2004:

**edificio:** Costruzione qualsiasi classificabile secondo le tre categorie seguenti:

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

**danno architettonico (o di soglia):** Effetto residuo delle vibrazioni che determina alterazione estetica o funzionale dell'edificio senza comprometterne la stabilità strutturale o la sicurezza degli occupanti. Il danno architettonico si presenta in molti casi con la formazione o l'accrescimento di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o sulle superfici intonacate o nei giunti di malta delle costruzioni in mattoni.

**danno maggiore:** Effetto che si presenta con formazione di fessure più marcate, distacco e caduta di gesso o pezzi di intonaco fino al danneggiamento di elementi strutturali (per esempio fessure nei pilastri e nelle travature, apertura di giunti).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 6 di 58	<b>Rev.</b> 0

## 2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE DELL'AREA INTERESSATA DAI LAVORI

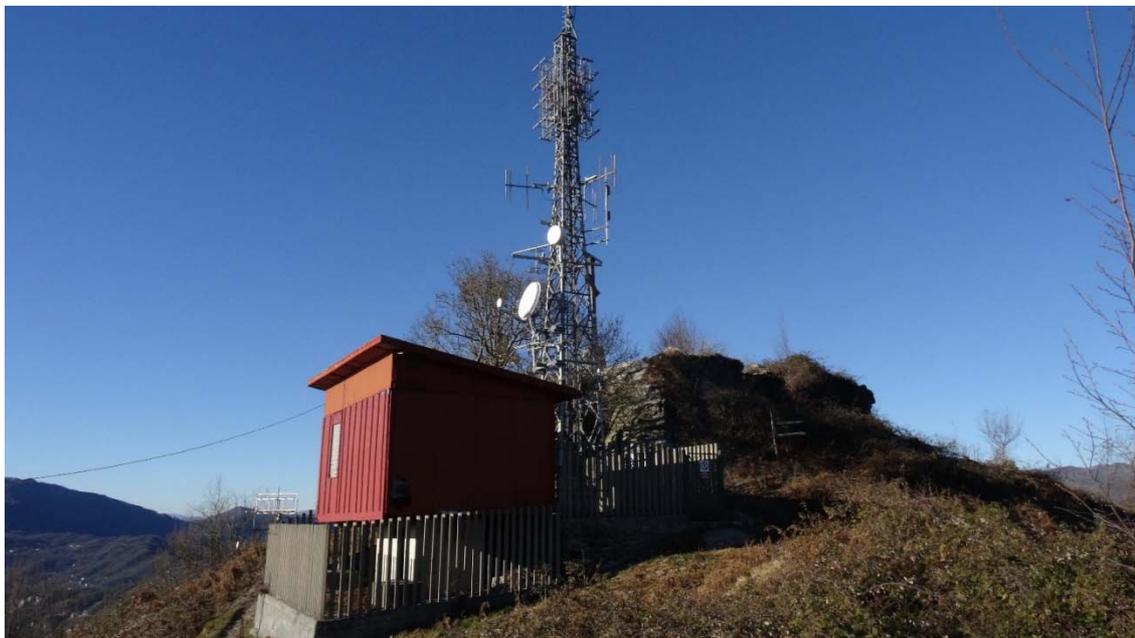
Nel corso del sopralluogo effettuato per valutare le situazioni più critiche riscontrate lungo il tracciato di progetto, sul sito in esame è stato effettuato un rilievo geologico, geomorfologico e geomeccanico speditivo allo scopo di:

- valutare la stabilità generale dell'area interessata dal passaggio della condotta con particolare riguardo alle aree più prossime ai resti del Castello,
- identificare le possibili alternative di tracciato locali,
- individuare la soluzione ottimale tra quelle ritenute fattibili.

### 2.1 Analisi preliminare del sito di interesse storico-archeologico

I resti archeologici del Castello dei Fieschi occupano la sommità della rupe che interrompe la continuità di un lungo percorso in cresta del metanodotto in progetto. Il versante settentrionale è acclive e caratterizzato da dissesti descritti in seguito. Sul versante meridionale è presente una antenna a traliccio con un basamento fondato sulla roccia; all'antenna è associato un edificio tecnico realizzato quasi a ridosso del rudere.

La figura 2.1/A mostra il lato sud-orientale della cima evidenziando le strutture antropiche realizzate alla base delle mura perimetrali della fondazione del castello



**Figura 2.1/A:** lato sud-orientale della cima: in primo piano l'edificio di servizio alla antenna; dietro questa i resti delle mura di contenimento della fondazione del castello.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 7 di 58	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## 2.2 Analisi geologica e geomorfologica del sito

### 2.2.1 Inquadramento geologico

Il tracciato del metanodotto attraversa unità geologiche appartenenti al Supergruppo del Vara presente nel settore sommitale dell'edificio strutturale dell'Appennino Settentrionale, costituito nell'area di studio fondamentalmente dal Dominio Ligure interno, rappresentato dal Supergruppo del Vara.

Il Supergruppo del Vara è costituito da un basamento formato da relitti di litosfera oceanica di età giurassica al quale sono sovrapposte delle formazioni pelagiche di ambiente oceanico a composizione siliceo-calcareo a loro volta ricoperte da una potente successione di formazioni torbiditiche calcareo-arenacee che inizia con il Gruppo degli Scisti della Val Lavagna (*szo*), Arenarie del Gottero (*got*). Gli acronimi indicati in corsivo fanno riferimento alla legenda ufficiale delle Note Illustrative dei fogli CARG sopra citati presente nella carta geologico-geomorfologica (Dis. LB-D-83209) fornita tra la documentazione del SIA.

L'area in studio interessa le Ardesie di Monte Verzi che costituiscono l'ossatura dei medi versanti della Val Lavagna. Sono formate da torbiditi pelitico-arenacee in strati silico-clastici medio-spessi, alternati a strati marnosi e calcareo-marnosi, chiamati comunemente ardesie, in strati e banchi di spessore variabile tra uno e dieci metri, talvolta superiori. Le intercalazioni di argilliti, in strati molto sottili, sono quantitativamente subordinate. Negli strati silicoclastici il rapporto a/p è inferiore o prossimo all'unità, mentre diviene molto inferiore all'unità negli strati calcareo-marnosi. Le arenite degli strati calcareo-marnosi hanno composizione mista, prevalentemente quarzo-fillosilicatica, ma con significativa frazione di frammenti micritici calcarei. L'età è Cretacea (Campaniano-Maastrichtiano).

### 2.2.2 Assetto strutturale e geomorfologico locale

La rupe che costituisce la cima di Monte Tugio è parte di una lunga linea di crinale orientata su un asse NO-SE; la rupe risalta morfologicamente grazie alla presenza di uno sperone roccioso immergente verso il lato meridionale della cresta con un angolo elevato.

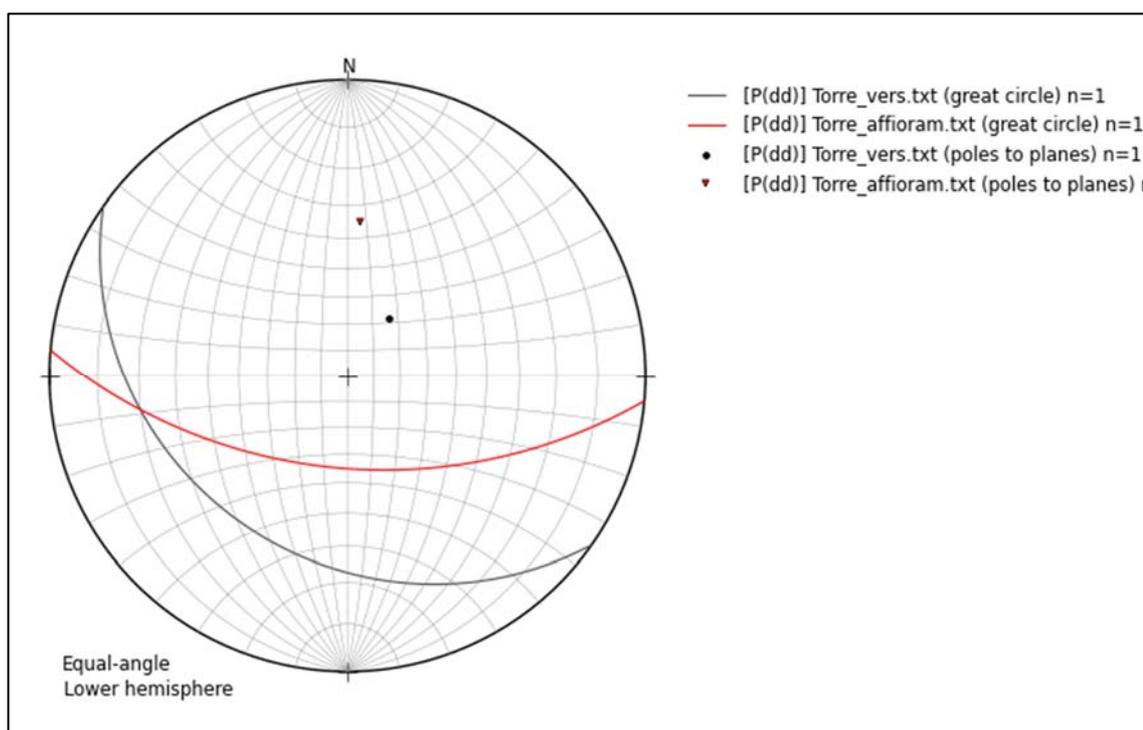
Il substrato roccioso sul quale si appoggia il castello appare fratturato ed interessato da almeno tre sistemi di giunti, tra i quali prevale quello parallelo alla stratificazione. Questa immerge a franapoggio con una inclinazione maggiore di quella del pendio e consente di escludere, in quanto non possibili cinematicamente, la possibilità che si verifichino scivolamenti planari alla scala del versante e delle fondazioni del castello.

Nella figura 2/B sono riportati schematicamente un piano medio rappresentativo dei giunti di stratificazione della roccia (in rosso) affiorante sul lato sud della rocca a NW del traliccio ed il piano del versante (in nero) a W del traliccio. La pendenza degli strati rocciosi affioranti è stata stimata superiore ai 50° e quella del versante minore di 30° entrambi immergono indicativamente verso sud.

La figura 2/B mostra la proiezione stereografica del piano rappresentativo della giacitura della roccia affiorante sulla quale poggia il castello (in rosso) e quello rappresentativo del terreno del versante sottostante (in nero). Si tratta di giaciture stimate ma dalle quali è possibile vedere che, rispetto al castello il versante è stabile nei confronti dello scivolamento planare verso SE (dove è stata installata l'antenna con il relativo edificio)

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fig. 8 di 58	<b>Rev.</b> <b>0</b>

ed è potenzialmente<sup>1</sup> instabile sul lato sud-occidentale. Il piano che rappresenta la roccia, infatti, è più inclinato del versante dal quale affiora per tutto un ampio arco prevalentemente contenuto nel quadrante di SE. Sul lato ovest, però la situazione si inverte e si entra nel campo della potenziale instabilità qualora l'angolo di immersione del piano di discontinuità superi i 20° rispetto all'angolo di immersione del versante<sup>2</sup>.



**Figura 2/B: analisi di stabilità semplificata, su diagramma di Wulff (emisfero inferiore), relativo all'affioramento della roccia di fondazione del “Castello dei Fieschi”. (arco rosso= proiezione del piano rappresentativo dell'affioramento di roccia; arco nero = proiezione del piano rappresentativo della media del versante; triangolo rosso e punto nero poli dei due piani precedenti)**

Il versante settentrionale si caratterizza per la presenza di due cigli di scarpata: uno orientato a nord e l'altro ad est, separati da una cresta che si allunga verso NE. In

<sup>1</sup> Lo scorrimento planare degli strati superficiali ed alterati di formazioni stratificate a franapoggio, costituisce uno dei rischi potenziali che deve essere analizzato per garantire la stabilità della trincea di posa e del versante durante la costruzione. Una analisi cinematica, anche se sommaria come in questo caso, consente di attestare la stabilità della configurazione stratificazione-versante verso tale tipo di dissesto in base solo a fattori geometrici e guidare l'attenzione per eventuali rilievi più dettagliati verso le aree “potenzialmente instabili” nelle quali, per completare la verifica di stabilità, dovranno essere stimati i parametri di resistenza al taglio in base alle condizioni dei giunti (rugosità, caratteristiche del riempimento, ecc.). Sul versante opposto (nord), dove gli strati sono a reggipoggio, lo scivolamento planare non è possibile ma è possibile che i dissesti, in genere superficiali si verifichino per ribaltamento delle testate o per creeping degli strati soggetti alla alterazione meteorica.

<sup>2</sup> Il caso specifico presentato in figura presenta una condizione al limite del 20°, quindi ancora nel campo delle stabilità, tuttavia il piano che schematizza il versante rappresenta una situazione morfologica molto articolata proprio nel settore sudoccidentale del castello; è possibile che la vegetazione ed il detrito coprano modesti scivolamenti planari delle testate degli strati disarticolati dai sistemi delle discontinuità che attraversano i piani di strato.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 9 di 58	<b>Rev.</b> 0

entrambi si rinvergono fenomeni di dissesto causati da un insieme di fattori concomitanti. In particolare, la posizione sommitale al rilievo inasprisce gli effetti della degradazione meteorica che agisce più profondamente sui livelli della formazione meno competenti ed è accentuata dalla presenza di sistemi dei giunti trasversali alla stratificazione. Sul lato nord, infatti, affiorano i livelli stratigraficamente sottostanti alla roccia ardesiaca, più competente, affiorante in prevalenza sul lato sud del castello.

Il dissesto sul lato nord coinvolge anche parte dei resti delle strutture murarie più esterne del castello, mentre sul lato est la scarpata si trova ancora ad alcuni metri dal muro che cinge la fondazione del castello.

Il complesso delle strutture esistenti sulla cima e la morfologia acclive dei versanti laterali non lascia spazio per realizzare la condotta in progetto con tecnologie tradizionali quindi per superare questa criticità progettuale è necessario ricorre ad una tecnologia di attraversamento sotterraneo (*"trenchless"*).

### 2.2.3 Caratterizzazione geofisica

Le indagini sismiche eseguite sui siti interessati dalle principali opere trenchless previste lungo il tracciato del metanodotto in progetto hanno permesso di valutare la velocità di propagazione media delle onde sismiche nei differenti siti. In particolare, il metodo di prospezione sismica prevede l'energizzazione del terreno con colpi singoli di una mazza da 11 kg che impatta su una piastra di nylon rigido appoggiata al terreno e la registrazione delle onde sismiche da una serie di sensori posti a distanze crescenti fino ad oltre 150m.

Le informazioni ottenute hanno permesso di ricostruire differenti sezioni di tomografie sismiche in cui la seguente sismo-stratificazione è sempre presente seppure con spessori differenti:

- uno strato superficiale molto allentato, con velocità sismiche inferiori a 700-800m/s, capace di attenuare fortemente le vibrazioni;
- uno strato intermedio, con velocità sismiche variabili tra 700-800 e 1600-1800m/s, 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/s, in cui l'attenuazione è generalmente modesta.

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, quali trincee o sbancamenti in senso lato, che saranno realizzate in corrispondenza delle zone di imbocco e di uscita dell'attraversamento in sotterraneo previsto per il sito del castello, interessano generalmente modesti spessori di coltri eluvio colluviali o detritiche 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 rilevate durante la campagna geofisica indiretta.. La bassa elasticità di questi materiali non consente di propagare efficacemente le vibrazioni generate dai macchinari operanti, quindi tali vibrazioni verranno smorzate rapidamente.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 10 di 58	<b>Rev.</b> 0

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

### 2.3 Selezione della metodologia di attraversamento

Nel contesto geologico e geomorfologico precedentemente descritto, considerando anche la presenza del locale tecnico associato al traliccio del ripetitore che impedisce il passaggio sul versante sud, non è possibile individuare percorsi alternativi per superare la cima del rilievo su cui sorge il castello.

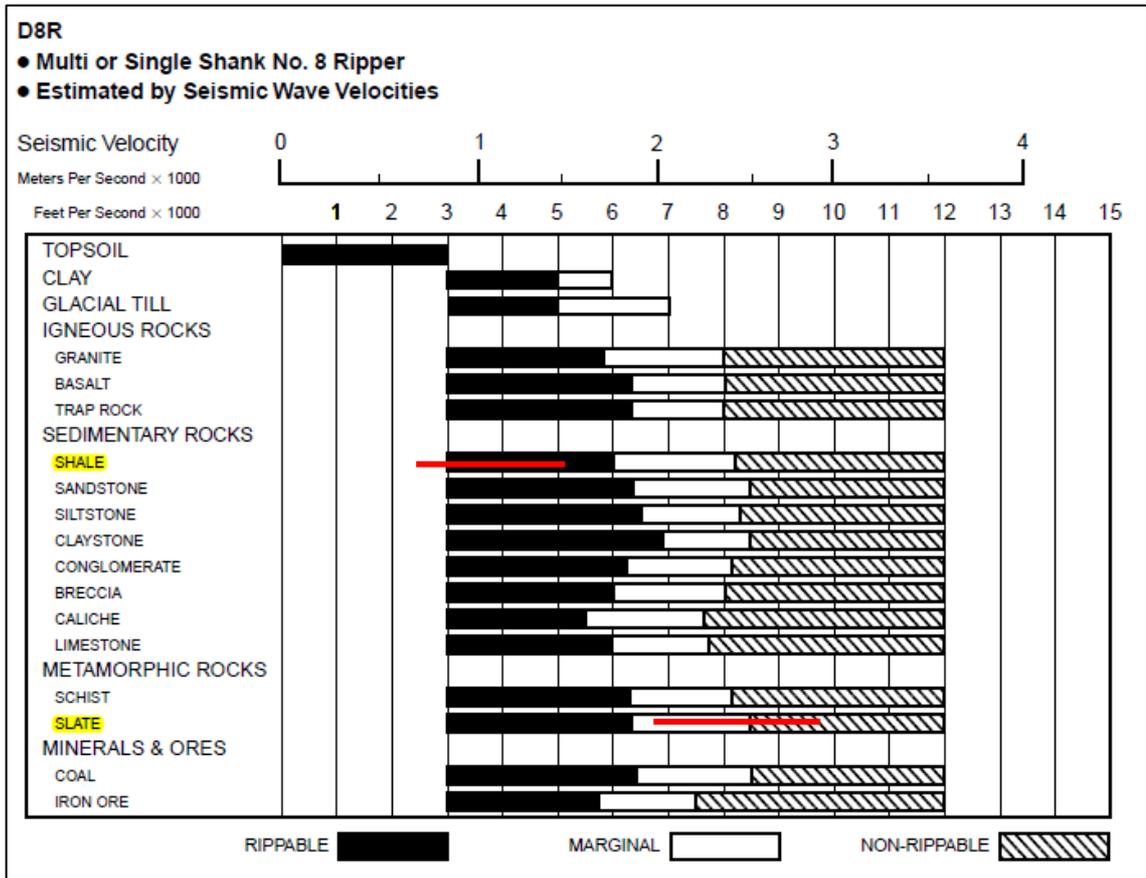
I resti archeologici del castello che devono essere salvaguardati occupano circa 30 metri nella la parte centrale di una rupe che si estende per circa 60-70 metri tra le due creste strette percorse dal tracciato in progetto. Si tratta di una distanza relativamente breve che è possibile superare mediante la tecnologia di attraversamento in sotterraneo "spingitubo" (*thrust boring*): una tecnologia relativamente semplice e consolidata che verrà descritta nel Capitolo 3.

L'applicazione di questa metodologia richiede la verifica di una serie di aspetti, quali la lunghezza dell'attraversamento, le caratteristiche geomeccaniche dei terreni di scavo; la presenza di falda acquifera.

L'attraversamento in sotterraneo del sito di interesse dovrebbe svilupparsi per una lunghezza inferiore a 70 m, pertanto compatibile con i limiti di applicazione del metodo.

Nel caso in oggetto, la posizione in cresta consente di escludere la possibilità che la trivellazione intercetti una falda acquifera. Inoltre, le condizioni morfologiche del sito, e quelle litologiche e giaciture della formazione minimizzano la percentuale di acqua di infiltrazione rispetto a quella ruscellante, quindi, anche in casi di eventi meteorologici particolarmente intensi e prolungati si esclude la presenza di flussi significativi entro il volume di roccia interessato dalla trivellazione. La trivellazione si svilupperà prevalentemente in materiale roccioso, pertanto l'utilizzo di una fresa per roccia, con utensili di scavo idonei alle caratteristiche geomeccaniche dei terreni presenti lungo l'asse di trivellazione, consentirà di realizzare con successo l'attraversamento, garantendo anche una maggiore scelta nella tipologia degli utensili di scavo ed una maggiore possibilità di intervento per superare eventuali difficoltà di avanzamento dovute a situazioni geologiche impreviste.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 11 di 58	<b>Rev.</b> 0



**Figura 2/C: Diagramma di scavabilità per varie tipologie di rocce secondo il Caterpillar Performance Handbook Edition 29; in evidenza le due litologie prevalenti sul sito in esame e la stima dei relativi campi di resistenza (tratti rossi).**

La figura 2/C mostra il diagramma di scavabilità, relativo al “ripper” Caterpillar D8R (il più piccolo del catalogo citato nella didascalia) nel quale sono evidenziate le due litologie prevalenti nella zona del progetto ed una valutazione delle relative caratteristiche meccaniche effettuata in base alle evidenze di superficie ed alle indicazioni desunte dalle indagini geofisiche.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 12 di 58	<b>Rev.</b> 0

### 3 METODOLOGIA THRUST BORING PER L'ATTRAVERSAMENTO IN SOTTERRANEO DEL SITO

#### 3.1 Aspetti generali della tecnica

La tecnica *thrust boring* (o spingitubo) consiste in un sistema meccanico (testa fresante) in grado di perforare il terreno sul fronte di un tubo che viene spinto tra una buca di partenza ed una di recupero; la tecnologia comprende un meccanismo a spirale, interno al tubo di spinta, che trasporta all'esterno il materiale rimosso dal fronte di scavo mentre il tubo stesso avanza.

La figura 3/A rappresenta schematicamente le varie fasi dell'esecuzione dello spingitubo:

- la macchina spingitubo è installata nella buca di spinta;
- la testa fresante viene spinta e fatta avanzare nel terreno tramite il tubo che resterà inserito nella trivellazione. Per il metanodotto si tratta di un tubo di protezione entro il quale sarà inserita la condotta di processo;
- al termine della trivellazione la testa fresante viene recuperata tramite un apposito scavo (buca di recupero) ed il tubo di spinta rimane in sito.

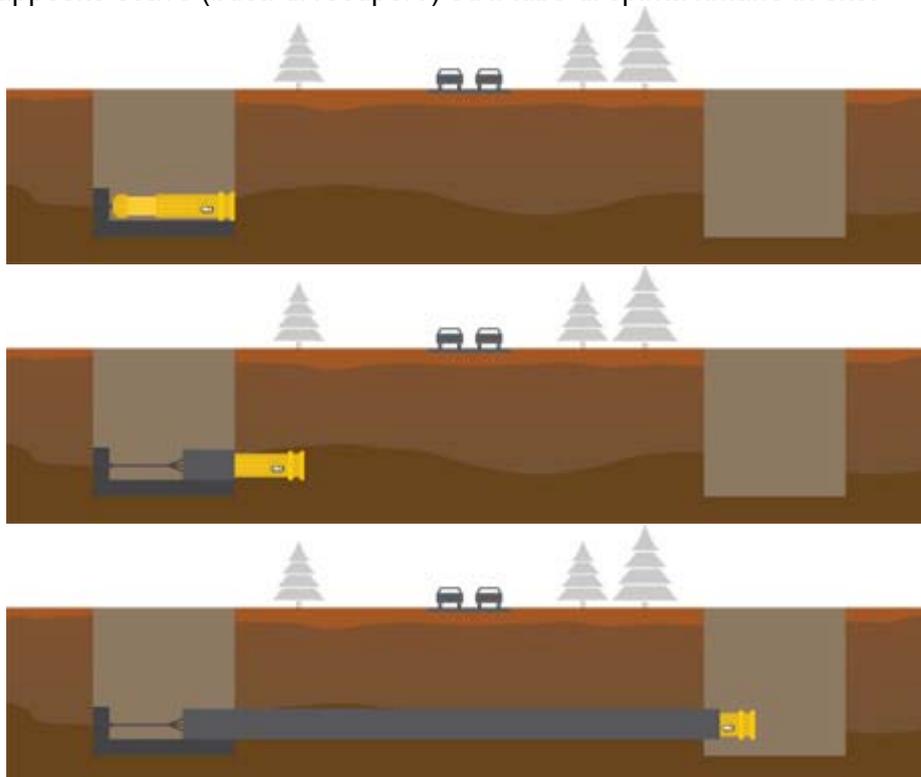
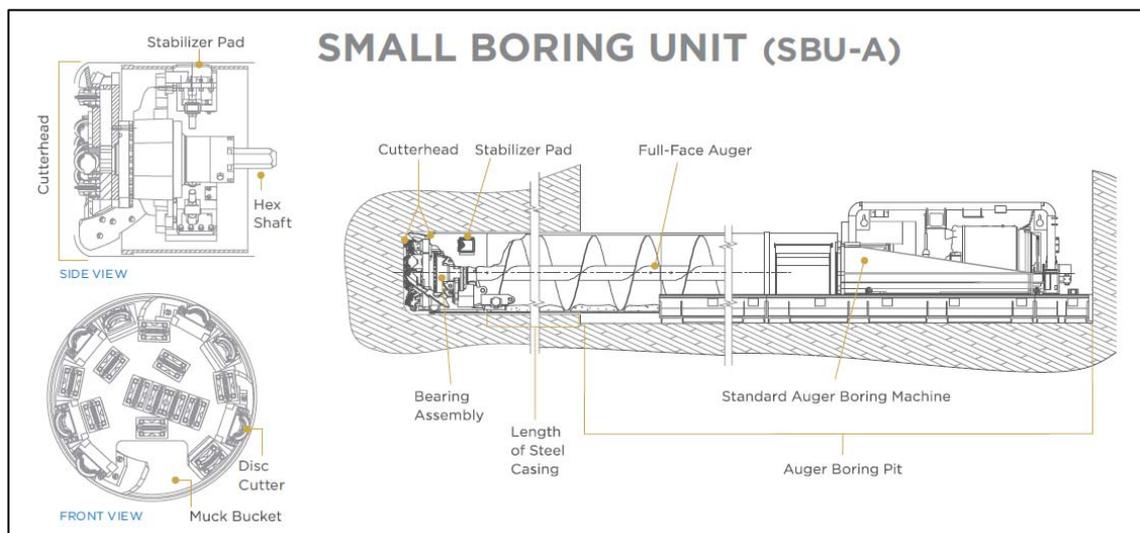


Figura 3/A: schema di esecuzione del *thrust boring*.

I punti di forza di questa tecnologia sono la realizzazione di una sezione di scavo poco superiore a quella della tubazione e la costante presenza della tubazione stessa che contrasta la deformazione della cavità e ne impedisce l'eventuale collasso.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 13 di 58	<b>Rev.</b> 0



**Figura 3/B: (a destra) sezione assiale del pozzo di spinta con la macchina in azione; (a sinistra) sezione e vista frontale di una testa fresante da roccia<sup>3</sup>.**



**Figura 3/C: esempio di pozzo di spinta con la macchina *thrust boring* in azione nel verso della sezione schematica in figura 3/B.**

La figura 3/B mostra uno schema del pozzo di spinta (*auger/thrust boring pit*) con le rotaie della macchina spingitubo montate a contrasto contro la parete sul lato destro e la macchina che spinge il tubo verso sinistra; sul fronte di scavo la fresa (*bearing assembly*) fa ruotare la testa fresante (*cutterhead*) mentre la coclea trascina indietro, verso

<sup>3</sup> L'Auger è la coclea che trasporta in esterno il materiale scavato sul fronte. Con *auger boring machine* ci si riferisce ad un particolare sistema di *thrust boring*. Essendo il sistema a coclea quello maggiormente applicato i due termini vengono generalmente usati come sinonimi

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 14 di 58	<b>Rev.</b> 0

l'esterno, la roccia frantumata. Il tubo in acciaio (*steel casing*), che ha un diametro poco inferiore alla testa rotante, sostiene le pareti del foro stabilizzandole.

La figura 3/C mostra un esempio di pozzo di spinta con la macchina *thrust boring* che spinge il tubo verso la sinistra dell'immagine.

La figura 3/B comprende anche un esempio di testa fresante specifica per roccia. Dal numero dei dischi è possibile intuire che ciascun utensile distacchi numerosi frammenti di roccia, durante una rotazione completa della testa, generando un complesso di vibrazioni ad elevata frequenza ma di modesta ampiezza per ciascun punto di contatto (cfr SPC LA-E-83022\_r0) e questo nonostante la velocità di rotazione della testa fresante sia piuttosto lenta, dell'ordine di 15-20 giri al minuto.

Sul fronte, tra le circonferenze incise dai dischi, si individuano le superfici di fratturazione della roccia e, dal loro rilievo rispetto alle incisioni circolari, si intuisce la modesta dimensione dei singoli frammenti distaccati. Alla modesta dimensione media dei frammenti corrisponde una modesta energia necessaria per distaccarli ed una modesta ampiezza dell'onda vibrazionale trasferita al terreno.

La figura 3/D: mostra un esempio di una fresa da roccia azionata contro il fronte di scavo in una formazione rocciosa di caratteristiche geomeccaniche analoghe a quella interessata dal progetto in esame

Al termine della perforazione vengono rimossi tutti i macchinari ed il tubo del metanodotto viene inserito all'interno del "tubo camicia" che diventa un tubo di protezione per il metanodotto stesso. Il tubo di protezione è destinato a rimanere nel terreno anche oltre la vita utile della condotta quindi non sarà più necessario effettuare ulteriori interventi; qualora nel futuro venisse rimosso il tratto di metanodotto, il tubo di protezione sarà intasato con malta cementizia per garantire, nel tempo, la stabilità del foro.

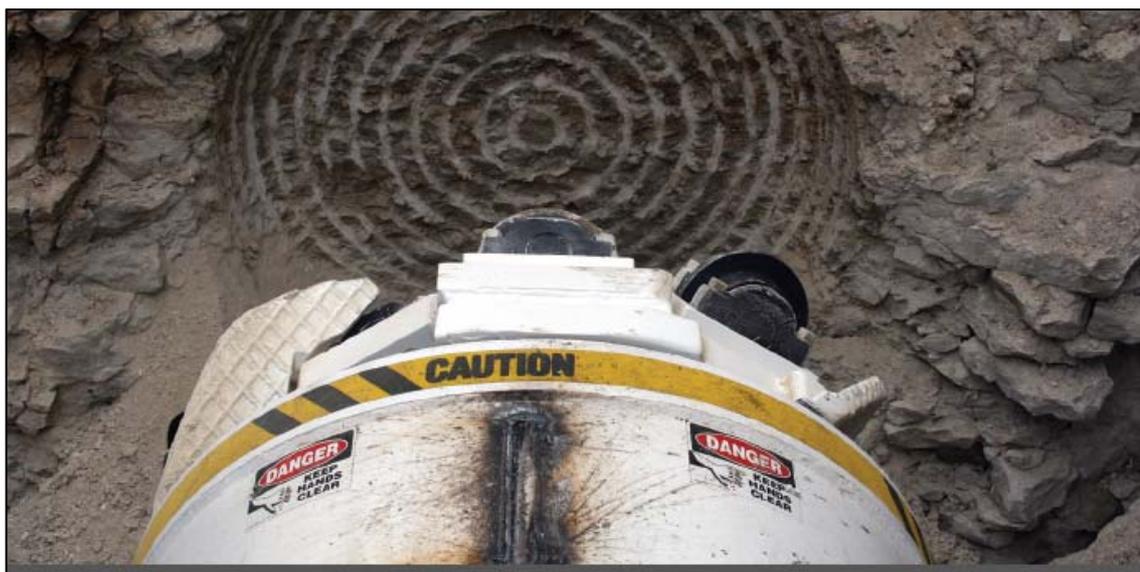


Figura 3/D: fronte di scavo intaccato dalla testa di una fresa da roccia.

### 3.2 Caratteristiche delle macchine operatrici

L'efficienza di una macchina 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

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 15 di 58	<b>Rev.</b> 0

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: il comportamento fragile, nel quale l'energia è trasferita alla roccia per superare la sua resistenza alla trazione, e il comportamento duttile nel quale 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.

Le macchine operatrici solitamente utilizzate per gli scavi in sotterraneo sono dotate di molteplici utensili che lavorano sulla stessa macchina. Nelle figure 3/B e 3/C si può vedere la testa perforante di una macchina per *thrust boring* in cui si distinguono 20 dischi taglienti diversamente orientati per coprire tutta la superficie del fronte di scavo. 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 fresa chiusa, 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, quindi, include 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 concentriche, ma non coincidenti, dei dischi. Vedi figura 3/E (Cho et al., 2013) La Figura 3/F (tratto 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 (spilt ring).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 16 di 58	<b>Rev.</b> 0

L'azione di molti utensili rotanti sul proprio asse e contemporaneamente attorno all'asse centrale della fresa genera sul fronte di avanzamento un elevato numero di punti di rottura della roccia che, infatti, generano scaglie di piccole dimensioni. Tanto l'impatto dell'utensile nella fase di indentazione, quanto la rottura della scaglia sottoposta alla forza di torsione concentrata dall'utensile, costituiscono una locale sorgente di vibrazione. Il numero delle sorgenti può quindi essere intuitivamente correlato al numero delle scaglie prodotte e l'ampiezza dell'onda prodotta dalle tante rotture può essere correlata alla dimensione delle stesse. Conseguentemente, il segnale che si può propagare nella roccia circostante sarà un treno di onde ad alta frequenza e non in fase, risultante dalla sommatoria di molteplici impulsi nell'unità di tempo, e di intensità estremamente modesta, poiché ogni impatto dei singoli utensili sulla roccia produce frammenti piccolissimi.

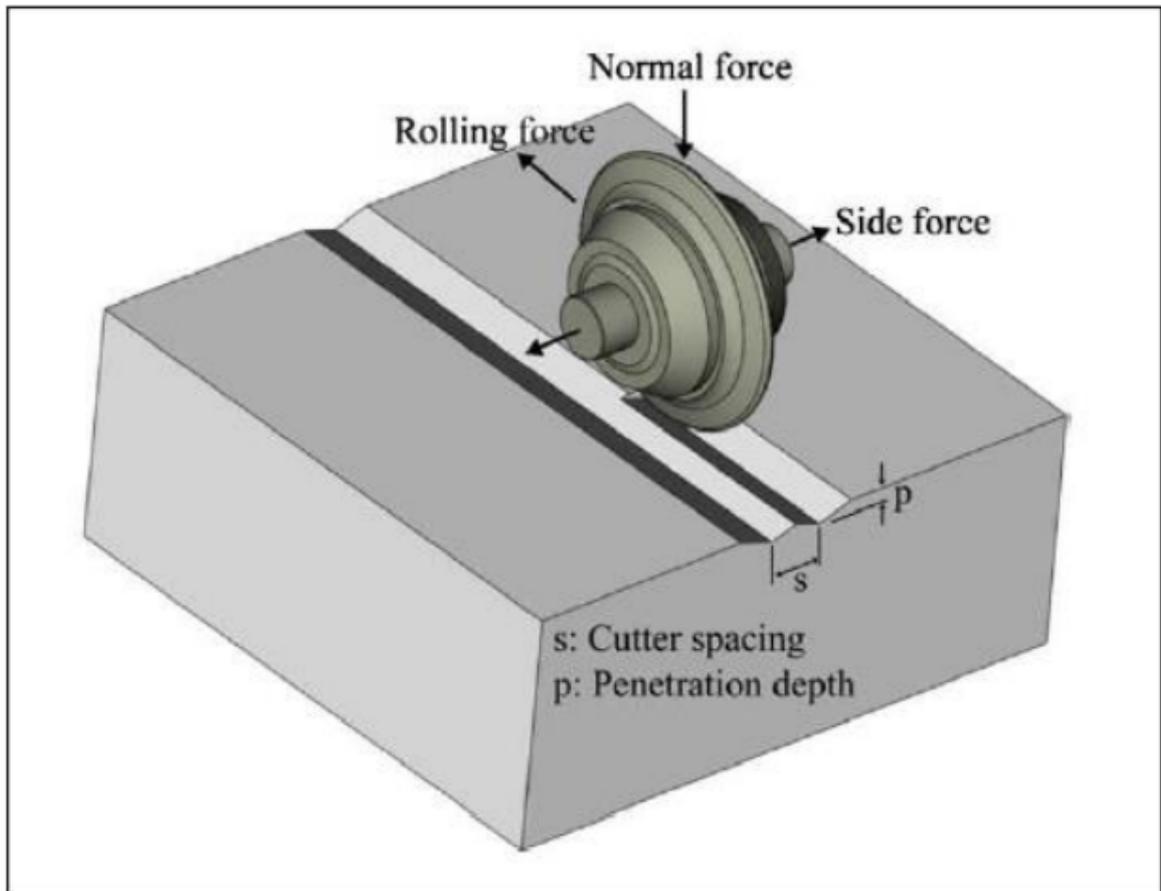
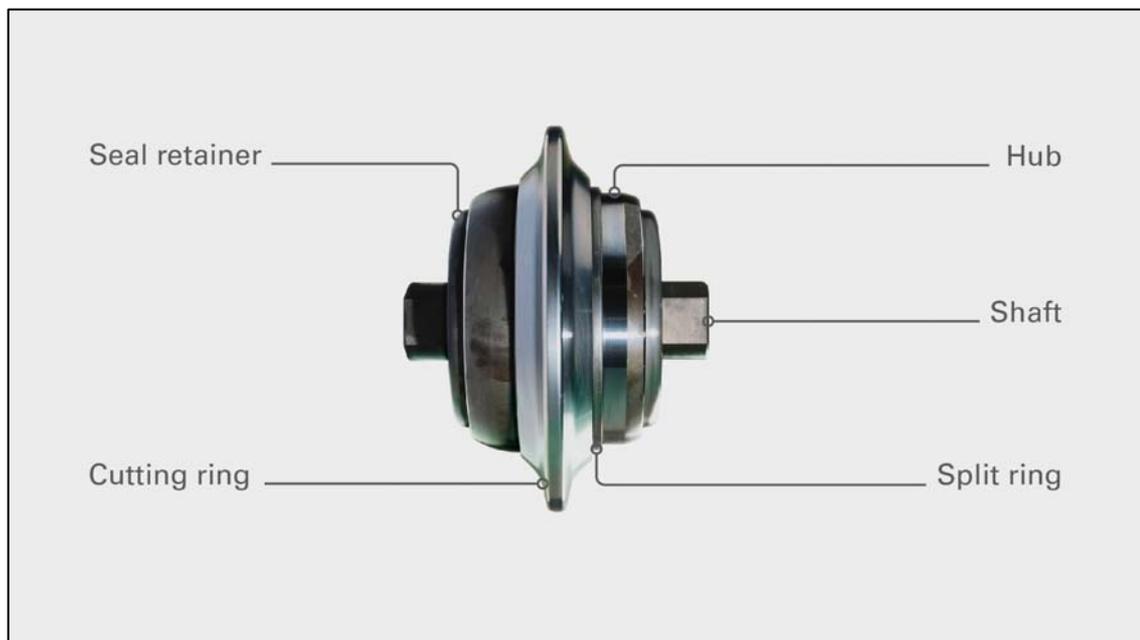


Figura 3/E: Schema di lavoro dei dischi operanti sulla fresa del microtunnel.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 17 di 58	<b>Rev.</b> 0



**Figura 3/F: Esempio di disco tagliente operante sulla testa della fresa.**

Questa tecnologia di trivellazione minimizza il disturbo della roccia circostante il fronte del foro e facilita il passaggio del tubo di spinta, riducendo il rischio di aumentare la fratturazione della roccia circostante lo scavo per evitare cedimenti della calotta o di altre parti del tunnel.

Nel caso specifico del *thrust boring* la spinta viene impressa tramite un tubo in acciaio: un materiale di elevate caratteristiche elastiche che, per questo uso, diventano un limite in quanto la flessione del tubo per eccesso di carico di punta (*buckling*), può avvenire ben prima che sia raggiunto il limite della resistenza a compressione assiale del tubo di spinta e/o il superamento delle capacità di spinta della macchina, e la deformazione può interferire con il controllo della direzionalità. È evidente, quindi, che minimizzare il disturbo della roccia da attraversare concorre alla buona riuscita dell'opera.

Vibrazioni eccessive, inoltre, 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.

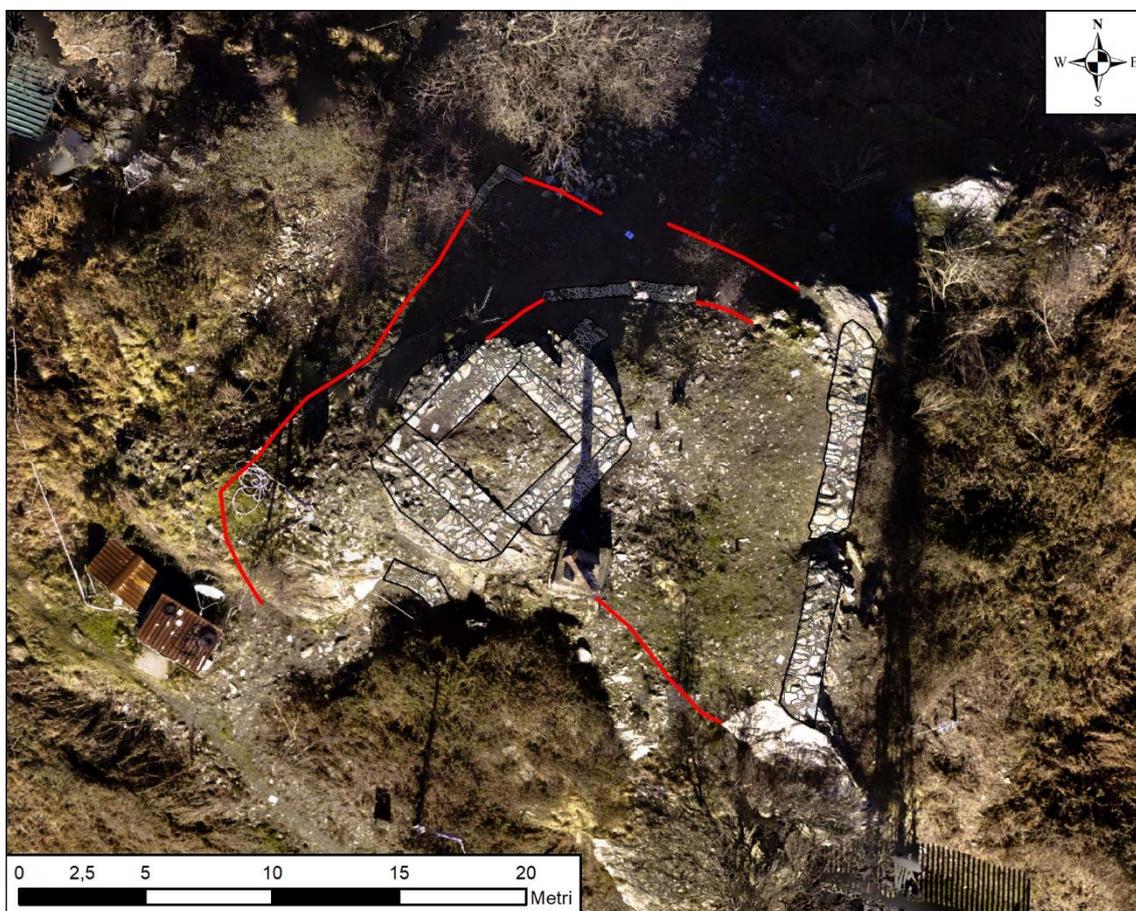
Le tecnologie trenchless, quindi, tendono a frantumare la roccia contenendo le vibrazioni prodotte entro i limiti di efficienza e di buona operabilità della macchina.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 18 di 58	<b>Rev.</b> <b>0</b>

#### 4 ANALISI STRUTTURALE DEI RESTI ARCHEOLOGICI

Dalle osservazioni in campo risulta che della struttura originale sia rimasto solo il piano di fondazione: una struttura finalizzata a regolarizzare e livellare la morfologia dello sperone roccioso sommitale al rilievo ed a costituire la base per le strutture murarie in effettiva elevazione: presumibilmente la torre, il vano di abitazione per il corpo di guardia e, forse, qualche ricovero esterno alla struttura principale.

La figura 4/A mostra il rilievo aereo fotogrammetrico del castello con evidenziati i resti delle strutture murarie ed i salti di quota dei due livelli delle murature.



**Figura 4/A:** Rilievo aereo fotogrammetrico dei ruderi del Castello dei Fieschi. Evidenziato con retino il contorno delle strutture murarie; la linea rossa marca i salti di quota tra i due livelli delle murature.

La struttura di fondazione è stata realizzata perimetrando attorno alla cima di roccia l'area del complesso da edificare erigendo le opere murarie dell'altezza necessaria ad uniformare la quota per il livello di base partendo dalle diverse quote dell'affioramento della formazione lungo il perimetro della fondazione.

I resti planimetrici delle basi murarie sono fondati direttamente sulla formazione:

- roccia scistosa ma compatta e di buone caratteristiche meccaniche sui lati sud ed est (ardesia – slate),

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 19 di 58	<b>Rev.</b> 0

- roccia scistosa ma tenera e prevalentemente argillitica (shale), inoltre molto alterata, sul lato nord;
- sul lato ovest la formazione non affiora, coperta da una coltre di detrito e terreno pedogenizzato.

Per la muratura è stato utilizzato il pietrame locale parzialmente legato con malta. La natura scistosa ed il metamorfismo di basso grado della formazione, fornisce clasti a prevalente sviluppo planare e di buone caratteristiche meccaniche ottimo anche per la realizzazione di murature a secco.

Il volume compreso tra la roccia e l'opera muraria è stato riempito con materiale di riporto compatto (pietrame e terra). Considerata la posizione in cresta e la difficoltà di approvvigionare materiali da costruzione è prevedibile che il riporto sia stato ottenuto bilanciando i volumi di scavo della coltre detritica e della parte di formazione più alterata e facile da rimuovere.

La base della torre ed il muro sul lato orientale formano un piano leggermente rialzato rispetto ai resti di muratura circostante sul lato ovest.

In posizione semi centrale alla struttura, in epoca recente, è stata innalzata una croce fondata su un basamento in cemento.

Per chiarire la descrizione ed il contesto dell'area archeologica si propongono le figure nel seguito descritte:

- La figura 4/B mostra il lato sud-occidentale della struttura perimetrale nel quale è evidente l'immorsamento sulla roccia della struttura muraria che delimita il lato est del castello.
- La figura 4/C mostra il lato interno della struttura muraria sul lato opposto (nord-occidentale) del versante. Anche su questo lato il muro sul lato orientale termina su un affioramento di roccia ma, dietro di questo, si individuano dei lembi di muratura poggianti sul materiale detritico di una formazione molto alterata.
- La figura 4/D mostra il lato nord della struttura. In primo piano si vedono ancora lembi di muratura poggianti su una formazione molto alterata; in secondo piano si vedono i resti della torre.
- La figura 4/E mostra la parte sommitale dell'area archeologica scattata dal muro ad est verso ovest; si evidenzia che tutto il ripiano a monte del muro ed anche all'interno dei resti della torre siano riempiti di terreno e la muratura costituisca un blocco unico con il terreno al suo interno.
- La figura 4/F stessa situazione della figura 4/E scattata da ovest verso est.

Da quanto esposto ed evidenziato con le immagini precedentemente citate, risulta che i resti archeologici non possono più essere considerati come un edificio, in relazione alla loro suscettività alle vibrazioni, in quanto il tempo e le intemperie hanno abbattuto tutte le strutture completamente elevate sopra il terreno.

Allo stato attuale il rudere risulta essere un complesso basso e tozzo, di difficile caratterizzazione ingegneristica essendo costituito quasi totalmente da un nucleo ricavato nella formazione, sul quale poggiano alcuni tratti di muratura, rinfiancata con materiale di antico riporto, come uniche tracce planimetriche dell'originale architettura. Nonostante il livello di compattazione originale potesse essere stato relativamente sommario, date le tecnologie tardo medioevali e le caratteristiche del luogo, il materiale

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 20 di 58	<b>Rev.</b> 0

di riporto presenta buoni livelli di compattazione in grado di connettere, in un corpo unico, la muratura di contenimento e la formazione.

È opportuno sottolineare che, per quanto le fondazioni costituiscano una parte dell'edificio, se queste sono vincolate e vibrano assieme al terreno hanno un comportamento ingegneristicamente diverso dai volumi in elevazione, quindi non si configurano come degli "oscillatori".

Definire come i terreni su cui sorge l'area archeologica trasmettono le vibrazioni è complesso perché la formazione è fortemente inclinata ed esce in affioramento lateralmente alla struttura parzialmente integrata in essa. Due litologie stratificate, contrastanti per competenza, e fortemente inclinate convogliano le onde di volume in superficie con velocità diverse generando onde secondarie per riflessione e rifrazione ma, date le brevi distanze, è discutibile assumere che il fronte d'onda sferico possa essere considerato piano<sup>4</sup>.

La maggior parte di queste onde secondarie, quindi, interferirà fuori fase con le onde dirette provocando interferenza distruttiva (intensità minore di quella dell'onda entrante) e/o un aumento del contenuto di alte frequenze (che perdono energia più rapidamente delle basse).

È prevedibile che tali fenomeni siano complessivamente dispersivi tuttavia non è possibile ricostruire gli effettivi rapporti geometrici tra la formazione, il rinterro e la muratura senza effettuare indagini dettagliate.

Non si ritiene però necessario approfondire questa parte dello studio perché le scelte progettuali sono state rivolte ad evitare qualunque interferenza dei lavori in superficie con il manufatto archeologico. L'interferenza sarà solo planimetrica con l'asse della trivellazione e l'attraversamento in sotterraneo del sito avrà uno spessore di copertura che sarà prevedibilmente tra 10m e 15m.

Le tecnologie adottate unitamente alla geometria del progetto di dettaglio, saranno adeguate a minimizzare le vibrazioni prodotte dalla trivella ed a mantenerle entro una soglia ampiamente inferiore a limiti tollerabili per i resti archeologici.

<sup>4</sup> Condizione su cui si basa la legge di Snell-Descartes che descrive le modalità di rifrazione di un'onda nella transizione tra due mezzi con indice di rifrazione diverso.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 21 di 58	<b>Rev.</b> 0



**Figura 4/B: lato sud-occidentale della struttura.**



**Figura 4/C: lato nord-occidentale - visto da nord.**

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 22 di 58	<b>Rev.</b> 0



**Figura 4/D: lato nord – verso la torre.**



**Figura 4/E: parte sommitale dell'area archeologica scattata da est verso ovest.**

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 23 di 58	<b>Rev.</b> 0



**Figura 4/F: parte sommitale dell'area archeologica scattata da ovest verso est.**

#### 4.1.1 Valutazione preliminare di suscettibilità alle vibrazioni

Da quanto rilevato si conclude che sul sito archeologico:

- non sussiste più alcuna struttura che possa essere qualificata come edificio<sup>5</sup>;
- la parete interna della muratura residua è completamente integrata nei terreni del riempimento retrostante e costituisce un corpo unico con esso e con la formazione;
- un danneggiamento del complesso dei resti archeologici per cause vibratorie è ipotizzabile solo in caso di azioni sismiche importanti ed in grado di disarticolare la muratura dal riempimento retrostante.

Nota: Può essere tranquillizzante notare nella figura 2.1/A come il traliccio ed il suo edificio di servizio siano strettamente adiacenti ai resti archeologici. È probabile che le fondazioni di tali strutture, in particolare quelle del traliccio, siano state scavate con mezzi meccanici che generano maggiori vibrazioni superficiali rispetto alla trivella e non risulta che i resti del castello siano stati in qualche modo danneggiati dalle contigue attività di scavo e dalle relative vibrazioni indotte durante le attività di costruzione.

<sup>5</sup> Dal punto di vista della risposta alle vibrazioni

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 24 di 58	<b>Rev.</b> 0

#### 4.1.2 Altre cause di rischiosità presenti non correlate alle attività di costruzione

Si segnala la presenza di fenomeni erosivi sul lato settentrionale dei ruderi prossimi o a ridosso dei resti delle opere murarie. Tali fenomeni possono riattivarsi e/o acuirsi in occasione di eventi meteorologici particolarmente intensi e prolungati mettendo a rischio la stabilità delle murature (es: Fig. 4/C).

Si tratta di un rischio concreto, dipendente da fenomeni naturali, e non collegabile in alcun modo ai fenomeni vibratorii o alle altre attività di costruzione specifiche del progetto in esame.

#### 4.1.3 Prime valutazioni sulle geometrie del progetto di trivellazione

Considerando la larghezza della cima su cui sorgeva il castello si può ipotizzare una lunghezza della trivellazione di circa 60- 70 m dei quali i resti delle murature occupano meno di una ventina di metri

Sul lato est, tra la cresta stretta e la cima si apre un breve tratto con blanda acclività; tra le quote 664 m s.l.m. e 667 m s.l.m, nonostante gli spazi molto limitati, è possibile impostare l'area di cantiere per la buca di spinta.



Figura 4/G: Area archeologica con indicazione del tracciato del metanodotto (giallo) e della trivellazione (azzurro) scala 1:500; sul lato di SE la posizione del pozzo di spinta.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 25 di 58	<b>Rev.</b> 0

Sul lato ovest la cresta si raccorda direttamente alla cima con pendenze maggiori che limitano molto gli spazi operativi; questo lato, quindi, sarà destinato alla buca di recupero che sarà dimensionata al minimo indispensabile per raggiungere la condotta in progetto entro il tubo di protezione e conmetterla al tratto successivo del metanodotto. Dal punto di vista esecutivo la trivellazione potrà essere portata fino in prossimità della superficie affinché la buca di recupero possa avere dimensioni e profondità nell'ordine di grandezza della trincea di linea. Prevedibilmente la zona di recupero potrebbe essere intorno all'attuale quota del piano campagna di 660 m slm.

Indicativamente la trivellazione si svilupperebbe quindi intorno ad una quota poco inferiore ai 660 m slm che garantirebbe una copertura di circa 12 m metri sotto il muro orientale (672.5 m slm circa), di circa 15 m sotto il piano principale del castello (675.5 m slm circa) e di oltre 15m rispetto al piano della torre (676.5 m slm circa)<sup>6</sup>.

La traccia dell'interferenza planimetrica tra la trivellazione e l'area archeologica è riportata in figura 4/G.

Per quanto l'attuale livello di progettazione non sia definitivo, le possibilità di variazione sono minime e limitate ad un ambito di pochi metri.

Considerando la posizione in cresta e la difficile accessibilità si prevede di utilizzare macchinari leggeri e di dimensioni limitate.

---

<sup>6</sup> Le quote sono state desunte dal rilievo archeologico effettuato nel febbraio 2020, al quale si rimanda per una trattazione più completa e qualificata degli aspetti archeologici.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 26 di 58	<b>Rev.</b> 0

## 5 NORMATIVE DI RIFERIMENTO PER IL MONITORAGGIO VIBRAZIONALE

### 5.1 Premessa

In questo capitolo si riassumono le principali normative che trattano il problema dell'interazione tra le vibrazioni e gli edifici: tutte prendono in considerazione il livello del picco massimo di velocità registrata al livello delle fondazioni dell'edificio e la sua frequenza, e sono finalizzate a valutare gli effetti di tali vibrazioni sull'edificio stesso.

Nel caso in esame, i resti dell'antica struttura sono le fondazioni; queste non sono trattate dalla normativa perché si può assumere, cautelativamente, che queste vibrino assieme al terreno trasferendo tutta l'energia ricevuta all'edificio.

Si evidenzia che queste normative riguardano i possibili effetti delle vibrazioni di origine antropica, dal traffico alle esplosioni di cava, non quelle relative ai sismi le cui vibrazioni hanno un contenuto energetico non commensurabile con quello generato dalle comuni attività umane.

### 5.2 Concetti generali sulle vibrazioni

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.

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

Le strutture raggiunte dalle vibrazioni propagate attraverso il suolo si comportano come un mezzo ulteriore che le trasmette dalla base alla sommità, 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).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 27 di 58	<b>Rev.</b> 0

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.

NOTA: nel caso specifico del sito "tracce del Castello dei Fieschi" sussistono le componenti di attenuazione a)-b)-c), non sussiste la componente di attenuazione e) ma nemmeno quella di amplificazione f); risulta incerta l'applicabilità della componente di attenuazione d) in quanto le strutture residue sono solo parzialmente integrate nel terreno.

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 seguente:

<b>Tipici periodi propri di vibrazione per le strutture degli edifici con altezza &lt; 30 m</b>	
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

Se si escludono i terremoti che, essendo sorgente di vibrazioni con elevati livelli energetici e producendo frequenze che rientrano nei campi sopra individuati sono molto pericolose 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 in caso di vibrazioni di eccezionali entità come quelle conseguenti ad un sisma. Uno stesso livello di vibrazione potrà provocare lesioni differenti alle varie componenti dell'edificio; in particolare ad esempio le vibrazioni in grado di provocare danni solo agli intonaci o alle tamponature non mettono a rischio la

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 28 di 58	<b>Rev.</b> 0

sicurezza della struttura portante. Le lesioni subite dagli edifici possono quindi essere distinte in estetiche e strutturali essendo il danno connesso alle prime decisamente inferiore a quello che interessa le seconde.

L'energia dissipata dall'onda per percorrere un certo tratto di spazio è inversamente proporzionale alla frequenza; ne consegue che la pericolosità di una vibrazione diminuisce fortemente all'aumentare della frequenza del segnale e le varie normative di riferimento recepiscono il fenomeno attribuendo alle vibrazioni caratterizzate da alte frequenze dei limiti di pericolosità superiori rispetto a quelli imposti per le basse frequenze.

Da quanto esposto consegue 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 nell'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.

### 5.3 Principali normative

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, ed al quale sono state 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 integrità architettonica. Si applica in generale a tutte le tipologie di edifici di carattere abitativo, industriale e monumentale. Mentre ciminiere, ponti e strutture sotterranee, quali gallerie e tubazioni, non sono considerate dalla presente norma.

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.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 29 di 58	<b>Rev.</b> <b>0</b>

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;
- 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 Tabella 5.1.

**Tabella 5.1: valori di riferimento - 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

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 30 di 58	<b>Rev.</b> 0

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 nel Tabella 5.2 e sono indipendenti dal contenuto in frequenza del segnale.

**Tabella 5.2: valori di riferimento – 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, differentemente dalla 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 effettuate sulle fondazioni e riportati in Tabella 5.3 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)

**Tabella 5.3: valori di riferimento – per le misurazioni in fondazione**

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).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 31 di 58	<b>Rev.</b> 0

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 ferroviario. La norma non è applicabile alle vibrazioni di frequenza minore di 8 Hz e non riguarda gli effetti indiretti delle vibrazioni, quali, per 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 Tabella 5.4 sono indicati i valori di riferimento, al di sotto dei quali anche i piccoli danni sono poco probabili.

**Tabella 5.4: valori di riferimento per la velocità di vibrazione**

Classe	Tipo di costruzione	Esposizione	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s		
			Posizioni di misura <sup>*)</sup>		
			Da 8 Hz fino a 30 Hz <sup>*)</sup>	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
<sup>*)</sup> Le posizioni di misura devono essere scelte sugli elementi rigidi della struttura portante o dove sono attesi i maggiori effetti delle vibrazioni.					

Le soglie sono applicabili ai tipi di costruzioni ivi descritti. Sono considerati i casi di vibrazioni:

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 32 di 58	<b>Rev.</b> 0

- occasionali (numero di oscillazioni eccedenti il 70% del valore di velocità di riferimento maggiore di 1000 eventi vibratori),
- 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 della 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 prudentiale utilizzare questa condizione.

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

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 33 di 58	<b>Rev.</b> 0

## 6 INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEI RISCHI

Riprendendo quanto esposto al capitolo 3, che tratta sommariamente la tecnologia *thrust boring*, le fasi di lavoro potenzialmente impattanti dal punto di vista vibrazionale sono la trivellazione stessa e lo scavo dei pozzi di spinta e di recupero.

Nel presente capitolo si valuta il livello di pericolosità dei fenomeni potenzialmente indotti dai lavori e si presentano le attività e le procedure per prevenirne e mitigarne gli effetti sui resti archeologici.

Si premette che l'area di cantiere sarà recintata fino al versante su entrambi i lati rivolti alla zona archeologica.

### 6.1 Mitigazione dei rischi connessi alla trivellazione

Per quanto riguarda la trivellazione nel medesimo capitolo si è visto come gli utensili siano progettati e disposti sulla testa fresante per ottenere la migliore frantumazione della roccia e la pezzatura del detrito ottimale per essere facilmente allontanata.

È opportuno rammentare che l'energia prodotta dal distacco di ogni frammento è direttamente proporzionale alla sua massa ed al quadrato dell'ampiezza e che la trivellazione interessa in profondità l'ammasso roccioso sottostante il castello producendo onde di volume che si attenuano geometricamente secondo un rapporto inverso alla distanza dal punto di emissione; l'energia prodotta dal distacco di ogni frammento si distribuisce quindi su superfici sferiche sempre più ampie prima di raggiungere la superficie e le fondazioni del castello.

Stimando in almeno 10 m lo spessore della copertura sovrastante la trivellazione è possibile valutare che, solo a causa dell'attenuazione geometrica<sup>7</sup>, l'energia raggiunga la superficie già ridotta di un ordine di grandezza, senza considerare gli effetti dissipativi del terreno ed i vari fenomeni di "attenuazione intrinseca" e "scattering" dovuti alla differente velocità di trasmissione delle onde nei diversi litotipi ed alla loro disomogeneità<sup>8</sup> che contribuiscono a ridurre ulteriormente l'energia complessiva che raggiunge il sito di interesse.

Su distanze così limitate e con le geometrie complesse dell'opera in rapporto alla stratificazione, a sua volta disomogenea e discontinua, non è possibile trattare analiticamente il fenomeno, ma è evidente che dato il rapporto tra le masse che si scambiano energia, il frammento, il volume circostante e le opere murarie, l'energia che giunge alla fondazione possa essere considerata irrilevante e di molto inferiore a quella necessaria per smuovere e disarticolare il pietrame della muratura.

<sup>7</sup> Attenuazione geometrica (per onde di massa sferiche in mezzo omogeneo 3-D)  $A_g = n \cdot 1/R$ , con R= raggio o distanza dalla sorgente ed n = coefficiente di proporzionalità.

<sup>8</sup> Le cause che producono l'attenuazione sono essenzialmente la perdita di energia per riscaldamento del mezzo attraversato e quelle subite da parte dell'onda primaria per la generazione di onde secondarie. Quest'ultimo processo viene chiamato "scattering" (termine inglese non direttamente traducibile, ma che può essere impropriamente reso dal termine italiano "diffusione") e il decremento dell'energia delle onde primarie prodotto da questo fenomeno viene chiamato attenuazione per scattering. Il fenomeno del riscaldamento delle rocce al passaggio dell'onda genera invece l'attenuazione intrinseca.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 34 di 58	<b>Rev.</b> 0

#### 6.1.1 Mitigazioni in fase di progetto

Considerando il valore storico dell'area archeologica ed il principio di precauzione, la progettazione sarà finalizzata alla massima tutela del bene archeologico.

La distanza tra i lavori ed i resti archeologici sarà massimizzata compatibilmente con la morfologia, i vincoli di rispetto delle distanze dagli edifici adiacenti il castello e tecnici in relazione alla lunghezza della trivellazione.

Inoltre, sulla base di un rilievo geologico e geostrutturale di dettaglio, si cercherà di impostare la trivellazione entro le facies più argillitiche (shale) e questo consentirà di minimizzare le vibrazioni ma anche di ottenere una migliore produzione ed un migliore controllo direzionale

#### 6.1.2 Mitigazioni in fase di appalto

Cronologicamente questa fase si attua prima della fase di costruzione che viene trattata nel paragrafo successivo. A questo si rimanda per valutare l'importanza che la tecnica sia operata "a regola d'arte", cioè utilizzando tecnologie e mezzi meccanici di qualità specificatamente ottimizzati per il sito, ma anche personale di comprovata esperienza in grado di operare regolando adeguatamente i parametri delle macchine in funzione della risposta dei terreni.

A tale proposito si evidenzia che SNAM Rete Gas opera solo con ditte certificate e selezionate in seguito ad una stringente procedura di qualificazione e che le ditte operanti sono sottoposte ad una supervisione di terza parte per la direzione dei lavori per gli aspetti tecnici ed economici.

#### 6.1.3 Mitigazioni in fase esecutiva

Data la variabilità della formazione e la mancanza di ampi affioramenti anche in fase di progetto non sarà possibile prevedere la geometria degli strati con la necessaria accuratezza. Durante lo scavo della buca di spinta sarà però possibile verificare il rilievo geostrutturale di dettaglio e, di conseguenza, adeguare le impostazioni delle macchine e i relativi parametri di controllo.

Qualora la trivellazione dovesse intercettare anche la facies scistosa-ardesiaca (slate) è prevedibile che si riscontri un aumento della resistenza all'avanzamento e solo un modesto aumento dell'ampiezza della vibrazione emessa.

Poiché la stratificazione è orientata quasi parallelamente alla direzione di scavo, la spinta degli utensili potrebbe sollecitare a flessione gli strati più resistenti e privi di giunti naturali; questi, rompendosi in frantumi di dimensioni maggiori dei normali possono produrre picchi di ampiezza superiore alla media. È prevedibile che si tratti di eventi discreti e spaziali nel tempo ma, qualora si presentassero con frequenza, sarà possibile ridurre la spinta e la velocità di avanzamento diminuendo conseguentemente la dimensione dei clasti frantumati ed aumentando la percentuale di materiale abraso.

Si tratta di una procedura che viene comunemente adottata anche a salvaguardia della vita utile degli utensili e delle macchine; queste, infatti, sono sottoposte a vibrazioni di energia comparabile a quelle trasmesse al fronte di scavo. Nel caso delle ardesie l'angolo di incidenza con la stratificazione è particolarmente significativo perché queste rocce hanno delle elevate caratteristiche meccaniche in termini di resistenza a compressione e flessione, ma si caratterizzano anche per una modesta durezza nella

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 35 di 58	<b>Rev.</b> 0

scala di Mohs (3)<sup>9</sup>, poco superiore a quella delle argilliti (2.5), quindi una adeguata velocità di avanzamento può concorrere al mantenimento della direzionalità.

## 6.2 Mitigazione dei rischi connessi alla realizzazione del pozzo di spinta

Viene considerato in particolare il pozzo di spinta perché sarà più grande e profondo di quello di recupero (cfr 4.1.3) dovendo contenere la macchina di spinta e le barre del tubo di protezione. La lunghezza di tale pozzo sarà nell'ordine di 15 m per una larghezza ed una profondità di circa 5 m; lo scavo comporterà la rimozione (e l'accantonamento per il futuro ripristino) di un consistente volume di materiale, per la maggior parte roccioso.

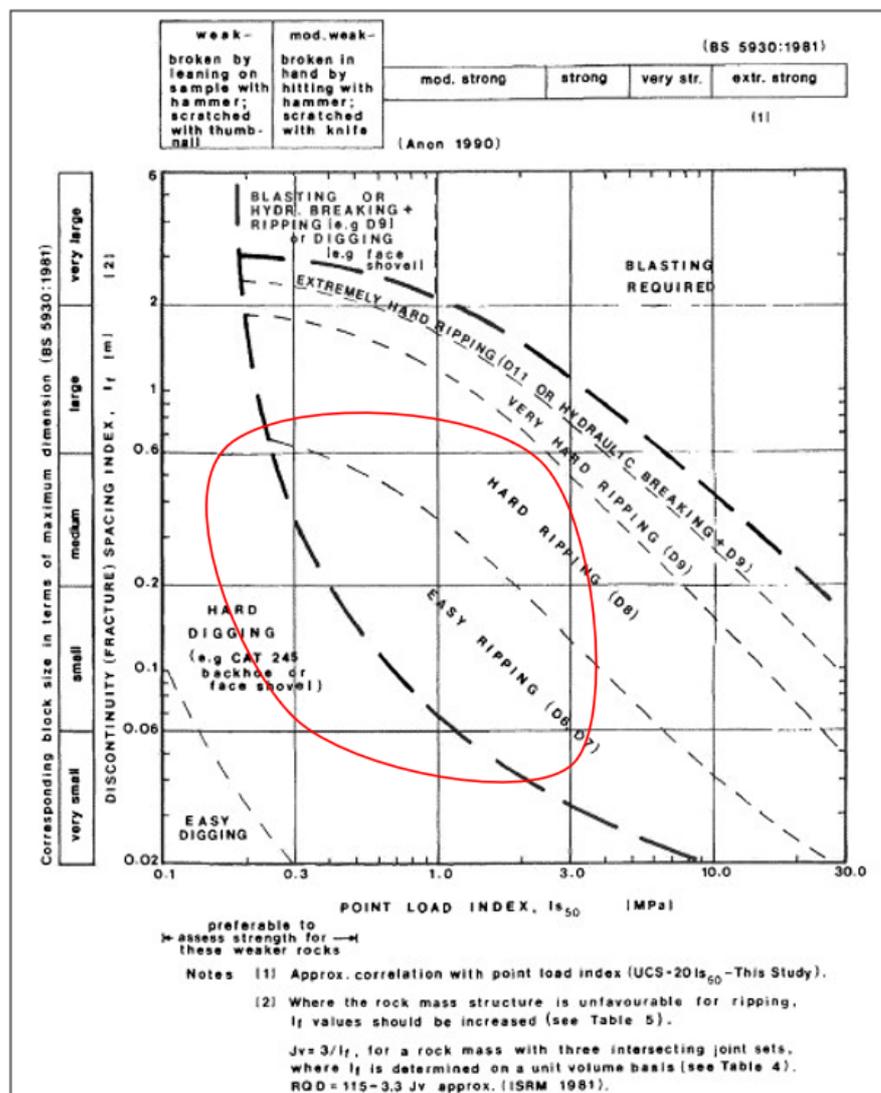


Figura 6/A: Diagramma di scavabilità di Pettifer e Fooke (1994) con una stima preliminare del campo di resistenze meccaniche delle litologie presenti nella zona interessata dal progetto.

9 Non a caso vengono usate in architettura e nell'artigianato per la resistenza per la lavorabilità

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 36 di 58	<b>Rev.</b> 0

In questo caso sarà probabilmente necessario utilizzare anche mezzi di scavo che frantumano la roccia con impatti ripetuti, come martelli azionati idraulicamente (cfr. figura 6/A e relativa didascalia). Questi trasmettono al terreno una energia decisamente superiore a quella della fresa del *thrust boring* ma degli studi basati su interventi di monitoraggio effettuati durante la realizzazione di pozzi per acqua, perforando roccia con un martello fondo foro e durante l'attività di un martello demolitore azionato su roccia concludono che i limiti di previsti dalla normativa per la sicurezza gli edifici nei confronti di danni, solamente estetici, è risultato inferiore ai 6 m<sup>10</sup>.

Come si è già più volte ribadito il Castello dei Fieschi non può essere assimilato ai classici edifici *in alzata* interessati dalle procedure previste dalle normative presentate nel capitolo 6 ed è assodato che la suscettibilità delle strutture di fondazione alle comuni vibrazioni di origine antropica è trascurabile (cfr. 4.1.1).

### 6.3 Mitigazione dei rischi dovuti a cause naturali

Sono stati evidenziati degli scoscendimenti di terreno che coinvolgono parte dei resti di muratura presenti sul lato nord del Castello. Si è detto che eventi meteorologici particolarmente intensi e prolungati potrebbero riattivare coinvolgendo ulteriormente l'area archeologica.

Non si prevede di compiere alcun lavoro in tutto l'ambito archeologico e in un suo intorno per una distanza di sicurezza di almeno 6 m, tuttavia la zona sarà controllata dal personale preposto alla supervisione dei lavori qualora simili eventi meteorologici dovessero verificarsi nel periodo di realizzazione della trivellazione.

Essendo prevista l'assistenza archeologica durante i lavori sarà cura del personale di cantiere segnalare tempestivamente al tecnico qualificato qualunque avvenimento abbia modificato l'attuale situazione dell'area archeologica o manifesti evidenze di un accresciuto pericolo. Poiché la rischiosità evidenziata è causata da fenomeni di tipo geomorfologico il "geologo di cantiere", potrà contribuire efficacemente all'analisi preventiva dei fenomeni e della loro potenziale evoluzione.

### 6.4 Mitigazione dei rischi con interventi di monitoraggio

Nel corso dei lavori sarà posto in opera un sistema di monitoraggio dei potenziali danni incipienti, in grado di prevenire la formazione di danni significativi o l'aggravarsi dei danni preesistenti considerando la già attuale situazione di forte degrado di ciò che resta delle opere di muratura.

Le proposte per strutturare tale sistema sono presentate e giustificate al capitolo 7; i particolari del sistema di monitoraggio dovranno essere concordati con le Autorità competenti.

### 6.5 Mitigazione dei rischi con interventi di emergenza

Per quanto non sia in alcun modo prevedibile che il sito archeologico possa subire danni diretti o indiretti dai lavori ed in particolare dalla trivellazione, è possibile che particolari eventi naturali possano modificare l'attuale stato delle opere murarie rendendone incerta

<sup>10</sup> I dati sono stati riportati sullo "Studio previsionale sulle vibrazioni prodotte durante la realizzazione delle opere trenchless in progetto" - SPC-L- 83022 del quale sono riportati degli stralci nell'Annesso 1 .al presente studio

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 37 di 58	<b>Rev.</b> 0

la stabilità. In tali casi, o se per altre ragioni se ne rilevasse la necessità, sarebbe possibile realizzare delle opere previsionali di contenimento per evitare interruzioni alle attività di cantiere. Se il caso si verificherà, tali opere dovranno essere definite in accordo con le Autorità competenti, con la Direzione Lavori e con la Supervisione Lavori e dimensionate dall'ingegneria di cantiere.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 38 di 58	<b>Rev.</b> 0

## 7 PROPOSTA DI INTERVENTI DI MONITORAGGIO

Nei capitoli precedenti si è descritto il contesto geologico, geomorfologico, in cui si trova l'area archeologica da tutelare e le soluzioni tecnologiche, progettuali ed operative adottate per realizzare la condotta in progetto senza interferire con i resti archeologici, direttamente o indirettamente.

Nella fase di progettazione di dettaglio, nella saranno disponibili maggiori e più accurate informazioni che contribuiranno a pianificare le fasi della trivellazione concorrendo alla sua buona riuscita che, caso specifico, si intende la realizzazione della trivellazione operando in modo che le vibrazioni prodotte da tutti i mezzi operanti risultino ampiamente entro i limiti di sicurezza per l'area archeologica.

Nei precedenti capitoli sono state individuate le fasi di costruzione potenzialmente più critiche e le misure che possono e saranno predisposte per la mitigazione dei rischi.

In questo capitolo si propone un sistema di monitoraggio finalizzato:

- a verificare l'efficacia complessiva dei vari interventi di mitigazione;
- a fornire indicazioni per ottimizzare l'attività di perforazione;
- a consentire ai tecnici incaricati della direzione, della supervisione e dell'assistenza archeologica un rapido ed efficace controllo delle attività in corso;
- a produrre un documento finale che attesti l'ininfluenza dei lavori conclusi sulla zona archeologica;

Nonostante esistano diverse normative finalizzate al monitoraggio di edifici da tutelare contro i rischi connessi a fenomeni vibratorii (cfr. cap 5) nell'area di interesse storico-archeologico denominata "*tracce del Castello dei Fieschi*", effettivamente, non restano che le tracce delle antiche strutture in elevazione, ed in particolare le opere di fondazione dei piani su cui si articolava l'edificio.

Non esistendo strutture architettoniche in effettiva elevazione, anche i valori di riferimento dell'ampiezza delle vibrazioni in relazione alla tipologia ed alle caratteristiche geometriche della struttura perdono significato.

Si propone pertanto un monitoraggio di tipo geometrico cioè un insieme di operazioni di misura e calcolo finalizzate alla determinazione ed al controllo di movimenti e deformazioni, comunemente usato anche nell'ambito della conservazione dei Beni Culturali (monitoraggio preventivo).

### 7.1 Monitoraggio geometrico

Il monitoraggio geometrico consiste nella ripetizione nel tempo di misure topografiche di determinati punti del sito ritenuti più significativi per verificare il comportamento del manufatto.

La frequenza di rilevamento più opportuna dipende dal tipo di fenomeno che deve essere osservato; in questo caso deve consentire di evidenziare gli spostamenti e/o le deformazioni prima che questi possano recare danno alla struttura da monitorare.

Nel caso specifico si propone di finalizzare il monitoraggio al controllo delle distanze reciproche tra i punti ritenuti significativi per prevenire l'eventuale sviluppo di deformazioni plano-altimetriche. A tale fine si suggerisce di ubicare alcune mire su punti intrinsecamente stabili (capisaldi) come ad esempio gli affioramenti rocciosi, la fondazione della croce o altre strutture considerabili "fisse" quantomeno alla scala temporale del monitoraggio. Se le distanze dei punti stabiliti come fissi dai punti

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 39 di 58	<b>Rev.</b> 0

potenzialmente mobili e le distanze tra questi restano entro un valore ritenuto tollerabile compatibilmente con i limiti della precisione strumentale, potrà essere confermata nulla l'interferenza dei lavori con l'area archeologica.

Considerando la tipologia muraria si propone, in prima ipotesi, un limite di tollerabilità di  $0.01 \times h$ , con  $h$  = l'altezza della muratura da tutelare, ma il limite di tollerabilità da applicare effettivamente in fase di monitoraggio sarà concordato con le Autorità responsabili in base alle caratteristiche specifiche dei vari settori di muratura.

La rete di inquadramento topografico sarà la stessa materializzata in campo per l'appoggio dei rilievi topografici relativi al progetto affinché ci sia la massima coerenza tra i disegni di progetto ed i risultati del monitoraggio.

Prima di ogni rilievo in corso d'opera la ditta topografica incaricata delle misurazioni dovrà consegnare ai Responsabili del monitoraggio in Cantiere i calcoli e le comparazioni con i rilievi effettuati precedentemente.

#### 7.1.1 Monitoraggio in fase di ante opera

Sulla base dei rilievi archeologici già effettuati nel febbraio 2020 e dei rilievi topografici effettuati nel corso delle attività di progettazione si propone di installare un adeguato numero di punti di controllo sulle parti del castello ritenute maggiormente significative e/o più soggette a rischio, comprendendo tra i rischi anche quello geomorfologico.

La scelta dei punti di monitoraggio sarà fatta da un topografo con il supporto di un tecnico archeologo per la scelta dei punti significativi e per concordare le modalità di fissaggio dei riferimenti (mire fisse) sulle strutture archeologiche senza danneggiarle.

Il rilievo geometrico di installazione (Rilievo 00) dovrà essere verificato il giorno antecedente l'inizio dei lavori di scavo del pozzo di spinta (Rilievo 01), e costituirà la misura di riferimento per tutta la durata dei lavori.

Congiuntamente alla installazione dei punti di mira sarà effettuato un rilievo dimensionale di dettaglio dei punti ritenuti critici, supportato da fotografie.

Sempre antecedentemente l'inizio dei lavori di scavo del pozzo di spinta si prevede di segnalare l'asse di perforazione con dei picchetti posti ad un interasse di 4 m (1/3 della lunghezza delle barre dei tubi di spinta) per consentire una facile individuazione dell'avanzamento della testa fresante e della sua posizione in rapporto ai resti del Castello da tutelare.

#### 7.1.2 Monitoraggio in fase di corso d'opera

Si propone un rilievo topografico quotidiano durante lo scavo della buca di spinta qualora vengano usati martelli idraulici montati su escavatori: a giorni alterni se vengono usati martelli idraulici manovrati a mano, o durante le successive fasi di scavo e/o finitura e durante l'installazione della stazione di spinta per il *thrust boring*. Se almeno tre rilevazioni consecutive oltre a quelle delle giornate in cui si sia fatto uso di martelli idraulici non hanno rilevato spostamenti significativi, il monitoraggio della buca di spinta potrà essere interrotto.

Il rilievo topografico riprenderà quotidianamente a partire dal giorno di inizio della trivellazione fino al termine della stessa.

Durante la trivellazione del tratto compreso tra 6 m prima e dopo le mura presenti ad est ed ovest del castello, il rilievo dovrà essere eseguito due volte al giorno: all'inizio ed al

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 40 di 58	<b>Rev.</b> 0

termine della giornata di lavoro segnalando nel report le condizioni meteorologiche verificatesi durante la notte.

I risultati di ogni rilievo dovranno essere resi consegnati alla Direzione lavori prima del rilievo successivo. La Direzione Lavori provvederà a diffonderli tra tutti gli interessati<sup>11</sup> Una copia dei risultati di ciascun rilievo dovrà essere conservata in cantiere e resa disponibile per la consultazione da parte degli interessati<sup>12</sup>

### 7.1.3 Monitoraggio post opera

Si tratta di un unico evento da effettuare il giorno successivo il termine della fase di trivellazione.

## 7.2 **Monitoraggio suppletivo**

Si è proposto un monitoraggio topografico-geometrico per poter documentare le attività di monitoraggio ma, per facilitare un rapido adeguamento dei parametri di spinta alle condizioni del sottosuolo durante la trivellazione del *thrust boring*, o lo scavo del pozzo di spinta, si propone un sistema di monitoraggio non standardizzato, in quanto soggettivo, che nel caso specifico, però, può rispondere alle esigenze di immediatezza e di controllo speditivo delle vibrazioni prodotte dai mezzi di cantiere e può consentire di adattare le operazioni alla variabilità delle situazioni.

Si tratta di un monitoraggio definibile di tipo whole-bod y<sup>13</sup>, basato sugli effetti delle vibrazioni sul corpo umano il quale possiede una frequenza di risonanza o naturale che gli consente di “sentire” le vibrazioni (in un determinato campo di frequenze) quando la loro ampiezza è ancora molto inferiore alla soglia di danneggiamento per gli edifici.

Per una trattazione più estesa del fenomeno si rimanda all'Annesso2, citando qui Cestelli Guidi ("Geotecnica e Tecnica delle fondazioni" vol.2 - Ed. HOEPLI):

- *“Il sismografo più sensibile è l'organismo umano che percepisce vibrazioni già per un coefficiente energetico  $C \cdot E = 0,06$  (m/sec)”;*
- *“non si producono danni alle normali costruzioni per un coefficiente energetico  $C \cdot E = 0,3$  (m/sec)”.*

Il Grafico di Richardt (1962) riportato in figura A2/A dell'Annesso2 può costituire un utile riferimento, per gli operatori e per il personale preposto al controllo.

Il picchettamento in asse alla trivellazione consentirà di verificare con facilità la posizione della testa fresante, di percepirne l'intensità delle vibrazioni e di regolare conseguentemente i parametri di spinta e di rotazione della macchina *thrust boring*.

La seguente figura 7/A mostra, in forma grafica, la sensibilità alle vibrazioni dell'organismo umano e delle strutture in relazione alla vibrazione emessa da sorgenti a

<sup>11</sup> La condizione di “interessato” sarà definita durante gli accordi di dettaglio con le Autorità preposte e comunicata all'impresa esecutrice prima dell'inizio delle attività di monitoraggio

<sup>12</sup> Cfr. Nota precedente

<sup>13</sup> La definizione “whole-body” è stata mutuata, per analogia, dalla ISO 2631, *Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration*

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 41 di 58	<b>Rev.</b> 0

breve distanza connesse ad attività antropiche molto comuni. La scala dell'ampiezza dell'onda in termini di velocità è espressa in dB<sup>14</sup> on riferimento alle unità Imperiali.

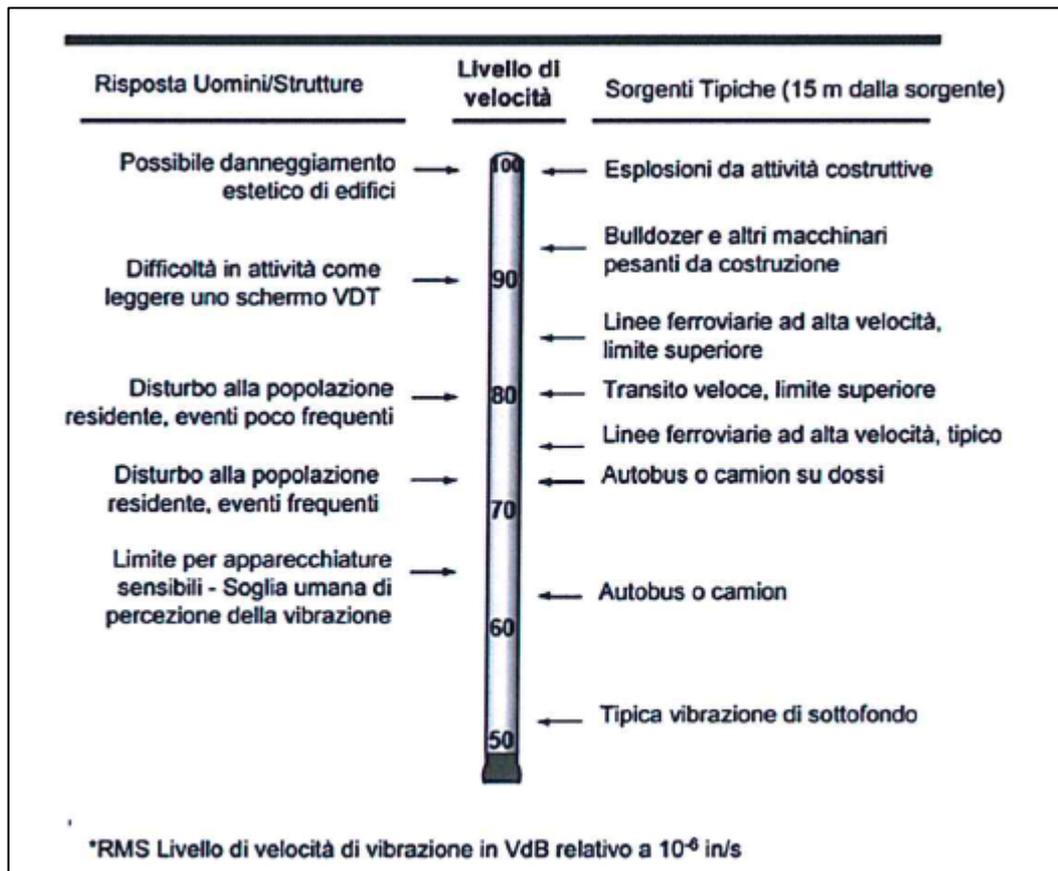


Figura 7/A: Livelli tipici di vibrazione derivanti da attività umane (si evidenzia che la scala delle velocità è in dB pertanto l'ampiezza raddoppia ogni 3 dB).

<sup>14</sup> Si evidenzia che il valore di riferimento per le vibrazioni meccaniche non è lo stesso di quello della pressione sonora; i rispettivi valori in dB non sono comparabili

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 42 di 58	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## 8 CONCLUSIONI

Un tratto del tracciato del “Metanodotto Sestri Levante – Recco DN400 (16”), DP 75 bar ed opere connesse” si sviluppa su un crinale ed intercetta l’area d’interesse storico-archeologico (SME) denominata: “*tracce del Castello dei Fieschi*” e situata sulla cima del Monte Tugio.

Il contesto morfologico non lascia spazio per proporre alternative locali, quindi si è reso necessario utilizzare la tecnologia *trenchless thrust boring* (o trivella spingitubo) per evitare qualunque interferenza diretta con i resti del castello passando al di sotto dei ruderi con un ampio franco di sicurezza.

Dell’antico edificio restano ora solo delle strutture identificabili come fondazioni in quanto, pur se movimentate su due livelli, tutte le murature sono riempite da terreno compattato che le legano alla formazione. Parte di questa emerge dal versante meridionale, come un contrafforte al quale è stata collegata l’opera muraria meglio conservata. Sul versante settentrionale, sono ancora presenti resti discontinui di muratura, bassi e solo a tratti interessati da fenomeni erosivi di modesta entità. Questi però, essendo localizzati al piede della muratura costituiscono un rischio potenziale se si riattivassero in occasione di particolari eventi meteorologici.

La cima sulla quale sorge il castello è interposta tra i due tratti di cresta molto stretta che il metanodotto deve necessariamente percorrere e gli spazi disponibili per le aree di cantiere sono esigui anche per applicare la tecnologia prevista. Per tale motivo si prevede di realizzare solo il pozzo di spinta dal lato est dell’area archeologica, nella zona un leggermente più ampia tra le due, e di spingere il tubo di protezione fin quasi alla superficie sul lato nord-ovest per limitare lo scavo a dimensioni analoghe a quelle della trincea di linea.

Per facilitare la rimozione dei detriti la trivellazione deve avere una leggera pendenza verso la zona di spinta, quindi la geometria è condizionata dalla quota di uscita. Da questa condizione geometrica risulta che la trivellazione passerà sotto il castello a una profondità compresa tra 12 m e 15 m. Si tratta di uno spessore di terreno che riduce di un ordine di grandezza l’ampiezza delle vibrazioni prodotte dalla testa fresante che raggiungono la superficie.

La testa fresante è la parte del sistema tecnologico destinata a realizzare il foro nel terreno sotto la spinta impressa dalla macchina all’estremo opposto del tubo di protezione. Sulla testa sono fissati numerosi utensili che frantumano la roccia in pezzi molto piccoli, singolarmente in grado di generare vibrazioni di ampiezza molto modesta, e complessivamente vibrazioni di frequenza elevata in relazione a quelle di risonanza per gli edifici più comuni.

Esistono delle norme specifiche per monitorare gli edifici da tutelare ma nessuna di esse ha valore prescrittivo. Ciascuna normativa classifica diversamente gli edifici ed attribuisce ad essi dei valori limite di ampiezza della velocità di picco della vibrazione ritenuti di sicurezza per le varie tipologie di edificio. Tuttavia, essendo tali normative

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 43 di 58	<b>Rev.</b> 0

rivolte alla conservazione dell'edificio, inteso come struttura architettonica fuori terra<sup>15</sup>, non possono essere applicati al sito in esame del quale si conservano, relativamente integre, solo le fondazioni.

Nonostante non sia prevedibile che le vibrazioni emesse dalla trivellazione possano recare danno ai manufatti archeologici, sono state individuate tutte le misure di mitigazione del rischio che saranno applicate sin dalla fase di appalto; tra queste sono anche previsti due sistemi di monitoraggio:

- un monitoraggio topografico finalizzato a verificare l'invarianza dei rapporti geometrici tra un insieme di caposaldi rappresentativi dei punti più significativi della struttura archeologica. Questo tipo di monitoraggio produce anche i dati numerici utili per redigere un documento finale a testimonianza dello sviluppo e dei risultati del monitoraggio;
- un monitoraggio fisico, qui definito *whole-body*<sup>16</sup> che sfrutta la sensibilità umana alle vibrazioni per valutare, in corso d'opera, l'intensità delle vibrazioni che raggiungono le strutture archeologiche, e se necessario, adottare immediatamente provvedimenti più opportuni.

---

<sup>15</sup> Non potrebbe essere altrimenti perché le norme sono finalizzate ad evitare anche i “danni architettonici” (in particolare di edifici particolarmente sensibili quali i Beni Culturali), che insorgono molto prima di quelli “maggiori” con implicazioni strutturali. Tentare di applicare queste normative a edifici di cui restano solo le fondazioni è discutibile, o impossibile, se sono prescritte misure anche ai piani superiori.

<sup>16</sup> secondo la definizione della normativa volta a tutelare il corpo umano dalle vibrazioni potenzialmente dannose



	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 45 di 58	<b>Rev.</b> 0

## ANNESSE 1: ESEMPI DI REGISTRAZIONI DI VIBRAZIONI DOVUTE A MACCHINE OPERATRICI

Nel seguito sono presentati due esempi di monitoraggi effettuati in situazioni in cui i macchinari operanti trasmettono al terreno una energia elevata entrambi tratti dallo “Studio previsionale sulle vibrazioni prodotte durante la realizzazione delle opere trenchless in progetto” (SPC-L- 83022) delle quale si riportano anche le conclusioni rimandando allo studio stesso per una trattazione più estesa.

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.

### **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)

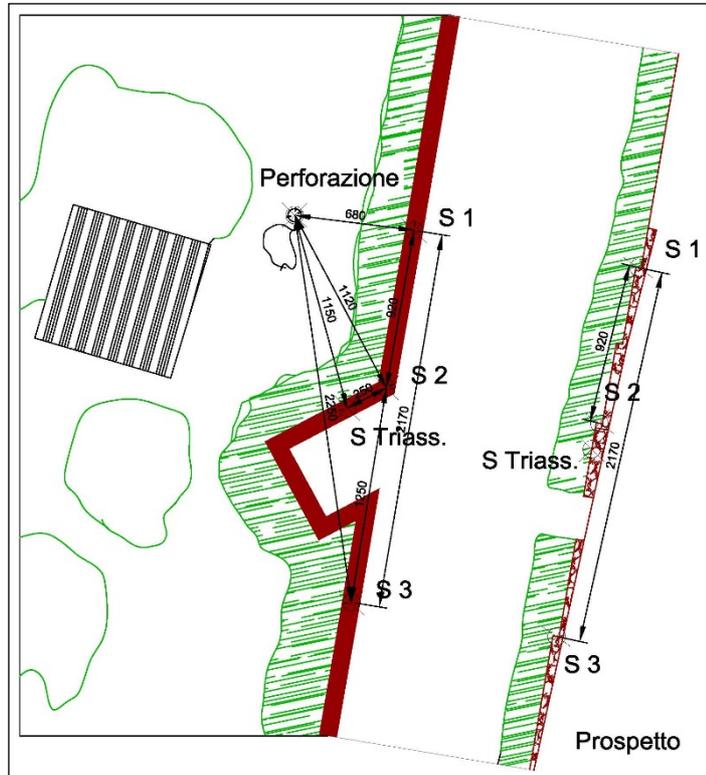
Le registrazioni delle vibrazioni sono state effettuate mediante tre sensori velocimetrici verticali, con risposta in frequenza da 4.5 a 500 Hz ed in grado di fornire un segnale di 20mV/mm/sec di velocità di vibrazione.

Per l’acquisizione dati è stato usato il sistema DAQ-LINK III che è 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 figura A1.1.1

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 figura A1.1.2.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 46 di 58	<b>Rev.</b> 0



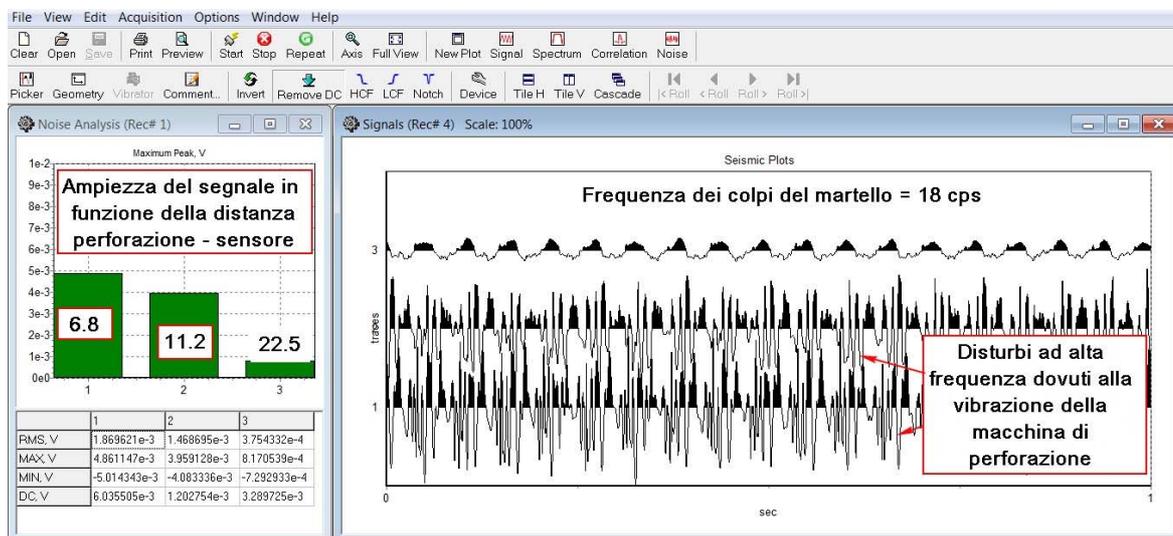
**Figura A1.1.1:** ubicazione dei sensori lungo il muro di cinta della proprietà interessata dalla perforazione a distanze di 6,8, 11,2 e 22,5 m

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

**Figura A1.1.2:** elenco della registrazione dei 12 eventi vibratori 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 figura A1.1.3 i sismogrammi relativi ai 3 punti di monitoraggio e la relativa analisi.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 47 di 58	<b>Rev.</b> 0



**Figura A1.1.3:** Sismogrammi e relativa analisi della registrazione n. 4 relativa alla profondità di 1.3 m dal p.c. evidenziata in Figura A1.1.2

Di ogni sismogramma è stata presa in considerazione, come valore di picco, la media dei valori massimo e minimo 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 nella 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 ed il 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 ed 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:

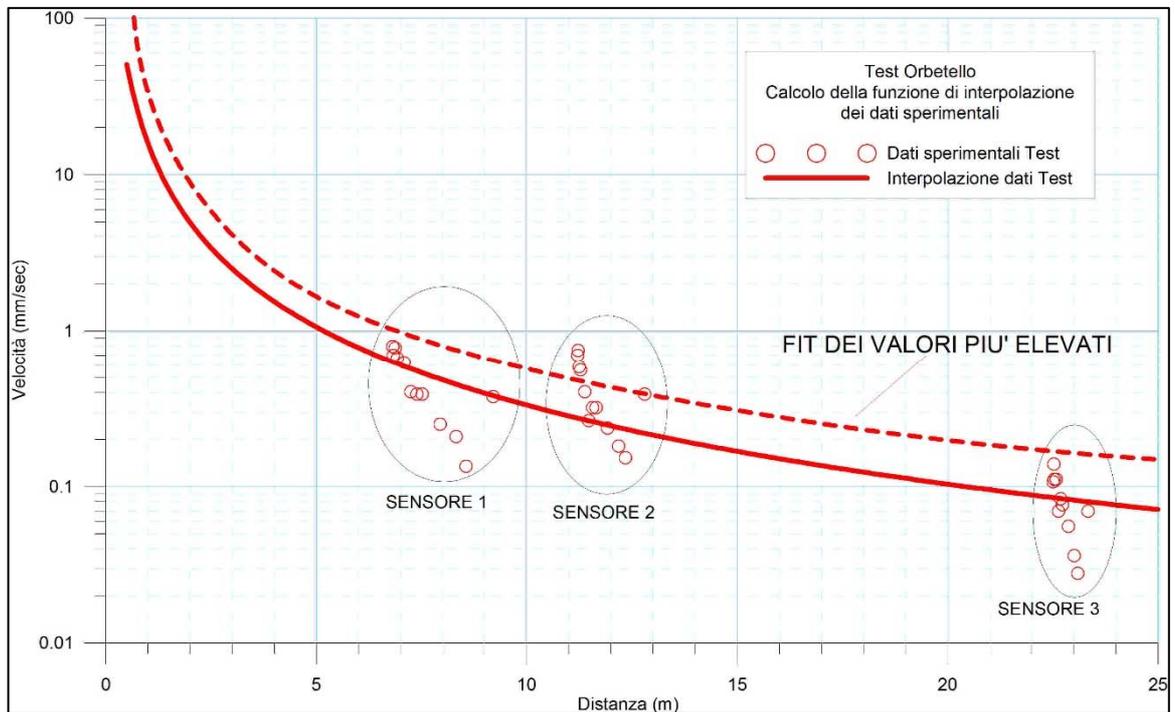
$$V_{\max} = X^{-1.6782} \times 15.824$$

dove  $V_{\max}$  è il valore scalare dell'ampiezza massima del vettore velocità atteso ad una determinata distanza dalla sorgente di vibrazione (X), ed il Coefficiente di Attenuazione è l'esponente negativo del parametro distanza (quindi l'intensità delle vibrazioni

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 48 di 58	<b>Rev.</b> <b>0</b>

decrese in maniera esponenziale con la distanza) mentre C è una costante legata alle 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 figura A1.1.4 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.



**Figura A1.1.4: Dati sperimentali e relative curve di interpolazione esponenziale negativa 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**

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 49 di 58	<b>Rev.</b> 0

## 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 è stato deciso di generare delle vibrazioni con uno strumento di energia nota e ripetibile e di effettuare prima un test in una area nota per la quale fossero note anche le caratteristiche dissipative dei terreni poi un monitoraggio specifico nel sito interessato dal progetto.

Per l'area di 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 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 modello 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 al fine di 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 figura A1.2.1 (uno sulla proprietà B e due sulla proprietà A) e generando vibrazioni nei punti indicati lungo il muro oggetto del progetto di consolidamento.

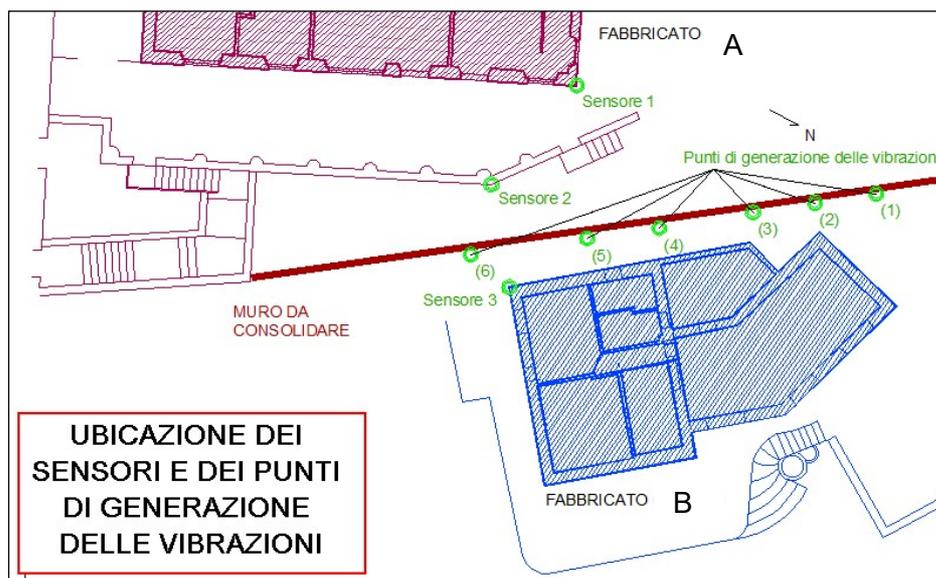
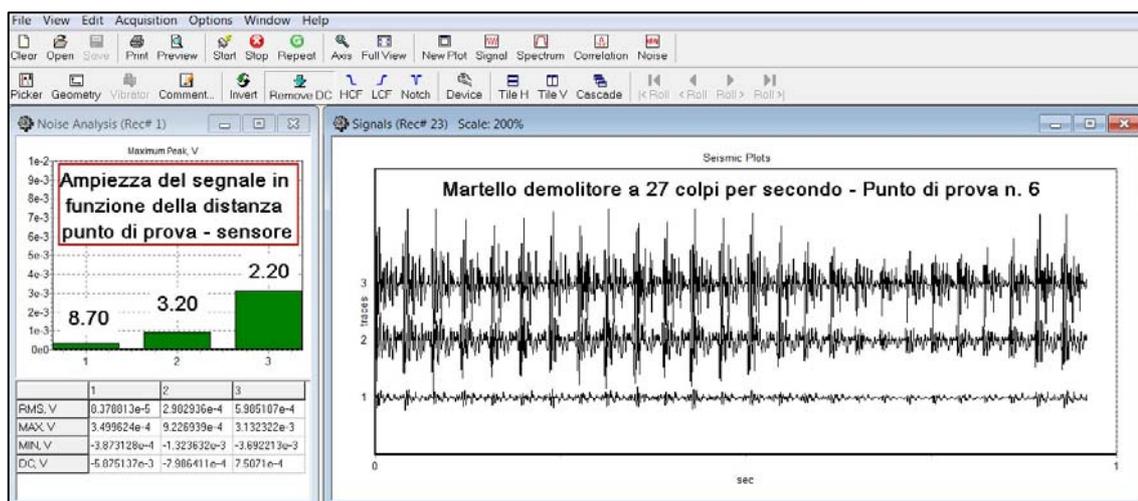


Figura A1.2.1: Planimetria dell'area di monitoraggio ed ubicazione dei tre sensori e dei punti di energizzazione

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 50 di 58	<b>Rev.</b> 0

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

Nella immagine in figura A1.2.2 si riportano i sismogrammi relativi alla registrazione n. 23 ed alle vibrazioni generate nel punto 6.



**Figura A1.2.2:** 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 (1mm/sec = 20mV) 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 una 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.

**Tabella A1.1:** Informazioni sulla energia di impatto a disposizione della perforatrice

Parametri del sistema di perforazione							Parametri derivati				
massa del pistone e della punta da 152 mm	di diametro del pistone	di diametro 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 <sup>2</sup>	Bar	N/cm <sup>2</sup>	n/sec	N	m/sec <sup>2</sup>	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

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 51 di 58	<b>Rev.</b> 0

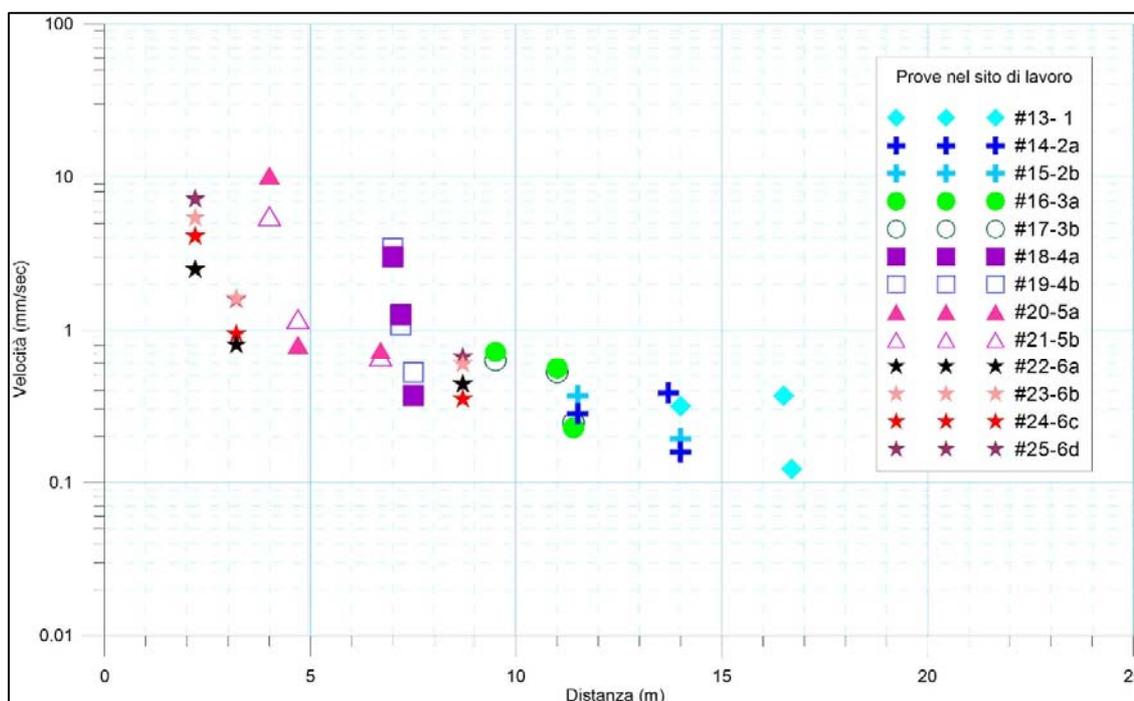
L'impresa esecutrice del pozzo nell'area test ha fornito le informazioni sulla energia di impatto a disposizione della perforatrice riportate nella tabella 6.1.

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 figura 6.2.3:



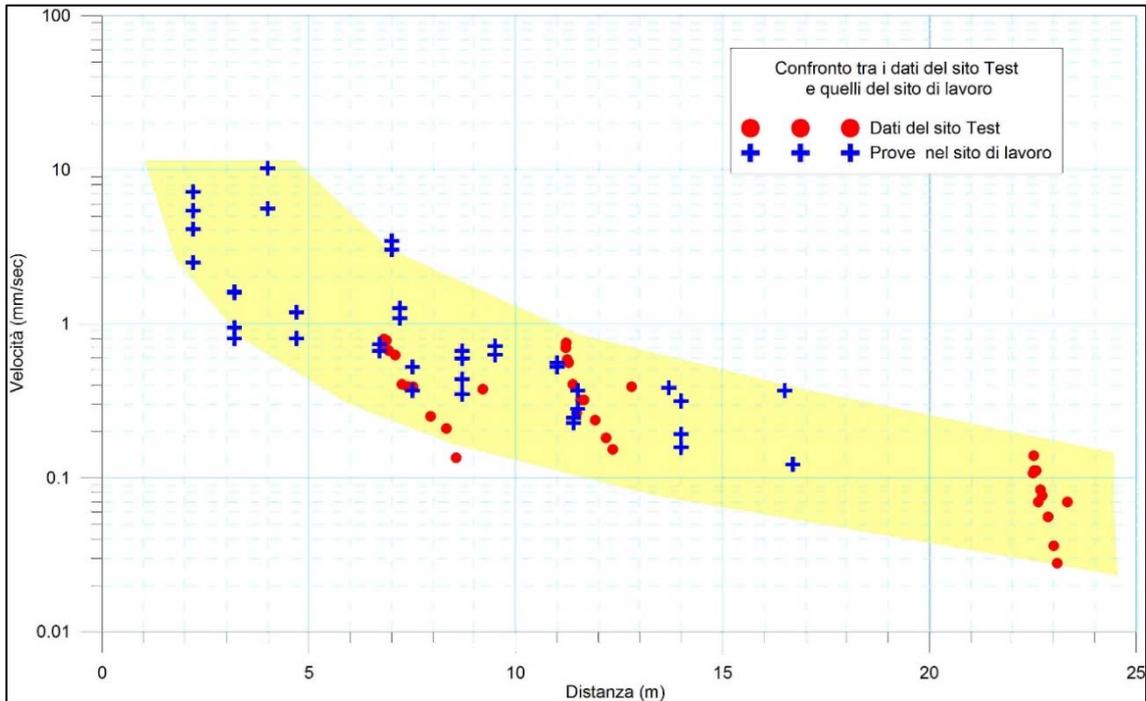
**Figura A1.2.3: Dati relativi all'azione del martello demolitore moltiplicati per il coefficiente 11.5 al fine di simulare l'azione del martello fondo foro**

Il grafico in figura A1.2.4, nel quale sono riportati i dati delle prove effettuate nel sito test ed in quello del progetto, mostrano una discreta correlazione confermando la validità della procedura seguita e la possibilità di estendere al sito del progetto la curva di dissipazione ottenute nel sito Test.

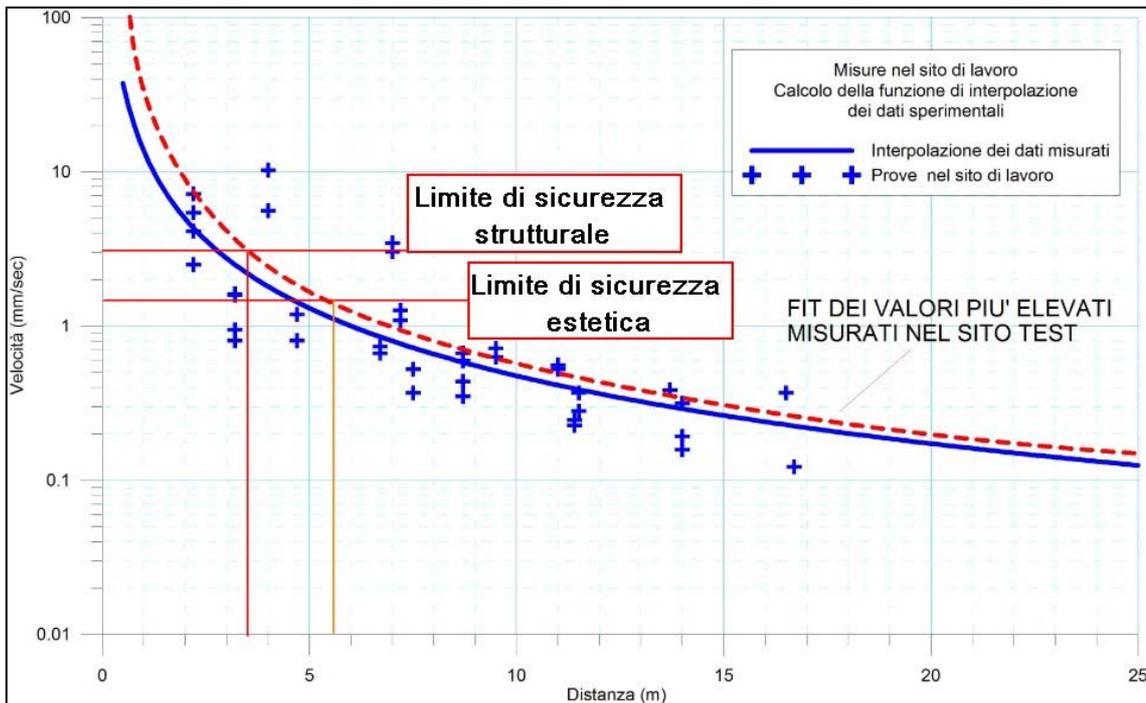
Questa funzione è riportata in figura A1.2.5 dalla quale risulta che l'esecuzione di micropali mediante il sistema di scavo a percussione con martello fondo foro può comportare il rischio di provocare delle lesioni agli edifici posti in adiacenza alla zona di lavoro:

- 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)

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 52 di 58	<b>Rev.</b> 0



**Figura A1.2.4:** Confronto grafico dei dati ottenuti nel sito in cui è previsto di realizzare i micropali (crocette blu) e nel sito Test (pallini rossi)



**Figura A1.2.5:** 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

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 53 di 58	<b>Rev.</b> 0

**A1-1 Considerazioni conclusive** della relazione “Studio previsionale sulle vibrazioni prodotte durante la realizzazione delle opere trenchless in progetto” -SPC-L- 83022

Nei precedenti capitoli si è evidenziato come la vibrazione prodotta da una sorgente energizzante si smorza con la distanza dall'origine in funzione delle caratteristiche dei terreni attraversati e come a parità dell'energia fornita dalla sorgente (accelerazione) l'ampiezza della velocità di vibrazione diminuisca rapidamente con l'aumentare della frequenza.

Si è visto, inoltre, come la sensibilità degli edifici alla 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 perforazioni 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, 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.

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, tanto maggiore è la qualità della roccia integra (generalmente quantizzata in termini di resistenza a compressione monoassiale) quanto 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 ad 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 fondo foro, potrebbe risultare critica nei confronti di eventuali edifici presenti in adiacenza all'area di intervento fino ad una distanza di quasi 6 m dalla sorgente (figura A1.2.5).

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 da quella massima per la quale sarebbero potenzialmente possibili danni estetici agli edifici, se fosse in azione un martello perforatore fondo foro, e circa quattro volte quella per la quale sarebbero potenzialmente possibili danni strutturali.

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

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 54 di 58	<b>Rev.</b> 0

essendo l'ampiezza di tali vibrazioni prevedibilmente inferiore di almeno di un ordine di grandezza rispetto a quelle prodotte dal martello fondo foro e la distanza dagli edifici abitualmente superiore (con ampi margini di sicurezza) rispetto a quella rivelatasi potenzialmente insicura nel sito di monitoraggio.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 55 di 58	<b>Rev.</b> 0

## ANNESSO 2: SUSCETTIBILITÀ DEL CORPO UMANO ALLE VIBRAZIONI

Quando un oggetto viene fatto vibrare alla sua frequenza naturale o di risonanza risente di spostamenti maggiori di quelli che la forzante gli imporrebbe a frequenze diverse da questa.

Per tutelare le persone sul lavoro o in tutte le situazioni di prolungata esposizione a fenomeni vibratorii è stata definita la norma UNI 9614:2017 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo” che definisce il metodo di misurazione delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti interne o esterne agli edifici e i criteri di valutazione del disturbo delle persone all’interno degli edifici stessi.

La soglia umana di percezione si colloca, secondo la norma UNI 9614, a 71 dB di accelerazione ponderata (quello che, in acustica è lo “zero dB” della scala dei livelli sonori) quindi l’organismo umano risulta più sensibile alle vibrazioni (di frequenze da 0,5 ad 80 Hz - cfr paragrafo A.2.1) rispetto agli edifici rapportando la soglia del “fastidio” fisico alla soglia oltre la quale gli edifici potrebbero subire danni.

La norma UNI 9614 suggerisce dei valori di livello di accelerazione ponderata che sarebbe opportuno non superare, in funzione del tipo di edificio abitato e della sua destinazione d’uso, come riportato nella tabella A2/A.

La norma UNI 9916, nel suo allegato “D”, fornisce una indicazione sui valori della velocità di picco ammissibile per vari tipi di edifici; tali valori vengono riportati nella tabella A2/B, e di ciascuno viene anche indicato il corrispondente valore di accelerazione ponderata in dB, onde poter confrontare questi numeri con quelli della tabella A2/A riferita al disturbo alle persone<sup>17</sup>.

**Tabella A2/A: Valori di livello di accelerazione ponderata in funzione del tipo di edificio abitato e della sua destinazione d’uso secondo la norma UNI 9614**

Edificio	Limite (dB)
Aree critiche	71
Abitazioni (notte)	74
Abitazioni (giorno)	77
Uffici	83
Fabbriche	89 <sup>18</sup>

<sup>17</sup> Dati tratto dallo studio *Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali* del Prof. A. Farina - Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale

<sup>18</sup> Valore non più accettabile perché superiore ai limiti di esposizione alle vibrazioni negli ambienti di lavoro.

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 56 di 58	<b>Rev.</b> 0

**Tabella A2/B: Valori della velocità di picco ammissibile secondo la norma UNI 9916 con il corrispondente valore di accelerazione ponderata in dB in funzione del tipo di edificio**

Per vibrazioni di breve durata		
Edificio	v <sub>pk</sub> (mm/s)	L <sub>aw</sub> (dB)
Edifici industriali	20 - 40	107.0 - 113.0
Edifici residenziali	5 - 15	95.0 – 104.5
Edifici storici	3 - 8	90.5 – 99.1

Per vibrazioni permanenti		
Edificio	v <sub>pk</sub> (mm/s)	L <sub>aw</sub> (dB)
Edifici industriali	10	101.0
Edifici residenziali	5	95.0
Edifici storici	2.5	89.0

Si tratta in generale di valori piuttosto elevati anche per gli edifici storici, per i quali si prescrivono i livelli di vibrazione più bassi, la velocità di picco non deve superare i 2.5 mm/s, cui corrisponde un livello di accelerazione ponderata pari a circa 89 dB. Tale limite è dunque generalmente più alto di quello che non causa disturbo alle persone edifici sensibili, cioè alla soglia di percezione (71 dB).

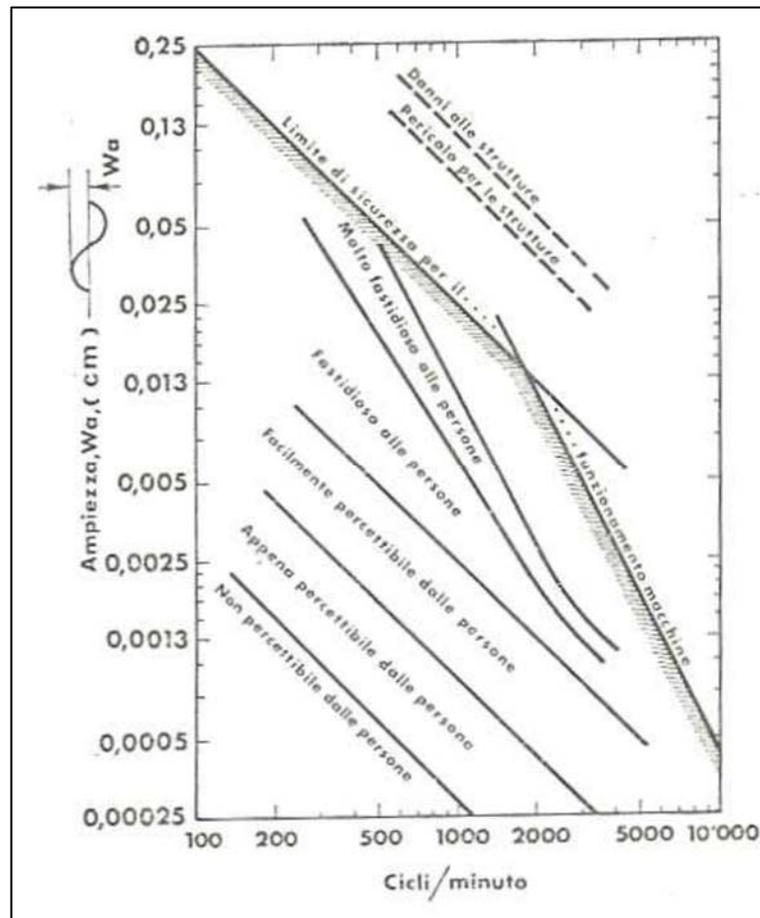
L' autore dello studio (cfr. nota 16) sostiene *“che solo in presenza di un fattore di cresta molto elevato, maggiore di 18 dB, potrebbe verificarsi il caso di superamento del limite di danno strutturale senza che si verifichi il superamento del limite di disturbo alle persone”*, e che *“casi simili non (gli) sono mai capitati in una più che ventennale esperienza, per cui si conclude che in sostanza il raggiungimento del rispetto dei limiti di non-disturbo alle persone, (omiss.) è sicura garanzia anche di non avere effetti dannosi per le strutture edilizie”*.

A conferma delle affermazioni precedenti si propone la figura A2/A nelle quale è riprodotto un grafico di Richardt (1962) (tratto da: Cestelli Guidi, *"Geotecnica e Tecnica delle fondazioni"* vol.2 - Ed. HOEPLI) che, delimita il campo di sicurezza per il buon funzionamento delle macchine in funzione delle caratteristiche dell'accelerazione (ampiezza e frequenza)

La seguente tabella consente di correlare il grafico di Richardt con il campo di frequenze da 0,5 ad 80 Hz alle quali è più sensibile il corpo umano (cfr paragrafo A2-1)

<b>Cicli/min</b>	100	200	500	1000	2000	5000	10000
<b>Hz</b>	1,67	3,33	8,33	16,67	33,33	83,33	166,67

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 57 di 58	<b>Rev.</b> 0



**Figura A2/A: Grafico di Richardt (1962) - da: Cestelli Guidi, "Geotecnica e Tecnica delle fondazioni" vol.2 - Ed. HOEPLI**

• A2-1 Le frequenze naturali del corpo umano

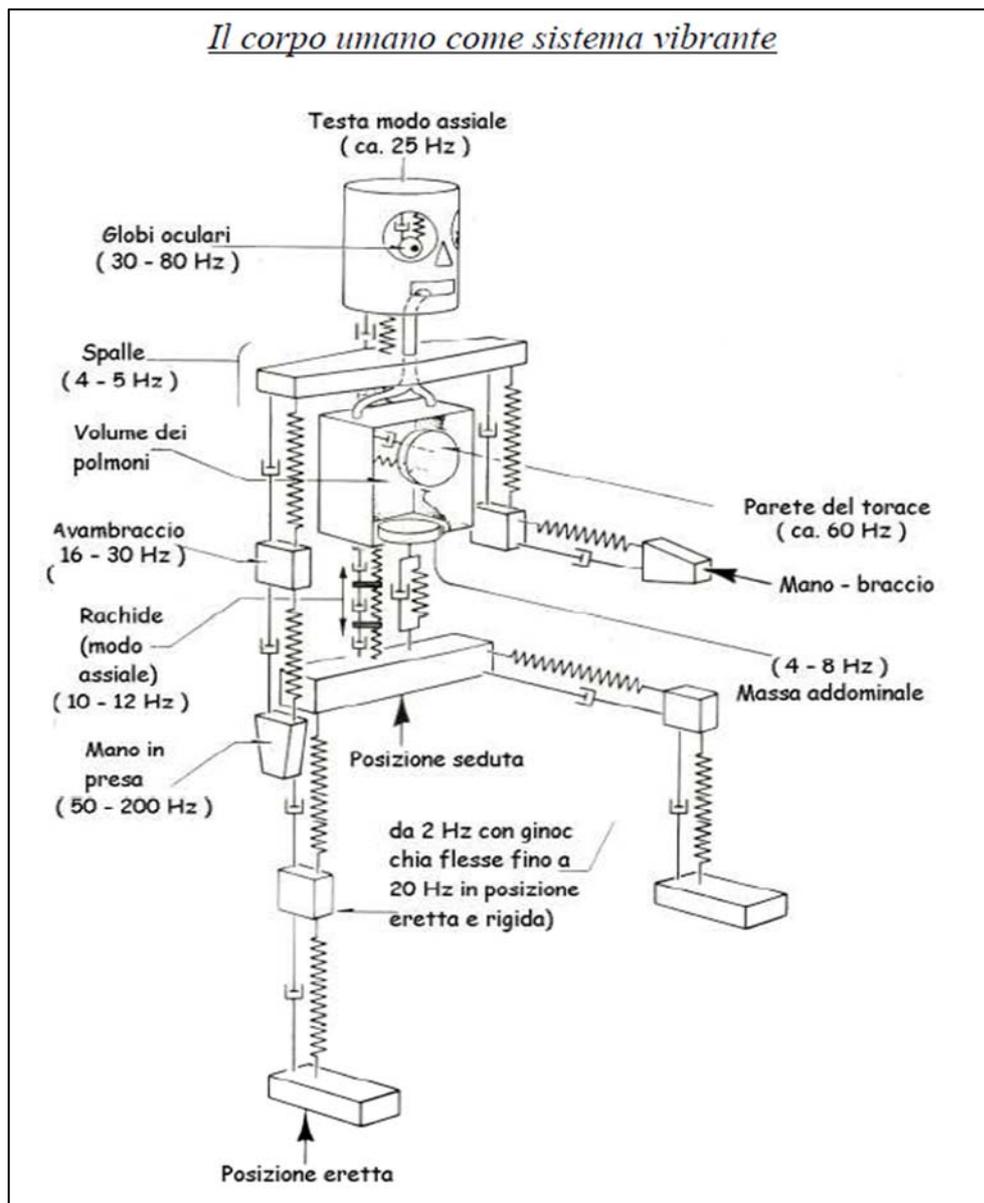
Il corpo umano assorbe dall'esterno componenti vibratorie nel campo di frequenze da 0,5 ad 80 Hz; a frequenze inferiori si muove come un'unica massa, a frequenze superiori l'energia viene assorbita dagli strati cutanei superficiali o dalla suola delle scarpe.

In quel campo di frequenze, gli organi ed i componenti individuali del corpo presentano frequenze naturali proprie e non si muovono come un'unica massa. I singoli organi, sollecitati dalle vibrazioni, amplificano o attenuano la vibrazione di ingresso, in funzione dalla frequenza eccitante:

- Frequenze da 4 a 8 Hz costituiscono il gruppo di frequenze che subisce la maggiore amplificazione, nella direzione verticale per la risonanza dei visceri.
- Frequenze da 10 a 12 Hz danno luogo a marcati effetti di risonanza nella regione delle vertebre cervicali e delle vertebre lombari con amplificazioni del 240% (7,6 dB).
- Frequenze da 4 a 6 Hz mettono in risonanza la parte superiore del tronco con amplificazioni del 200% (6,0 dB).

	<b>PROGETTISTA</b> 	<b>UNITÀ</b> 000	<b>COMMESSA</b> 023089
	<b>LOCALITÀ</b> Regione Liguria	<b>SPC. LA-E-83024</b>	
	<b>PROGETTO</b> Metanodotto Sestri Levante – Recco	Fg. 58 di 58	<b>Rev.</b> 0

- Frequenze da 20 a 30 Hz mettono in risonanza la testa con amplificazioni fino al 350% (10,9 dB).



**Figura A2/B:** Corpo umano schematizzato come sistema di molle e smorzatori ed attribuzione delle frequenze caratteristiche delle componenti principali