

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 1 di 66	Rev. 0

Metanodotto:

RIFACIMENTO ALLACCIAMENTO COMUNE DI ALFONSINE
 DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar
 IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)

RELAZIONE DI PERICOLOSITA' SISMICA



0	Emissione	Polloni	Battisti	Luminari	29.08.2018
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

	PROGETTISTA 	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 2 di 66	Rev. 0

INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	LOCALIZZAZIONE E DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	6
3	MODELLO GEOLOGICO-SISMICO DELL'AREA	9
3.1	Inquadramento fisico dell'area	9
3.2	Indagini eseguite	11
3.3	Modello geologico-sismico	12
4	SISMICITA' DELL'AREA	14
4.1.	Inquadramento sismico	14
4.2.	Magnitudo attesa	17
5	PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE.....	19
6	ANALISI DEL RISCHIO SISMICO	25
6.1.	Generalità	25
6.2.	Categoria di sottosuolo e condizioni topografiche	26
6.3.	Pericolosità sismica locale con metodo semplificato	27
7	EFFETTI SISMOINDOTTI	33
7.1.	Generalità	33
7.2.	Liquefazione	34
7.3.	Scuotimento sismico	39
8	CONCLUSIONI.....	40

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 3 di 66	Rev. 0

APPENDICE 1- Metodologia di calcolo della pericolosità sismica

ALLEGATO 1 - Stratigrafia sondaggio geognostico

ALLEGATO 2 - Verifiche alla liquefazione

ALLEGATO 3 - Indagini geofisiche: prove MASW

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 4 di 66	Rev. 0

1 PREMESSA

La presente relazione, redatta su incarico di Snam S.p.A., è relativa allo studio di pericolosità sismica dell'area interessata dal tracciato metanodotto "Rifacimento Allacciamento comune di Alfonsine, DN 100 (4'') – DP 75 bar" di lunghezza 2400 m, che si snoda interamente nel territorio del comune di Alfonsine (RA)..

Con riferimento alle caratteristiche litostratigrafiche e al modello geologico del sito, descritte nel dettaglio nella specifica "Relazione Geologica" (v. Rel. COMIS NR/18123 LSC-211) e desunte - oltre che dai dati bibliografici, cartografici disponibili - dalle indagini geognostiche e geofisiche eseguite allo scopo, nella presente relazione si riferisce in merito alle caratteristiche sismiche di base e al sito delle aree attraversate dal tracciato.

Sono stati esaminati i possibili effetti sismoindotti, con particolare approfondimento nei confronti del fenomeno della liquefazione e dello scuotimento del terreno. Per questo ultimo aspetto nella presente relazione si espongono i risultati sintetici delle verifiche effettuate, per il cui dettaglio si rimanda alla specifica relazione "Verifica strutturale allo scuotimento sismico" (v. Rel. COMIS NR/18123 LSC-213).

Per lo sviluppo del presente studio ci si è basati in particolare sulla documentazione disponibile, specialmente quella contenuta nei piani PSC Unione dei Comuni Bassa Romagna e PTCP della provincia di Ravenna, sui valori dei parametri sismici forniti da NTC 2018, sui risultati di una specifica indagine geognostica comprensiva di 1 sondaggio e 2 prove CPTU condotti da Beduschi Geotecnica, di un'indagine geofisica con 2 prove MASW condotta da Tecnogeofisica e da prove di laboratorio geotecnico presso il laboratorio Geomeccanico Orazi.

Lo studio effettuato tiene conto della legislazione, della normativa e delle raccomandazioni vigenti, in particolare di:

- D.M. 11 Marzo 1988: *Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.*
- CIRC. 24 Settembre 1988 n° 30483. D.M. 11 Marzo 1988: *Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni, Istruzioni per l'applicazione.*
- Ordinanza n. 3274 della Presidenza del Consiglio: *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per la costruzione in zona sismica*
- Ordinanza n. 3274 della Presidenza del Consiglio: *Norme tecniche per il progetto sismico di opere di fondazione e di sostegno dei terreni*
- UNI ENV 1977-1- EUROCODICE n° 7: *Progettazione geotecnica*
- UNI ENV 1998- 5 - EUROCODICE n° 8: *Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture: Parte 5 fondazioni, strutture di contenimento e aspetti geotecnici*
- D.M. 14 Gennaio 2008: *Norme Tecniche per le costruzioni*
- D.M. 17 Gennaio 2018: *Norme Tecniche per le costruzioni*

	PROGETTISTA 	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 5 di 66	Rev. 0

- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici: *Circolare 2 febbraio 2009, n. 617. Istruzioni per l'applicazione delle NTC*
- D.A.L. 112/2007 Regione Emilia Romagna, "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica"
- DGR 2193/2015 Regione Emilia Romagna, "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica"
- P.S.C., Piano Strutturale Unione Comuni Bassa Romagna
- P.T.C.P., Provincia di Ravenna.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 6 di 66	Rev. 0

2 LOCALIZZAZIONE E DESCRIZIONE DELL'OPERA

2.1 Localizzazione

L'area in cui si colloca il metanodotto in oggetto è localizzata nel territorio comunale di Alfonsine (provincia RA), alla periferia NW della città (v. Corografia in Fig. 1).

Essa ricade nel foglio IGM 89 Ravenna a scala 1:100.000 e nel foglio 223053 della cartografia tecnica della Regione Emilia Romagna a scala 1:10.000 (v. Fig. 2).



Figura 1 – Corografia a scala 1:200.000

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 7 di 66	Rev. 0

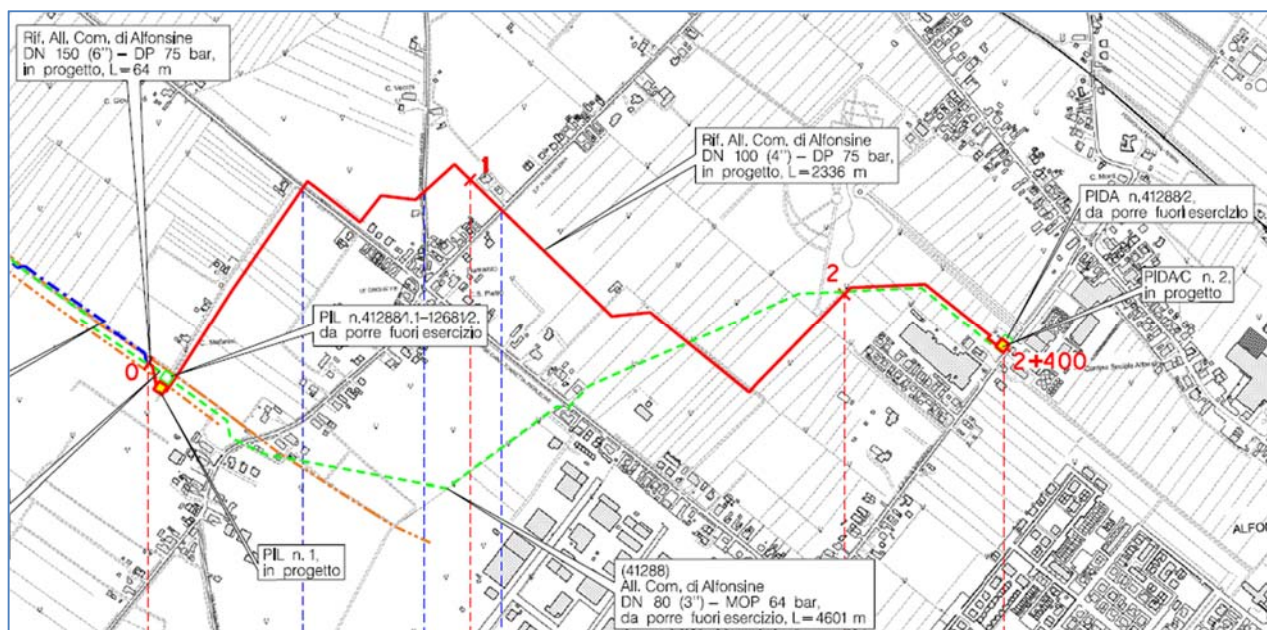


Figura 2 – Stralcio planimetrico CTR con localizzazione del tracciato in progetto

In figura 3 è rappresentata l'immagine aerea, tratta da Google Earth.



Figura 3 – Immagine aerea dell'area in studio (tratta da Google Earth)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 8 di 66	Rev. 0

2.2 Descrizione dell'opera

Il tracciato del Metanodotto Rifacimento Allacciamento Comune di Alfonsine DN 100 (4'')/150 (6'') - DP 75 bar in progetto, riportato sulle planimetrie in scala 1:10.000 allegate, ha origine dal metanodotto esistente Pot. Comune di Alfonsine 1a Presa DN 150 (6'') – MOP 64 bar, subito a monte del nuovo impianto PIL da realizzarsi in adiacenza di quello esistente da porsi fuori esercizio. Nel primo tratto, tra il punto di stacco e il nuovo PIL compreso, il metanodotto Rifacimento Allacciamento Comune di Alfonsine sarà costituito da tubazioni aventi diametro nominale DN 150 (6''). A valle dell'impianto PIL, fino al punto terminale, le tubazioni costituenti il metanodotto avranno invece un diametro nominale DN 100 (4'').

La condotta in progetto si sviluppa in direzione Est, interamente in Comune di Alfonsine, per una lunghezza complessiva di 2+400 Km.

Lungo il suo sviluppo il metanodotto interessa i seguenti attraversamenti principali:

- S.P. n.69;
- Via Carretto Vecchi;
- S.P. n.104;

La realizzazione delle opere in progetto comporterà la messa fuori esercizio dei rispettivi tratti di tubazioni/impianti esistenti per i quali è prevista la rimozione/intasamento per una lunghezza complessiva di circa 4.651 m.

La costruzione del metanodotto consiste nella posa della tubazione nel sottosuolo in una trincea scavata con mezzo meccanico e successivo rinterro della stessa con terreno per una copertura minima della tubazione di 1.50 m.

Nella fase di scavo della trincea si accantonerà separatamente lo strato superficiale del terreno agrario che verrà successivamente ricollocato in superficie.

La trincea, una volta posata la tubazione, sarà riempita riportando il terreno di scavo così che non saranno modificate le caratteristiche granulometriche e di permeabilità del sottosuolo.

Il progetto comprende pure la realizzazione di 2 piccoli impianti di intercettazione (denominati PIL; PIDA) i quali sono costituiti da tubazioni, valvole di intercettazione e pezzi speciali, prevalentemente interrati, ubicati in area recintata con pannelli in grigliato di ferro, su cordolo di calcestruzzo armato.

Le aree interne degli impianti sono pavimentate con autobloccanti prefabbricati.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 9 di 66	Rev. 0

3 MODELLO GEOLOGICO-SISMICO DELL'AREA

3.1 Inquadramento fisico dell'area

L'area in cui si snoda il tracciato del metanodotto in oggetto appartiene al settore emiliano del Bacino Sedimentario Padano, formato da una successione ciclica di depositi marini, deltizi, lagunari, palustri ed alluvionali di età pliocenico-quadernaria, che poggia su di un substrato con una complessa configurazione a pieghe. La base dei sedimenti pliocenici in zona si situa ad elevata profondità.

Dalla carta del Servizio Geologico d'Italia (v. Fig. 4) si vede come, a parte una fascia prevalentemente sabbiosa (s) a cavallo del T. Senio che attraversa l'abitato di Alfonsine, i terreni a NW dove si sviluppa il tracciato sono essenzialmente argille sabbiose (a^s).

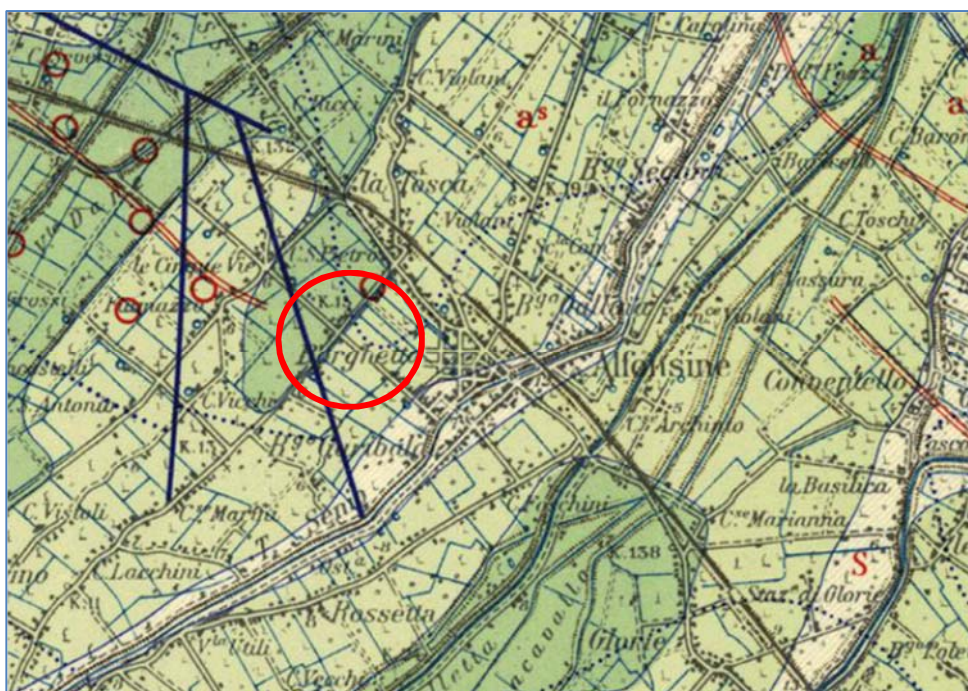


Figura 4 – Stralcio della Carta Geologica d'Italia Fg. 89 Ravenna

Il quadro stratigrafico dei depositi quadernari, desunto dallo studio Regione&ENIAGIP, è riportato nello stralcio della sezione 54 della Regione (v. Figg. 5, 6). Da esso si evidenzia come gli spessori dei sedimenti quadernari hanno una notevole potenza superiore a 200 m nella zona in studio e, a causa della pluralità degli ambienti deposizionali, i sedimenti presentano un'elevata variabilità litologica degli strati costituiti da sabbie, limi e argille e da miscele di tali litotipi.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4")/DN 150 (6") – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 10 di 66	Rev. 0

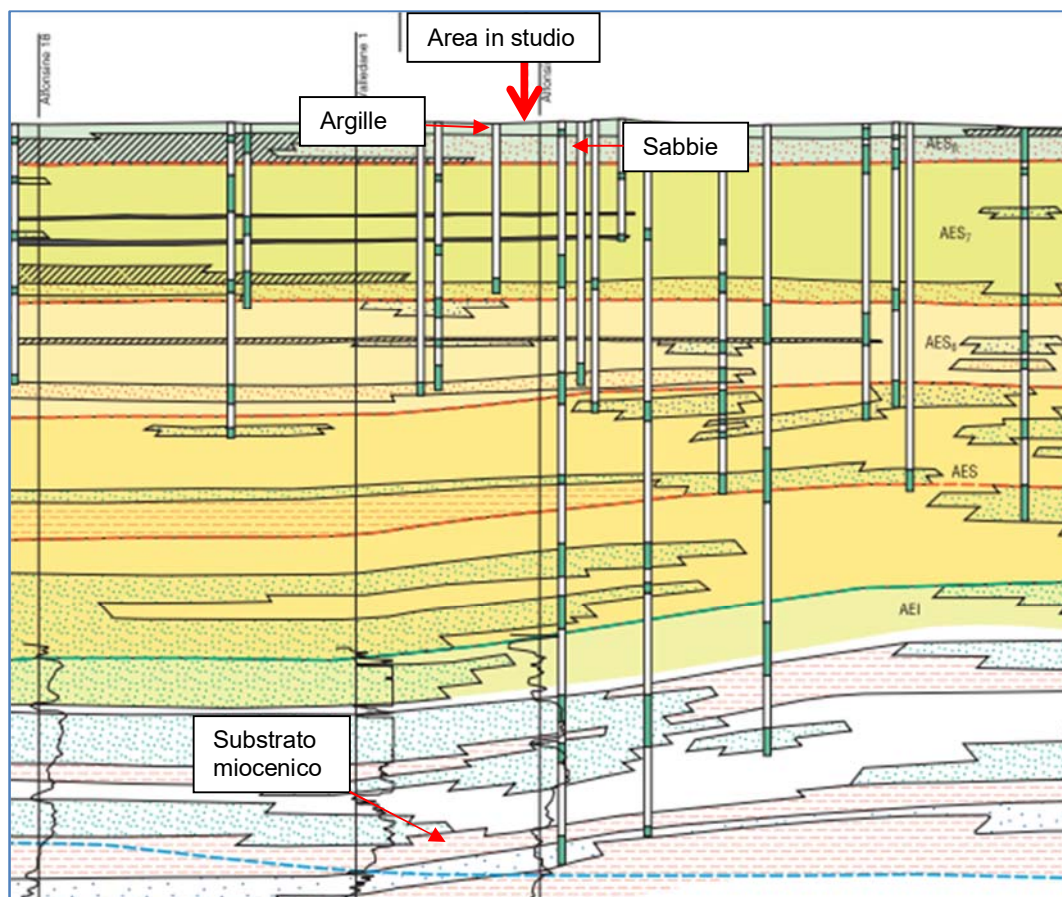


Figura 5 – Stralcio della sezione geologica n. 54 (Banca dati Servizio Geologico Regione ER)



Figura 6 – Ubicazione della sezione geologica n. 54 che attraversa l'area in studio

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 11 di 66	Rev. 0

Dal punto di vista litologico, l'area è formata negli strati superficiali da terreni alluvionali argillosi-limosi-sabbiosi depositati in ambiente a bassa energia in periodi geologici recentissimi, dell'ordine di pochissimi millenni.

L'evoluzione ambientale e deposizionale dell'area risente della complessa evoluzione dei sistemi fluviali presenti in zona, soprattutto del T. Senio che scorre in loco, consistente in una marcata e costante migrazione dei canali dovuti a fattori interni alla dinamica fluviale, ma anche a drastiche variazioni climatiche, del livello eustatico del mare e della deformazione tettonica in atto. Pertanto sedimenti sabbiosi si collocano in corrispondenza degli alvei e meandri dei canali mentre depositi fini argillosi negli spazi intervallivi.

3.2 Indagini eseguite

Al fine di ricostruire il modello geologico dell'area interessata dai lavori in oggetto fino a profondità significative dell'ordine di 20 m, oltre ai dati disponibili nella banca dati regionale, è stata condotta una campagna geognostica con l'esecuzione di un sondaggio a carotaggio continuo, due prove penetrometriche statiche continue (CPT) e due prove geofisiche MASW le quali hanno permesso di ricavare i dati necessari per la caratterizzazione del comportamento sismico dei terreni presenti.

L'ubicazione delle indagini è riportata di seguito nella figura 7.



Figura 7 – Localizzazione delle indagini svolte

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 12 di 66	Rev. 0

I risultati di tali indagini con la stratigrafia del sondaggio e quelle derivate dalle interpretazioni delle prove CPT sono riportati nel dettaglio nella Relazione Geologica e relativi allegati cui si rimanda (v. COMIS NR/18123 LSC-211). Il rapporto geofisico con i risultati delle prove MASW eseguite è in appendice alla presente relazione (v. Allegato 3).

3.3 Modello geologico-sismico

La situazione stratigrafica emersa dalle indagini geognostiche effettuate ha evidenziato sempre la presenza di litologie costituite da terreni alluvionali, che comprendono sabbie, limi e argille negli strati più superficiali dell'ordine di 10 m e sottostanti terreni prevalentemente sabbiosi, confermando anche localmente quanto in generale evidenziato dalla sezione 67 riportata in figura 5.

Le prove MASW hanno mostrato velocità delle onde di taglio dello strato superficiale sabbio-limo-argilloso con velocità di 100÷150 m/s e del sottostante strato sabbioso dell'ordine di 200-250 m/s (v. Fig. 8).

Le velocità equivalenti $v_{s\ eq}$ (come definite da NTC 2018), essendo il bedrock con $v_s > 800$ m/s molto profondo, corrispondono alla v_{s30} :

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

Prova	V_{s30} (m/s) misurate da p.c.	V_{s30} (m/s) misurate da piano posa -2 m	Categoria di sottosuolo
MASW 1	168	159	D
MASW 2	175	168	D

Tabella 1 - Velocità V_{s30} e categorie di sottosuolo ricavate dalle varie prove MASW

Pertanto il sito in oggetto viene caratterizzato da un sottosuolo di terreno di natura alluvionale con stratificazioni orizzontali di strati di non alto contrasto tra di loro, riferibili alla categoria D e con situazione topografica assolutamente pianeggiante.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 13 di 66	Rev. 0

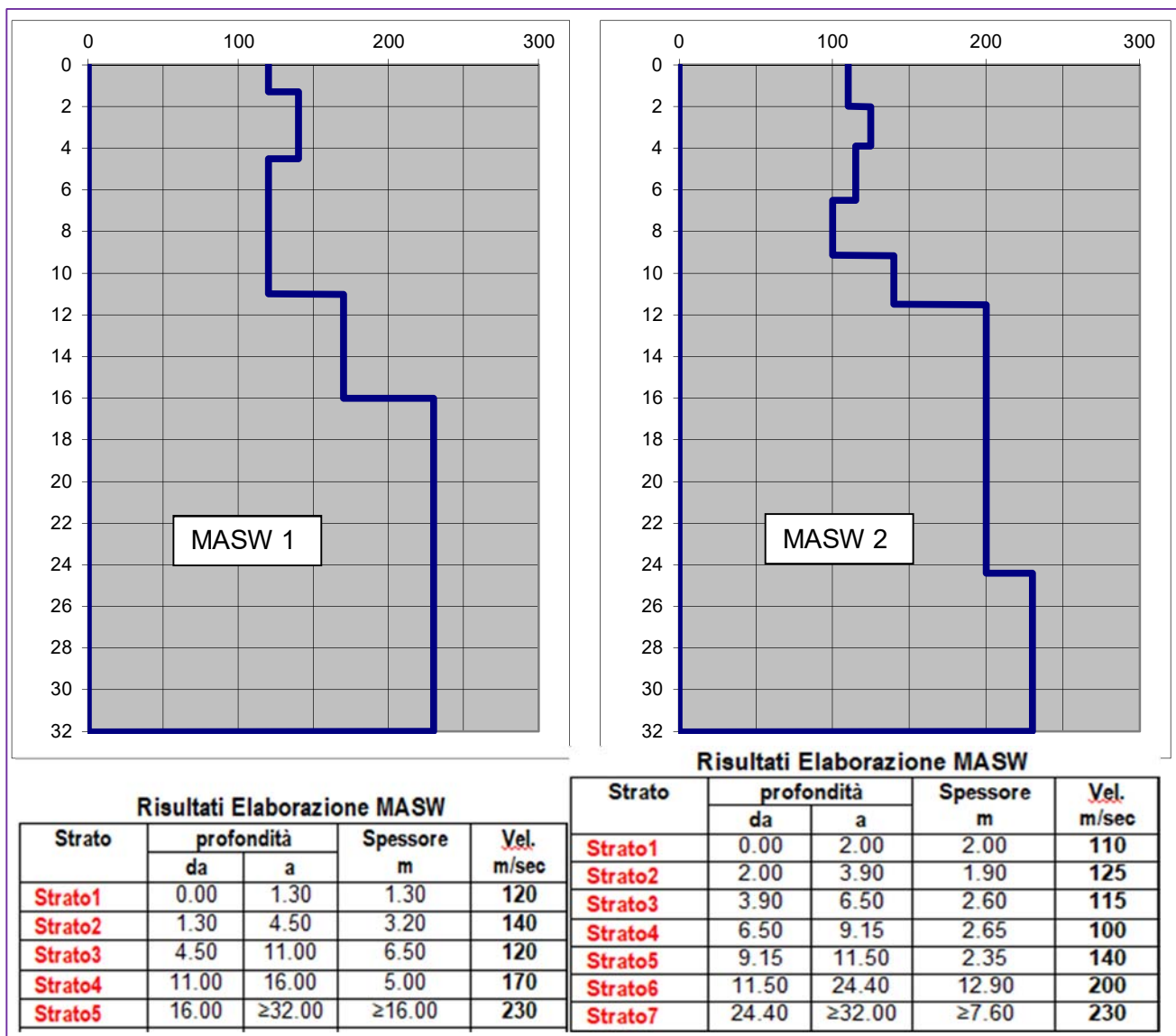


Figura 8 - Prove MASW: grafico delle velocità Vs in funzione della profondità

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 14 di 66	Rev. 0

4 SISMICITA' DELL'AREA

4.1. Inquadramento sismico

Nel nuovo modello sismogenetico usato in Italia, la cosiddetta zonazione ZS9, il territorio italiano è stato suddiviso in 36 diverse zone, numerate da 901 a 936, più altre 6 zone identificate con le lettere da "A" a "F" fuori dal territorio nazionale (A-C) o ritenute di scarsa influenza (D-F). Per ogni zona sismogenetica, caratterizzata da una propria sismicità, è stata effettuata una stima della profondità media dei terremoti e del meccanismo di fagliazione prevalente.

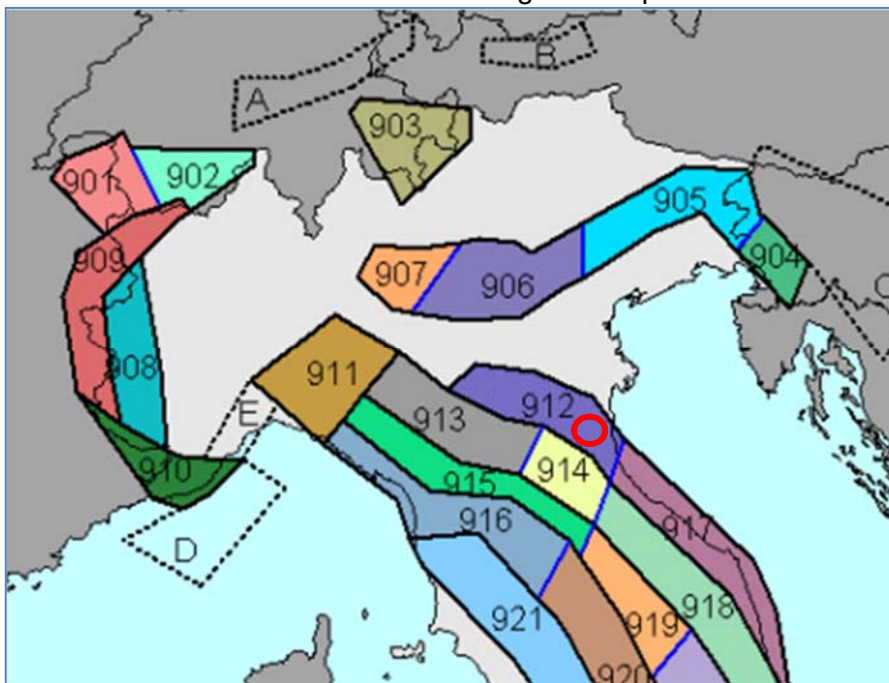


Figura 10– Zone sismogenetiche d'Italia (zonazione ZS9, da INGV). Stralcio nord Italia

In base alla zonazione sismica ZS9 operata da INGV, il tracciato in esame cade all'interno della zona sismogenetica 912 (v. Fig. 10).

La figura seguente (v. Fig. 11) riporta lo stralcio della mappa delle sorgenti sismogenetiche individuali in cui sono rappresentate le faglie attive e le aree di sorgente sismogenetica.

L'area di Alfonsine non ricade in zone di sorgente sismogenetica, anche se si situa in prossimità della "Composite Seimogenic Source" ITCS012 Malalbergo-Ravenna strutture cui si associano terremoti in genere di magnitudo M_w massima 5.4 ± 5.6 , come nel terremoto del 725 (M_w 5.6 a Classe-Ravenna), del 1624 (M_w 5.4 ad Argenta), del 1796 (M_w 5.6 nella Bassa Padana), del 1909 (M_w 5.5 nella Bassa Padana) e del 1967 (M_w 5.4 nella Bassa Padana).

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 15 di 66	Rev. 0

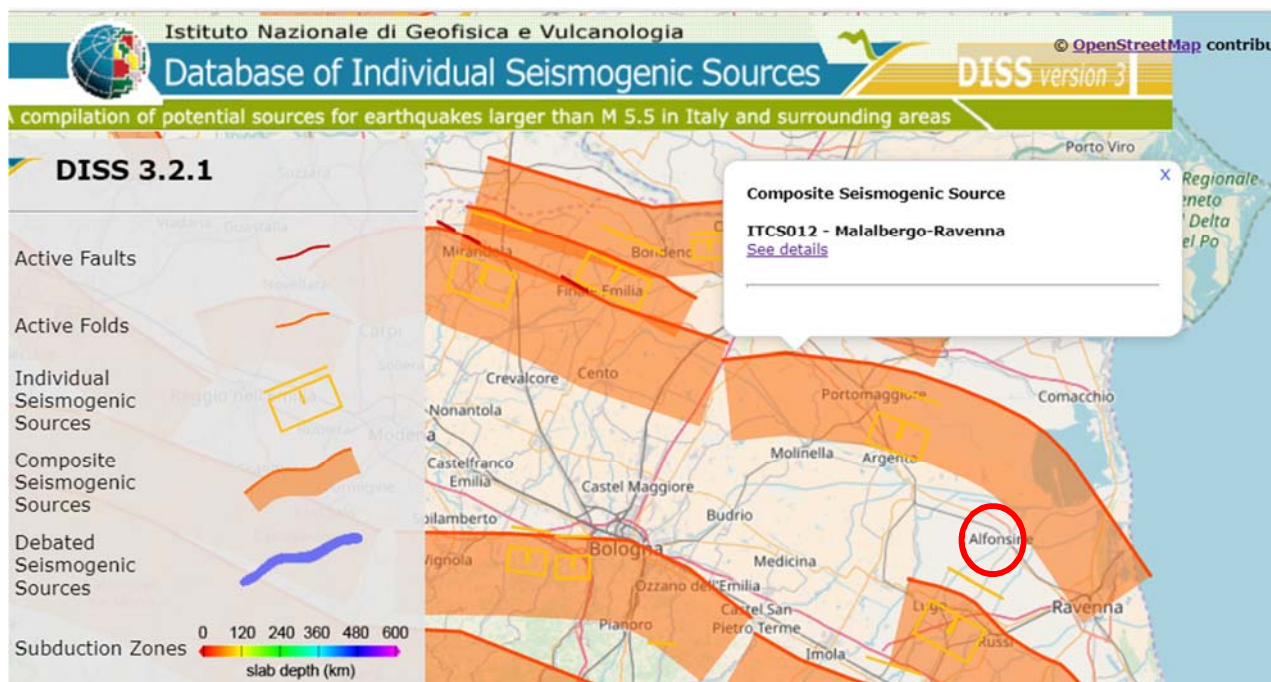


Figura 11 - Mappa delle fonti sismogenetiche
(da INGV, DISS 3, Database of Individual Seimogenetic souces)

Tuttavia, come si vede dall'immagine in Fig. 12, il territorio della zona di Alfonsine è stato interessato da deboli risentimenti di sismi fino a intensità macrosismiche di 5 nel 1911 (terremoto nel Forlivese Mw 5.26) e del 1916 (terremoto nel Riminese Mw 5.82) (v. Fig. 13).

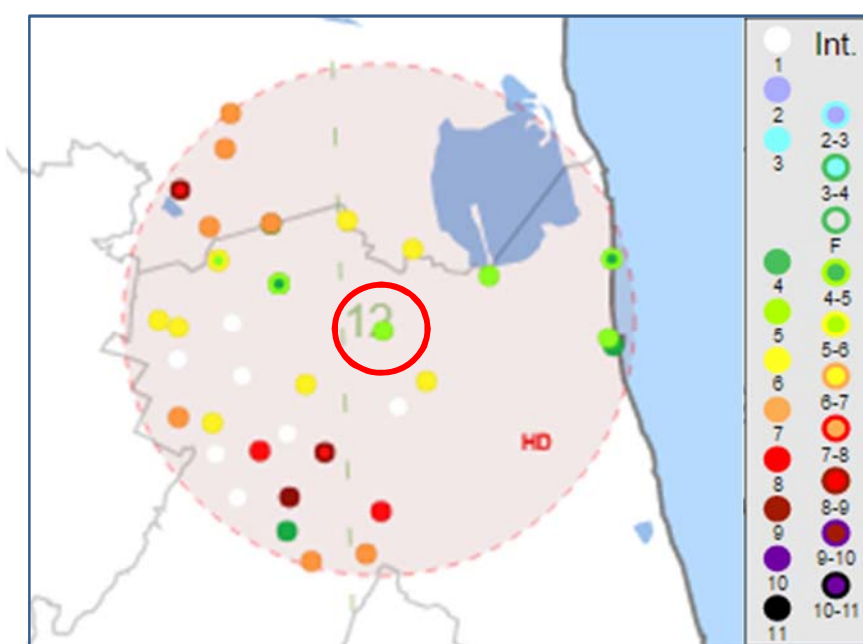


Figura 12 – Localizzazione dei terremoti nell'intorno dell'area di interesse e relativa intensità macrosismica
Da database macrosismico dei terremoti italiani di INGV, DBMI 15

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 16 di 66	Rev. 0

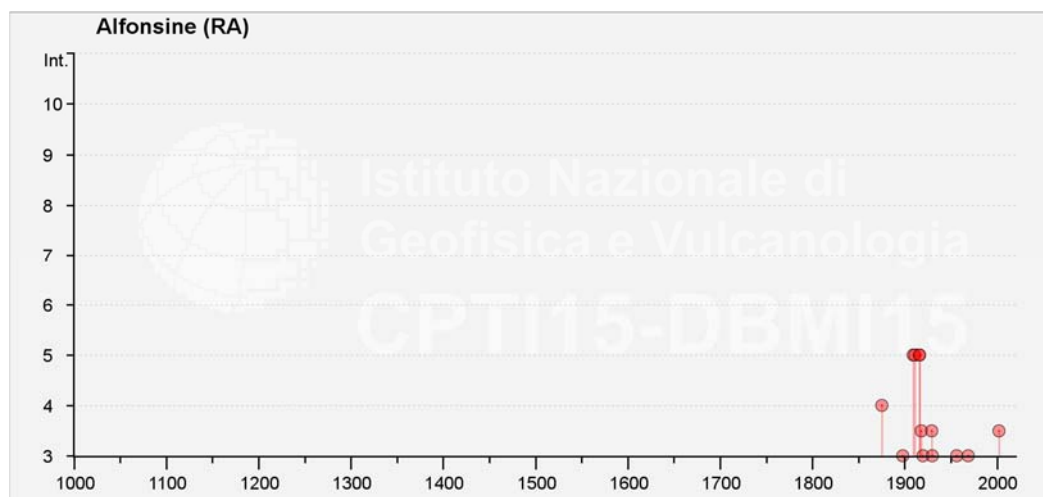
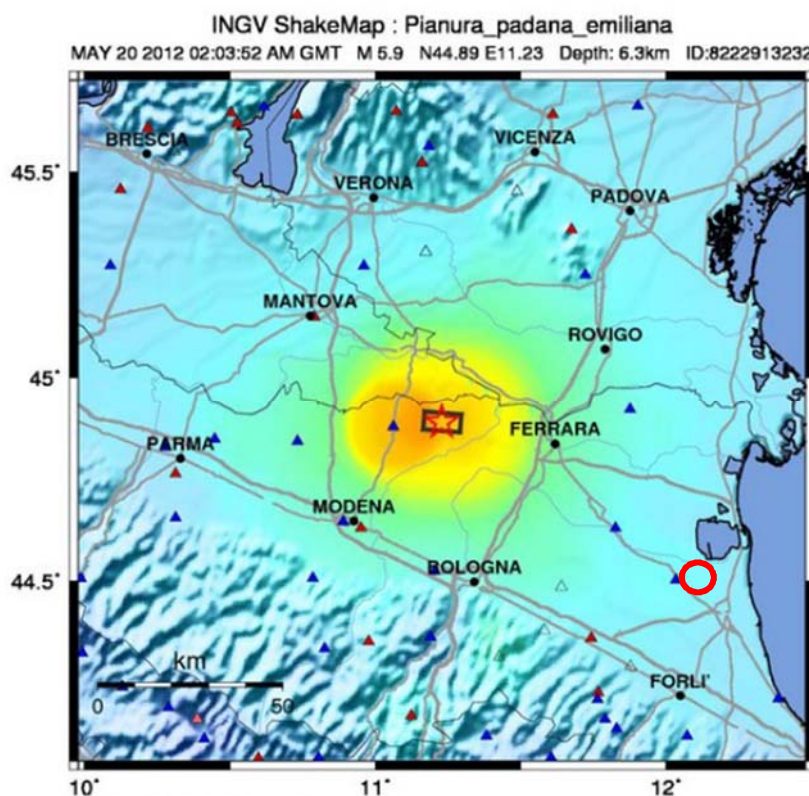


Figura 13 – Intensità macrosismiche dei terremoti risentiti ad Alfonsine nell'ultimo millennio
 Da database macrosismico dei terremoti italiani di INGV, DBMI 15

In occasione del terremoto di maggio-giugno 2012 il territorio del comune di Alfonsine non è stato interessato da intensità macrosismiche apprezzabili (v. Fig. 14).



	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 17 di 66	Rev. 0

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.1	0.5	2.4	6.7	13	24	44	83	>156
PEAK VEL.(cm/s)	<0.07	0.4	1.9	5.8	11	22	43	83	>160
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Figura 14 – Mappa di scuotimento in intensità macrosismica per l'evento del 20/05/2012

4.2. Magnitudo attesa

Sulla base della zonazione sismogenetica ZS9 dell'INGV per la zona 912 in cui ricade l'area in studio la magnitudo massima attesa M_{wmax} è pari a 6.14 (v. Tab. 2).

E' stata stimata inoltre la magnitudo attesa con il metodo della disaggregazione di $a(g)$ delle mappe di pericolosità sismica dell'INGV che permette di valutare la combinazione magnitudo-distanza epicentrale più probabile per un dato tempo di ritorno.

Dato che per l'opera in progetto le verifiche vengono eseguite anche per lo stato limite severo SLV (salvaguardia vita), tale disaggregazione è stata calcolata per la condizione $T_r = 949$ anni (5% di superamento in 50 anni).

Nome ZS	Numero ZS	M _{wmax}
Colli Albani, Etna	922, 936	5.45
Ischia-Vesuvio	928	5.91
Altre zone	901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 916, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934	6.14
Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza Sanremo	918, 919, 910	6.37
Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana-Mugello, Calabria Jonica	905, 906, 915, 930	6.60
Molise-Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto	924, 925, 931	6.83
Appennino Abruzzese, Sannio – Irpinia-Basilicata	923, 927	7.06
Calabria tirrenica, Iblei	929, 935	7.29

Tabella 2– Valori di M_{wmax} per le varie zone sismogenetiche d'Italia (da INGV)

Il grafico, riportato nella seguente Fig. 15, è stato desunto dalle Mappe Interattive di Pericolosità Sismica dell'INGV, relativamente al punto di maggior a_g della griglia in cui si ricade l'opera. La relativa tabella numerica non è qui riportata, ma può essere consultata on line nel sito INGV.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 18 di 66	Rev. 0

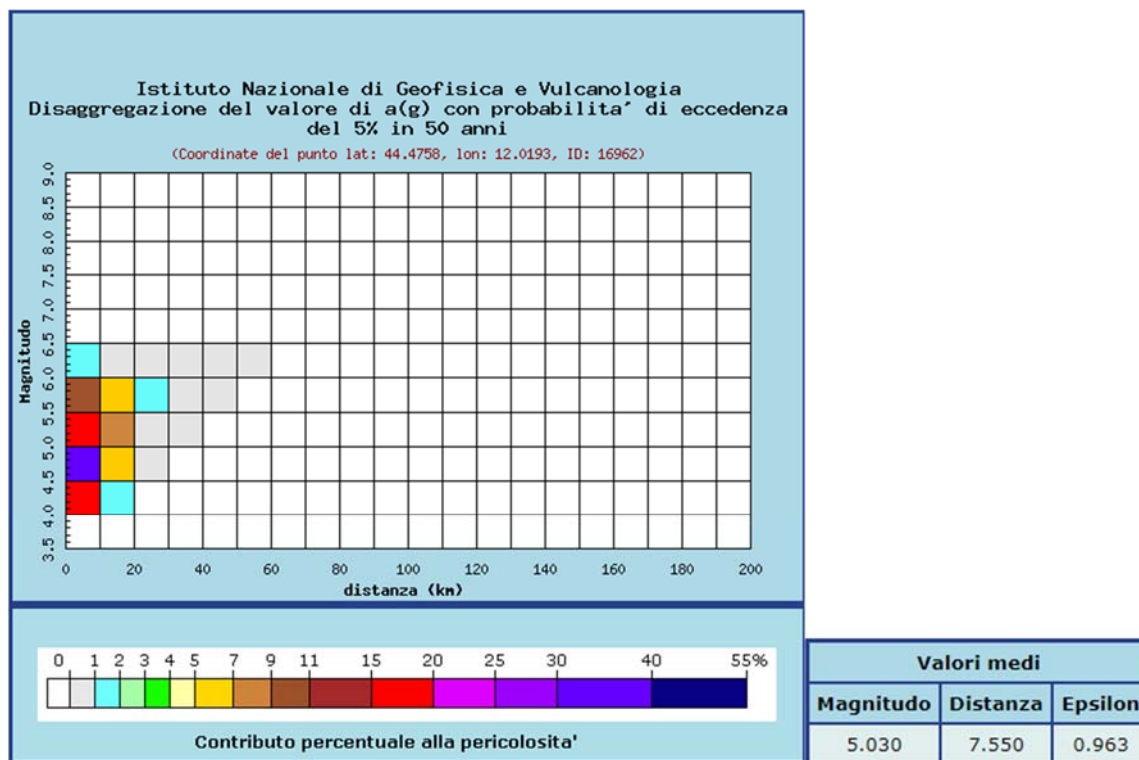


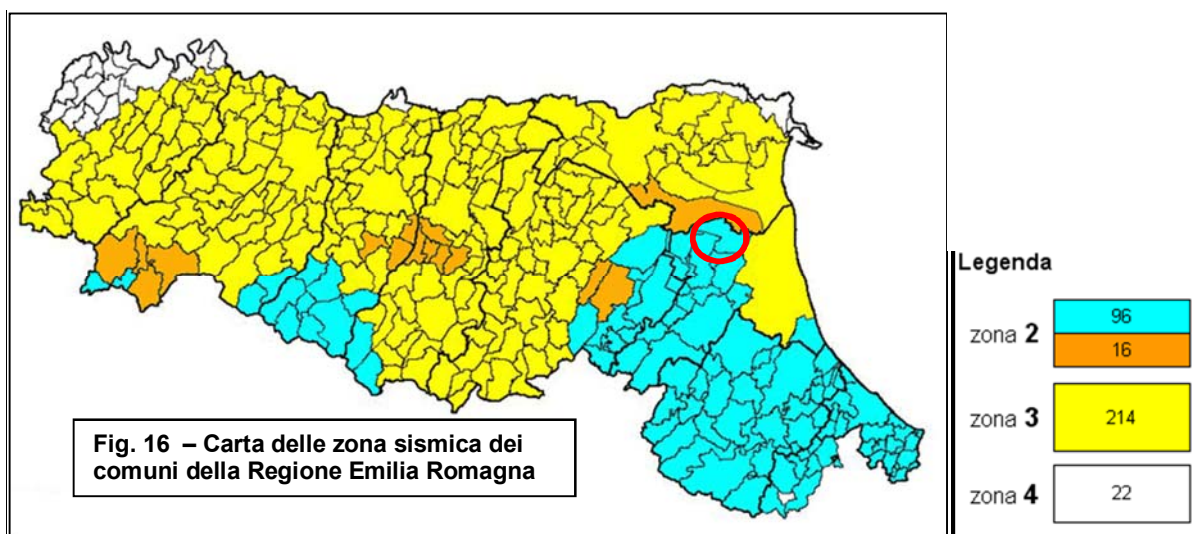
Figura 15 – Disaggregazione Magnitudo-distanza

Come appare dalla figura sopra riportate, le magnitudo attese per un tempo di ritorno di 949 anni sono dell'ordine di 5.03 cui corrisponde una distanza epicentrale di 7.55 km.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 19 di 66	Rev. 0

5 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

Il tracciato ricade interamente nell'ambito del territorio del comune di Ferrara, classificato, ai sensi della PCM 3274/ 2003, in zona sismica 2. (v. Fig. 16).



In base alla zonazione INGV “Pericolosità sismica del territorio nazionale” (PCM 28/04/2006 n. 3519) il tracciato cade in aree con $a_g = 0.150 \div 0.175$ g con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, cioè tempo di ritorno 475 anni e con $a_g = 0.200 \div 0.225$ g con probabilità di superamento del 5% in 50 anni, cioè tempo di ritorno 949 anni (v. Fig. 17).

Con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008) e come successivamente confermato dal loro aggiornamento (D.M. 17 gennaio 2018) la pericolosità sismica del territorio nazionale, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido affiorante (o caratterizzato da velocità delle onde sismiche trasversali 800 m/s) viene definita mediante un approccio sito dipendente, cioè tramite la posizione delle sue coordinate nell'ambito del grigliato nazionale, per i cui vertici vengono forniti i valori dei parametri sismici di base: a_g , F_0 , T_c .

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 20 di 66	Rev. 0

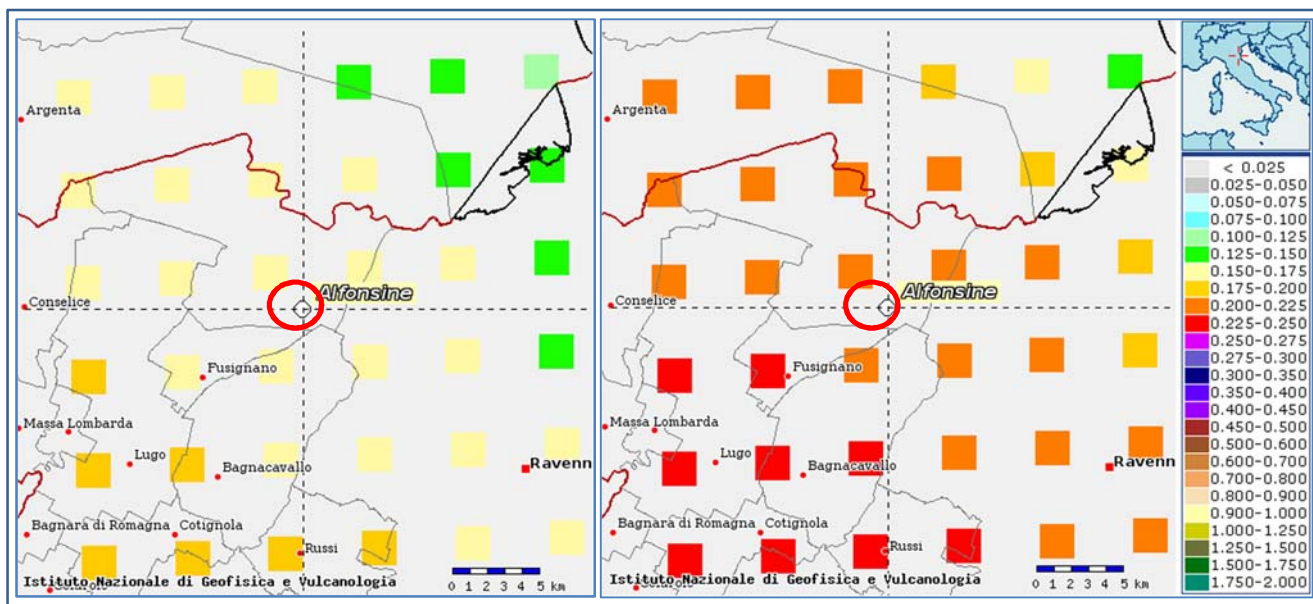


Figura 17– Carta di pericolosità sismica (INGV): a sinistra $T_r = 475$ anni, a destra $T_r = 949$ anni

Tramite media pesata è possibile in tal modo definire gli spettri di risposta, ai sensi delle NTC 2018, nelle condizioni di sito di riferimento su suolo rigido orizzontale (categoria di terreno A). I valori dei parametri a_g , F_o , T_c^* sono indicati per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o per diversi tempi di ritorno T_R , essendo:

a_g = accelerazione orizzontale massima

F_o = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale

T_c^* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Qualora la pericolosità sismica del sito sia relativa ad un periodo di riferimento diverso da quelli forniti dalle NTC 2018, i vari parametri vengono calcolati per interpolazione.

Sulla base del programma di calcolo *Spettri-NTC ver. 1.0.3*, messo a disposizione dal Ministero dei L.L. P.P. e tramite il software *Geostru PS Advanced*, l'interpolazione dei valori del grigliato nazionale ha permesso di definire i parametri sismici di base e i relativi spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno di riferimento.

Per il calcolo dei parametri sismici nell'ambito del territorio attraversato dal metanodotto in progetto, stanti le caratteristiche di relativa omogeneità degli stessi e della limitata estensione del tracciato, si è fatto riferimento ad un sito baricentrale (v. Fig. 18) con le seguenti coordinate:

- WG S84: Lat 44.512023 – Long 11.022467
- ED 50: Lat 44.512956 – Long 11.023445

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 21 di 66	Rev. 0

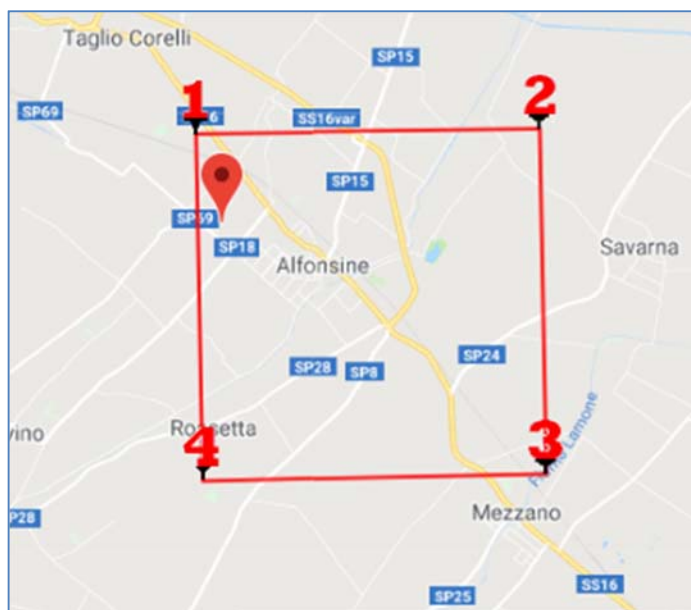


Figura 18 – Localizzazione del sito di riferimento per il calcolo dei parametri sismici nell'ambito del grigliato nazionale

Per tale sito si sono calcolati i parametri sismici di base sia per la condizione di stato limite di danno SLD ($T_r = 101$ anni) che di stato limite salvaguardia vita SLV ($T_r = 949$ anni) come si riporta nella tabella 3.

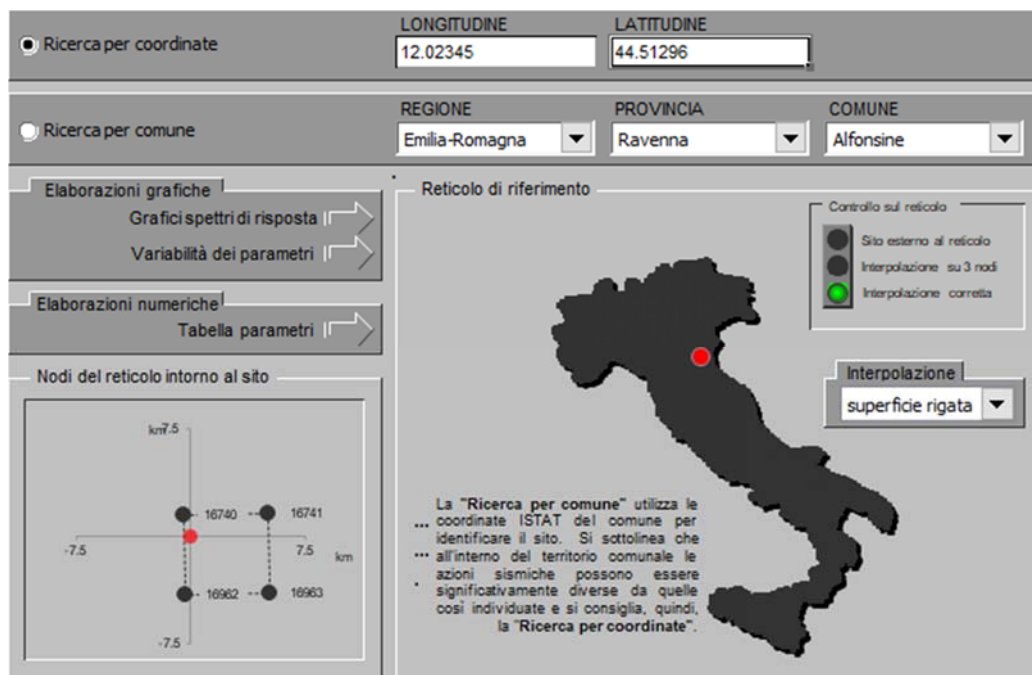


Figura 19 – Schermata del programma Spettri-NTC ver. 1.0.3 utilizzato per la stima dei parametri sismici

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 22 di 66	Rev. 0

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
SLO	60	0.064	2.475	0.279
SLD	101	0.083	2.460	0.280
SLV	949	0.211	2.512	0.284
SLC	1950	0.275	2.455	0.297

Tabella 3 – Parametri sismici di base per diversi tempi di ritorno.
 Evidenziati i parametri relativi agli stati SLD e SLV

Di seguito nelle figura 20 si riportano i valori di progetto dei parametri a_g , F_o , T_C' in funzione del periodo di ritorno e in figura 21 gli spettri di risposta elastici per diversi stati limite.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4")/DN 150 (6") – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 23 di 66	Rev. 0

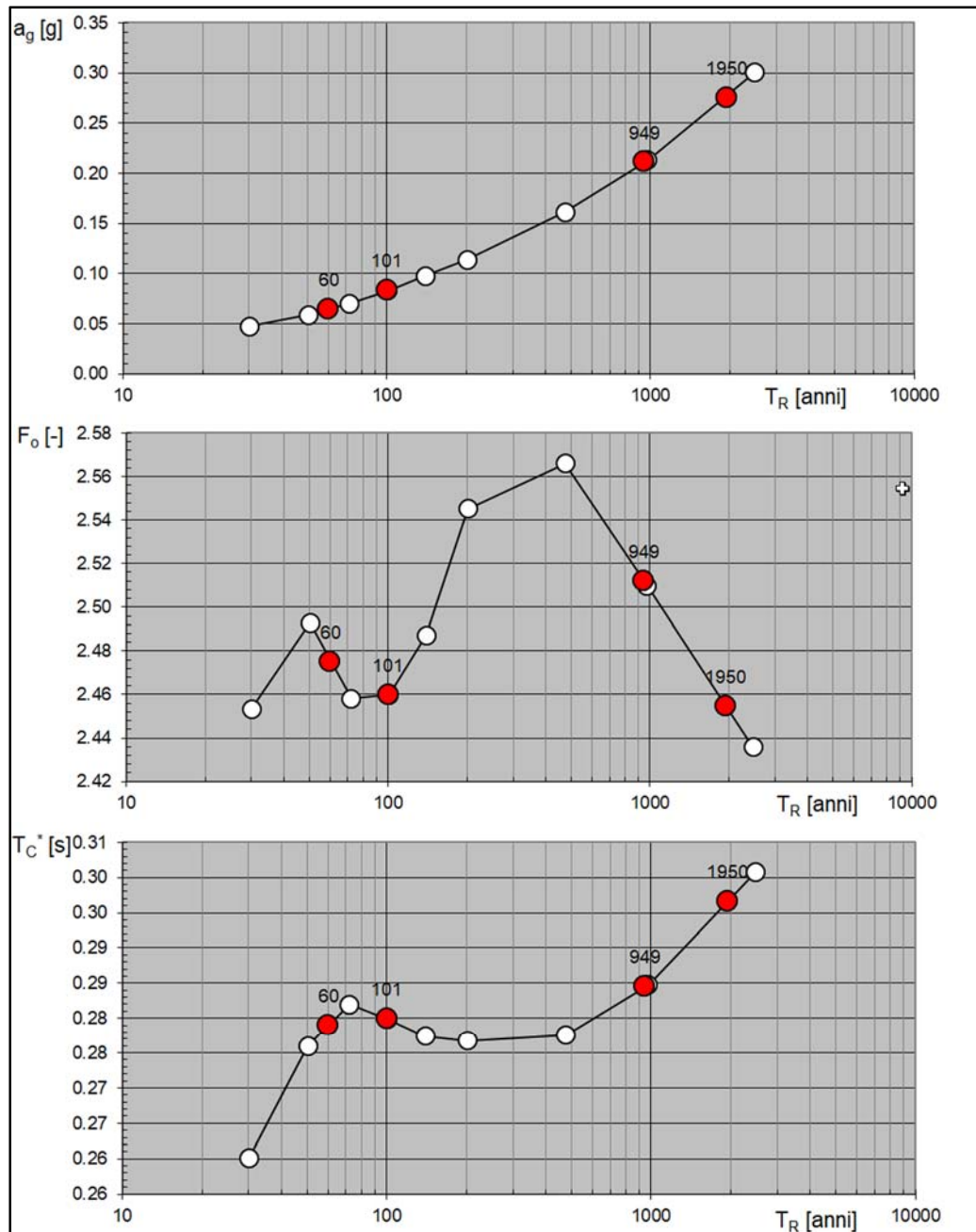


Figura 20 – Valori di progetto dei parametri a_g , F_o , T_c'

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 24 di 66	Rev. 0

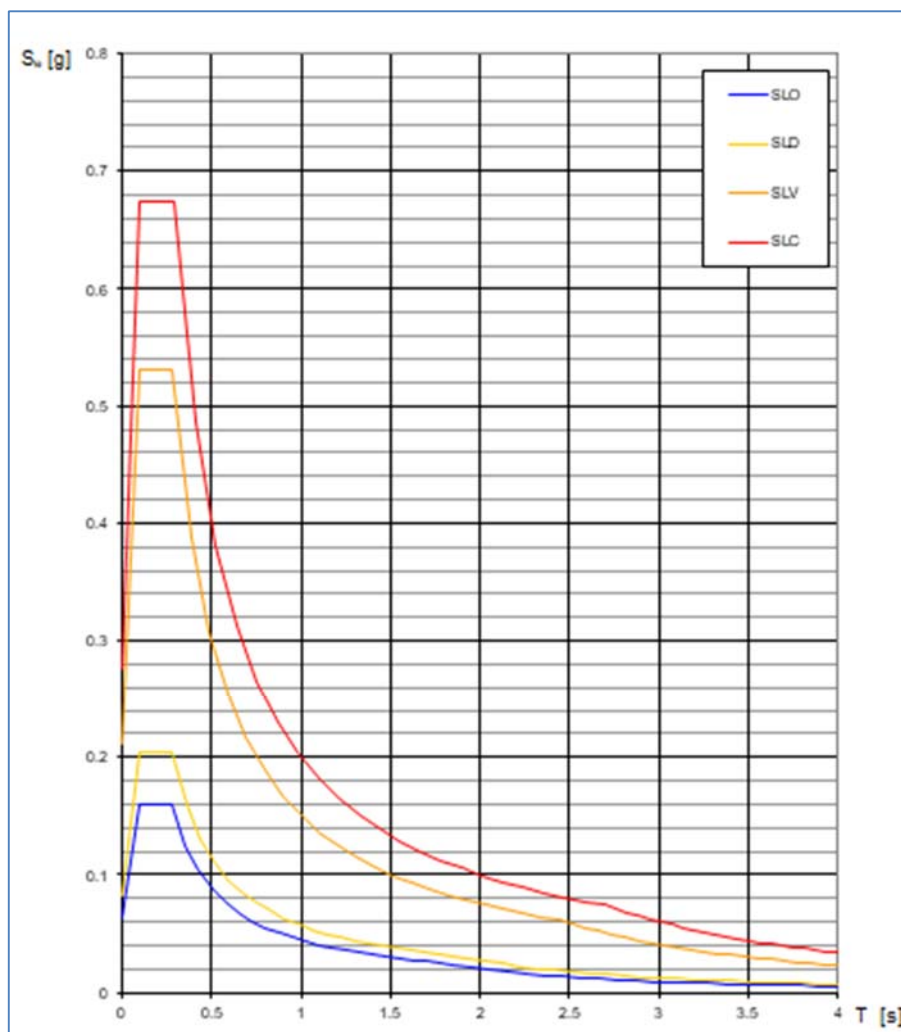


Figura 21 – Spettri di risposta elastici per diversi stati limite

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 25 di 66	Rev. 0

6 ANALISI DEL RISCHIO SISMICO

6.1. Generalità

Il rischio sismico al sito viene valutato in funzione delle condizioni geologiche e geomorfologiche in cui è inserita l'area di intervento. Deve pertanto essere valutata l'amplificazione sismica locale secondo la metodologia e le procedure indicate dalla legislazione nazionale, NTC 2018, e regionale (DGR n. 65-7656/2014; DGR n. 2193/2015).

Le condizioni locali possono infatti influenzare, in occasione di eventi sismici, la pericolosità sismica di base producendo effetti da considerare nella valutazione della pericolosità sismica dell'area.

Elemento indispensabile per qualsiasi studio finalizzato al riconoscimento delle aree potenzialmente pericolose dal punto di vista sismico è l'individuazione della categoria di terreno.

Gli effetti di sito o amplificazione sismica locale sono rappresentati dall'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che il terremoto di riferimento, relativo al bedrock, può subire durante l'attraversamento degli strati sovrastanti, a causa dell'interazione delle onde sismiche con le particolari condizioni locali. Si possono quindi distinguere effetti di amplificazione topografica e di amplificazione litologica.

Gli effetti di amplificazione topografica si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie superficiali articolate, con versanti acclivi e scarpate, zone di cresta rocciosa o cocuzzolo, ecc.

Gli effetti di amplificazione litologica o geometrica si possono produrre quando si è in presenza di profili stratigrafici costituiti da litologie con proprietà meccaniche diverse o articolate morfologie sepolte. Con tali condizioni si possono generare fenomeni di esaltazione delle azioni sismiche trasmesse dal terreno e di risonanza.

La valutazione dei fenomeni di amplificazione finalizzata alla definizione dei parametri sismici al sito può essere eseguita con il cosiddetto metodo semplificato, come previsto dalla NTC 2018, oppure con analisi semiquantitative (analisi di 2° livello) o quantitative (analisi di 3° livello).

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 26 di 66	Rev. 0

6.2. Categoria di sottosuolo e condizioni topografiche

Le indagini geognostiche eseguite lungo il tracciato hanno evidenziato la presenza di terreno di origine alluvionale di granulometria variabile, limo-argillosa e subordinatamente sabbiosa.

La definizione della categoria di sottosuolo, in ottemperanza con quanto stabilito dalle NTC 2018 in Tab. 3.2.II (v. Tab. 4), si è basata sulla misura della velocità media delle onde di taglio ottenuta tramite le prove geofisiche MASW eseguite lungo il tracciato.

Le prove MASW hanno fornito entrambe valori che portano alla classificazione in categoria D.

L'intero tracciato verrà considerato pertanto nella categoria in **categoria D**.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tabella 4 - Categorie di sottosuolo (Da Tab. 3.2.II, Norme Tecniche per le costruzioni, 2008)

Per quanto attiene le condizioni topografiche, l'intero metanodotto viene classificato nella classe T1: "Pendii con inclinazione media $i < 15^\circ$ ".

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 27 di 66	Rev. 0

6.3. Pericolosità sismica locale con metodo semplificato

La risposta sismica locale è l'azione sismica quale emerge in superficie a seguito delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza, subite per effetti morfologici o subite trasmettendosi dal substrato rigido attraverso le coperture.

Nel D.M. 14 Gennaio 2018 viene evidenziato che *“ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi di risposta sismica locale”*.

In mancanza di tali analisi, le norme NTC prevedono che la risposta sismica locale possa essere calcolata attraverso il metodo semplificato, basato sulla determinazione della categoria di sottosuolo e dei relativi coefficienti topografico e stratigrafico del sito su cui sorge l'opera.

La forma spettrale su sottosuolo rigido di categoria A viene in tal modo modificata in funzione di tali coefficienti che intervengono nel calcolo dei diversi rami dello spettro e che variano in dipendenza della categoria di sottosuolo.

Tali coefficienti parziali vengono determinati nel seguente modo.

S_T = coefficiente di amplificazione topografica

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T 1	Superfici pianeggianti, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 5^\circ$
T 2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base i inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base i inclinazione media $i > 30^\circ$

S_s = coefficiente di amplificazione stratigrafica

Categoria di sottosuolo	Coefficiente di amplificazione stratigrafica S_s	Coefficiente funzione della Categoria di sottosuolo C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \times F_0 \times a_g / g \leq 1,20$	$1,10 (T'_c)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \times F_0 \times a_g / g \leq 1,50$	$1,05 (T'_c)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \times F_0 \times a_g / g \leq 1,80$	$1,25 (T'_c)^{-0,50}$

Il coefficiente globale di amplificazione è pari al prodotto del coefficiente di amplificazione stratigrafica con quello di amplificazione topografica:

$$S = S_s \times S_T$$

Ai fini della valutazione della risposta sismica locale le opere in progetto sono state così valutate:

- Tipo di costruzione (v. Tab. 2.4.I delle NTC 2008): 2
Opere ordinarie, opere infrastrutturali d'importanza normale
- Vita nominale V_N : ≥ 50 anni
- Classe d'uso: IV

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 28 di 66	Rev. 0

Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti

- Coefficiente d'uso: 2
- Vita nominale: 50 anni
- Vita di riferimento V_R : 100 anni

Stati Limite		P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 5 – Probabilità di superamento per i vari stati limite (Tab. 3.2.I delle NTC 2018)

Il tempo di ritorno è legato alla probabilità di superamento dalla relazione seguente:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

Poiché è $V_R = 100$ anni, il tempo di ritorno T_R sarà:

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	$T_R = 60$
Stato limite di esercizio: danno	SLD	$T_R = 101$
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	$T_R = 949$
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	$T_R = 1950$

Tabella 6- Stati limite e rispettivi tempi di ritorno, nel periodo di riferimento V_R

Per le opere in progetto l'azione sismica viene valutata per lo *stato limite di esercizio di danno* (SLD) e per lo *stato limite ultimo di salvaguardia della vita* (SLV), facendo riferimento pertanto ai tempi di ritorno pari a 101 e 949 anni rispettivamente come stabilito dalle NTC 2018.

Con tale assunzione l'azione sismica al sito è caratterizzata dai seguenti parametri (v. Tab. 7).

Stato	T_r	Categoria sottosuolo	a_g/g	F_o	F_a	PGA
SLD	101	D	0.083	2.460	1.80	0.149
SLV	949		0.211	2.512	1.60	0.338

Tabella 7 – Valori dei parametri sismici caratteristici al sito per gli stati limite SLD e SLV

La stima della massima velocità orizzontale al suolo (PGV) per gli stati limite considerati può essere calcolata (v. NTC 2018, 3.2.3.3) secondo la relazione:

$$PGV = 0.16 \times a_g \times S \times T_C \quad \text{essendo } T_C = C_C \times T'_C$$

I fattori di amplificazione ottenuti tramite l'approccio semplificato in accordo con le NTC 2018 risultano $F_a = 1.80$ per $T_r = 101$ anni e $F_a = 1.60$ per $T_r = 949$ anni.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 29 di 66	Rev. 0

Tali valori sono molto più cautelativi rispetto a quelli stabiliti dalla Regione Emilia Romagna che sono $F_a = 1.3$ per ogni classe di V_s (v. Tab. 8).

$V_{s30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.3	1.3	1.3			
F.A. SI1	1.5	1.5	1.5			
F.A. SI2	2.3	2.3	2.2			
F.A. SI3	2.6	2.6	2.4			

Tab. 8 – Tabella dei fattori di amplificazione per Pianura 3
(da DGR 2193/2015)

Sono stati calcolati inoltre gli spettri di risposta elastica delle componenti orizzontale e verticale per entrambi gli stati limite, utilizzando un fattore di struttura $q_0=1.5$ e smorzamento $\xi=5\%$ e $\eta=1$ (v. Figg. 22 e 23). Per lo stato limite SLV si è calcolato, per quanto riguarda le verifiche della tubazione (struttura interrata), anche lo spettro di risposta inelastica (v. Tab. 24).

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4")/DN 150 (6") – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 30 di 66	Rev. 0

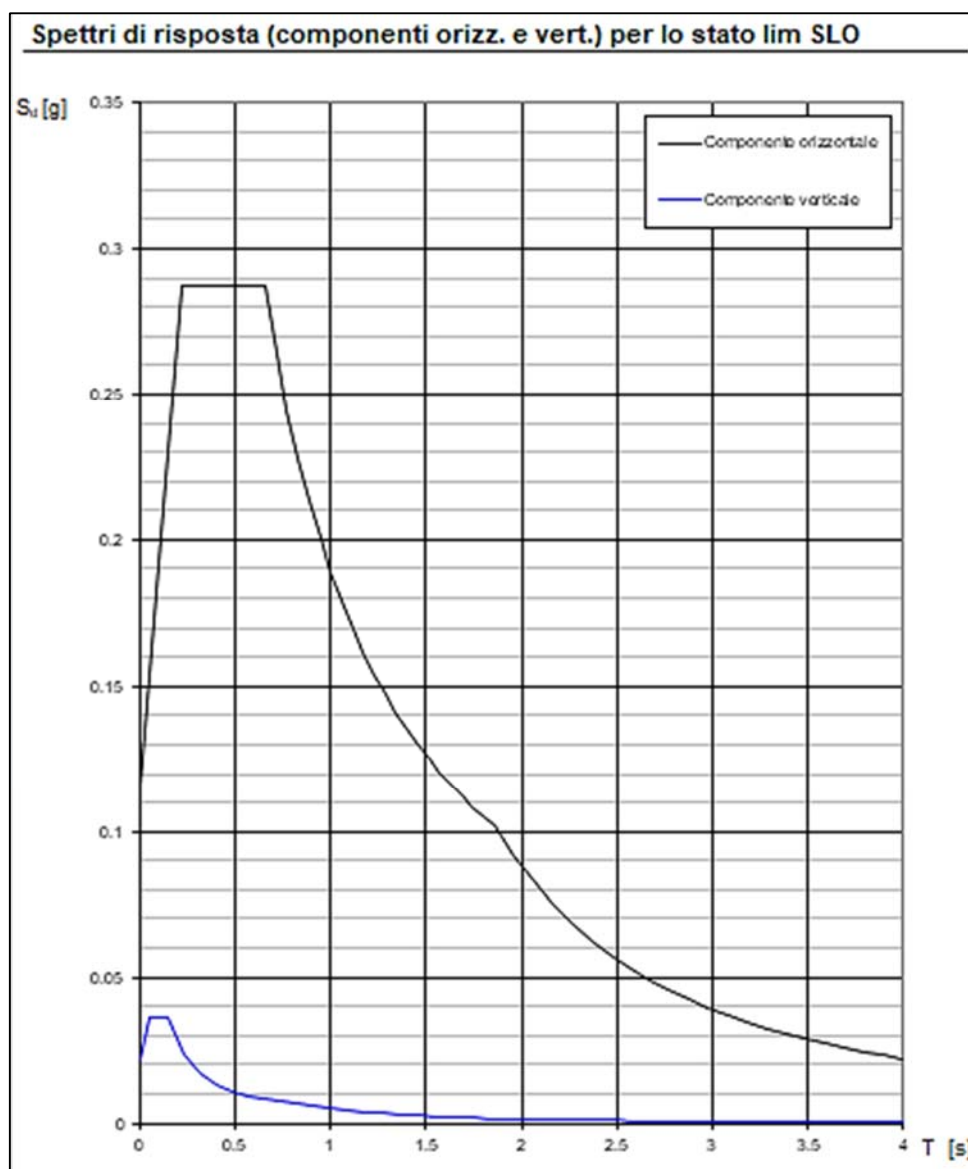


Figura 22 - Spettro di risposta elastico per SLD

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4")/DN 150 (6") – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 31 di 66	Rev. 0

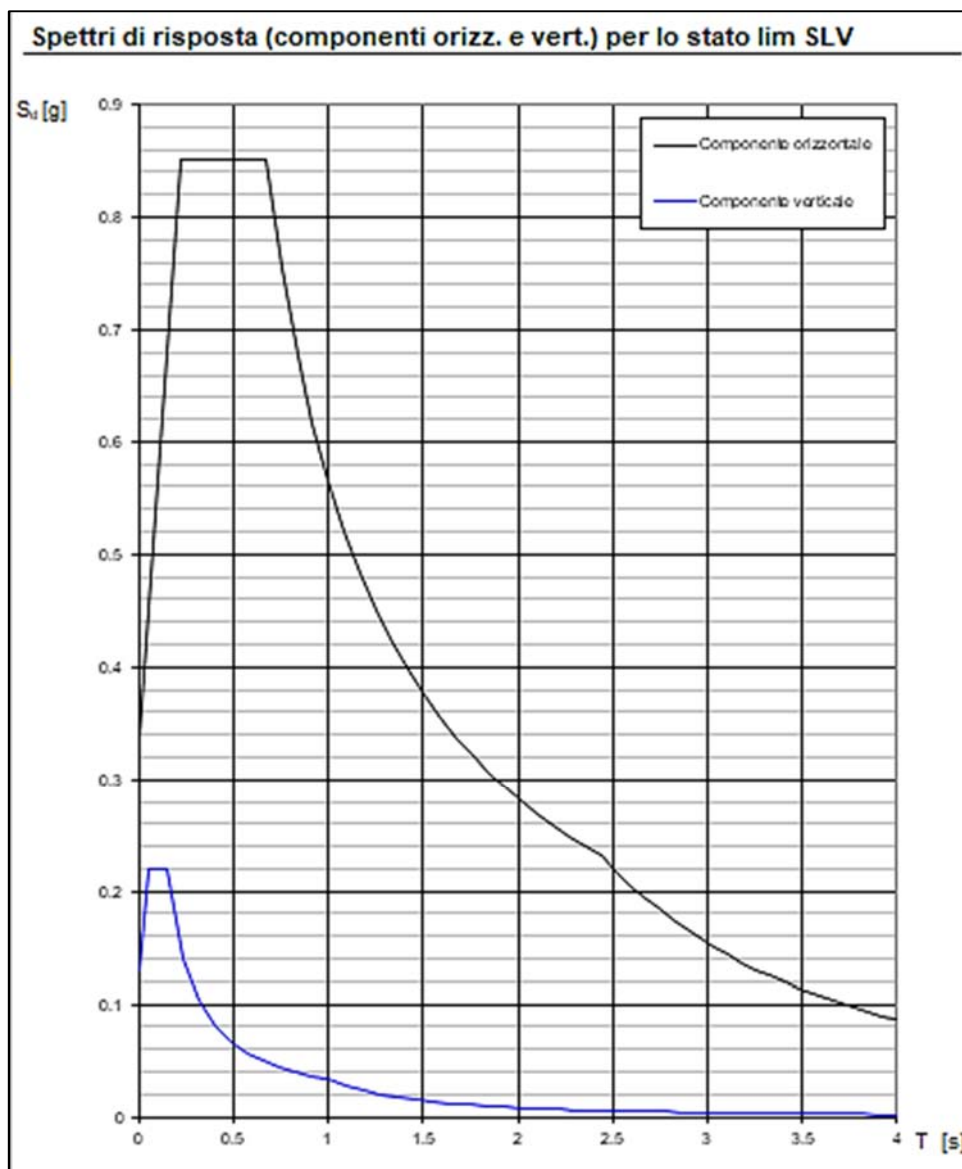


Figura 23 - Spettro di risposta elastico per SLV

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4")/DN 150 (6") – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 32 di 66	Rev. 0

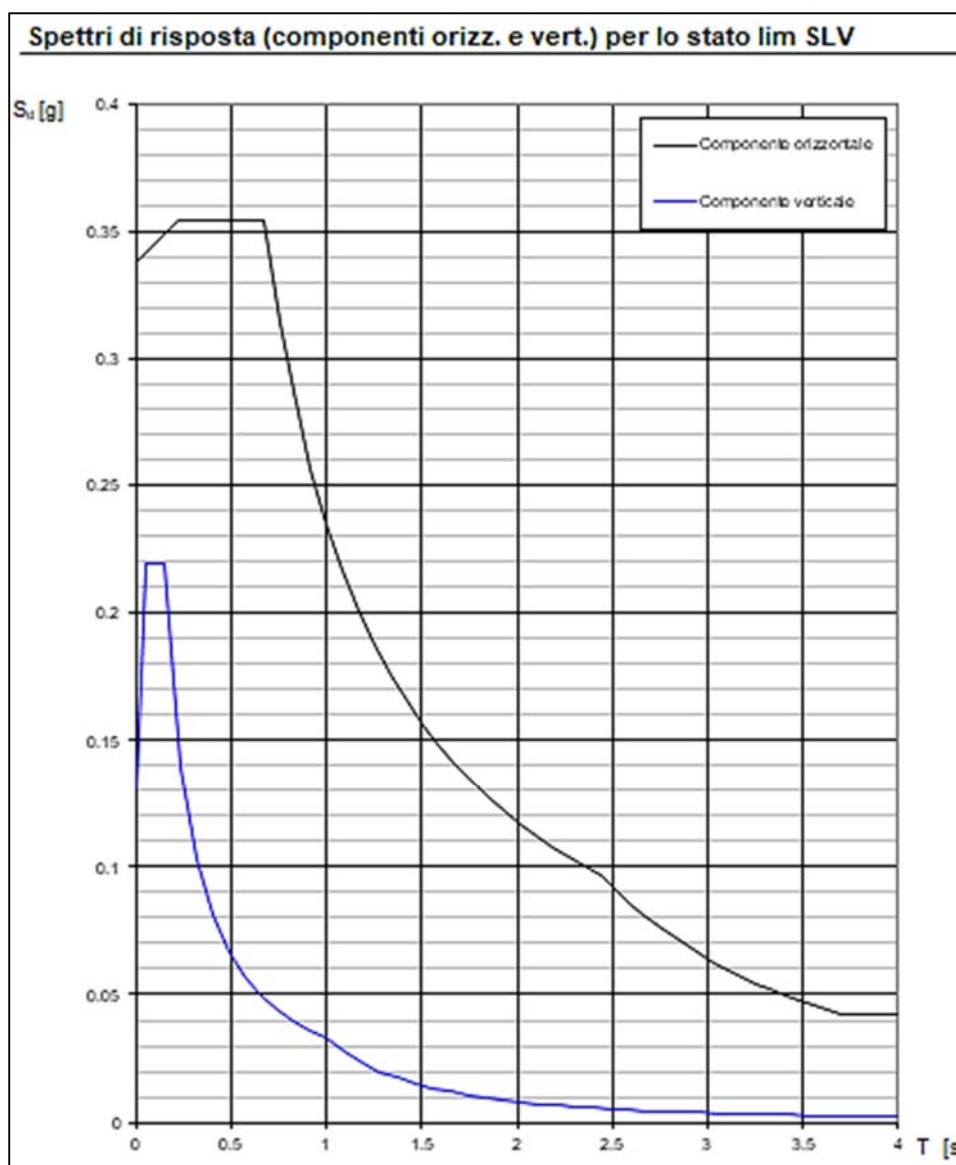


Figura 24 - Spettro di risposta inelastico per SLV

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 33 di 66	Rev. 0

7 EFFETTI SISMOINDOTTI

7.1. Generalità

Gli eventuali effetti conseguenti a un evento sismico sono riconducibili ai seguenti casi:

- instabilità di versante in presenza di pendii instabili o potenzialmente instabili
- liquefazione del terreno in presenza di importanti spessori di terreni granulari saturi nei primi 20 m da piano campagna
- cedimenti dovuti a densificazione di terreni granulari poco addensati e terreni coesivi poco consolidati
- cedimenti/spostamenti differenziali in aree che presentano terreni con significative variazioni laterali delle caratteristiche meccaniche (zone di contatto tra materiali diversi, zone di faglia attiva, ecc.) o in presenza di cavità sotterranee
- stress nella tubazione dovuto allo scuotimento del terreno.

In relazione all'area in oggetto si osserva che, essendo essa del tutto pianeggiante, il rischio di fenomeni franosi non sussiste.



Figura 25 – Carta delle faglie attive (Progetto Ithaca, SGI)

Per quanto riguarda spostamenti dovuti a faglie attive, dal catalogo Ithaca del Servizio geologico d'Italia si osserva che nessuna faglia attiva interessa la zona in studio, in virtù anche dell'elevato spessore delle coltri alluvionali sopra il bedrock (v. Fig. 25).

In merito al rischio di liquefazione e correlati cedimenti postsismici del terreno, anche se non si hanno notizie di accadimenti nel passato nella zona in esame, tuttavia si è ritenuto di doverlo approfondire come di seguito riferito.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 34 di 66	Rev. 0

Similmente, gli eventuali effetti dannosi dello scuotimento sismico sulla tubazione, mai sofferti sulla rete di gasdotti italiani neppure nelle aree colpite da i più intensi terremoti registrati (Carnia 1976, Irpinia 1980, Emilia 2012), sono stati valutati tramite specifica modellazione (v. Rel. COMIS NR/18066 LSC-213).

7.2. Liquefazione

La liquefazione è un fenomeno di riduzione della resistenza al taglio del terreno dovuto all'incremento della pressione interstiziale che si può verificare in terreni granulari saturi, inducendo:

- deformazioni permanenti significative
- condizioni di tensioni efficaci pressoché nulle con conseguente perdita di resistenza al taglio.

Le norme NTC 2018 prescrivono la verifica alla liquefazione ogni qual volta non sia presente almeno una delle seguenti circostanze che ne esclude la potenziale ricorrenza, condizioni da verificarsi in ordine progressivo.

- 1- Accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1 g
- 2- Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub orizzontale e strutture con fondazioni superficiali
- 3- Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$
- 4- Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nelle figure 24.

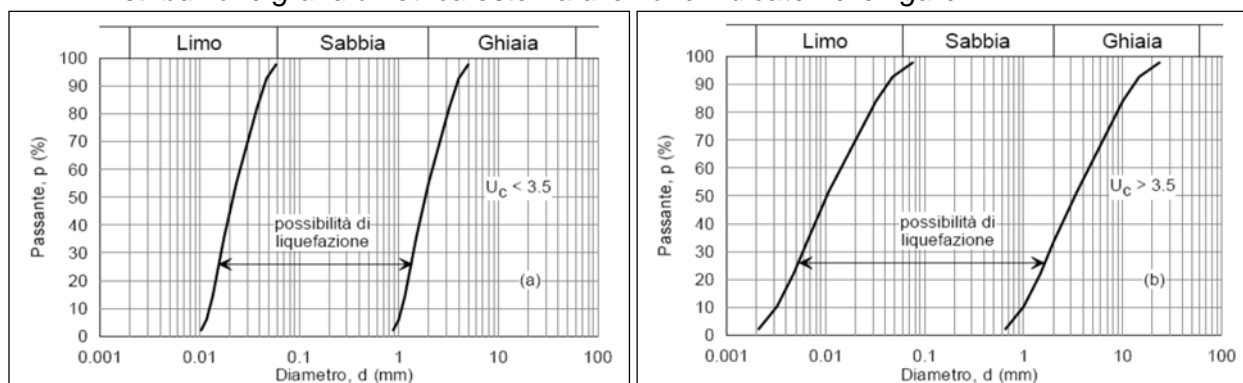


Figura 24- Fusi granulometrici di riferimento per $U_c < 3.5$ (a sin.) e per $U_c > 3.5$ (a dx)

Nel caso in studio si osserva che le condizioni 1 e 2 non sono verificate, essendoci probabilità di accadimento di terremoti con $a_g > 0.1$ ed essendo la superficie piezometrica sicuramente al di sopra di 15 m dal piano campagna.

In merito alla condizioni 4, dal momento che il tracciato attraversa interamente aree alluvionali costituite da depositi argillosi-limosi presenti fino a profondità superiori a 10 m, si ritiene non ci siano rischi di liquefazione (v. Fig. 25).

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 35 di 66	Rev. 0

Tuttavia, per accertarsene in modo più preciso, si è comunque scelto di eseguire analisi di liquefazione in corrispondenza dei punti indagati con CPT, i cui risultati sono di seguito esposti.

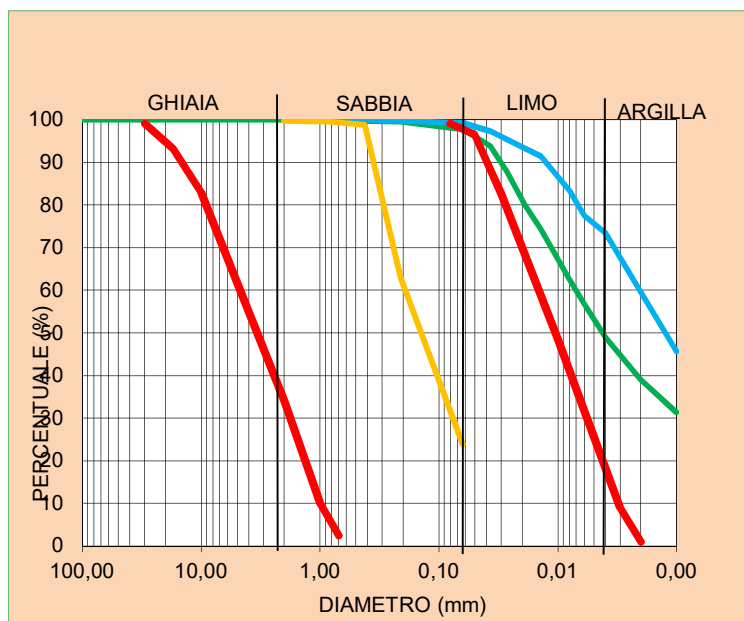


Figura 25 – Curve granulometriche dei terreni presenti in confronto con i limiti di liquefacibilità da NTC 2018 (in rosso)

Dalla figura sopra riportata si vede che i terreni più superficiali (curva blu a 3.50, curva verde a 6.30) ricadono all'esterno del fuso granulometrico stabilito dalla NTC 2018 e quindi senza possibilità di liquefarsi.

I terreni più profondi, di natura sabbiosa.limosa (curva gialla relativa al campione a 11.5 m), ricadono nell'ambito del fuso granulometrico di possibile liquefacibilità.

Per verificare il reale rischio che abbia luogo tale fenomeno, si sono condotte pertanto specifiche analisi, di seguito descritte, in corrispondenza dei punti indagati tramite le due prove CPT eseguite lungo il tracciato, cioè là dove sono disponibili specifici dati geotecnici continui con la profondità.

I punti campione scelti per le prove CPT e per le relative verifiche alla liquefazione sono considerati sufficientemente significativi per l'intero tracciato, anche se a priori non si possono escludere punti a comportamento diverso.

In corrispondenza delle varie verticali indagate si è valutato il fattore di sicurezza alla liquefazione F_L relativamente ai terreni con granulometria sabbiosa-limosa, nel seguente modo:

$$F_L = (CRR/CSR) \times MSF$$

dove:

CRR (resistenza normalizzata rispetto alla pressione efficace verticale)
valutabile in funzione dei parametri desumibili dalle prove CPT

CSR (tensione massima indotta dal terremoto)

$$= \tau_{media}/\sigma'_{vo} = 0.65 \times (a_{max}/g \times \sigma_{v0}/\sigma'_{vo} \times r_d)$$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 36 di 66	Rev. 0

essendo r_d un coefficiente riduttivo dell'azione sismica, $r_d=1-0.015z$
 MSF (magnitude scaling factor), fattore di riduzione funzione della magnitudo dei terremoti attesi.

Per le verifiche si è utilizzato il software CLiq 2.0 di GeoLogismiki, che impiega il metodo di analisi di Robertson e Wride (1998), basato sulla determinazione della resistenza al taglio mobilitabile CRR tramite i risultati delle prove CPTU.

Input di tale metodo sono i seguenti parametri:

q_c = resistenza alla punta penetrometrica CPTU
 f_s = resistenza per attrito laterale durante la infissione CPTU
 σ_{v0} = pressione verticale
 σ'_{v0} = pressione verticale efficace
 I_c = indice di comportamento, indicatore del tipo di terreno, a sua volta derivabile dai parametri sopraelencati.

Oltre al fattore di sicurezza alla liquefazione F_L , si è calcolato anche l'indice del potenziale di liquefazione LP, come definito da Iwasaki et al. (1978), esprimibile come:

$$\int_0^{20} F(z)w(z)dz$$

esteso fino alla profondità di 20 m, se in presenza di terreni potenzialmente liquefacibili, o ad altre profondità inferiori z_{crit} oltre le quali è da escludersi il fenomeno della liquefazione, essendo:

$$\begin{aligned}
 F(z) &= 1 - F_L(z) && \text{per } F_L > 1 \\
 F &= 0 && \text{per } F_L \leq 1 \\
 w(z) &= 10 - 10(z/z_{crit})
 \end{aligned}$$

In funzione del valore di I_L si stima il rischio di liquefazione in accordo con la seguente tabella:

VALORE LP	RISCHIO DI LIQUEFAZIONE
LP=0	Molto basso
$0 < LP \leq 5$	Basso
$5 < LP \leq 15$	Alto
LP > 15	Molto alto

Le verifiche alla liquefazione sono state effettuate per l'intero spessore investigato con le prove CPTU e CPT e si sono successivamente stimati i valori di FS per gli strati ritenuti potenzialmente liquefacibili in funzione delle loro caratteristiche granulometriche e l'indice LP cumulato lungo la verticale indagata.

Si è anche calcolato l' *indice di comportamento* I_c , dal quale si stima la natura più o meno granulare/coesiva dei singoli livelli secondo la seguente classificazione (Robertson, 1990):

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 37 di 66	Rev. 0

I_c	CLASSI DI TERRENO
$I_c < 1.31$	Sabbie compatte
$1.31 < I_c \leq 2.05$	Sabbie ghiaiose-sabbie
$2.05 < I_c \leq 2.60$	Sabbia limosa
$2.60 < I_c \leq 2.95$	Limo sabbioso
$2.95 < I_c \leq 3.60$	Limo argilloso-argilla limosa
$I_c > 3.60$	Argille

Come evidenziato da molti autori¹ sulla base di diffuse ricerche su casi reali, il potenziale di liquefazione LP non è sempre un affidabile indicatore del manifestarsi degli effetti della liquefazione al piano campagna. Il terreno liquefacibile deve avere uno spessore sufficiente ed essere vicino al piano campagna al fine di poter causare liquefazione in superficie.

A tale scopo sono state stimate sperimentalmente relazioni che legano l'effettivo risentimento in superficie allo spessore del materiale più superficiale non liquefacibile (H_1) con il sottostante spessore dello strato liquefacibile, per diversi valori di accelerazione sismica (PGA) (v. Fig. 27).

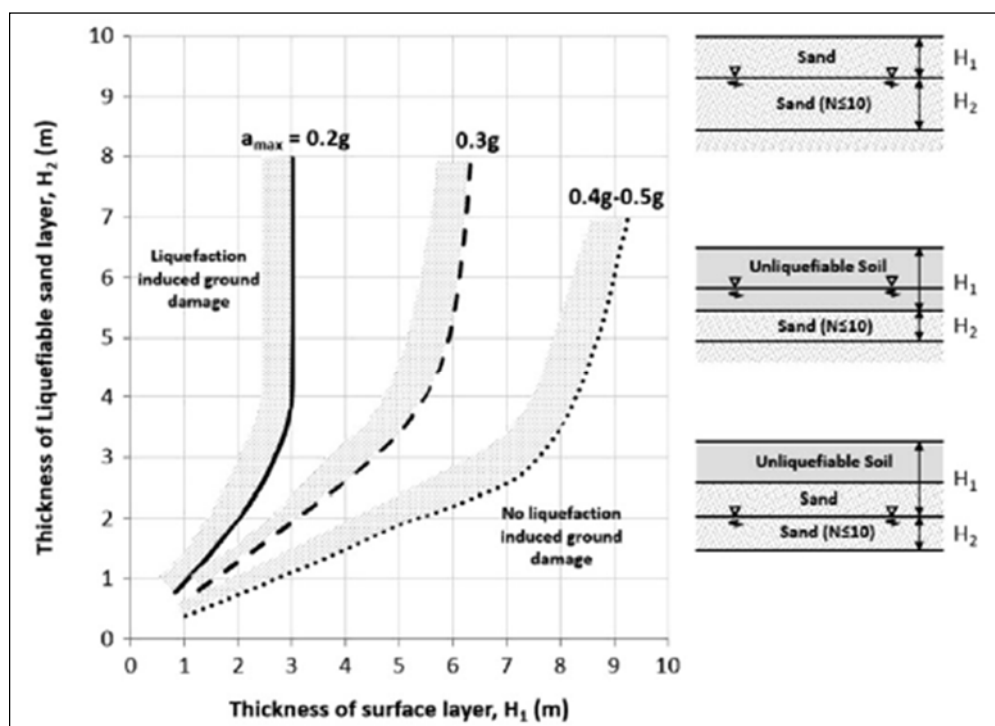


Figura 27 – Relazione tra lo spessore dello strato liquefacibile (H_2) e lo spessore dello strato non liquefacibile sovrastante (H_1) (Da Ishihara, 1985)

¹ - Ishihara K. *Stability of natural deposits during earthquakes*. 1985

- Sjoerd van Ballegooy et al.. *Assessment of various CPT based liquefaction severity index frameworks relative to the Ishihara (1985) H_1 - H_2 boundary curves*. 2015

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 38 di 66	Rev. 0

Nel presente studio pertanto, sempre con l'impiego del software CLiq 2.0, sono state condotte anche verifiche in tal senso, le quali hanno permesso di stimare la possibilità o meno di risentimento in superficie dell'effetto di eventuale liquefazione degli strati sottostanti.

Infine, oltre al fattore di sicurezza dei vari strati (F_s), al potenziale cumulato di liquefazione (LP) e alla possibilità di risentimento in superficie, si sono stimati anche i cedimenti postsismici superficiali che i terreni possono subire se sottoposti a impulso ciclico dovuto al sisma; si tratta di un effetto di "riordino", in particolare nei depositi granulari poco addensati e recenti e nei sedimenti coesivi molto plastici e poco consistenti, conseguente alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto.

I risultati grafici delle varie verifiche con l'andamento di FS (per gli strati potenzialmente liquefacibili), di LP, del risentimento in superficie e dei cedimenti superficiali con la profondità sono riportati in Allegato 2, riepilogati per lo stato limite SLV nella tabella che segue.

SLV Tr= 949 anni			
PROVA	LPI	Cedimenti	Risentimento superficiale
		cm	
CPTU 1	1.2	3.4	no
CPTU 2	2.5	6.2	no

Tabella 12 - Risultati delle verifiche a liquefazione

(LPI= 0 rischio molto basso; $0 < LPI \leq 5$ rischio basso; $5 < LPI < 15$ rischio alto; $LPI > 15$ rischio molto alto)

Le verifiche sono state condotte anche per lo stato limite SLD (periodo di ritorno 101 anni) ed hanno tutte escluso qualsiasi rischio di liquefazione, di risentimento superficiale e di cedimenti del terreno sismoindotti.

Quelle condotte per lo stato limite SLV (periodo di ritorno 949 anni) mostrano tutte un basso potenziale di liquefazione (LPI, *liquefaction potential index*, < 5) e pertanto un rischio basso. Si hanno cedimenti cosismici di qualche cm, fino ad un valore massimo di circa 6 cm.

La stratigrafia dei terreni presenti comprende la presenza di terreni coesivi (non liquefacibili) fino a profondità di 11-12 m e di livelli di terreni sabbiosi - limosi (potenzialmente liquefacibili) a profondità maggiori, per cui il rischio che si abbiano liquefazioni con risentimento superficiale (stimato in accordo con Ishihara, 1985) è escluso.

In merito ai cedimenti indotti dal sisma, si fa presente che l'assenza di brusche variazioni litologiche fa ritenere assolutamente improbabili cedimenti differenziali su breve distanze che la condotta, struttura dotata di elevata elasticità, non possa sopportare.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 39 di 66	Rev. 0

7.3. Scuotimento sismico

Lo scuotimento del terreno (*ground shaking*), e con esso della condotta interrata, è provocato dalla propagazione delle onde sismiche nel terreno le quali, impartendo movimenti alle particelle di suolo, sollecitano la tubazione interrata a deformarsi in sintonia con la deformazione del terreno. Le tensioni indotte dalle onde sismiche sulla tubazione sono variabili sia nel tempo, che con la direzione di propagazione del movimento sismico rispetto l'asse della condotta.

Sono state eseguite specifiche verifiche strutturali al fine di accertare la resistenza della tubazione nei confronti delle massime azioni di scuotimento attese (SLV) esercitate dal sisma di progetto, sia nei tratti rettilinei che in curva della condotta.

Tali verifiche, riportate nel dettaglio in Allegato 3, hanno evidenziato che le sollecitazioni indotte dal sisma di progetto alla tubazione per lo stato limite SLV sono tutte ampiamente sotto i limiti di resistenza dell'acciaio utilizzato con un fattore di sicurezza ben maggiore di quanto prescritto dalla norma ASME B31.8.

Le verifiche hanno inoltre evidenziato l'idoneità degli spessori delle tubazioni nel farsi carico delle sollecitazioni trasmesse dall'oscillazione del terreno durante l'evento sismico.

Nella tabella di seguito allegata (v. Tab. 13) si riportano i risultati delle verifiche condotte per la tubazione prevista dall'intervento in oggetto DN 100 e anche per il breve tratto iniziale DN 150, sia nei tratti rettilinei che in curva.

METANODOTTO	Tratto rettilineo		Tratto curvilineo	
DN 100 (4'') 75 bar	$F_{LO} = \sigma_{LO} / \sigma_y =$	0,27 < 0,75 Verificato	$F_{LO} = \sigma_{LO} / \sigma_y =$	0,21 < 0,75 Verificato
	$F_{LT} = \sigma_{LT} / \sigma_y =$	0,39 < 0,90 Verificato		
	$F_{COMBO} = \sigma_{COMBO} / \sigma_y =$	0,34 < 1,00 Verificato	$F_{LT} = \sigma_{LT} / \sigma_y =$	0,33 < 0,90 Verificato
	$\varepsilon / \varepsilon_{CR} =$	0,04 < 1,00 Verificato		
DN 150 (6'') 75 bar	$F_{LO} = \sigma_{LO} / \sigma_y =$	0,27 < 0,75 Verificato	$F_{LO} = \sigma_{LO} / \sigma_y =$	0,22 < 0,75 Verificato
	$F_{LT} = \sigma_{LT} / \sigma_y =$	0,38 < 0,90 Verificato		
	$F_{COMBO} = \sigma_{COMBO} / \sigma_y =$	0,34 < 1,00 Verificato	$F_{LT} = \sigma_{LT} / \sigma_y =$	0,33 < 0,90 Verificato
	$\varepsilon / \varepsilon_{CR} =$	0,04 < 1,00 Verificato		

Tabella 13 – Risultati delle verifiche allo scuotimento sismico

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 40 di 66	Rev. 0

8 CONCLUSIONI

La presente relazione valuta le condizioni sismiche dell'area interessata dal tracciato del metanodotto in progetto, fornendo i parametri sismici al sito da adottare per la progettazione e valutando l'eventualità di rischi sismoindotti.

L'opera in progetto si sviluppa nella bassa pianura padana ad W del centro urbano di Alfonsine (RA).

I terreni attraversati sono costituiti da terreni alluvionali granulometricamente costituiti da materiale per lo più fine, limi e argille, con subordinata sabbia limosa di scarso addensamento e consistenza in profondità. La categoria di sottosuolo è la D.

I valori delle PGA da impiegare per la progettazione, distinti per gli stati SLD e SLV, insieme con i principali parametri sismici, vengono di seguito riassunti.

Stato	T_r	Categoria sottosuolo	a_g/g	F_o	F_a	PGA
SLD	101	D	0.083	2.460	1.80	0.149
SLV	949		0.211	2.512	1.60	0.338

In merito ai fenomeni sismoindotti, si esclude che possano esserci rischi legati alla stabilità dei pendii e a spostamenti/cedimenti dovuti a fagliazione attiva dei terreni.

Per quanto attiene al rischio di liquefazione, nella condizione di SLD il potenziale è nullo. In condizione SLV il potenziale è sempre basso, peraltro non risentibile in superficie.

In caso di sisma intenso ($T_r = 949$ anni) si possono avere dei cedimenti del terreno superficiale di alcuni centimetri, fino a circa 6 cm. Ma l'assenza di bruschi cambiamenti litologici nelle zone attraversate dove si può avere liquefazione/cedimenti del terreno fa sì che il rischio di improvvisi cedimenti differenziali, che potrebbe costituire un pericolo per le condotte (peraltro di acciaio di elevata elasticità) sia praticamente nullo.

Infine per quanto attiene al rischio per la condotta derivante dallo scuotimento del terreno le verifiche eseguite hanno evidenziato come la condotta di progetto risulti idonea a sopportare con ampio fattore di sicurezza le sollecitazioni indotte dalla propagazione delle onde sismiche attese.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 41 di 66	Rev. 0

APPENDICE 1 **METODOLOGIA DI** **CALCOLO DELLA PERICOLOSITA' SISMICA** **IN ACCORDO CON NTC 2018**

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 42 di 66	Rev. 0

1 PREMESSA

Per valutare se un'opera strutturale è sicura bisogna far riferimento agli *stati limite*, che possono verificarsi durante un determinato *periodo di riferimento* della stessa opera. Quindi per poter stimare l'azione sismica, che dovrà essere utilizzata nelle verifiche agli stati limite o nella progettazione, bisognerà stabilire:

- in primo luogo la *vita nominale* dell'opera, che congiuntamente alla *classe d'uso*, permette di determinare quel *periodo di riferimento*;
- una volta definito il periodo di riferimento e i diversi stati limite da considerare, una volta definite le relative *probabilità di superamento*, è possibile stabilire il *periodo di ritorno* associato a ciascun stato limite;
- a questo punto è possibile definire la **pericolosità sismica di base** per il sito interessato alla realizzazione dell'opera, facendo riferimento agli studi condotti sul territorio nazionale dal Gruppo di Lavoro 2004 nell'ambito della convenzione-progetto S1 DPC-INGV 2004-2006 e i cui risultati sono stati promulgati mediante l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) 3519/2006.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 43 di 66	Rev. 0

2 VITA NOMINALE, CLASSI D'USO E PERIODO DI RIFERIMENTO

Nelle NTC18 il periodo di riferimento, che non può essere inferiore a 35 anni, è dato dalla seguente relazione:

$$V_R = V_N \cdot C_U \quad (2.1)$$

dove:

V_R = periodo di riferimento

V_N = vita nominale

C_U = coefficiente d'uso

La vita nominale di un'opera strutturale V_N , secondo le NTC18, è definita come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata e viene definita attraverso tre diversi valori, a seconda dell'importanza dell'opera e perciò delle esigenze di durabilità:

- $V_N \leq 10$ anni per le opere provvisorie, provvisionali e le strutture in fase costruttiva che però abbiano una durata di progetto ≥ 2 anni.
- $V_N \geq 50$ anni per le opere ordinarie, ponti, infrastrutture e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale.
- $V_N \geq 100$ anni per grandi opere, ponti, infrastrutture e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica.

Nel caso specifico **$V_N = 50$ anni**.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Le NTC08 prevedono quattro classi d'uso a ciascuna delle quali è associato un valore del coefficiente d'uso:

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 44 di 66	Rev. 0

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli. $C_U = 0.7$;

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso *III* o in Classe d'uso *IV*, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti. $C_U = 1.0$;

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso *IV*. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso. $C_U = 1.5$;

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie, ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica. $C_U = 2.0$.

Nel caso in esame viene presa in considerazione la **classe d'uso IV** a cui è associato il coefficiente d'uso **$C_U = 2$** .

Una volta ottenuti V_N e C_U , è possibile calcolare il periodo di riferimento V_R , che qui vale:

$$V_R = 50 * 2 = 100 \text{ anni.}$$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 45 di 66	Rev. 0

3 STATI LIMITE, PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO E PERIODO DI RITORNO

Le NTC18 prendono in considerazione 4 possibili *stati limite* (SL) individuati facendo riferimento alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti: due sono *stati limite di esercizio* (SLE) e due sono *stati limite ultimi* (SLU). Uno stato limite è una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per la quale è stata progettata.

Più in particolare le opere e le varie tipologie strutturali devono essere dotate di capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio (sicurezza nei confronti di SLE) e di capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e di dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone o comportare la perdita di beni, oppure provocare gravi danni ambientali e sociali, oppure mettere fuori servizio l'opera (sicurezza nei confronti di SLU).

Gli stati limite di esercizio sono:

- **Stato Limite di Operatività** (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- **Stato Limite di Danno** (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi sono:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita** (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso** (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Le NTC08, in presenza di azioni sismiche, richiedono le verifiche allo SLO solo per gli elementi non strutturali e per gli impianti di strutture di classi d'uso III e IV (NTC18, punto 7.1). Lo SLO si utilizza anche come riferimento progettuale per quelle opere che devono restare operative durante e subito dopo il terremoto. Le verifiche allo SLC sono, invece, richieste solo per le costruzioni o ponti con isolamento e/o dissipazione (NTC08, punto 7.10).

Ad ogni stato limite è associata una *probabilità di superamento* P_{VR} (Tabella 3.1), ovvero la probabilità che, nel periodo di riferimento V_R , si verifichi almeno un evento sismico ($n \geq 1$) di a_g prefissata (a_g = accelerazione orizzontale massima del suolo) avente frequenza media annua di ricorrenza $\lambda = 1/T_R$ (T_R = periodo di ritorno).

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 46 di 66	Rev. 0

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	P_{VR} = 81%
Stato limite di esercizio: danno	SLD	P_{VR} = 63%
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	P_{VR} = 10%
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	P_{VR} = 5%

Stati limite e rispettive probabilità di superamento, nel periodo di riferimento V_R

Fissati V_R e P_{VR} associata ad ogni stato limite, è possibile calcolare il periodo di ritorno dell'azione sismica T_R, espresso in anni, mediante l'espressione riportata nell'**Allegato A** delle NTC08:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} \quad (3.1)$$

Tale relazione tra P_{VR} (probabilità) e T_R (statistica) risulta biunivoca poiché utilizza la distribuzione discreta Poissoniana.

Poiché è **V_R = 100 anni**, il tempo di ritorno T_R sarà:

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	T_R = 60
Stato limite di esercizio: danno	SLD	T_R = 101
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	T_R = 949
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	T_R = 1950

Stati limite e rispettivi tempi di ritorno, nel periodo di riferimento V_R

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 47 di 66	Rev. 0

4 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

La pericolosità sismica di base, cioè le caratteristiche del moto sismico atteso al sito di interesse, nelle NTC18, per una determinata probabilità di superamento, si può ritenere definita quando vengono designati un'accelerazione orizzontale massima (a_g) ed il corrispondente spettro di risposta elastico in accelerazione, riferiti ad un suolo rigido e ad una superficie topografica orizzontale.

Per poter definire la pericolosità sismica di base le NTC08 si rifanno ad una procedura basata sui risultati disponibili anche sul sito web dell'INGV <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>, nella sezione "Mappe interattive della pericolosità sismica".

Secondo le NTC18 le forme spettrali sono definite per 9 differenti periodi di ritorno T_R (30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2475 anni) a partire dai valori dei seguenti parametri riferiti a terreno rigido orizzontale, cioè valutati in condizioni ideali di sito, definiti nell'**Allegato A** alle NTC08:

a_g = accelerazione orizzontale massima;

F_0 = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T_C^* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I tre parametri si ricavano per il 50° percentile ed attribuendo a:

a_g , il valore previsto dalla pericolosità sismica S1

F_0 e T_C^* i valori ottenuti imponendo che le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC18 scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica S1 (il minimo è ottenuto ai minimi quadrati, su valori normalizzati).

I valori di questi parametri vengono forniti nella seguente tabella, contenuta nell'**Allegato B** delle NTC08, per i 10751 punti di un reticolo di riferimento in cui è suddiviso il territorio nazionale, identificati dalle coordinate geografiche longitudine e latitudine.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 48 di 66	Rev. 0

ID	LON	LAT	T _R = 30			T _R = 50			T _R = 72			T _R = 101		
			a _g	F ₀	T _c [*]	a _g	F ₀	T _c [*]	a _g	F ₀	T _c [*]	a _g	F ₀	T _c [*]
13111	6.5448	45.1340	0.263	2.500	0.180	0.340	2.510	0.210	0.394	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13333	6.5506	45.0850	0.264	2.490	0.180	0.341	2.510	0.210	0.395	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13555	6.5564	45.0350	0.264	2.500	0.180	0.340	2.510	0.200	0.393	2.550	0.220	0.466	2.500	0.240
13777	6.5621	44.9850	0.263	2.500	0.180	0.338	2.520	0.200	0.391	2.550	0.220	0.462	2.510	0.240
12890	6.6096	45.1880	0.284	2.460	0.190	0.364	2.510	0.210	0.431	2.500	0.220	0.509	2.480	0.240
13112	6.6153	45.1390	0.286	2.460	0.190	0.366	2.510	0.210	0.433	2.500	0.220	0.511	2.480	0.240
13334	6.6210	45.0890	0.288	2.460	0.190	0.367	2.510	0.210	0.434	2.500	0.220	0.511	2.490	0.240
13556	6.6268	45.0390	0.288	2.460	0.190	0.367	2.510	0.210	0.433	2.510	0.220	0.510	2.490	0.240
13778	6.6325	44.9890	0.288	2.460	0.190	0.366	2.520	0.210	0.430	2.510	0.220	0.507	2.500	0.240
14000	6.6383	44.9390	0.286	2.470	0.190	0.363	2.520	0.210	0.426	2.520	0.220	0.502	2.500	0.240
14222	6.6439	44.8890	0.284	2.470	0.190	0.360	2.530	0.210	0.421	2.530	0.220	0.497	2.500	0.240
12891	6.6803	45.1920	0.306	2.430	0.200	0.389	2.500	0.210	0.467	2.470	0.230	0.544	2.490	0.230
10228	6.6826	45.7940	0.283	2.420	0.200	0.364	2.460	0.220	0.430	2.460	0.240	0.505	2.440	0.250
13113	6.6860	45.1430	0.309	2.430	0.200	0.391	2.510	0.210	0.470	2.470	0.230	0.546	2.490	0.230
10450	6.6885	45.7450	0.278	2.440	0.200	0.356	2.480	0.220	0.415	2.500	0.230	0.485	2.470	0.250
13335	6.6915	45.0930	0.310	2.430	0.200	0.392	2.510	0.210	0.470	2.480	0.230	0.546	2.500	0.230
10672	6.6942	45.6950	0.275	2.450	0.200	0.351	2.490	0.210	0.406	2.520	0.230	0.475	2.490	0.250
13557	6.6973	45.0430	0.311	2.440	0.200	0.392	2.520	0.210	0.469	2.480	0.230	0.545	2.500	0.230
13779	6.7029	44.9930	0.310	2.440	0.200	0.391	2.520	0.210	0.467	2.480	0.230	0.543	2.500	0.230

Stralcio della tabella contenuta nell'Allegato B delle NTC08, che fornisce i 3 parametri di pericolosità sismica, per diversi periodi di ritorno e per ogni nodo del reticolo che viene identificato da un ID e dalle coordinate geografiche.

Qualora la pericolosità sismica del sito sul reticolo di riferimento non consideri il periodo di ritorno T_R corrispondente alla V_R e P_{VR} fissate, il valore del generico parametro p ad esso corrispondente potrà essere ricavato per interpolazione (Figura 4.1), a partire dai dati relativi ai tempi di ritorno previsti nella pericolosità di base, utilizzando la seguente espressione dell'Allegato A alle NTC08:

$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \left[\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)\right]^{-1} \quad (4.1)$$

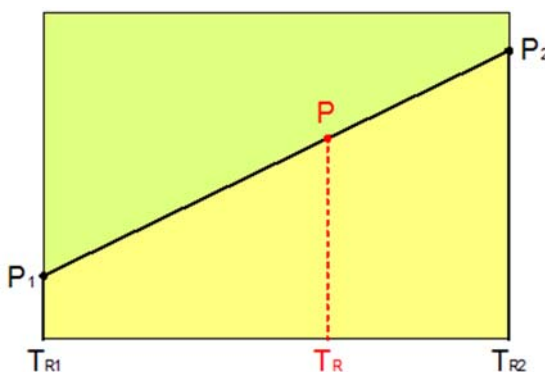
nella quale p è il valore del parametro di interesse (a_g , F_0 , T_C^*) corrispondente al periodo di ritorno T_R desiderato, mentre p_1 , p_2 è il valore di tale parametro corrispondente al periodo di ritorno T_{R1} , T_{R2} .

Per un qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri p possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando l'espressione dell'Allegato A alle NTC18:

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 49 di 66	Rev. 0

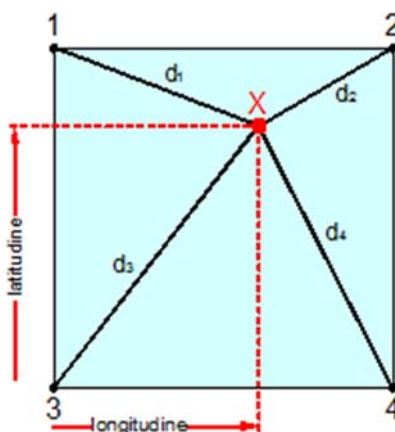
$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}} \quad (4.2)$$

nella quale p è il valore del parametro di interesse (a_g , F_0 , T_C^*) corrispondente al punto considerato, p_i è il valore di tale parametro nell' i -esimo vertice della maglia elementare contenente il punto in esame e d_i è la distanza del punto in esame dall' i -esimo vertice della suddetta maglia.



Interpolazione dei periodi di ritorno, per ottenere i parametri di pericolosità sismica, in accordo alla procedura delle NTC08

La procedura per interpolare le coordinate geografiche è schematizzata nella figura seguente.



Interpolazione delle coordinate geografiche, per ottenere i parametri di pericolosità sismica, in accordo alla procedura delle NTC08.

Pertanto per poter procedere all'interpolazione delle coordinate geografiche, in accordo alla procedura delle NTC18, bisogna calcolare le distanze che intercorrono tra i 4 punti del reticolo e il punto di interesse. Questo calcolo può essere eseguito approssimativamente utilizzando le

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 50 di 66	Rev. 0

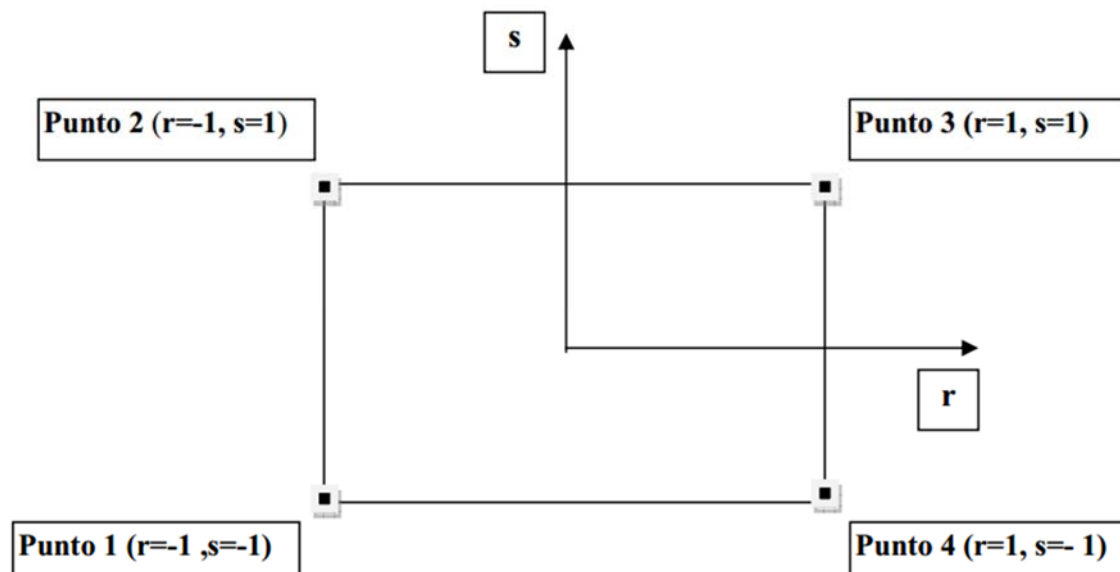
formule della trigonometria sferica, che danno la distanza geodetica tra due punti, di cui siano note le coordinate geografiche. Utilizzando quindi il teorema di Eulero, la distanza d tra due punti, di cui siano note latitudine e longitudine, espresse però in radianti, si ottiene dall'espressione seguente:

$$d = R \cdot \arccos[\sin(\text{lat}\beta) \cdot \sin(\text{lat}\alpha) + \cos(\text{lat}\beta) \cdot \cos(\text{lat}\alpha) \cdot \cos(\text{lon}\alpha - \text{lon}\beta)] \quad (4.3)$$

dove $R = 6371$ è il raggio medio terrestre in km, mentre $\text{lat}\alpha$, $\text{lon}\alpha$, $\text{lat}\beta$ e $\text{lon}\beta$ sono la latitudine e la longitudine, espresse in radianti, di due punti A e B di cui si vuole calcolare la distanza.

La formula di interpolazione sopra proposta, semplice da usare, presenta però l'inconveniente di condurre a valori di pericolosità lievemente diversi per punti affacciati ma appartenenti a maglie contigue. La modestia delle differenze (scostamenti in termini di PGA dell'ordine di $\pm 0,01g$ ossia della precisione dei dati) a fronte della semplicità d'uso, rende tale stato di cose assolutamente accettabile.

Qualora si vogliano rappresentazioni continue della funzione interpolata, si dovrà ricorrere a metodi di interpolazione più complessi, ad esempio i polinomi di Lagrange.



Applicazione dell'interpolazione bilineare

Definiti i 4 vertici di una generica maglia i polinomi di Lagrange sono così determinati:

$$h_1 = (1-r) \cdot (1-s)/4 \quad (4.4)$$

$$h_2 = (1-r) \cdot (1+s)/4 \quad (4.5)$$

$$h_3 = (1+r) \cdot (1+s)/4 \quad (4.6)$$

$$h_4 = (1+r) \cdot (1-s)/4 \quad (4.7)$$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 51 di 66	Rev. 0

Tra le coordinate x,y di un punto generico e le coordinate r, s dello stesso punto valgono le seguenti relazioni:

$$4x = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot x_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot x_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot x_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot x_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot x_4] \quad (4.8)$$

$$4y = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot y_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot y_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot y_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot y_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot y_4] \quad (4.9)$$

La soluzione del sistema di equazioni non lineari è ottenuta iterativamente e, tramite i valori di r ed s, si determinano i parametri a_g , F_0 , T_c^* dall'equazione:

$$4p = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot p_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot p_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot p_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot p_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot p_4] \quad (4.10)$$

Dove p rappresenta il parametro cercato.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 52 di 66	Rev. 0

5 Metodologia di calcolo dei coefficienti sismici

I coefficienti sismici orizzontale K_h e verticale K_v dipendono del punto in cui si trova il sito oggetto di analisi e del tipo di opera da calcolare. Il parametro di entrata per il calcolo è il tempo di ritorno (T_R) dell'evento sismico che è valutato come segue:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} \quad (5.1)$$

Con V_R vita di riferimento della costruzione e P_{VR} probabilità di superamento, nella vita di riferimento, associata allo stato limite considerato. La vita di riferimento dipende dalla vita nominale della costruzione e dalla classe d'uso della costruzione (in linea con quanto previsto al punto 2.4.3 delle NTC). In ogni caso V_R non può essere inferiore a 35 anni.

5.1 Stabilità dei pendii e fondazioni

Nel caso di stabilità dei pendii i coefficienti K_h e K_v sono così determinati:

$$K_h = \beta_s \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \quad (5.2)$$

$$K_v = \pm 0.5 \cdot K_h \quad (5.3)$$

Con

β_s coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

a_{max} accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g accelerazione di gravità.

I valori di β_s sono:

$\beta_s = 0.38$ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)

$\beta_s = 0.47$ nelle verifiche dello stato limite di esercizio (SLD)

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa al sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio.

$$a_{max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g \quad (5.4)$$

S_S (effetto di amplificazione stratigrafica) ($0.90 \leq S_S \leq 1.80$) è funzione di F_0 (Fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e della categoria di suolo (A, B, C, D, E).

S_T (effetto di amplificazione topografica), varia con il variare delle quattro categorie topografiche:

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 53 di 66	Rev. 0

T1: $S_T = 1.0$; **T2:** $S_T = 1.20$; **T3:** $S_T = 1.2$; **T4:** $S_T = 1.40$.

5.2 Muri di sostegno

Per i muri di sostegno pendii i coefficienti K_h e K_v sono così determinati:

$$K_h = \beta_s \cdot \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \quad (5.5)$$

$$K_v = \pm 0.5 \cdot K_h \quad (5.6)$$

Dove:

$\beta_m = 0.38$ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)

$\beta_m = 0.47$ nelle verifiche dello stato limite di esercizio (SLD)

a_{\max} accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g accelerazione di gravità.

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa sul sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio.

$$a_{\max} = S_s \cdot S_T \cdot a_g \quad (5.7)$$

S è il coefficiente comprendente l'effetto di amplificazione stratigrafica S_s e di amplificazione topografica S_T .

a_g accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

5.3 Paratie

In mancanza di studi specifici, a_h (accelerazione orizzontale) può essere legata all'accelerazione di picco a_{\max} attesa nel volume di terreno significativo per l'opera mediante la relazione:

$$a_h = K_h \cdot g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{\max} \quad (5.8)$$

dove:

g è l'accelerazione di gravità;

K_h è il coefficiente sismico in direzione orizzontale;

$\alpha \leq 1$ è un coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera.

Può essere ricavato a partire dall'altezza complessiva H della paratia e dalla categoria di sottosuolo mediante il diagramma seguente:

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 54 di 66	Rev. 0

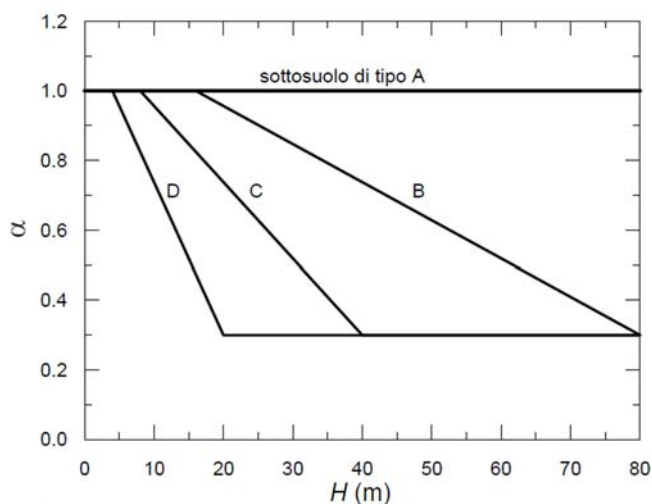


Diagramma per la valutazione del coefficiente di deformabilità α

Per la valutazione della spinta nelle condizioni di equilibrio limite passivo deve porsi $\alpha = 1$. $\beta \leq 1$ è un coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza. Il valore del coefficiente β può essere ricavato dal diagramma riportato nella figura sottoriportata, in funzione del massimo spostamento u_s che l'opera può tollerare senza riduzioni di resistenza.

Per $u_s = 0$ si ha $\beta = 1$; $u_s \leq 0.005 \cdot H$

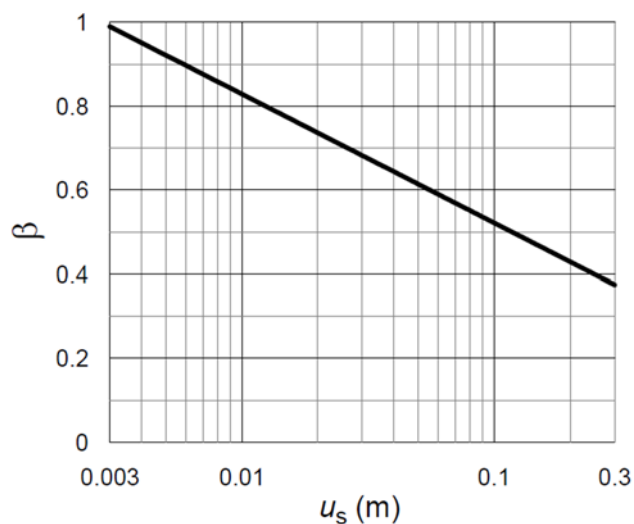


Diagramma per la valutazione del coefficiente di spostamento β

L'accelerazione di picco a_{\max} è valutata mediante un'analisi di risposta sismica locale, ovvero come

$$a_{\max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g \quad (5.9)$$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 55 di 66	Rev. 0

dove:

S è il coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica (S_S) e dell'amplificazione topografica (S_T), di cui al § 3.2.3.2;

a_g è l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

Se $\alpha \cdot \beta \leq 0.2$ deve assumersi $K_h = 0.2 \cdot a_{\max}/g$

	PROGETTISTA 	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 56 di 66	Rev. 0

ALLEGATO 1

STRATIGRAFIA DEL SONDAGGIO SG 1

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 57 di 66	Rev. 0

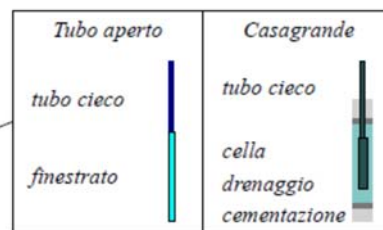
Beduschi Geotecnica
 di Beduschi Giovanni e C S.r.l.
 Via Centro Isola 1/d
 26046 San Daniele Po (CR)

Committente: SNAM RETE GAS	Sondaggio: SG 1
Riferimento: FERRARA RIF. ALL. COMUNE DI FERRARA	Data: 15/05/2018
Coordinate: N 44.83086° E 11.56877°	Quota:
Perforazione: CAROTAGGIO CONTINUO	

LEGENDA STRATIGRAFIA

o mm	R v	A r	Pz	metri bar	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T. S.P.T.	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

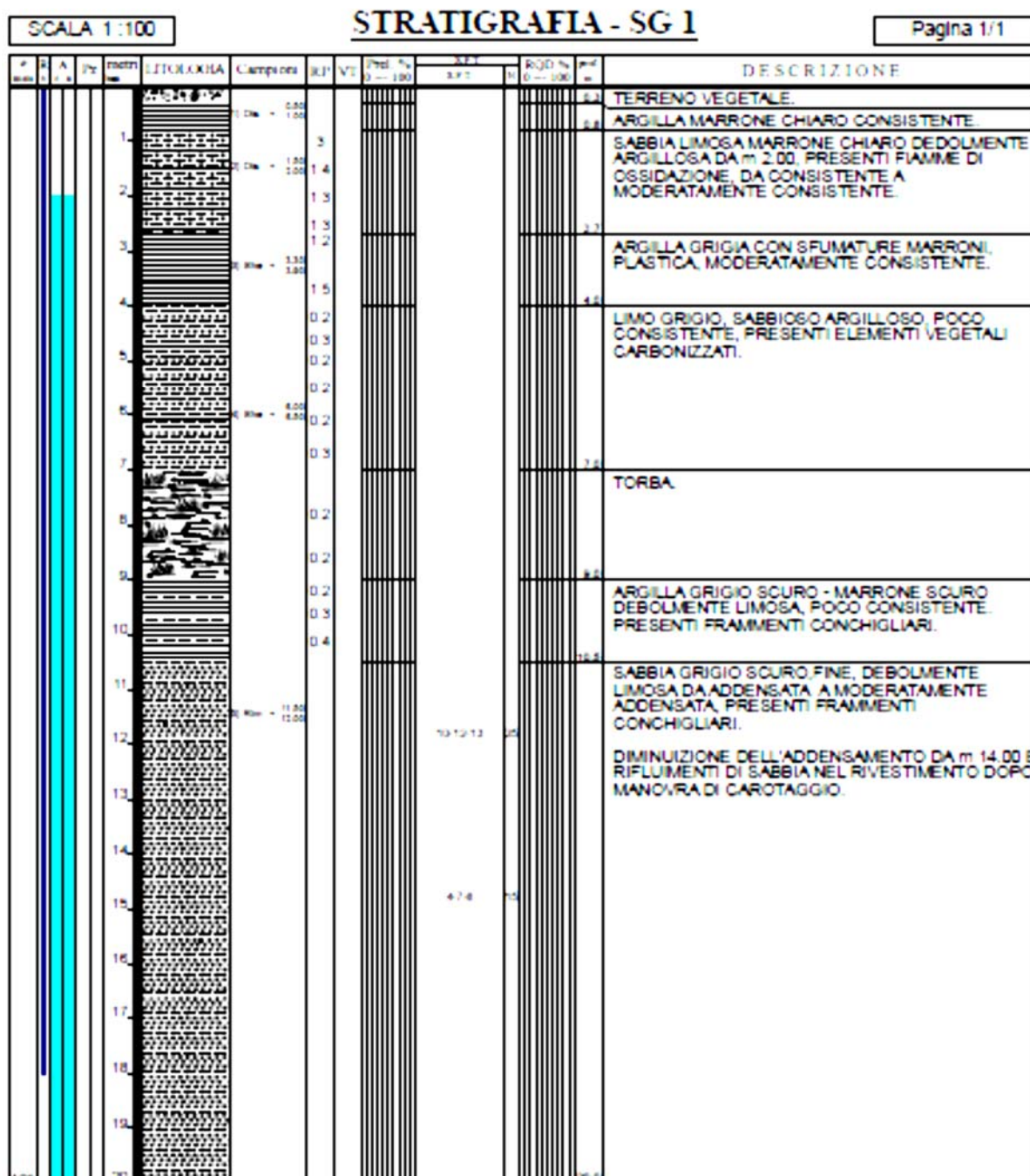
- 1) Diametro del foro / Tipo di carotiere
- 2) Rivestimento
- 3) Profondità dell'acqua (rinvenimento e stabilizzazione)
- 4) Piezometri
- 5) Scala metrica con limiti delle battute (>)
- 6) Simbolo litologico
- 7) Campioni (numero, tipo, profondità testa e scarpa)
- 8) Resistenza alla punta (kg/cm²)
- 9) Vane test (kg/cm²)
- 10) Percentuale di prelievo (1-10, 11-20, ..., 91-100 %)
- 11) Prova S.P.T.
- 12) Valore di N_{spt}
- 13) Percentuale R.Q.D. (1-10, 11-20, ..., 91-100 %)
- 14) Profondità della base dello strato (m)
- 15) Descrizione della litologia dello strato



She = Shelby
Den = Denison
Ost = Osterberg
Maz = Mazier
Crp = Craps
nk3 = NK3
Ind = Indisturbato
Dis = Disturbato
SDi = Semi disturbato
SPT = SPT

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4")/DN 150 (6") – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 58 di 66	Rev. 0

Committente: SNAM RETE GAS	Sondaggio: SG 1
Riferimento: ALFONSINE RIF. ALL. DN 100	Data: 05/08/2018
Coordinate: N 44.51266° E 12.02968°	Quota:
Perforazione: CAROTAGGIO CONTINUO	




















	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 59 di 66	Rev. 0

ALLEGATO 2

VERIFICHE ALLA LIQUEFAZIONE CPT 1- CPT 2

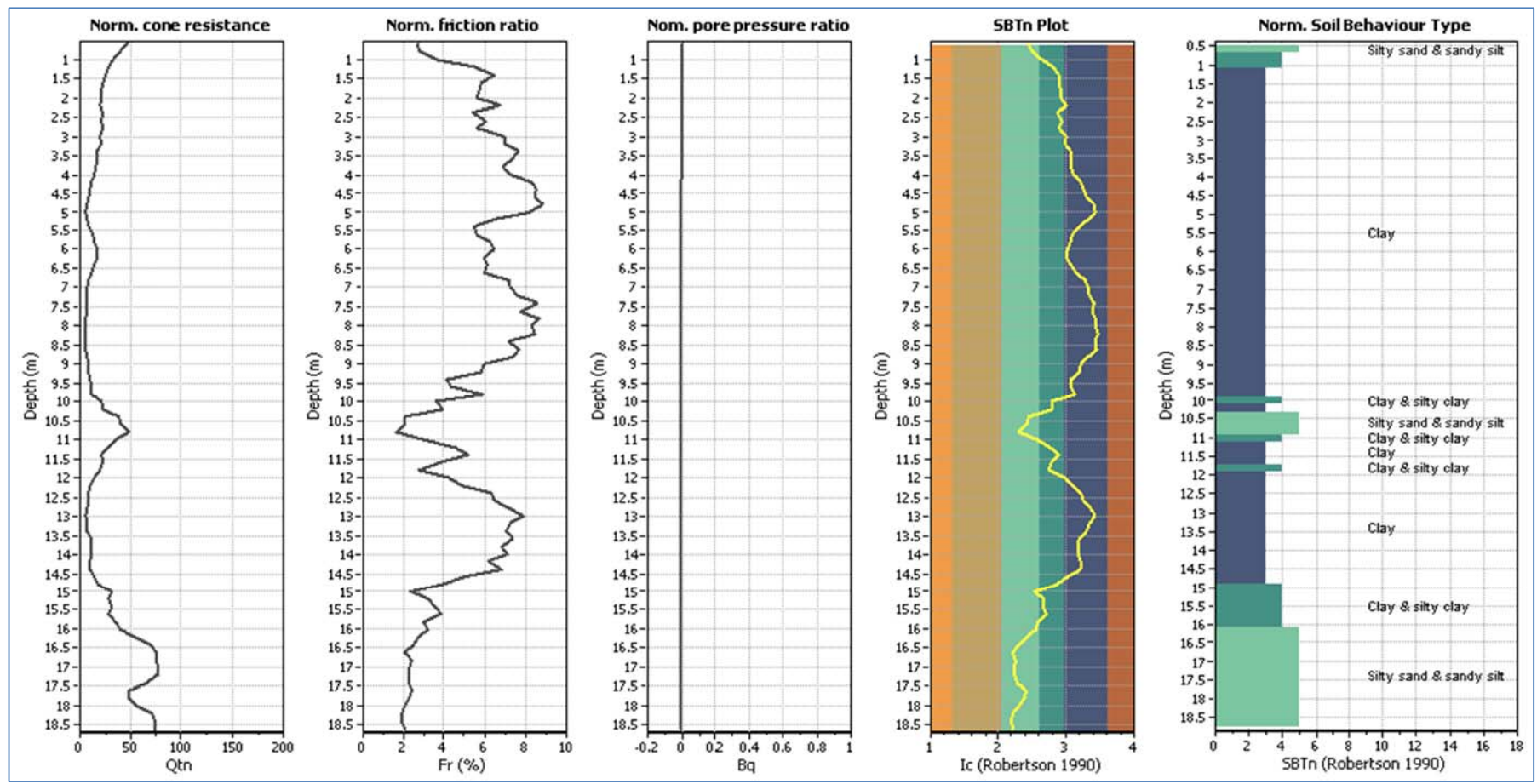
Legenda

SBTn legend					
	1. Sensitive fine grained		4. Clayey silt to silty		7. Gravely sand to sand
	2. Organic material		5. Silty sand to sandy silt		8. Very stiff sand to
	3. Clay to silty clay		6. Clean sand to silty sand		9. Very stiff fine grained

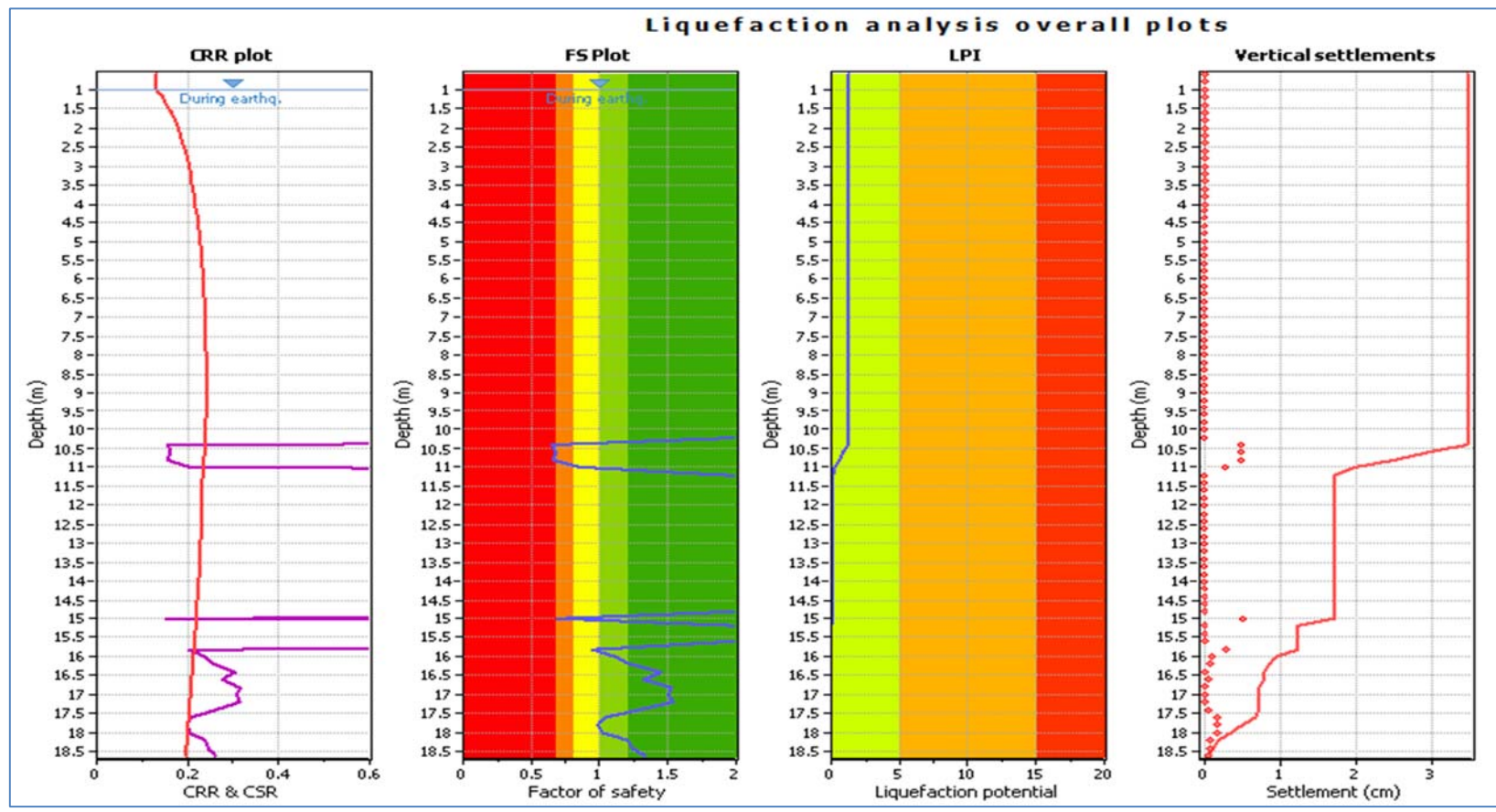
F.S. color scheme	LPI color scheme
 Almost certain it will liquefy	 Very high risk
 Very likely to liquefy	 High risk
 Liquefaction and no liq. are equally likely	 Low risk
 Unlike to liquefy	
 Almost certain it will not liquefy	

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITA 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 60 di 66	Rev. 0

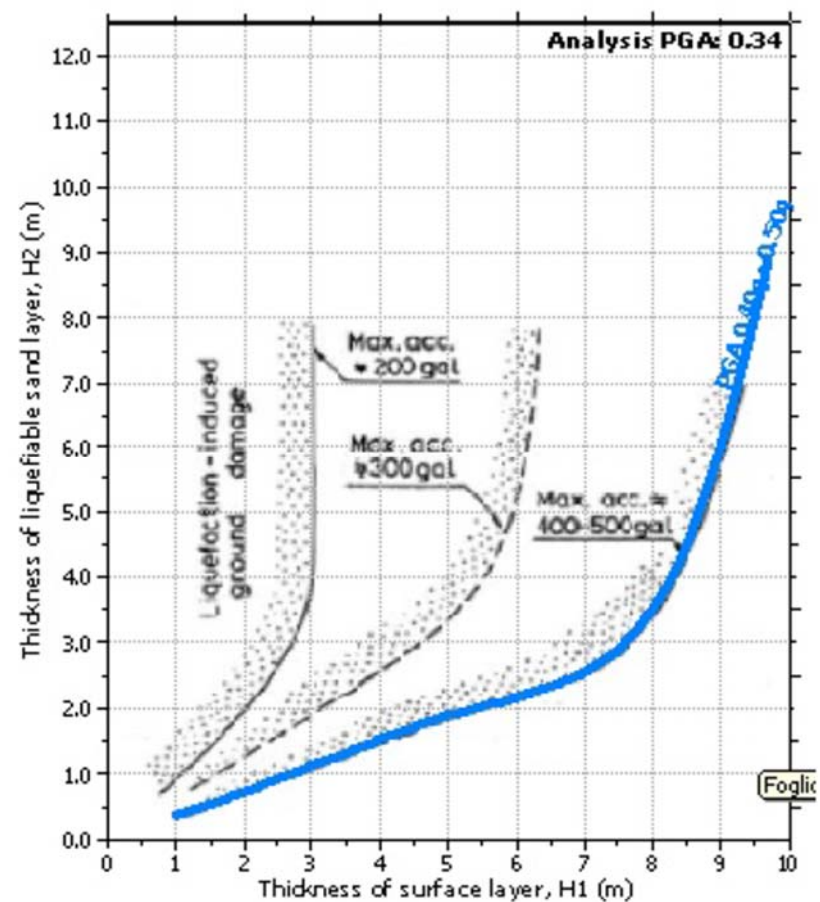
CPT 1



	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITA 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 61 di 66	Rev. 0

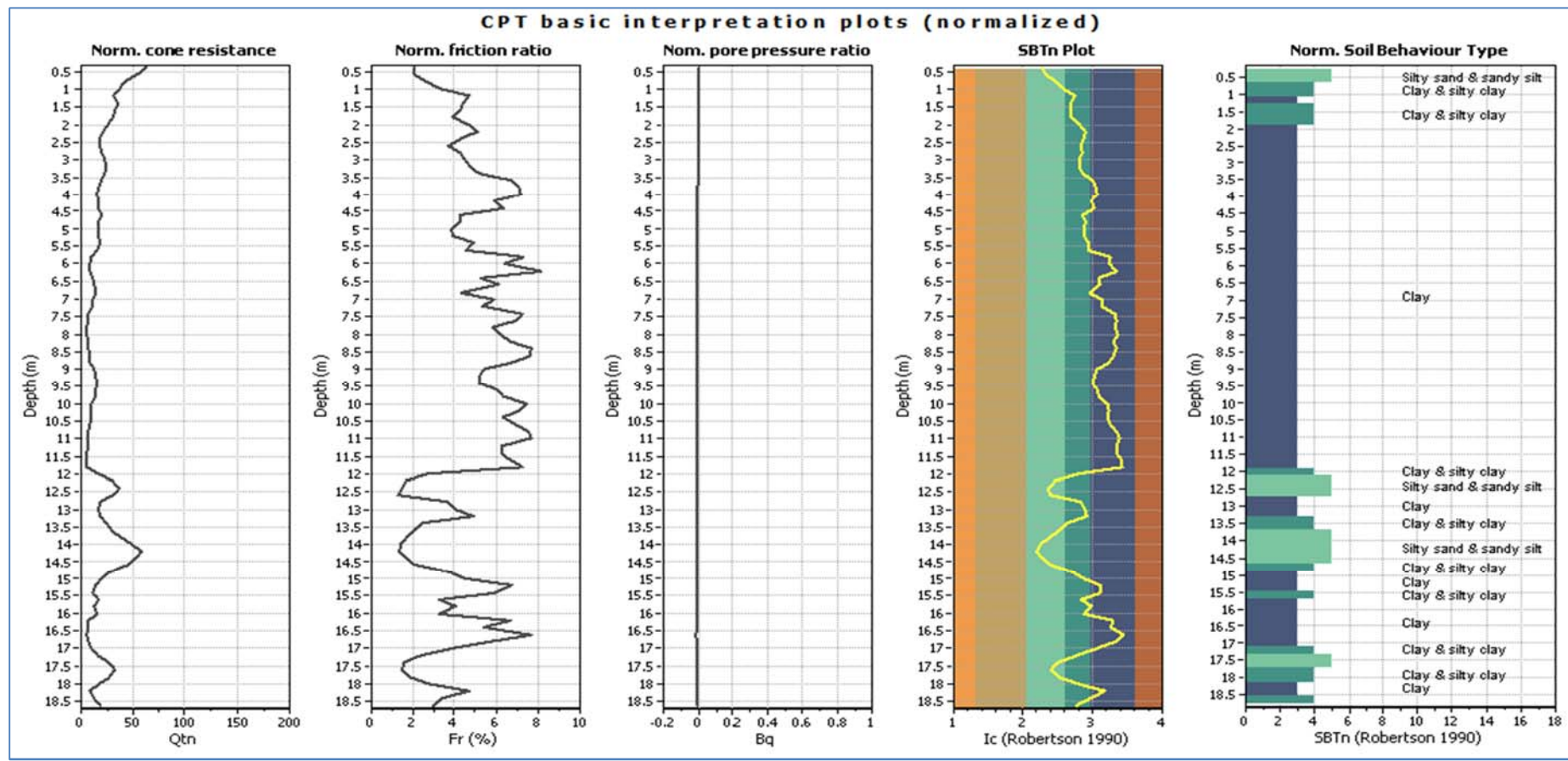


	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITA' 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 62 di 66	Rev. 0

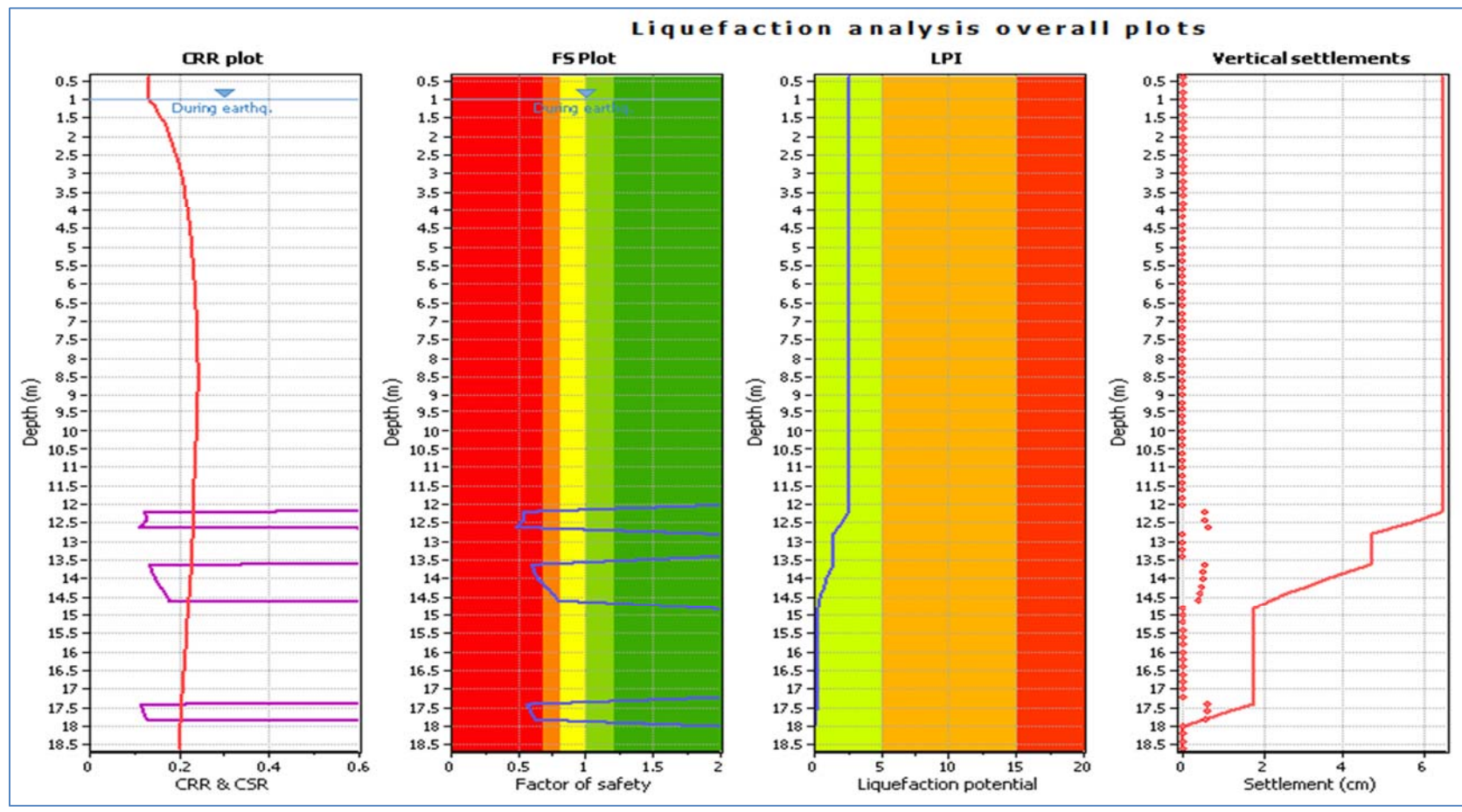


	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITA 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 63 di 66	Rev. 0

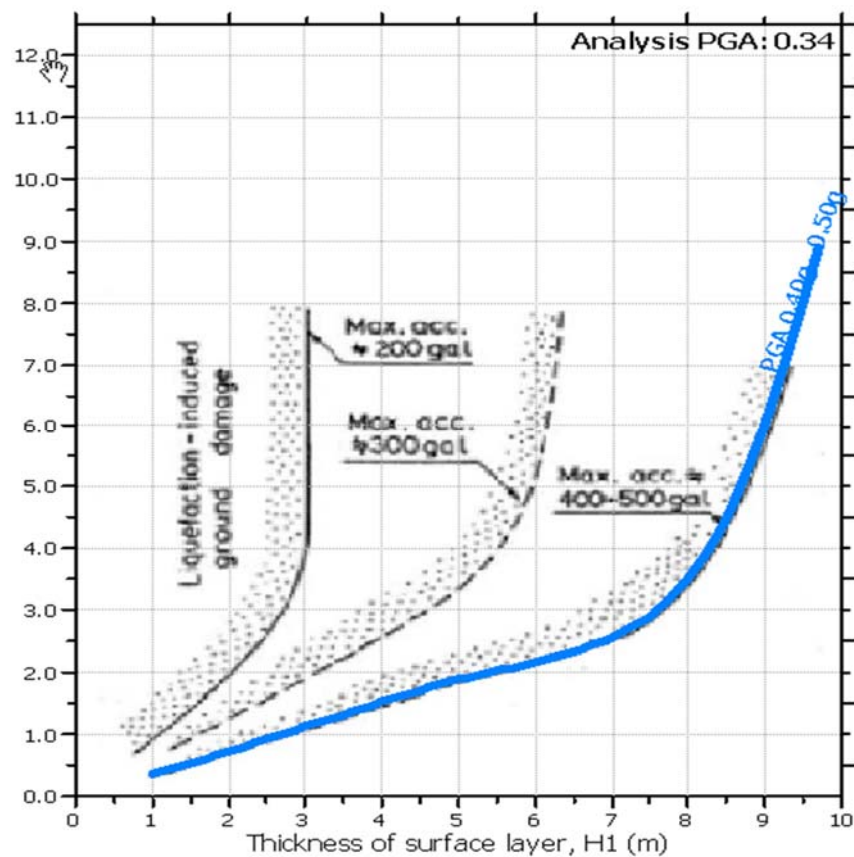
CPT 2



	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITA 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 64 di 66	Rev. 0



	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/18123	UNITA 00
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 65 di 66	Rev. 0



	PROGETTISTA 	COMMESSA NR/18123	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE EMILIA ROMAGNA	LSC - 212	
	PROGETTO METANODOTTO RIF. ALL. COMUNE DI ALFONSINE DN 100 (4'')/DN 150 (6'') – DP 75 bar IN COMUNE DI ALFONSINE (RA)	Pagina 66 di 66	Rev. 0

ALLEGATO 3
INDAGINI GEOFISICHE
PROVE MASW

COMMITTENTE:

COMIS

consulenza materiali - ispezioni - saldatura
progettazione - direzione lavori

Via degli Abeti, 25
61122 Pesaro (PU)

COMMESSA:

Metanodotto SNAM
"Rifacimento allacciamenti in comune di Alfonsine"

Indagini geofisiche

LOCALITA':

Alfonsine (RA)

OGGETTO:

Indagini Sismiche MASW (Vsh)

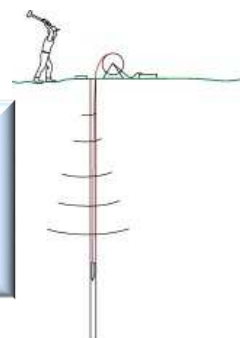
DATA:

Agosto 2018



Via S. Cattania, 1/a
41012 Carpi (MO)

info@tecnogeofisica.com
www.tecnogeofisica.com



INDAGINE GEOFISICA**Intervento:** Indagini MASW**Località:** Alfonsine (RA)**INDICE**

Premessa	3
Caratteristiche attrezzatura	4
Metodologia d'indagine MASW	5
Interpretazione dati acquisiti	7
Categorie di suolo di fondazione (Azione sismica di progetto V_{sh} o per il caso in esame V_{s30})	9
Allegati Intervento	11
Ubicazione Indagini	11
Scheda Masw MW1 (rif. CPT1)	12
Scheda Masw MW2 (rif.SG1)	14

Premessa

Nel mese di agosto 2018, su commissione di:



Via degli Abeti, 25
61122 Pesaro (PU)

Sono state eseguite 2 prove sismiche tipo MASW (Multichannel Spectral Analysis of Waves), in comune di Alfonsine (RA), in merito allo studio per il progetto del metanodotto SNAM: "rifacimento allacciamenti in comune di Alfonsine"

Le indagini sono state ubicate come richiesto dalla committenza ed indicato nelle schede allegate a fine testo.



Fig.1 Ubicazione area di indagine

Caratteristiche delle indagini geofisiche eseguite

Nome file	Tipologia indagine	Numero geofoni	Interdistanza geofonica m	Lunghezza linea m	Lunghezza compreso offset	comune	Coordinate indicative punto centrale
MW1	MASW	24	2,0	46	56	Alfonsine	N44,515498 E12,012225
MW2	MASW	24	2,0	46	56	Alfonsine	N44,512601 E12,029753

L'indagine MASW è indirizzata a misurare le velocità delle onde sismiche (V_s) del sottosuolo e la valutazione del parametro $V_{s,eq}$ come prescritto da:

Ordinanza del P.C.M. n° 3274 del 20 marzo 2003
D.M. 17 gennaio 2018 "Norme tecniche per le Costruzioni".

Si ricorda che la normativa (par. 3.2.2 NTC18) richiede l'effetto della risposta sismica locale valutata mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_s per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2. dell'NTC18.

All'interno del territorio nazionale sono state individuate 4 zone sismiche, contraddistinte dal valore a_g dell'accelerazione di picco al suolo, normalizzata rispetto all'accelerazione di gravità (v. Allegato 1 ord. 3274 del 2003 e succ. modifiche). La classificazione del

suolo (tabella 3.2.II) è invece convenzionalmente eseguita sulla base delle condizioni stratigrafiche e della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

- con:
- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Caratteristiche attrezzatura

Le indagini in sito sono state eseguite utilizzando un sismografo multicanale ad incrementi di segnale, della P.A.S.I. mod. 16S24-P a 24 canali. Le specifiche tecniche dello strumento sono:

-processore:	Pentium 200 MMx Intel,
-Trattamento dati:	Floating Point 32-Bit,
-Ambiente operativo:	Windows xp 32bit
-Canali:	24 (espandibili sino a 48)
-Display:	VGA a colori LCD_TFT 10,4" touch screen
-Supporto memorizz.:	Hard Disk stato solido
-Risoluzione acquisizione:	6/24 bit
-Sonde ambiente interne:	temperatura, umidità relativa
-Formato dati:	Pasi (.osv) e SEG-2 (.dat),
-Durata acquisizioni:	Rifrazione, 32÷65536 ms Riflessione, 32÷16384 ms,
-Tempi campionamento:	da 125 µs a 2 ms su 24 ch
-Filtri digitali:	Passa alto (25÷400 Hz) Passa Basso (100÷250 Hz)
	Notch (50÷180 Hz)
-Attivazione filtri:	in acquisizione o manualmente
-Trigger:	inibizione impulsi dovuti a rimbalzi

- Cavo multicanale da 65 m per collegare in serie i 24 geofoni.
- 24 geofoni a 4,5 Hz
- Sorgente impulsiva: mazza battente da 10 Kg con piastra di battuta in alluminio 15x15 cm, da disporre sul terreno.
- Bindella metrica per posizionare i ricevitori.

Metodologia d'indagine MASW

L'indagine sismica di tipo MASW, consente la determinazione diretta della velocità delle onde trasversali (Onde di taglio - onde Sh/Sv) dei terreni del sottosuolo in esame in modo da ottenere una corretta caratterizzazione della categoria sismica del sottosuolo dell'area in oggetto (V_{s30}). L'indagine sismica adottata, Masw (in sismica attiva) è stata scelta in funzione delle limitazioni che affliggono in genere misure di onde Sh in metodi a rifrazione tradizionali (come ad es. difficoltà di generazione di onde polarizzate Sh o inversioni di velocità identificabili con difficoltà e/o valutabili con costosi lunghi ed impegnativi metodi sismici in foro es. Cross-Hole e Down-Hole).

La tecnica sismica Masw, è stata ampiamente testata (perfezionata già dal 1999) ed è contemplata fra le indagini per la definizione rigorosa del profilo di Vs per caratterizzazione sismica del sito (NTC-08 e ad es. Lai, Foti e Rota "Input sismico e stabilità geotecnica dei siti di costruzione - IUSS Press Eucentre 2009) e risulta migliore per la caratterizzazione del primo sottosuolo; le tecniche basate su utilizzo di registrazioni di microtremori di origine naturale e/o antropica (tecniche passive) possono caratterizzare infatti il sottosuolo più in profondità, da diverse decine, sino alle volte, anche a centinaia di metri (Lai et alii - IUSS Press Eucentre 2009) ma con minor risoluzione per la zona prossima alla superficie che invece più ci interessa.

Diversi autori (Lachet e Bard 94, Bard 99, De Ferrari et alii - Università studi di Genova 2008), segnalano che sistemi d'acquisizione in sismica passiva sono poco idonei per terreni alluvionali, in quanto l'utilizzo di tecniche passive, è possibile o consigliabile nel caso di:

- intenso "rumore antropico" (che impedisce o maschera l'acquisizione dei dati in sismica attiva)
- discreto contrasto di impedenza sismica ($>2,5-3$) fra il substrato (sismico) ed il materasso alluvionale sovrastante
- è importante l'interramento del sensore sismico passivo (per migliorare l'accoppiamento sensore-terreno), quindi altri autori (Konno e Ohmachi 98, Bard 99, Bindi et alii 2000, Parolai et alii 2002) consigliano di evitare terreni caratterizzati da: erba, fango, terreno saturo, neve, ghiaccio, materiali incoerenti in superficie (ghiaia, ciottoli, quindi piazzali rilevati ecc.), coperture artificiali con piastrelle, superfici sintetiche, ecc.

Valutando le sopracitate motivazioni per caratterizzare il sottosuolo dal punto di vista del profilo Vs/profondità è stata realizzata una prospezione Masw, (rilevazione onde di Rayleigh - tecnica in sismica attiva).

Dal punto di vista operativo le indagini sono state eseguite stendendo lungo una linea 24 ricevitori (geofoni), ad una distanza intergeofonica costante ed energizzando ad una estremità dello stendimento con una mazza su una piastra di alluminio. La distanza tra il punto di energizzazione e il primo geofono è denominata "offset".

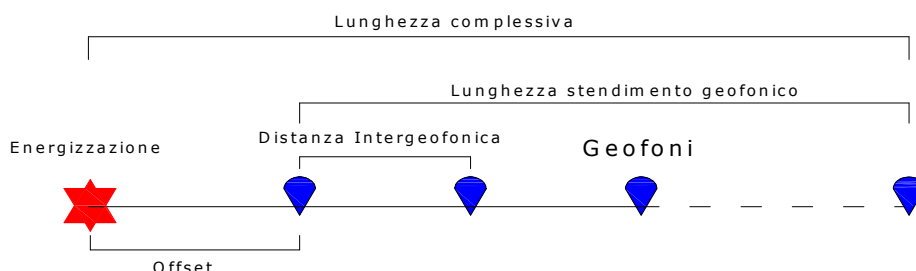


Fig.2 Schema illustrativo prova Masw

Le Basi Masw eseguite, per le possibilità operative presenti in corrispondenza del sito di intervento, presentano (Compreso il punto di shot) la con geometria come sotto indicato:

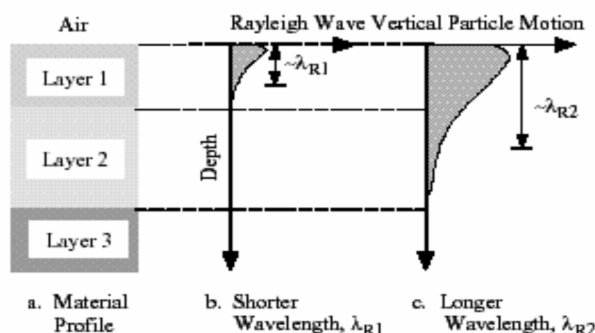
➤ Numero geofoni	24
➤ Distanza Intergeofonica	2,0 m
➤ Lunghezza stendimento geofonico	46 m
➤ Distanza punto di shot da primo geofono "offset"	10 m
➤ Lunghezza complessiva	56 m

Si ricorda che data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 20 Hz), la tecnica di acquisizione per onde di superficie necessita di geofoni (ad asse verticale) con frequenza di taglio non superiore a 4,5 Hz. Quindi le basi teoriche della tecnica di Acquisizione delle Masw, (analisi ed elaborazione delle onde di superficie di Rayleigh) sono completamente diverse dalle onde P od S degli stendimenti di sismica a riflessione o rifrazione). Perciò nell'acquisizione con tecnica Masw, non è possibile caratterizzare la tecnica con un classico coefficiente geometrico che esprime la profondità di investigazione in funzione della lunghezza della stesa sismica, (come nella riflessione o nella rifrazione), ove infatti le metodiche di interpretazione si basano sui tempi di arrivo ai geofoni delle onde riflesse o rifratte (quindi si misurano dei tempi). Nella tecnica Masw non si misurano dei tempi, ma viene eseguita una trattazione spettrale dei sismogrammi e mediante trasformata di Fourier si restituisce lo spettro del

segnale sismico nel dominio frequenza (f) n° d'onda (k) detto anche dominio f - k . La lunghezza dello stendimento dipende sia dal numero di ricevitori utilizzabili, sia dallo spazio disponibile.

Normalmente si dispongono i ricevitori ad interasse costante compreso tra 0,5 m e 3,0 m. (con array a parità di numero di ricevitori un interasse di 3,0 m consente di avere uno stendimento di ricevitori più lungo e quindi una maggiore risoluzione della curva di dispersione lungo la coordinata numero d'onda k ; tuttavia si riduce il numero d'onda di Nyquist oltre cui non si ha certezza sull'affidabilità del segnale misurato).

Al contrario un interasse piccolo può essere necessario in piccoli spazi e consente un intervallo più ampio di numeri d'onda, ma comporta una minore risoluzione della curva di dispersione lungo i numeri d'onda.



La profondità investigata dalle onde di Rayleigh dipende più propriamente dalla lunghezza d'onda, dalla velocità delle onde di taglio V_s e dalla frequenza. (Stokoe II and Santamarina, 2000).

La relazione quindi che meglio consente di valutare la profondità di investigazione di un'indagine masw, è legata più che alla dimensione dello stendimento, al valore della V_s assegnata ad una determinata profondità z dal piano campagna, calcolata in funzione della lunghezza d'onda, cioè:

$$z = \frac{\lambda}{1.5/2.0}$$

Dalle tecniche di analisi-interpretazione (analisi spettrale), mediante utilizzo del software (**SWAN**® vers. 2008) in seguito descritta più in dettaglio, dal grafico "Experimental Dispersion Curve" (nel dominio Frequenza-Velocità) è possibile ottenere la lunghezza d'onda delle onde di Rayleigh, caratteristiche dell'indagine eseguita, quindi per il sito in esame risultando:

MW1 una $\lambda \approx 65$ m, in base alla formulazione sopra indicata se ne può dedurre una profondità di investigazione pari a circa 43/32 m

MW2 una $\lambda \approx 64$ m, in base alla formulazione sopra indicata se ne può dedurre una profondità di investigazione pari a circa 42/32 m

Con la tecnica Masw (indagine sismica non invasiva di superficie) si ottiene una modellazione del sottosuolo, basandosi sulla propagazione delle onde di Rayleigh, oggi realizzata mediante approcci multi-stazioni, che risultano robusti ed efficienti (Foti, 2000; Lai e Wilmanski, 2005) rispetto ai primi approcci del metodo, che si basavano essenzialmente su 2 ricevitori (Prova Sasw - Stoke et al., 1994).

Queste prove (masw-sasw) sfruttano la proprietà della dispersione geometrica, che rende la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh (V_R) dipendente dalla frequenza di eccitazione in mezzi verticalmente eterogenei.

L'onda di Rayleigh, costituisce un particolare tipo d'onda sismica ed è facilmente individuabile in quanto ha una velocità differente dai treni d'onda delle onde P ed S risultando più lenta anche di queste ultime, con una velocità di propagazione $V_R \approx 0,9 \div 0,96 V_s$ (da V. Socco Lab. Geofisica Appl. Dip. Ing. Territorio Politecnico di TORINO)

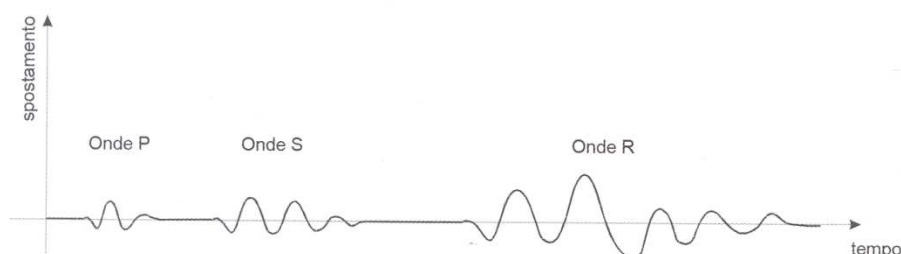


Fig. 3: sismogramma che evidenzia l'arrivo distinto di onde P, S e di Rayleigh (da Crespellani e Facciorusso "Dinamica dei terreni")

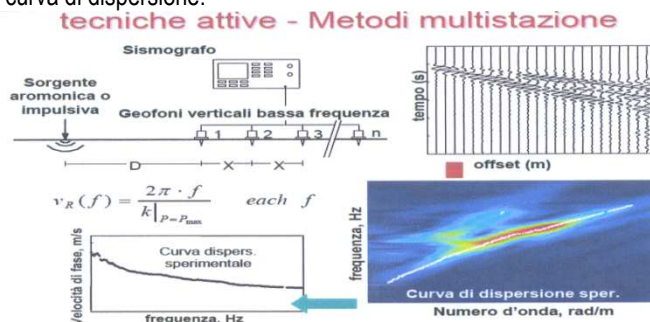
L'onda di Rayleigh si trasmette infatti sulla superficie libera di un mezzo isotropo e omogeneo ed è il risultato dell'interferenza e della combinazione d'onde sismiche di pressione (P-waves) e onde di taglio polarizzate verticalmente (Sv-waves).

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione (piccolo sisma) e nel registrare le vibrazioni prodotte sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

Il profilo di V_s viene determinato attraverso la soluzione di un problema matematico di inversione della curva di dispersione (V_R in funzione della frequenza).

In un mezzo reale stratificato avviene una dispersione delle onde prodotte; in altre parole, una deformazione del treno d'onda, dovuto alla variazione della velocità di propagazione, con la frequenza, che varia in relazione alle caratteristiche di "rigidezza" di ogni singolo strato.

Nella figura sotto esposta (da V. Socco Lab. Geofisica Appl. Dip. Ing. Territorio Politecnico di TORINO) è ben riassunto il processo di acquisizione ed il passaggio alla curva di dispersione:



Gli elementi a bassa frequenza penetrano quindi più in profondità, con velocità di fase in genere più alta, rispetto alle componenti ad alta frequenza.

Il calcolo del profilo delle velocità delle onde di Rayleigh, visualizzato dai grafici $V(\text{fase})/f(\text{frequenza})$, tramite elaborazioni e programmi dedicati, è convertito in profili V_s / profondità.

Interpretazione dati acquisiti

L'interpretazione delle tecniche di rilievo sismico MASW traggono spunto come sopra accennato dalle prime tecniche studiate da Nazarian e Stokoe (1984-94) che per primi hanno presentato il metodo SASW che utilizzava una sorgente d'impulso e 2 soli sismometri di rilevazione (1 Hz).

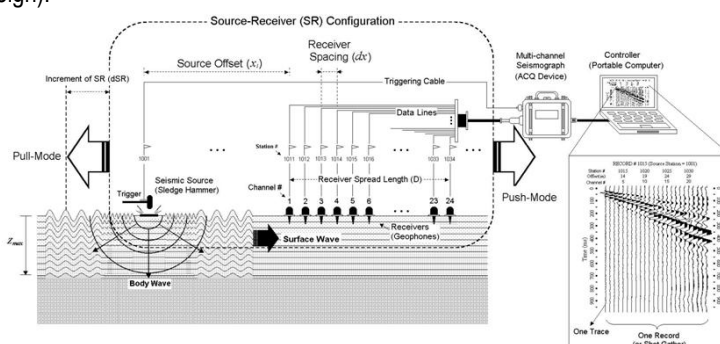
Tale tecnica come d'altronde anche la Masw, è basata sul fatto che osservando il segnale che si propaga nel suolo a seguito di una energizzazione, è notorio che la quasi totalità dell'energia (circa 2/3 o più) si propaga tramite onde superficiali (onde di Rayleigh).

A tale scopo Park et Alii (1999) hanno studiato e sviluppato il metodo MASW, per sopperire alle difficoltà d'applicazione, della tecnica Sasw in diverse situazioni.

La differenza principale è l'utilizzo simultaneo di 24 (o più) geofoni (sismometri polarizzati verticalmente - frequenza massima 4,5 Hz) per consentire di ricavare numerosi profili di velocità V_s , ricavati dallo studio delle velocità di fase, dei numerosi treni d'onda di Rayleigh che sono registrati ai sismometri.

I geofoni possono essere spazati da 0,5 sino ad un massimo di circa 2-3 m e forniscono una ridondanza statistica delle misure delle velocità di fase, avvalorandone quindi la veridicità (rispetto al metodo Sasw che si basava solo su di un'unica misura).

Le tracce dei sismogrammi, possono essere salvate nel dominio temporale, permettendo quindi di distinguere ed evidenziare (nel record di registrazione) le onde di Rayleigh, caratterizzate da elevata ampiezza di segnale (la quasi totalità dell'energia prodotta si ripartisce nelle onde di Rayleigh).



Dal sismogramma tramite una trasformata nel dominio, **frequenza (f) – numero d'onda (k)**, le tracce cui corrispondono i massimi spettrali (senza trascurare i modi superiori se presenti) si può così risalire alla curva di dispersione (cioè un grafico ampiezza/frequenza) mediante la relazione:

$$V_R(f) = f/k.$$

che consente di individuare il segnale proprio, relativo alle onde superficiali che interessano tale metodologia.

Il processo iniziale di individuazione della curva di dispersione caratteristica del sito in esame, è ottenuto tramite il software (**SWAN®** vers. 2008) seguito poi da una fase di elaborazione-interpretazione, eseguendo una "analisi spettrale" si procede sostanzialmente nella risoluzione del cosiddetto problema inverso: a partire dalla curva di dispersione misurata in situ, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri sismici, secondo il seguente schema:

- Concatenazione dei file contenenti i record di registrazione in situ.

- fase di pre-processing per "ottimizzare" i record stessi in modo da migliorare la qualità dell'interpretazione cioè eventuale filtraggio o "pulizia" dei dati grezzi.
- Passaggio dal sismogramma al dominio spettrale mediante trasformata FK.
- Picking dei punti dello spettro per ottenere la curva di dispersione sperimentale; la procedura consiste nel trovare per ogni frequenza dei massimi assoluti/relativi dello spettro FK, finalizzata alla individuazione del modo fondamentale di propagazione dell'onda (ovvero quello a velocità minore), senza trascurare (analisi multimodale) di ricercare anche eventuali modi superiori.
- Estrazione curva di dispersione sperimentale mediante la procedura sopra indicata dallo spettro FK.
- Inversione: tale procedura è avviata allo scopo di ottimizzare un modello stratigrafico che sia relativo e sovrapponibile alla curva di dispersione sperimentale propria del sito; in tale procedura il programma **SWAN®** utilizza una tecnica di inversione lineare tipo OCCAM che presenta il vantaggio di minimizzare l'errore quadratico medio tra dati sperimentali e dati teorici. In linea generale come in gran parte dei processi di inversione (definiti "try and error") l'inversione viene fermata quando un determinato parametro, definito ϵ (cioè la differenza fra dato osservato e dato calcolato) è in genere $< 2-3\%$. L'inversione OCCAM, utilizzando differenze quadratiche medie, da risultati ancora migliori, di un'inversione lineare classica, dato che quando si raggiunge lo stop dell'inversione (ϵ_{MIN}) cioè un valore percentualmente molto piccolo, la sovrapposizione delle curve è davvero buona.
- Fase di ottimizzazione e di taratura della curva teorica, realizzata contestualmente alla procedura d'inversione, con inserimento (eventuale) di strati sino ad un massimo di 30, assegnazione di moduli di Poisson e taratura dello spessore degli strati mediante confronto con prove dirette (prove penetrometriche, stratigrafie di sondaggio, colonne di perforazioni di pozzi ecc.) ed eseguendo ulteriori processi di inversione allo scopo di raffinare il risultato ottenuto, cioè una curva di dispersione teorica finale molto ben sovrapposta a quella sperimentale.

L'obiettivo finale cioè l'ottenimento di un profilo verticale delle Vs, minimizzando le imprecisioni (risultati random), ottenendo quindi un modello ad elevata attendibilità e fortemente rappresentativo, mediante le tarature, del reale profilo Vs/profondità del sito in analisi, come d'altronde suggerito anche da ricercatori in ambito geofisico (es. Dal Moro et alii Gruppo Esplor. Geofisica - Dip. Geol e Scienze Marine Univ. Trieste "cosa migliore è confrontare lo spettro di velocità osservato, con le curve teoriche di dispersione di un modello che riteniamo plausibile per l'area sotto esame.").

Considerazioni sulle tecniche di inversione:

- Le tecniche d'inversione possono fornire soluzioni non univoche, ma proprio ovviare a questa possibilità, si eseguono TARATURE, con dati reali del sito (prove cpt, stratigrafie ecc.) utilizzando anche parametri che esprimono la "rigidezza" degli strati individuati (es. coeff. Poisson), proprio per indirizzare l'inversione verso un modello molto vicino a quello reale.
- La funzione obiettivo (il misfit tra dato osservato e dato calcolato) è prossima a zero, solo in caso ideale in assenza di rumore; per questo motivo il sismogramma può essere trattato o filtrato per ridurre al minimo od eliminare eventuali rumori o disturbi esterni, che non hanno nulla a che fare con l'onda sismica che stiamo analizzando.
- E' fuorviante e sbagliato attribuire una percentuale di errore eseguendo una operazione di alterazione delle velocità sismiche, ottenute dall'esecuzione dei dettagliati processi di inversione sopra esposti (esempio attribuendo un errore globale del $\pm 10\%$, quindi alterando ad es. le velocità sismiche ottenute moltiplicando $\times 0,9$ le Vs dei singoli strati), perché in tal modo si **vanificherebbe** completamente l'elaborazione Masw, che è stata fatta con cura ed esperienza secondo principi codificati e consolidati. Ipotizzando possa esistere un modello Vs/profondità analogo a quello definito con l'interpretazione corretta della prova Masw, ma con velocità alterate (cioè diminuite/aumentate del 10%) si otterrebbe un Match fra curva sperimentale e teorica **completamente non attendibile**. A titolo di esempio si allegano alcune figure che illustrano tale erronea operazione di alterazione delle Vs calcolate.

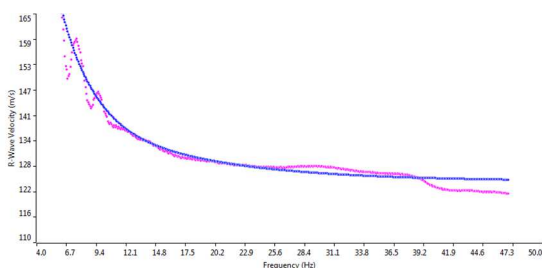


Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica (blu) ottenuta dal processo inversione Masw dominio frequenza/velocità.
Si noti la quasi perfetta corrispondenza del fitting fra le due curve

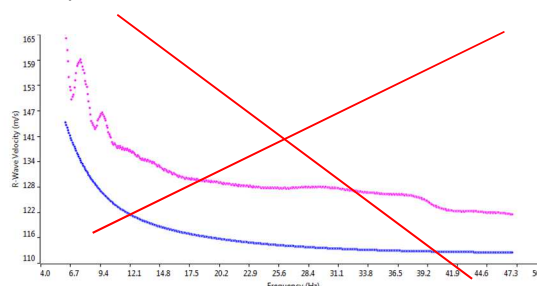


Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica "alterata" modificando le Vs diminuendole erroneamente del 10% (blu) dominio frequenza/velocità.
Si noti la completa "sfasatura" della curva teorica sinonimo di un allontanamento dalla reale stratigrafia sismica che caratterizza il sito quindi un modello **NON ACCETTABILE**

Le curve di dispersione sopra esposte sono da considerare indicative e non riferite alla indagine Masw della presente relazione; sono riferite ad un generico sito con una stratificazione di 5 strati, mantenuti identici nelle 2 simulazioni, con analoghi coefficienti di Poisson assegnati (variabili fra 0.45-0.48) e $V_{S30} \approx 190$ m/sec (grafico a sinistra) e $V_{S30} \approx 170$ m/sec (grafico a destra).

Categorie di suolo di fondazione (Azione sismica di progetto V_{sh} o per il caso in esame V_{s30})

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto (come previsto da DM 17/01/2018) sono stati esaminati i dati ottenuti dalle prospezioni sismiche di superficie, opportunamente tarati con dati stratigrafici e litologici presenti in bibliografia (pozzi, sezioni stratigrafiche ecc.), dai sondaggi geognostici e dalle prove penetrometriche eseguite in sito.

i valori della velocità media delle onde di taglio V_s risultano pertanto:

MASW MW1

metodo sismico attivo-MASW onde Rayleigh:

1° strato: velocità media onde V_s 120 m/sec	spessore medio 1,30 m
2° strato: velocità media onde V_s 140 m/sec	spessore medio 3,20 m
3° strato: velocità media onde V_s 120 m/sec	spessore medio 6,50 m
4° strato: velocità media onde V_s 170 m/sec	spessore medio 5,00 m
5° strato: velocità media onde V_s 230 m/sec	spessore medio $\geq 14,00$ m

In base a quanto sopra, la classificazione delle categorie dei suoli di fondazione, come da All. 2 (cfr. Ord. Pres. Consiglio dei Ministri 3274 del 20/03/2003 e art. 3.2.2 DM 17/01/2018), ai vari strati sismo stratigrafici individuati, è stato associato il valore della velocità V_s direttamente misurate, consentendo di ottenere la V_{s30} , cioè la velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo, dall'espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

dove

h_i = spessore dello strato i-esimo
 V_{s_i} = velocità onde S nello strato i-esimo
 N = numero strati considerati

Ottenendo in base ai dati sopra esposti,

Prospezione MASW $V_{s30} = 168$ m/sec (da p.c. a -30 m)

Si ricorda che in base a quanto previsto da art. 3.2.2 NTC18, "Per le fondazioni superficiali tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse"

quindi considerando che il piano di posa della tubazione è previsto ad almeno - 2,00 m da pc (dato comunicato da progettista):

$V_{s30} = 175$ m/sec (da - 2,00. a - 32,0. m)

Perciò sia dalla misura della V_s da piano campagna, sia in base ai valori ottenuti riferiti al piano di posa della tubazione comunicato dal progettista al momento della stesura della presente relazione, il terreno corrisponde alla categoria del suolo di fondazione di tipo

D (Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.)

Il progettista dovrà verificare che vi sia effettivamente un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità dei terreni come da NTC18

MASW MW2**metodo sismico attivo-MASW onde Rayleigh:**

1° strato: velocità media onde Vs 110 m/sec	spessore medio 2,00 m
2° strato: velocità media onde Vs 125 m/sec	spessore medio 1,90 m
3° strato: velocità media onde Vs 115 m/sec	spessore medio 2,60 m
4° strato: velocità media onde Vs 100 m/sec	spessore medio 2,65 m
5° strato: velocità media onde Vs 140 m/sec	spessore medio 2,35 m
6° strato: velocità media onde Vs 200 m/sec	spessore medio 12,90 m
7° strato: velocità media onde Vs 230 m/sec	spessore medio ≥5,60 m

In base a quanto sopra, la classificazione delle categorie dei suoli di fondazione, come da All. 2 (cfr. Ord. Pres. Consiglio dei Ministri 3274 del 20/03/2003 e art. 3.2.2 DM 17/01/2018), ai vari strati sismo stratigrafici individuati, è stato associato il valore della velocità Vs direttamente misurate, consentendo di ottenere la Vs₃₀, cioè la velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo, dall'espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

dove

h_i = spessore dello strato i-esimo
V_{s_i} = velocità onde S nello strato i-esimo
N = numero strati considerati

Ottenendo in base ai dati sopra esposti,

Prospezione MASW

V_{s30} = **159 m/sec** (da p.c. a -30 m)

Si ricorda che in base a quanto previsto da art. 3.2.2 NTC18, "Per le fondazioni superficiali tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse"

quindi considerando che il piano di posa della tubazione è previsto ad almeno – 2,00 m da pc (dato comunicato da progettista):

V_{s30} = **168 m/sec** (da – 2,00. a – 32,0. m)

Perciò sia dalla misura della Vs da piano campagna, sia in base ai valori ottenuti riferiti al piano di posa della tubazione comunicato dal progettista al momento della stesura della presente relazione, il terreno corrisponde alla categoria del suolo di fondazione di tipo

D (Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.)

Il progettista dovrà verificare che vi sia effettivamente un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità dei terreni come da NTC18

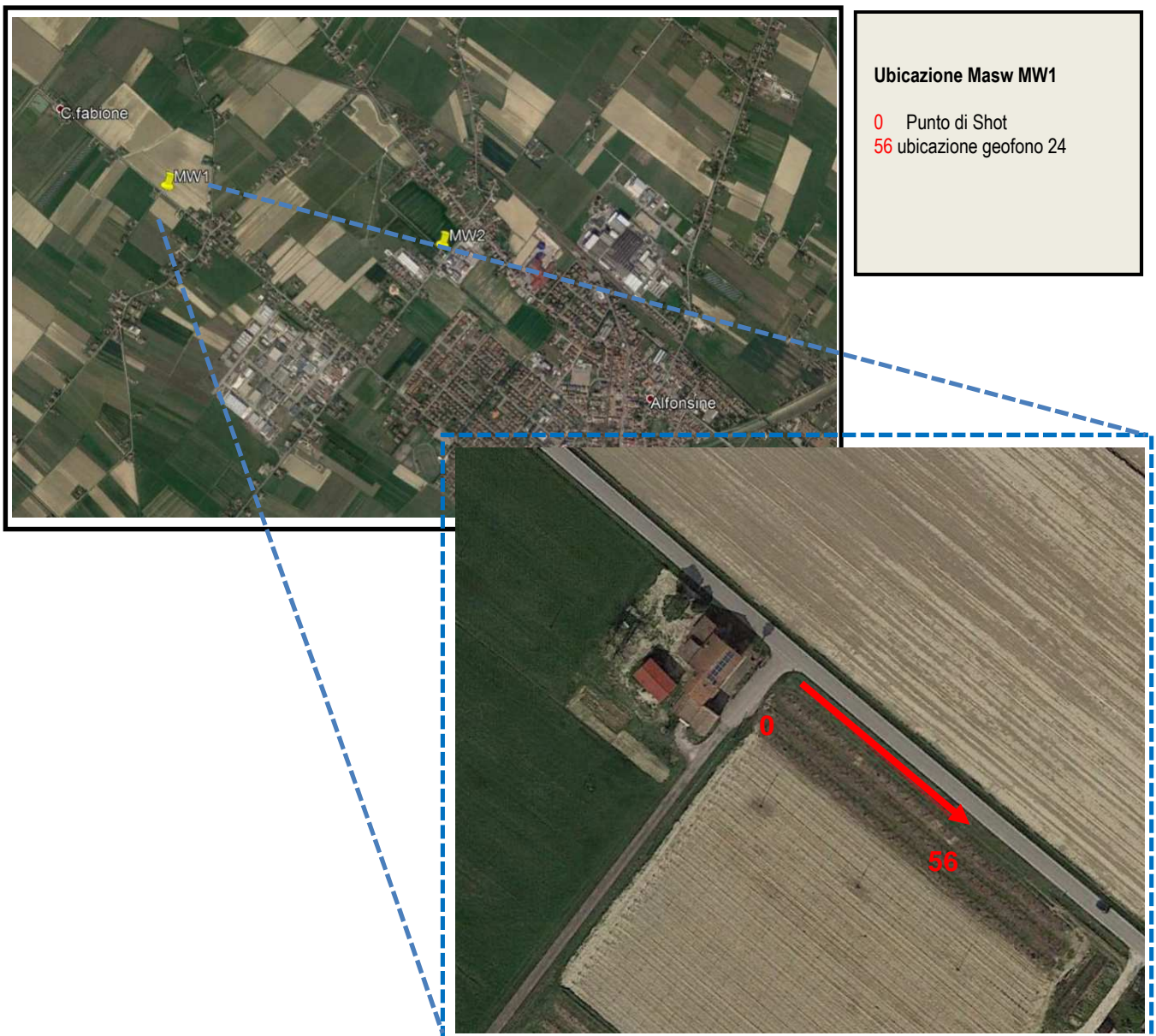


Allegati Intervento***Ubicazione Indagini***

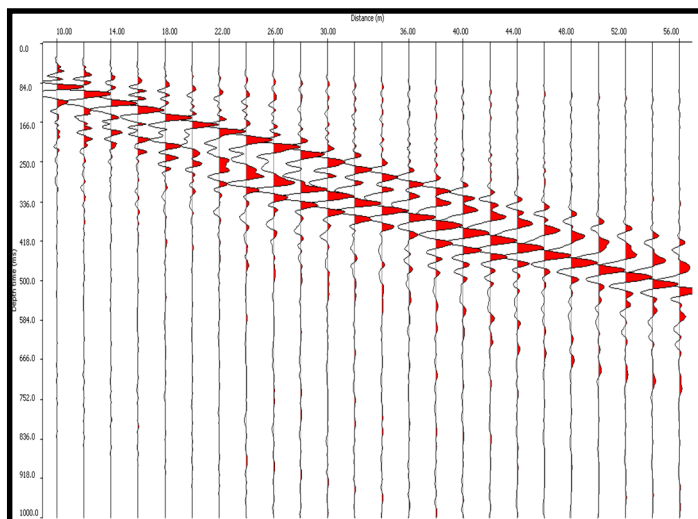
Caratteristiche delle indagini geofisiche eseguite:

Nome file	Tipologia indagine	Numero geofoni	Interdistanza geofonica m	Lunghezza linea m	Lunghezza compreso offset	comune	Coordinate indicative punto centrale
MW1	MASW	24	2,0	46	56	Alfonsine	N44,515498 E12,012225
MW2	MASW	24	2,0	46	56	Alfonsine	N44,512601 E12,029753

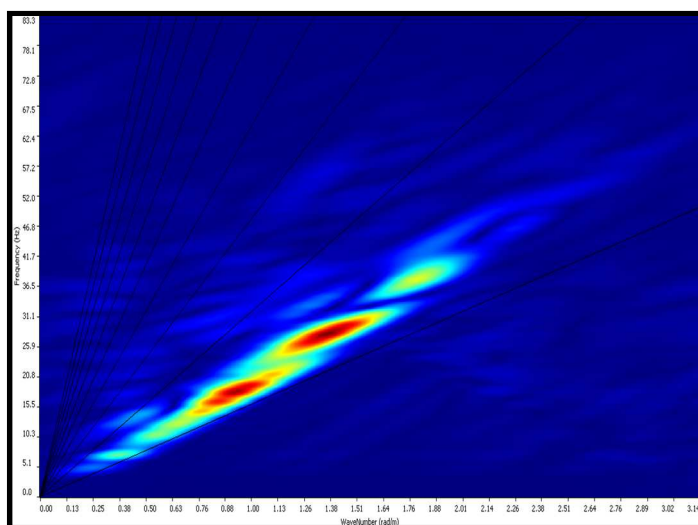
Scheda Masw MW1 (rif. CPT1)



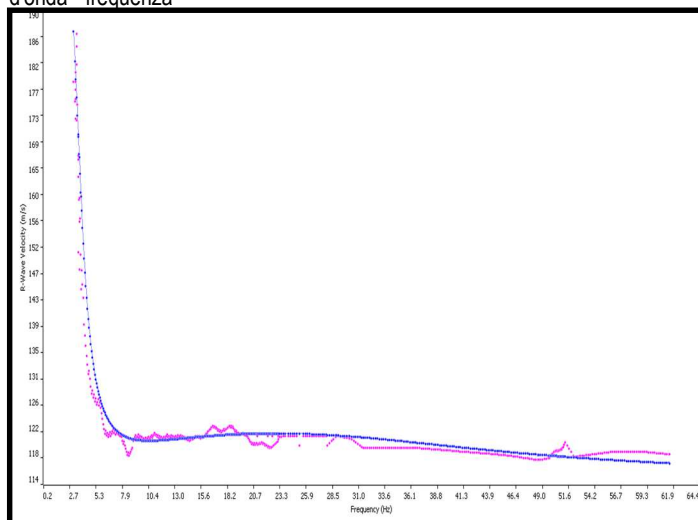
Piazzamento Masw



Sismogramma nel dominio spazio/tempo



Spettro FK - Rappresentazione del sismogramma nel dominio numero d'onda - frequenza



Sovrapposizione curva di dispersione calcolata / curva teorica rappresentata nel dominio Frequenza/Velocità

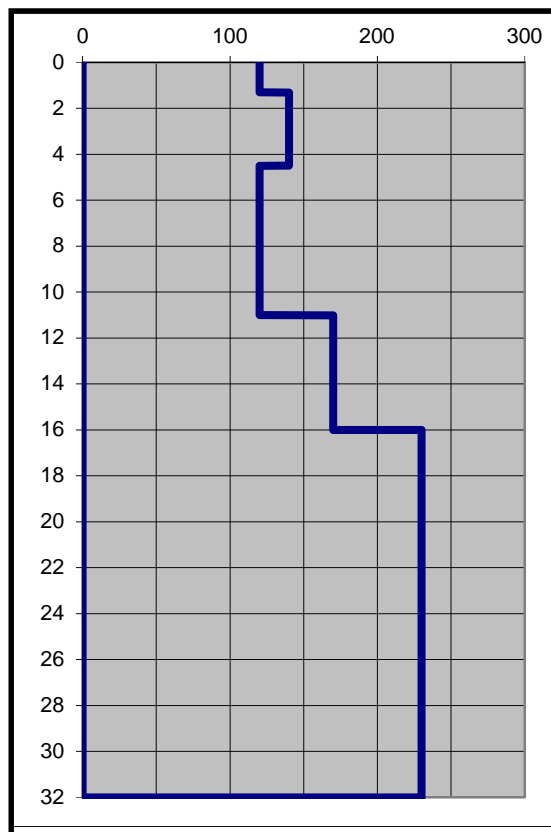


Grafico velocità/profondità onde di taglio Vs

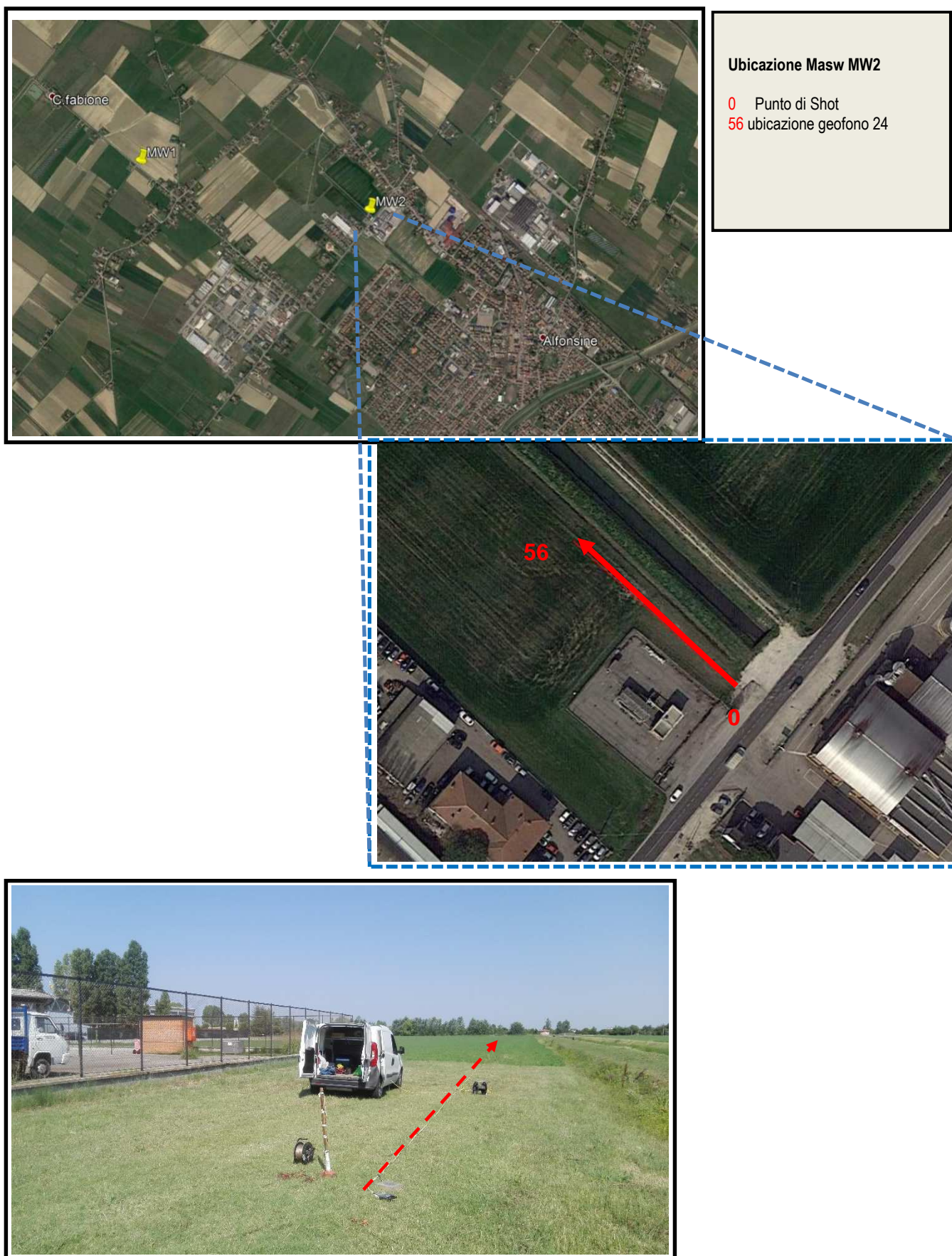
Risultati Elaborazione MASW

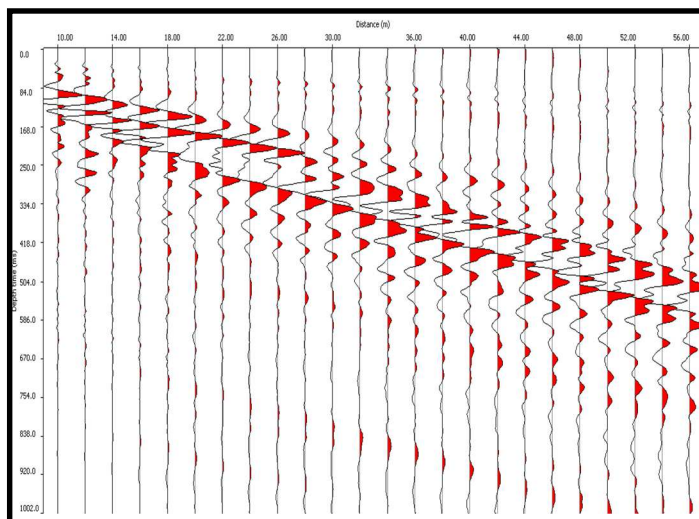
Strato	profondità		Spessore m	Vel. m/sec
	da	a		
Strato1	0.00	1.30	1.30	120
Strato2	1.30	4.50	3.20	140
Strato3	4.50	11.00	6.50	120
Strato4	11.00	16.00	5.00	170
Strato5	16.00	≥32.00	≥16.00	230

$V_{s30} = 168 \text{ m/sec}$ (da p.c. a -30 m)

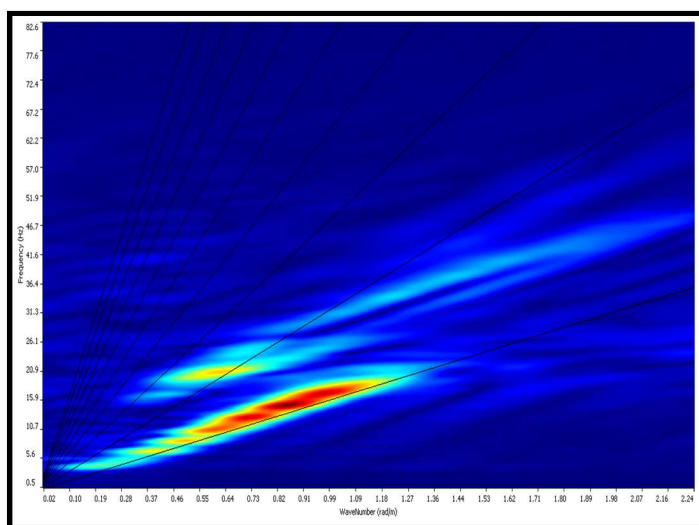
$V_{s30} = 175 \text{ m/sec}$ (da -2 a -32 m)

Rispetto al piano di posa a -2 m da pc corrisponde la categoria di suolo di fondazione di tipo **D** (*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti*, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s)

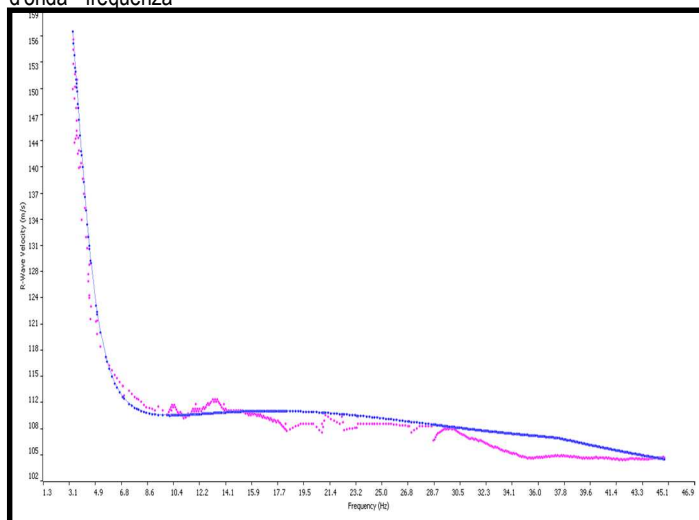
Scheda Masw MW2 (rif.SG1)



Sismogramma nel dominio spazio/tempo



Spettro FK - Rappresentazione del sismogramma nel dominio numero d'onda - frequenza



Sovrapposizione curva di dispersione calcolata / curva teorica rappresentata nel dominio Frequenza/Velocità

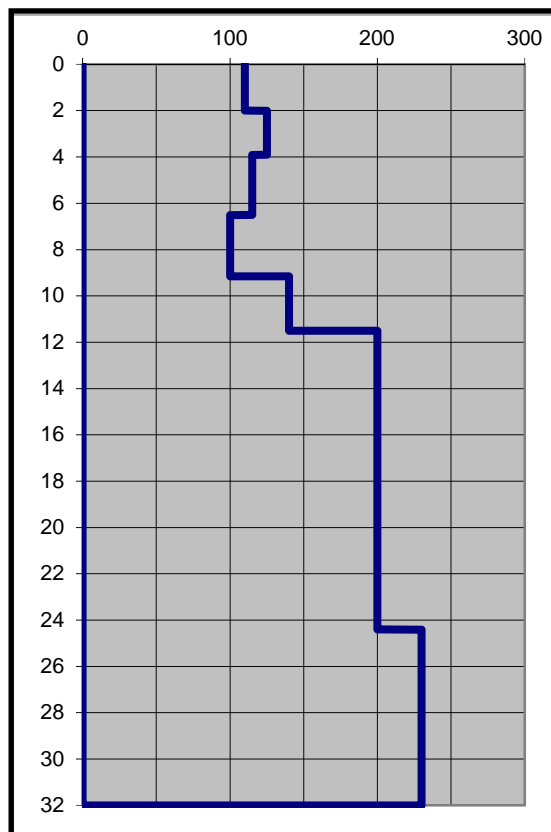


Grafico velocità/profondità onde di taglio Vs

Risultati Elaborazione MASW

Strato	profondità		Spessore m	Vel. m/sec
	da	a		
Strato1	0.00	2.00	2.00	110
Strato2	2.00	3.90	1.90	125
Strato3	3.90	6.50	2.60	115
Strato4	6.50	9.15	2.65	100
Strato5	9.15	11.50	2.35	140
Strato6	11.50	24.40	12.90	200
Strato7	24.40	≥32.00	≥7.60	230

$V_{s30} = 159 \text{ m/sec}$ (da p.c. a -30 m)

$V_{s30} = 168 \text{ m/sec}$ (da -2 a -32 m)

Rispetto al piano di posa a -2 m da pc corrisponde la categoria di suolo di fondazione di tipo **D** (*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti*, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s)