

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 1 di 249 | Rev. 0 |

**CENTRALE COMPRESSIONE GAS DI MALBORGHETTO
ADEGUAMENTO IMPIANTO DI COMPRESSIONE GAS**

RELAZIONE GEOTECNICA

SAIPEM SPA
 Il Progettista
 Dott. Ing. Filippo MARIOTTI iscritto all'ordine
 degli Ingegneri della Provincia di Pesaro Urbino al n. 1323
 Tel. 0721.1666557 - Fax 0721.1662338
 C.F. e P. IVA 0062579015



| Rev. | Descrizione | Elaborato | Verificato | Approvato | Data |
|------|-------------|-----------|------------|-----------|----------|
| 0 | Emissione | Belelli | Baldelli | Belelli | 06/04/20 |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg.2 di 249 | Rev. 0 |

INDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | GENERALITA' | 4 |
| | 1.1 Normativa di riferimento | 5 |
| 2 | INQUADRAMENTO DEL SITO | 7 |
| 3 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO | 9 |
| 4 | INDAGINE GEOGNOSTICA | 10 |
| | 4.1 Interpretazione delle indagini | 11 |
| | 4.2 Superficie Piezometrica (GWT) | 17 |
| | 4.3 Prove di laboratorio e prove in situ. Considerazioni ed elaborazioni | 18 |
| 5 | CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E GEOTECNICA | 23 |
| | 5.1 Caratterizzazione stratigrafica | 23 |
| | 5.2 Falda (GWT) | 23 |
| | 5.3 Modello geotecnico (schema stratigrafico di calcolo) | 24 |
| 6 | SISMICITÀ | 26 |
| 7 | PARAMETRI SISMICI DEL SITO | 33 |
| | 7.1 Analisi di pericolosità sismica di base | 33 |
| | 7.2 Valutazione del potenziale di liquefazione secondo le NTC2018 | 35 |
| 8 | FONDAZIONI: TIPOLOGIA, CAPACITÀ PORTANTE E CEDIMENTI | 39 |
| | 8.1 Modello geotecnico e parametri caratteristici del terreno | 39 |
| | 8.2 Caratteristiche tipologiche delle fondazioni dirette | 39 |
| | 8.3 Carico limite delle fondazioni dirette (Resistenza R) | 39 |
| | 8.4 Influenza dell'eccentricità delle sollecitazioni sul carico limite | 41 |
| | 8.5 Cedimenti di fondazioni dirette | 43 |
| | 8.6 Interazione terreno-struttura - [terreno alla Winkler] | 47 |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 3 di 249 | Rev. 0 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 9 | FONDAZIONI DI MACCHINE VIBRANTI | 48 |
| 9.1 | Parametri geotecnici dinamici del terreno. Velocità delle onde di taglio | 48 |
| 9.2 | Parametri geotecnici dinamici del terreno. Modulo di taglio | 48 |
| 9.3 | Miglioramento del terreno di fondazione delle macchine vibranti. | 51 |
| 9.4 | Intervento di miglioramento mediante letto di sottofondazione in magrone di calcestruzzo | 51 |
| 10 | ALLEGATI | 56 |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg.4 di 249 | Rev. 0 |

1 GENERALITA'

Nell'ambito della progettazione dell'adeguamento dell'Impianto di Compressione Gas di Malborghetto (UD) nell'area della Centrale SRG ricadente nel Comune di Malborghetto Valbruna (UD), sono state eseguite una serie di indagini e rilievi in sito, per caratterizzare l'area oggetto dell'intervento da un punto di vista geologico, idrogeologico, stratigrafico e geotecnico.

Il presente documento attiene alla ricostruzione del quadro di riferimento geotecnico necessario per la progettazione delle opere e dell'impianto in progetto, fa integralmente riferimento alla Relazione geologica [Rif. 2], redatta per l'area della Centrale.

La presente relazione definisce la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica dei terreni di fondazione assunta per l'area interessata dalla realizzazione dell'Adeguamento Impianto di Compressione Gas di Malborghetto (UD).

Lo studio ha preso in considerazione i risultati della campagna geognostica appositamente eseguita sull'area dell'impianto nell'ottobre – novembre 2019 da Geotecnica Veneta s.r.l. di Olmo di Martellago (VE), [Rif. 1], nonché ulteriori dati ed informazioni di natura geognostica, geologica e geotecnica pregressi e disponibili, [Rif. 3] e [Rif. 4].

Gli elementi e le analisi di seguito descritti sono stati finalizzati a:

- definire il modello geotecnico di sottosuolo in corrispondenza delle aree di interesse per gli interventi in progetto. Per modello geotecnico si intende uno schema rappresentativo delle condizioni stratigrafiche, del regime delle pressioni interstiziali e della caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce comprese nel volume significativo, finalizzato all'analisi quantitativa del problema geotecnico connesso con la progettazione dei manufatti previsti nell'impianto;
- sviluppare la caratterizzazione sismica di sito, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, ai sensi delle NTC2018.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 5 di 249 | Rev. 0 |

1.1 Normativa di riferimento

La presente relazione è redatta in conformità alle disposizioni del nuovo **Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” (NTC2018)**, emesse con **Decreto Ministro delle Infrastrutture del 17 gennaio 2018, di concerto con il Ministro dell'interno e il Capo del Dipartimento della Protezione Civile**, che costituisce il Testo aggiornato delle norme tecniche per le costruzioni, di cui alla legge 5 novembre 1971, n. 1086, alla legge 2 febbraio 1974, n. 64, al decreto del Presidente della Repubblica 6 giugno 2001, n. 380, ed al decreto-legge 28 maggio 2004, n. 136, convertito, con modificazioni, dalla legge 27 luglio 2004, n. 186 e ss. mm. ii..

E' inoltre redatta in conformità alle seguenti disposizioni di legge:

- **Circolare Ministeriale 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.:** Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;
- **D.g.r. 28 maggio 2008 – n. 8/7574:** Aggiornamento dei “Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell’art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n.12”, approvati con D.g.r. 22 dicembre 2005, n. 8/1566;
- **Allegato al voto n. 36 del 27/07/2007 Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici:** Pericolosità sismica e criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale;
- **Direttiva nazionale, 12 ottobre 2007:** direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle NTC;
- **Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006:** criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle stesse zone
- **Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri, 20 marzo 2003 n.3274:** primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica;
- **DPR 6 giugno 2001 n. 380:** Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia;
- **DPCM 29 settembre 1998:** atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all’art. 1, commi 1 e 2, del decreto legge 11/06/1997;
- **Circolare Ministeriale 10 novembre 1997 n.65/AA.GG.:** Istruzioni per l'applicazione delle “norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche” di cui al D.M. 16701/1996;
- **DM 16 gennaio 1996:** Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche;
- **Circolare ministeriale 9 gennaio 1996, n. 218:** Istruzioni applicative per la redazione della relazione geologica e della relazione geotecnica;
- **Circolare ministeriale 24 settembre 1998 n. 304833:** Istruzioni riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg.6 di 249 | Rev. 0 |

e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione;

- **DM 11 marzo 1988:** Norme tecniche riguardanti 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 ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione;
- **DM 3 marzo 1975:** Approvazione delle Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg.7 di 249 | Rev. 0 |

2 INQUADRAMENTO DEL SITO

L'area oggetto di studio si trova nel comune di Malborghetto Valbruna (UD) circa 1.0 km a Ovest del capoluogo, in destra del fiume Fella (Figura 2.1). Al catasto dei terreni il sito è individuato con i mappali n. 224 e 225 del F° 9 del Comune di Malborghetto Valbruna.

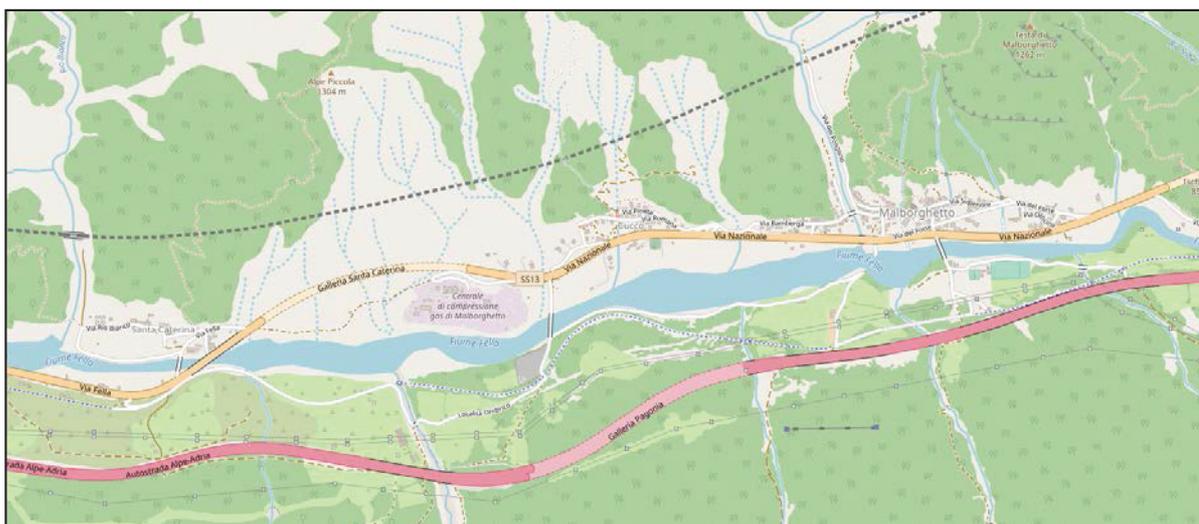


Figura 2.1 – Corografia con l'area della Centrale . Dalla carta "OpenStreetMap" (*riproduzione non in scala*).

Altri riferimenti cartografici sono:

- la Carta Tecnica Numerica Regionale della Regione Autonoma Friuli – Venezia Giulia – 033050 "LAGLÈSIE SAN LEOPOLDO, Scala 1:10000, riprodotta in stralcio (nella Figura 2.2);
- Immagine da satellite dell'area tratta da Google Earth, riprodotta nella Figura 2.3.

Altimetricamente l'area di interesse si trova ad una quota media di circa 680 m s.l.m..

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 8 di 249 | Rev. 0 |

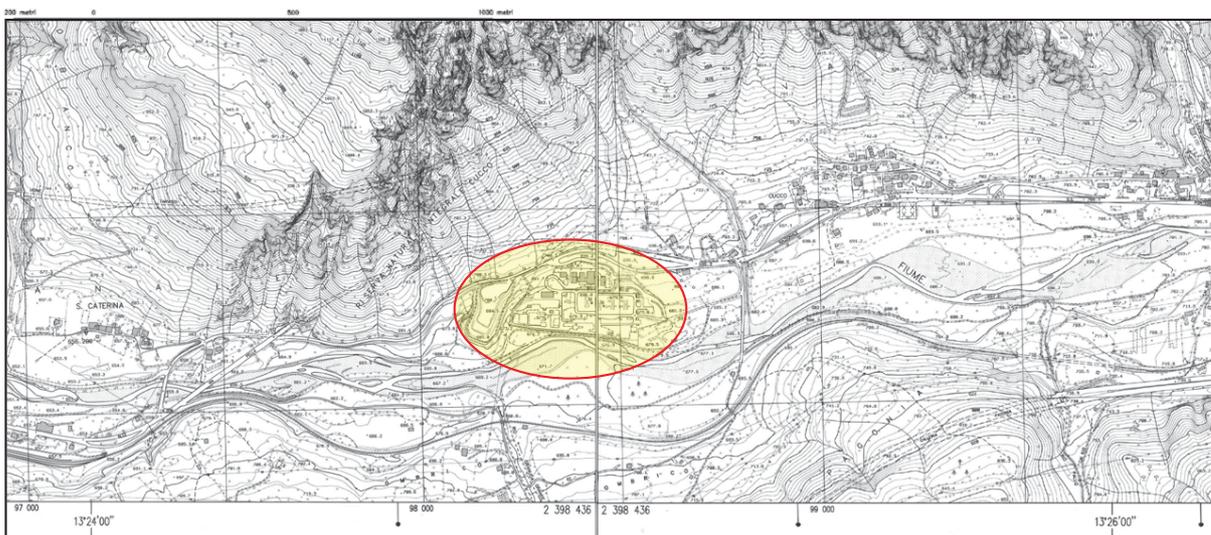


Figura 2.2 – Corografia con l’area della Centrale. Dalla Carta Tecnica Numerica Regionale della Regione Autonoma Friuli– Venezia Giulia – [033050 “LAGLÈSIE SAN LEOPOLDO unita a 03360 “MALBORGHETTO”], Scala 1:10000 (*riproduzione non in scala*).



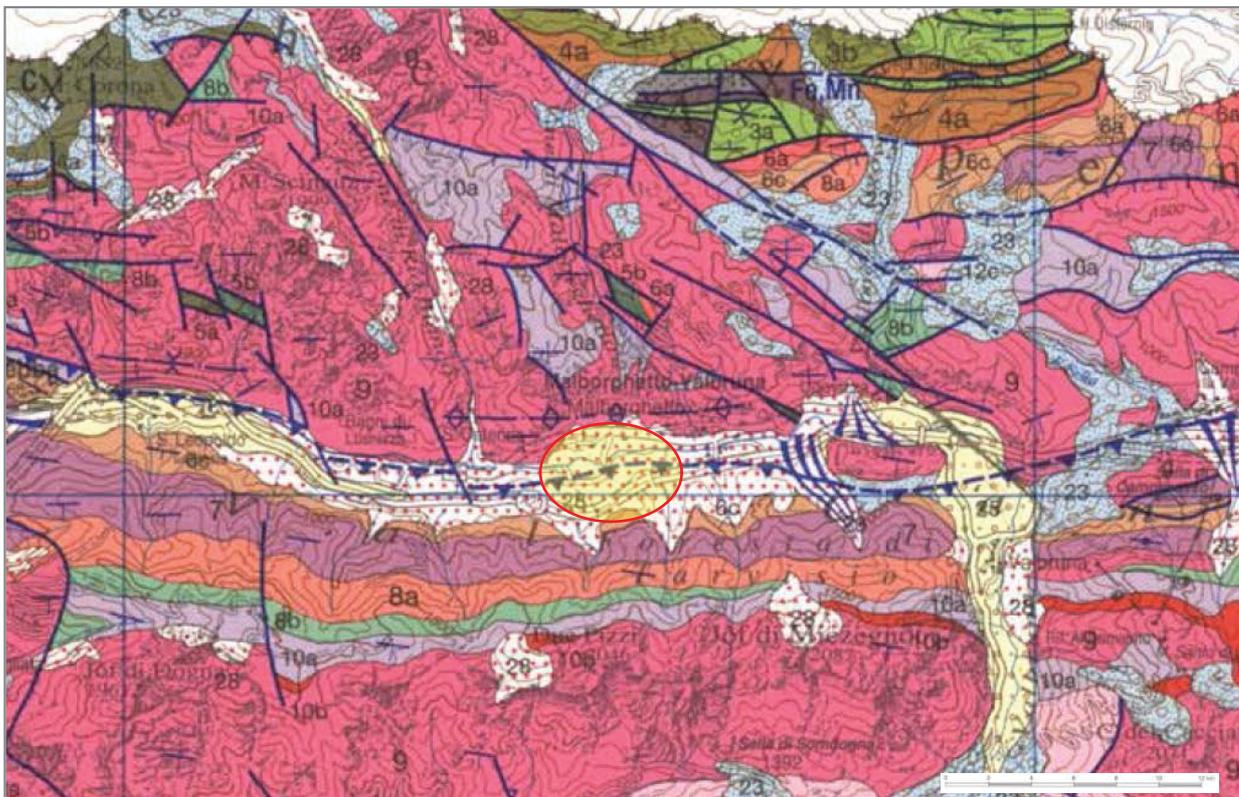
Figura 2.3 – Corografia dell’area. Immagine satellitare da Google Earth (*riproduzione non in scala*).

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 9 di 249 | Rev. 0 |

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nella Figura 3.1 è riprodotta, in stralcio, la Carta Geologica del Friuli Venezia Giulia¹, nella parte relativa all'area della Centrale.

L'area di interessarisulta caratterizzata dalla presenza di Detriti di falda recenti ed attuali: sono localizzati ai piedi di pareti sub-verticali o lungo i pendii e sono composti in prevalenza da ciottoli, ghiaia e sabbie, in scarsa matrice limoso-sabbiosa.



Detriti di falda recenti ed attuali. Olocene - Attuale

Figura 3.1 – Stralcio della Carta Geologica del Friuli Venezia Giulia (*riproduzione non in scala*).

¹ Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia - Carta geologica del Friuli Venezia Giulia alla scala 1:150.000, edita nel 2006 - Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine dell'Università di Trieste.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 10 di 249 | Rev. 0 |

4 INDAGINE GEOGNOSTICA

Per la caratterizzazione geognostica e geotecnica sono state eseguite indagini in sito. Queste sono consistite in sondaggi geognostici a carotaggio continuo. Inoltre per la definizione dei parametri dinamici del terreno e per la caratterizzazione della risposta sismica sono stati eseguiti profili sismici a rifrazione con tecnica MASW.

Più nel dettaglio:

- N. 12 sondaggi geognostici, a carotaggio continuo, nell'area Impianto SRG, denominati BH1÷BH12, spinti fino alla profondità variabili da 20 m a 30 m dal p.c. esistente;
- N. 4 sondaggi geognostici, a carotaggio continuo, nell'area delle flow line interrato fuori Centrale, denominati BH13÷BH16, spinti fino alla profondità di 20 m dal p.c. esistente; a completezza dei sondaggi in Centrale.
- N. 4 stendimenti di sismica attiva del tipo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*). MASW.

I sondaggi geognostico - geotecnici sono stati eseguiti a rotazione con carotaggio integrale a secco del terreno, secondo le modalità previste dalle "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche" AGI (giugno 1977), con percentuali di recupero sempre superiori all' 85%.

Nel corso dei sondaggi, oltre alla descrizione dei terreni ed all'esecuzione di prove speditive di resistenza con Pocket Penetrometer e Torvane in presenza dei rari livelli coesivi presenti, sono state eseguite prove penetrometriche dinamiche standard in foro (Standard Penetration Test, SPT) in corrispondenza dei livelli granulari per la determinazione del grado di addensamento e della resistenza dei materiali granulari e prove di permeabilità tipo Lefranc per la determinazione dei coefficienti di permeabilità dei terreni.

I sondaggi sono stati eseguiti in accordo con le specifiche vigenti, in particolare con le Raccomandazioni AGI (Associazione Geotecnica Italiana) "*Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*" (giugno 1977), con percentuali di recupero sempre superiori all' 85%.

Nel corso delle prove penetrometriche standard (SPT) sono stati prelevati campioni mediante il campionatore Raymond e, quando eseguite con la punta conica chiusa, mediante successivo carotaggio. I campioni rimaneggiati sono stati prelevati in accordo alla specifica ASTM D 1587². Negli strati di terreni incoerenti e granulari, le prove penetrometriche dinamiche standard (SPT) in foro, sono state eseguite in accordo con la specifica ASTM D1586³ così come il contemporaneo campionamento del terreno mediante campionatore Raymond. Quando le prove SPT sono state eseguite con la punta conica chiusa, per la presenza di granuli grossolani, il campionamento del terreno, su cui era stata eseguita la prova, è stato eseguito mediante successivo carotaggio.

I campioni (indisturbati e rimaneggiati) prelevati nel corso dei sondaggi sono stati conservati e spediti al laboratorio geotecnico "Laboratorio Geomeccanico Orazi S.A.S." di Pesaro,

² ASTM D1587 - Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes.

³ ASTM D1586 - Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 11 di 249 | Rev. 0 |

incaricato di eseguire le prove di laboratorio. Su tutti i campioni rimaneggiati sono state eseguite prove di classificazione, con caratterizzazione delle proprietà indici e granulometriche.

Le prove di permeabilità tipo Lefranc sono state condotte secondo le modalità previste dalle citate Raccomandazioni AGI (giugno 1977).

Nell'Allegato 1 sono riportati i risultati dell'indagine geognostica e geotecnica in situ, insieme alla planimetria con l'ubicazione delle indagini, le stratigrafie dei sondaggi, gli indici penetrometrici ed i risultati della campagna geofisica. Inoltre nell'Allegato 2 sono riportati i risultati delle prove di laboratorio geotecnico.

4.1 Interpretazione delle indagini

Al fine di individuare le problematiche relative al dimensionamento delle opere di fondazione (scelta della tipologia di fondazione, valutazione della capacità portante, previsione dei cedimenti, interventi di miglioramento del terreno, ecc.) si è fatto riferimento ai risultati delle indagini.

In particolare, data la natura generalmente granulare ed incoerente dei terreni interessati, sono risultate utili le interpretazioni, mediante accreditate correlazioni di letteratura tecnica internazionale, delle prove penetrometriche dinamiche standard (SPT), e le prove di laboratorio (Analisi Granulometriche per setacciatura e determinazioni dei Limiti di Atterberg sulla frazione fine *passante a 0.420 mm*), i cui risultati e le cui interpretazioni sono riassunti nelle Figure seguenti:

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 12 di 249 | Rev. 0 |

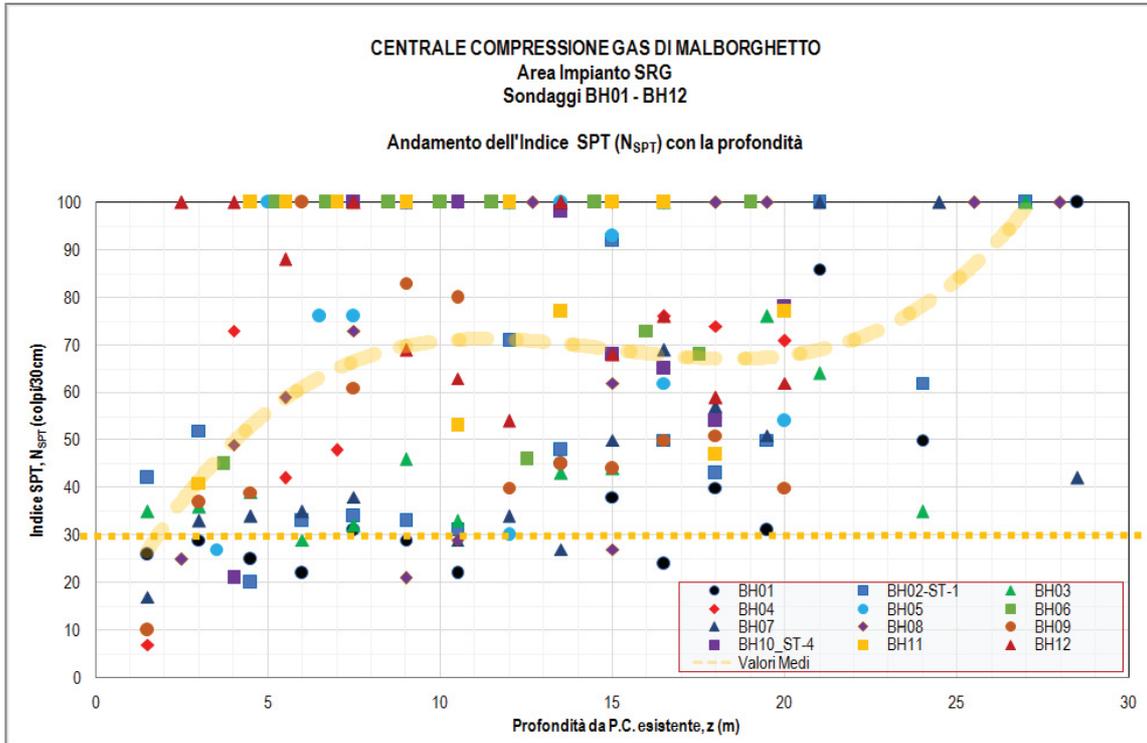


Figura 4.1.a – Area Centrale – Prove penetrometriche dinamiche standard - Andamento dell'Indice SPT (N_{SPT}) con la profondità dal p.c..

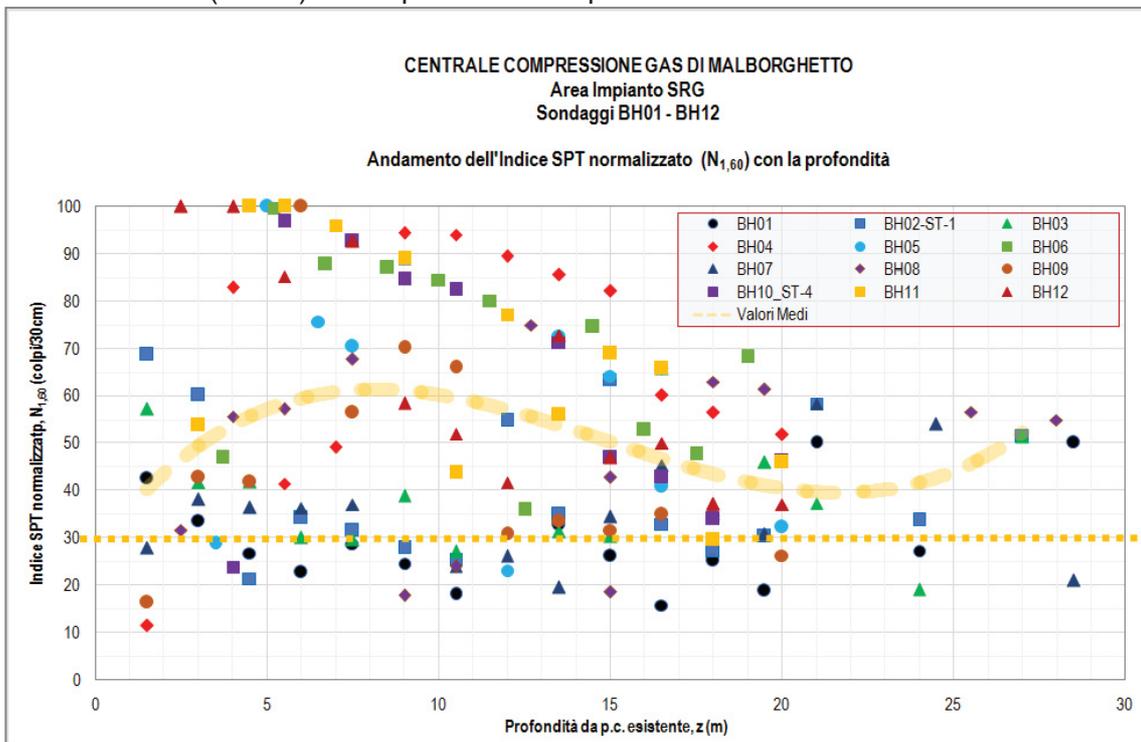


Figura 4.1.b – Area Centrale – Prove penetrometriche dinamiche standard - Andamento dell'Indice N_{SPT} normalizzato ($N_{1,60}$) con la profondità dal p.c..

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 13 di 249 | Rev. 0 |

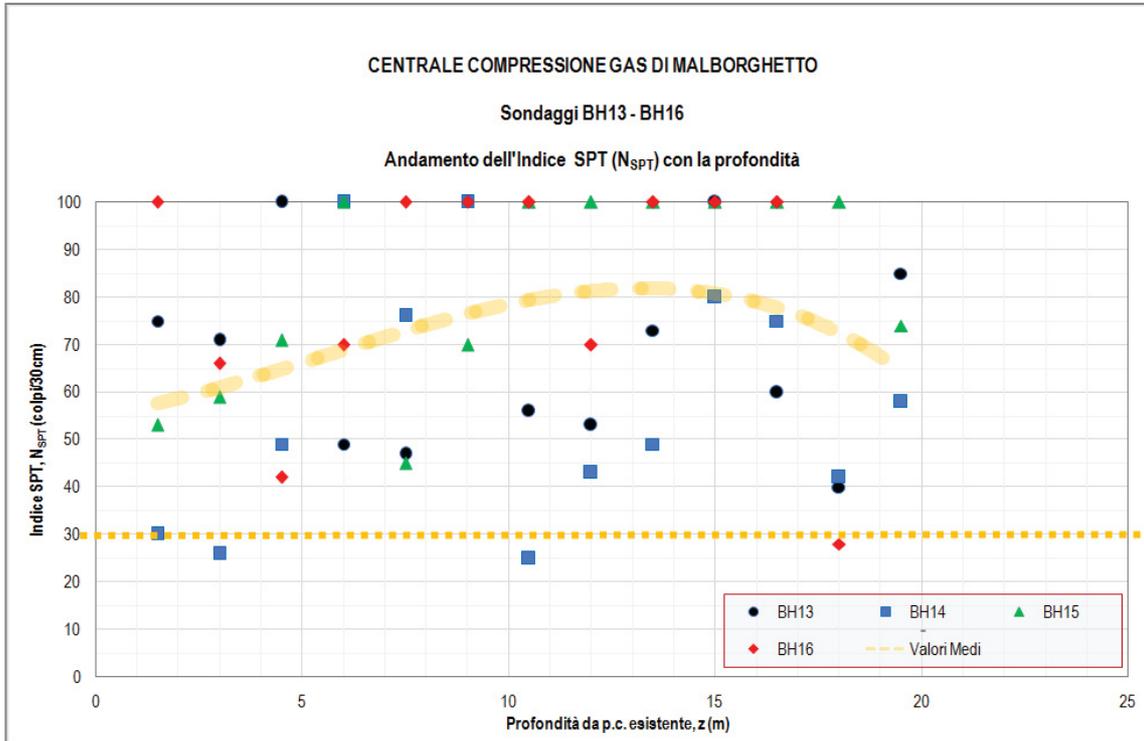


Figura 4.2.a – Nell’area delle flow line fuori Centrale – Prove penetrometriche dinamiche standard - Andamento dell’Indice SPT (N_{SPT}) con la profondità dal p.c..

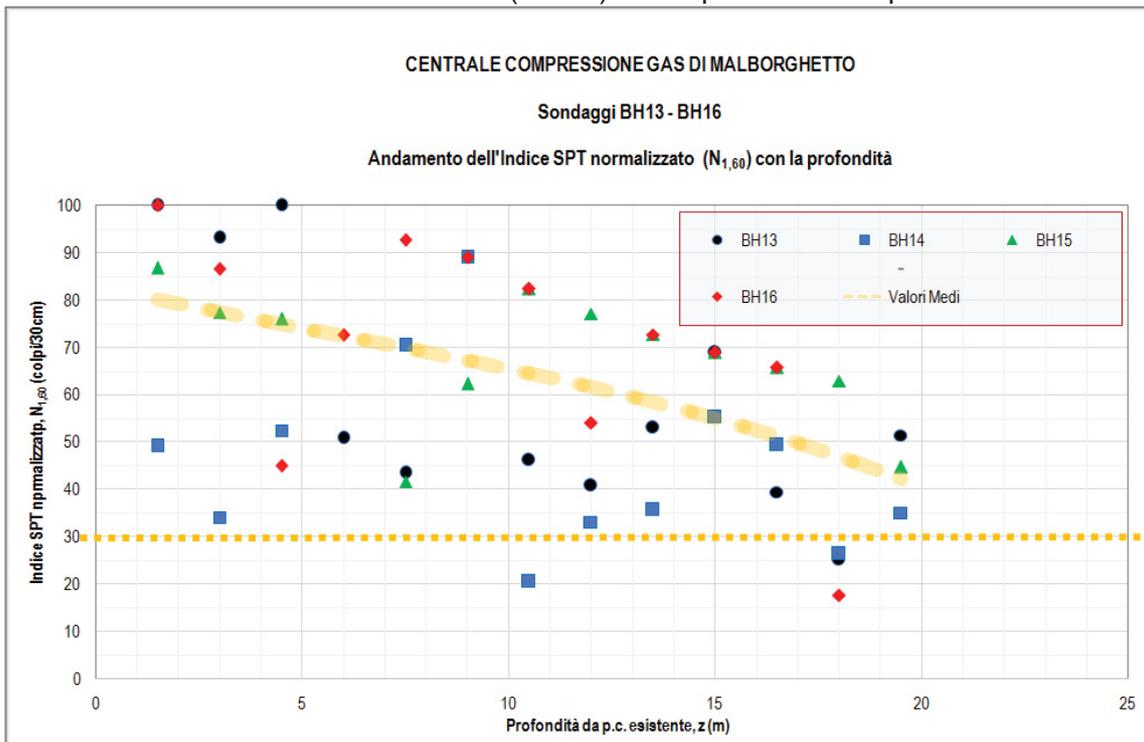


Figura 4.2.b – Nell’area delle flow line fuori Centrale – Prove penetrometriche dinamiche standard - Andamento dell’Indice NSPT normalizzato ($N_{1,60}$) con la profondità dal p.c..

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 14 di 249 | Rev. 0 |

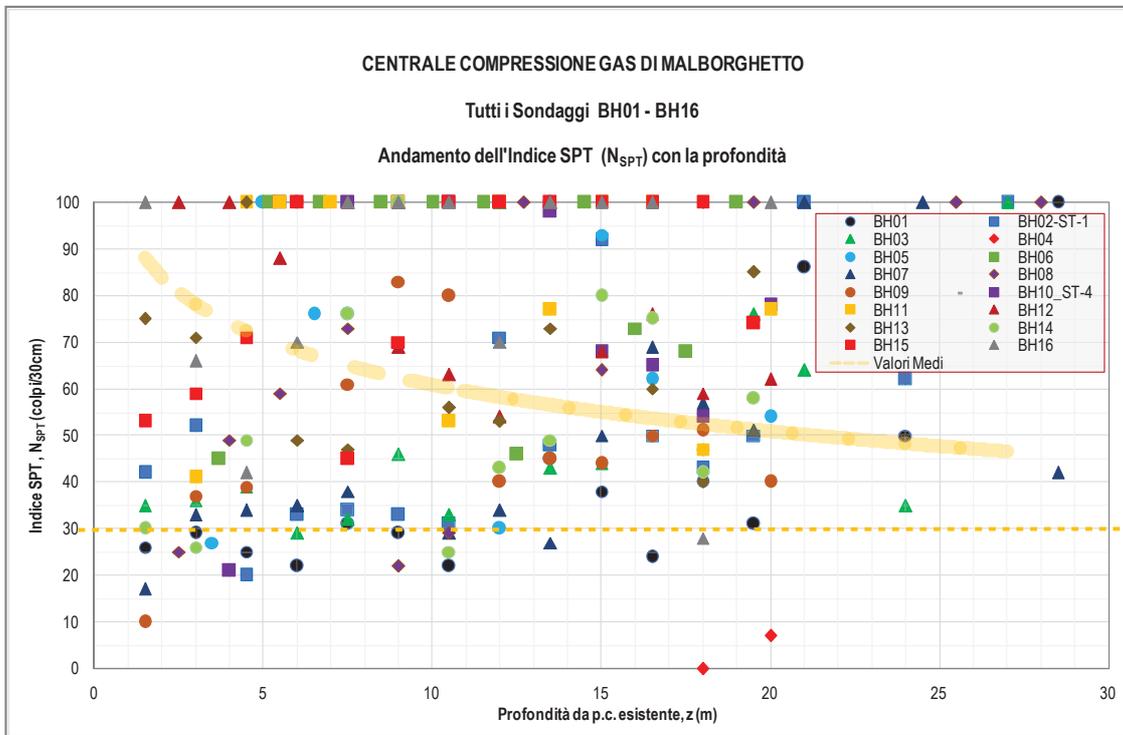


Figura 4.3.a – Area Centrale e nell’area delle flow line – Prove penetrometriche dinamiche standard - Andamento dell’Indice SPT (N_{SPT}) con la profondità dal p.c.

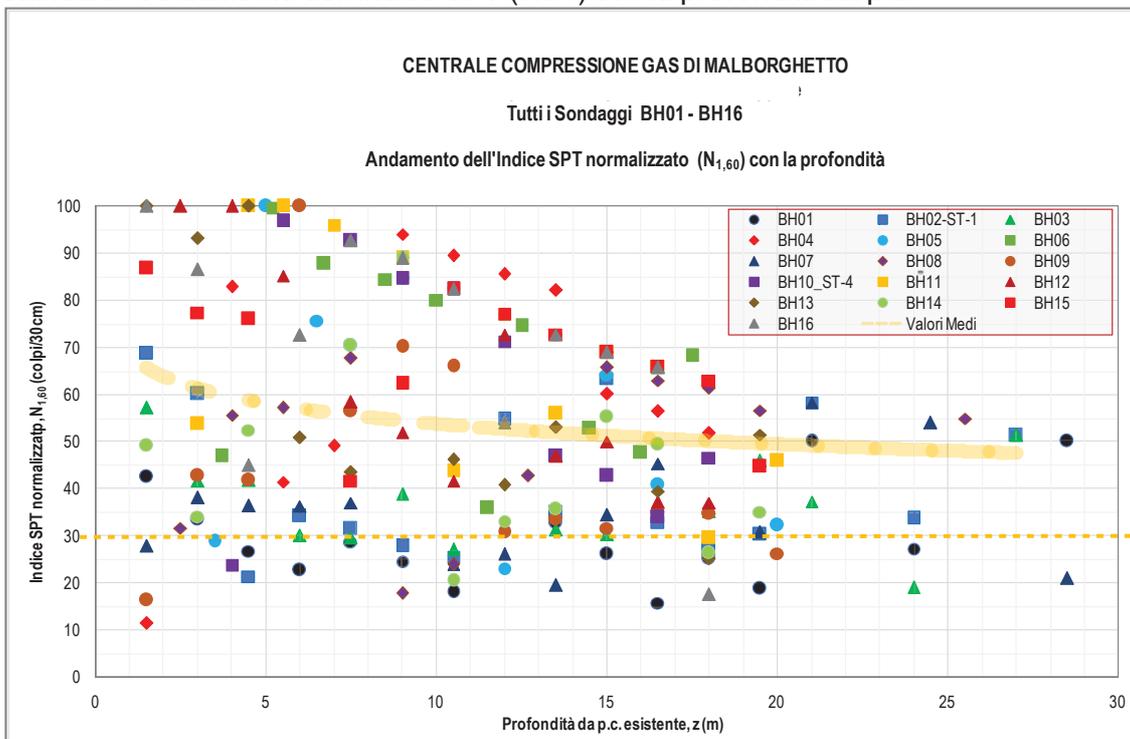


Figura 4.3.b – Area Centrale e nell’area delle flow line - Prove penetrometriche dinamiche standard - Andamento dell’Indice N_{SPT} normalizzato ($N_{1,60}$) con la profondità dal p.c.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 15 di 249 | Rev. 0 |

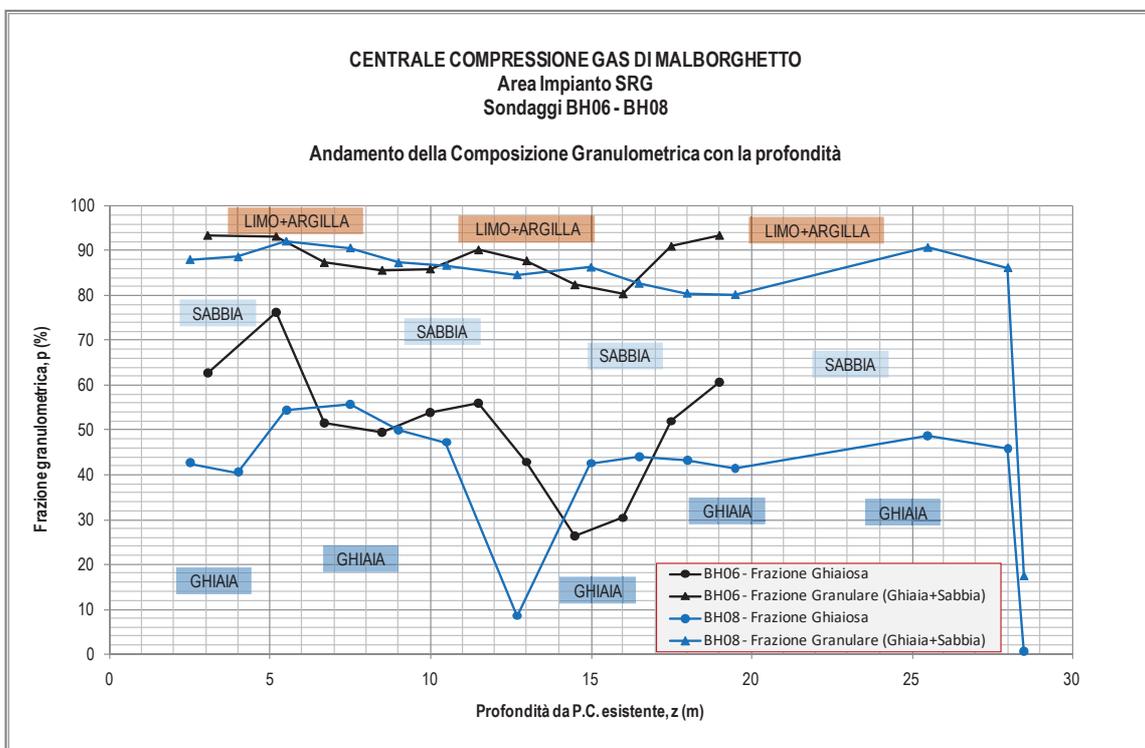


Figura 4.4.a – Area Centrale – Sondaggi BH06 e BH08 - Andamento della Composizione Granulometrica con la profondità dal p.c.

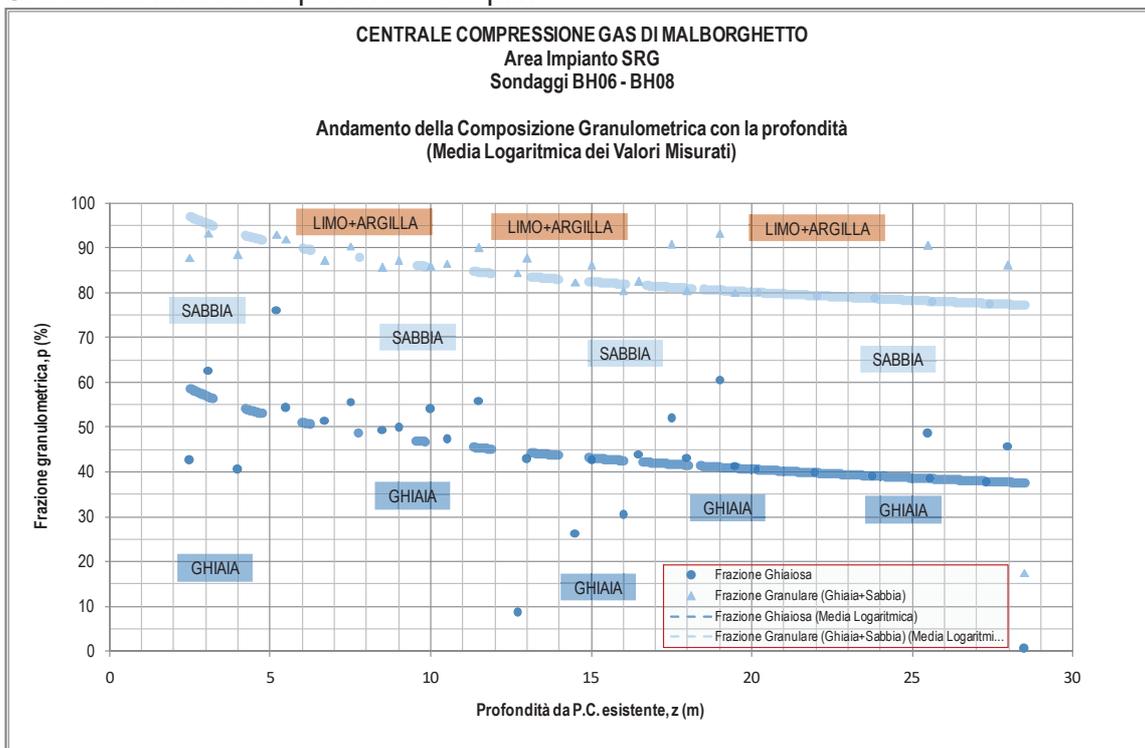


Figura 4.4.b – Area Centrale – Sondaggi BH06 e BH08 - Andamento della Composizione Granulometrica con la profondità dal p.c. (media logaritmica dei valori).

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 16 di 249 | Rev. 0 |

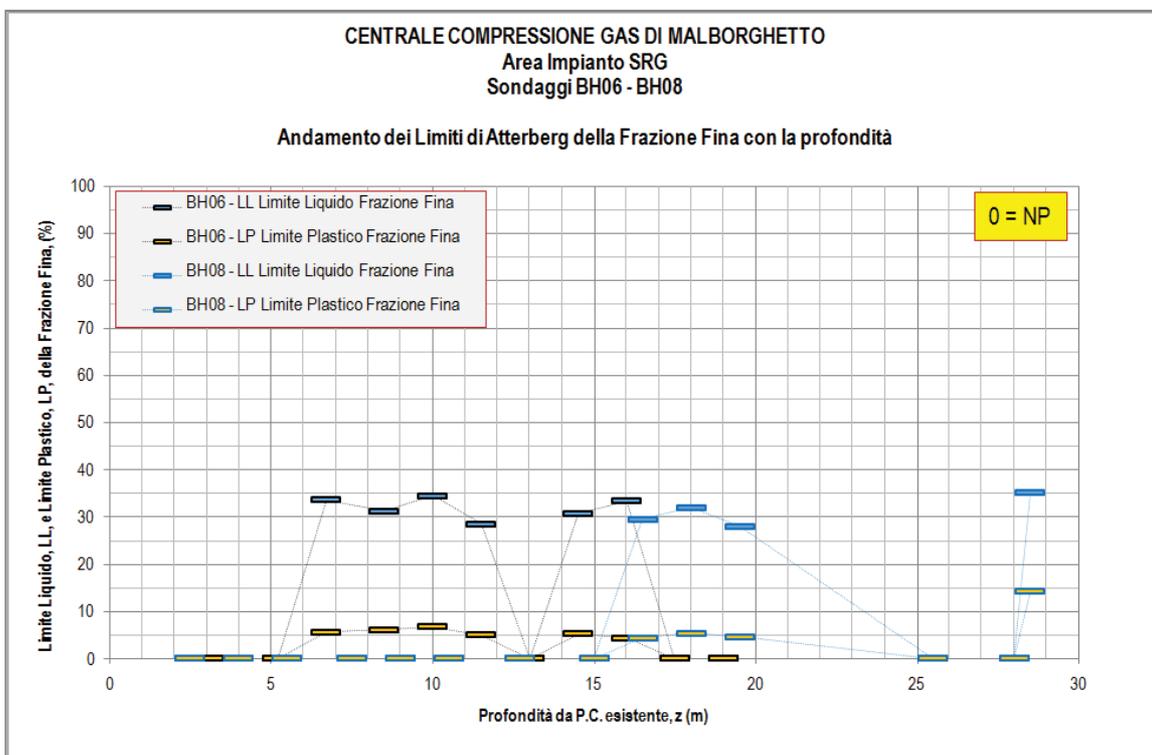


Figura 4.5 – Area Centrale – Sondaggi BH06 e BH08 - Andamento dei Limiti di Atterberg della Frazione Fina (passante a 0.420 mm) con la profondità dal p.c..

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 17 di 249 | Rev. 0 |

4.2 Superficie Piezometrica (GWT)

Nel corso dei sondaggi, il livello dell'acqua, a fine perforazione, è stato assente in quasi tutti i sondaggi; solamente nei sondaggi con quota della testa più bassa di 10-28 m rispetto agli altri (sondaggi: BH05, BH06, BH08, BH09, BH11), il livello dell'acqua si è stabilizzato a profondità comprese, 5.05 m e 18.25 m dal p.c. locale esistente: in termini di quote assolute, il livello dell'acqua si è stabilizzato a quote comprese tra 667 e 672 m *slm*. Questa quota può essere assunta come livello della falda nell'area.

Nella Figura 4.6 sono rappresentate le quote delle teste dei sondaggi insieme alle quote del livello dell'acqua nei suddetti sondaggi, ove è stato rinvenuto.

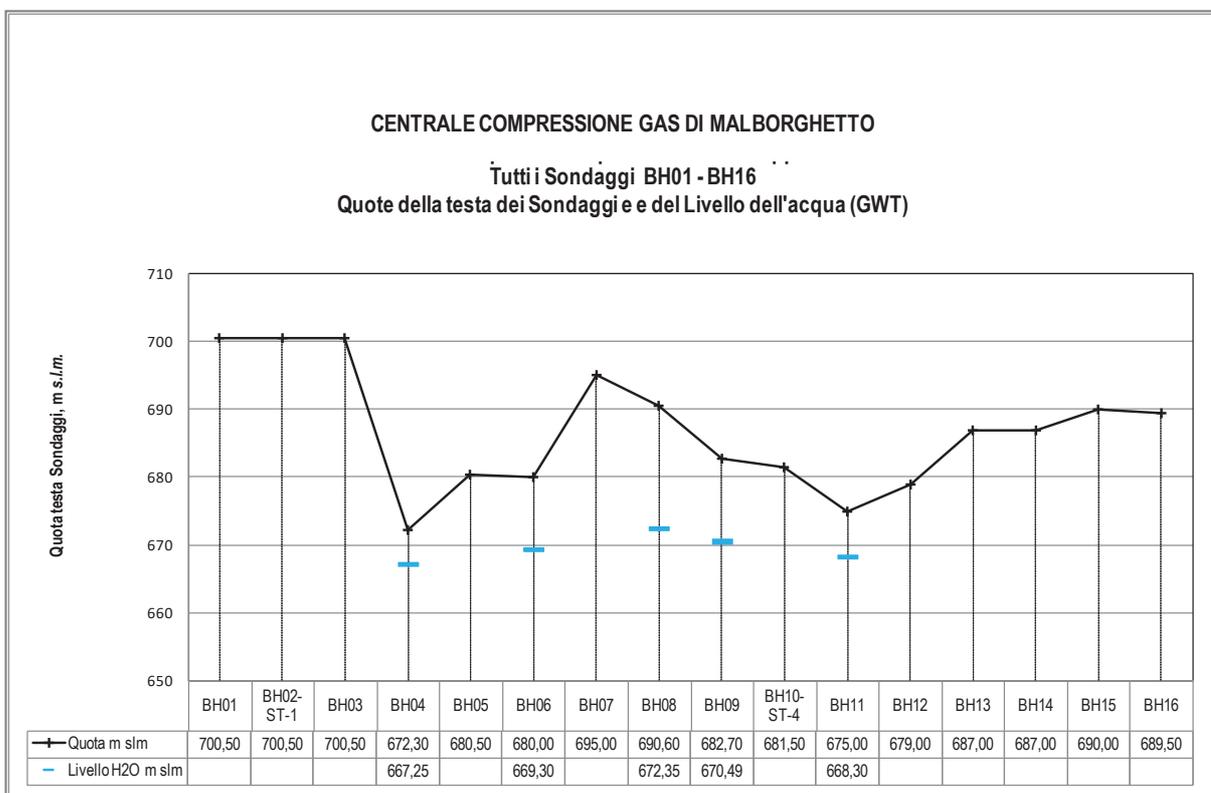


Figura 4.6 – Area Centrale e nell'area delle flow line – Tutti i sondaggi - Andamento delle quote delle teste dei sondaggi e del livello dell'acqua a fine perforazione nei sondaggi stessi.

Nel corso dell'indagine sono state eseguite, nei primi metri dei sondaggi BH05, BH09 e BH10-ST-4, prove di permeabilità tipo Lefranc (in accordo con le Raccomandazioni AGI 1977) per la determinazione dei coefficienti di permeabilità dei terreni.

Nella Tabella 4.1 sono riportati i risultati di tali prove: il valore del coefficiente di permeabilità, nei primi 3.0-4.0 metri di profondità, risulta compreso tra 1.28×10^{-6} m/s e 6.41×10^{-4} m/s, valori di permeabilità media, tipici della sabbia e ghiaia limoso-argillosa.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 18 di 249 | Rev. 0 |

Tabella 4.1 - Prova di Permeabilità a Carico Variabile Lefranc (AGI 1977) - Valori del Coefficiente di Permeabilità, K (m/s).

| Sondaggio N. | Profondità da p.c (m) | | Coefficiente di Permeabilità K (m/s) |
|--------------|-----------------------|------|--------------------------------------|
| | da | a | |
| BH05 | 3,00 | 3,50 | 1,28E-06 |
| BH09 | 1,00 | 1,50 | 6,41E-04 |
| BH10-ST-4 | 3,50 | 4,00 | 1,40E-04 |

4.3 Prove di laboratorio e prove in situ. Considerazioni ed elaborazioni

Le prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati nei sondaggi confermano che:

- il deposito è generalmente incoerente, costituito prevalentemente da Ghiaie e Sabbie con Limo e/o Ghiaie e Sabbie poco Limose, ben assortite e addensate/Molto addensate, e, con poca frazione fina prevalentemente Non Plastica (NP), e solo localmente Poco Plastica, classificabili, secondo la USCS, in prevalenza come GW-GM e GM, ed in via minoritaria come SW-SM e SM, con passante allo 0.075 mm dell'ordine del 12.0% (tra 6.5 e 19.5%).

L'andamento della composizione granulometrica del terreno di fondazione con la profondità è rappresentato nella Figura 4.4, ove appare evidente la generale prevalenza della componente granulare (Ghiaia + Sabbia) che mediamente si attesta intorno al 90%.

L'andamento dei Limiti di Atterberg della Frazione Fina (*passante a 0.420 mm*) con la profondità è rappresentato nella Figura 4.5, ove appare evidente la generale prevalenza del comportamento Non Plastico (NP) di questa componente.

L'andamento degli indici SPT con la profondità è rappresentato nelle Figure 4.1, 4.2 e 4.3, sia in termini di valori registrati alla prova in situ (N_{SPT}), sia in termini di valori normalizzati, e corretti per il 60% dell'energia, $N_{1,60}$, in accordo alla metodologia di calcolo di seguito sommariamente riportata nel riquadro esplicativo.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 19 di 249 | Rev. 0 |

Calcolo dei valori $N_{1,60}$ corretti per il 60% dell'energia, e normalizzati alla pressione atmosferica

$$N_{60} = C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E \cdot N_{SPT}$$

dove

C_R = correzione per la lunghezza delle aste;

C_S = correzione per il metodo di campionamento;

C_B = correzione per il diametro del foro del sondaggio;

C_E = correzione per l'energia di battitura.

Questo nuovo valore N_{60} poi deve essere ulteriormente corretto mediante il fattore di correzione della pressione litostatica C_N , secondo l'espressione $N_{1,60} = C_N \cdot N_{60}$, dove:

$$C_N = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_v}} \leq 1.7 \quad (\text{Liao e Withman 1986})^4$$

P_a = pressione atmosferica (=100 kPa);

σ'_v = pressione litostatica verticale efficace.

L'angolo di attrito dei terreni granulari, φ' , è valutato dall'indice SPT mediante affidabili correlazioni:

- Peck et al. (1974)⁵ hanno fornito una correlazione tra N_{SPT} e φ in una forma grafica, che è stata poi approssimata dalla relazione proposta da Wolff, 1989⁶:

$$\varphi' = 27.1 + 0.3 \cdot N_{SPT} - 0.00054 \cdot N_{SPT}^2$$

- In Giappone le "Road Bridge Specifications"⁷, adottando la specifica correlazione proposta da Shioi e Fukui, 1982⁸, suggeriscono per $N_{SPT} > 5$,

$$\varphi' = 15 + \sqrt{15 \cdot N_{SPT}} \leq 45^\circ$$

- sempre in Giappone, gli "Design Standards for Structures"⁹, adottando l'altra specifica correlazione proposta sempre da Shioi e Fukui, 1982, suggeriscono:

$$\varphi' = 0.3 \cdot N_{SPT} + 27^\circ$$

Quest'ultima equazione ("Design Standards for Structures") è particolarmente raccomandata per la sua ottima approssimazione della correlazione tra l'angolo φ' e l'indice SPT (N_{SPT}).

⁴ Liao S.C. e Withmann R.V. (1986). Overburden Correction Factors for SPT in Sand. Journal of GED, ASCE. 112(3): 373-377

⁵ Peck, R. B., Hanson, W. E., and Thornburn, T. H. 1974 – "Foundation Engineering", Wiley, New York

⁶ Wolff, T.F., "Pile Capacity Prediction Using Parameter Functions," ASCE Geotechnical Special Publications No. 23, 1989, pp. 96-106

⁷ Japan Road Association "Standard Specifications for Highway Bridges", Part. IV Substructures, JRA, Tokyo, 1990.

⁸ Shioi, Y. and Fukui, J. "Application of N-value to Design of Foundations in Japan," 2nd ESOPT, Vol. 1, 1982 - pp 159 – 164.

⁹ Japan Society of Civil Engineers "Design Standards for Structures" of Japan National Railway, JSCE, 1983.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 20 di 249 | Rev. 0 |

Le correlazioni proposte da Shioi e Fukui, 1982 forniscono valori molto simili: i valori dell'angolo di resistenza al taglio, ϕ' , ottenuti con entrambe le equazioni sono rappresentati nella Figura 4.7.a e nella Figura 4.7.b, rispettivamente, in funzione della profondità dal p.c.. Per completezza, nella Figura 4.7.c si presenta anche la correlazione ("Design Standards for Structures") con l'indice SPT corretto e normalizzato $N_{1,60}$. Il confronto con le correlazioni precedenti delle Figure 4.7.a e 4.7.b evidenzia valori dell'angolo di resistenza al taglio, ϕ' sostanzialmente simili, con una leggera e prevedibile correzione verso l'alto per i primi metri di profondità.

Il Modulo di Deformazione Confinato, M_0 , dei terreni granulari è valutato dall'indice SPT mediante la correlazione proposta da Denver (1982)¹⁰:

$$M_0 = 7 \cdot \sqrt{N_{SPT}}$$

ed i valori ottenuti sono rappresentati nella Figura 4.8.a con riferimento all'indice N_{SPT} ottenuto dalle prove in situ, e nella Figura 4.8.b con riferimento all'indice SPT corretto e normalizzato $N_{1,60}$, rispettivamente, in funzione della profondità dal p.c..

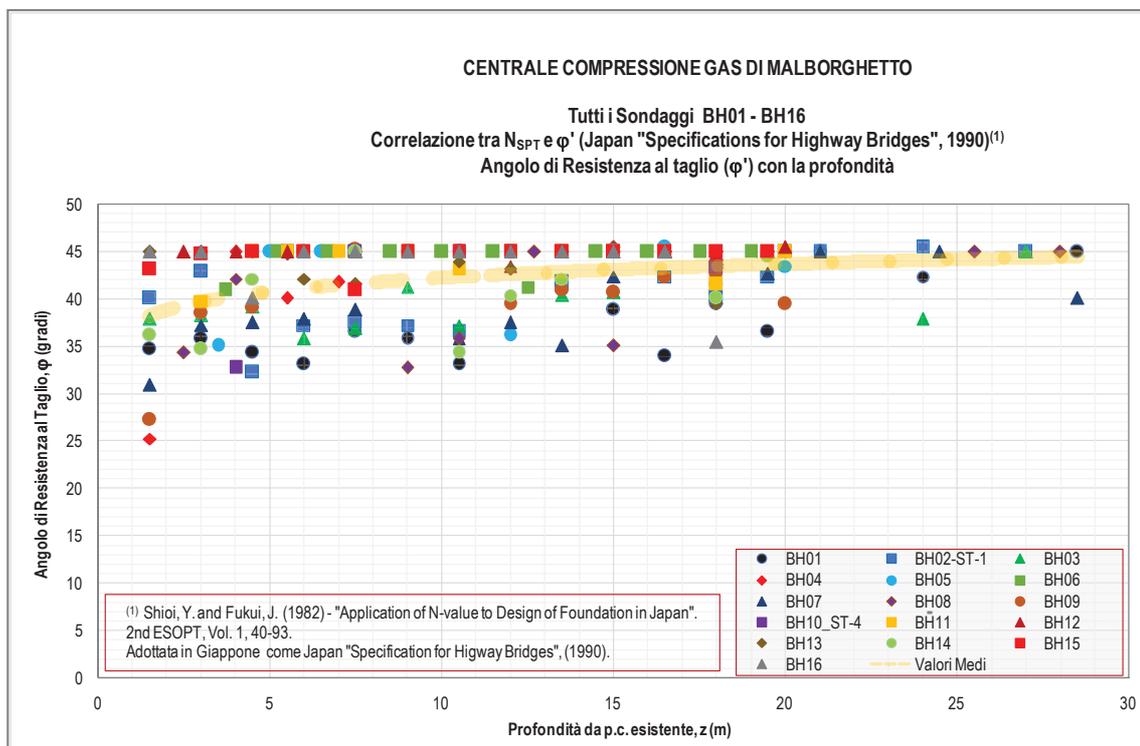


Figura 4.7.a – Area Centrale e nell'area delle flow line – Tutti i sondaggi BH01-BH16 – Correlazione Japan "Specifications for Highway Bridges" - Andamento ϕ' con la profondità dal p.c..

¹⁰ Denver, H. (1982). Modulus of elasticity for sand determined by SPT and CPT. Proc. of the 2nd European Symp. on Penetration Testing, ESOPT II, Vol. I, Amsterdam

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 21 di 249 | Rev. 0 |

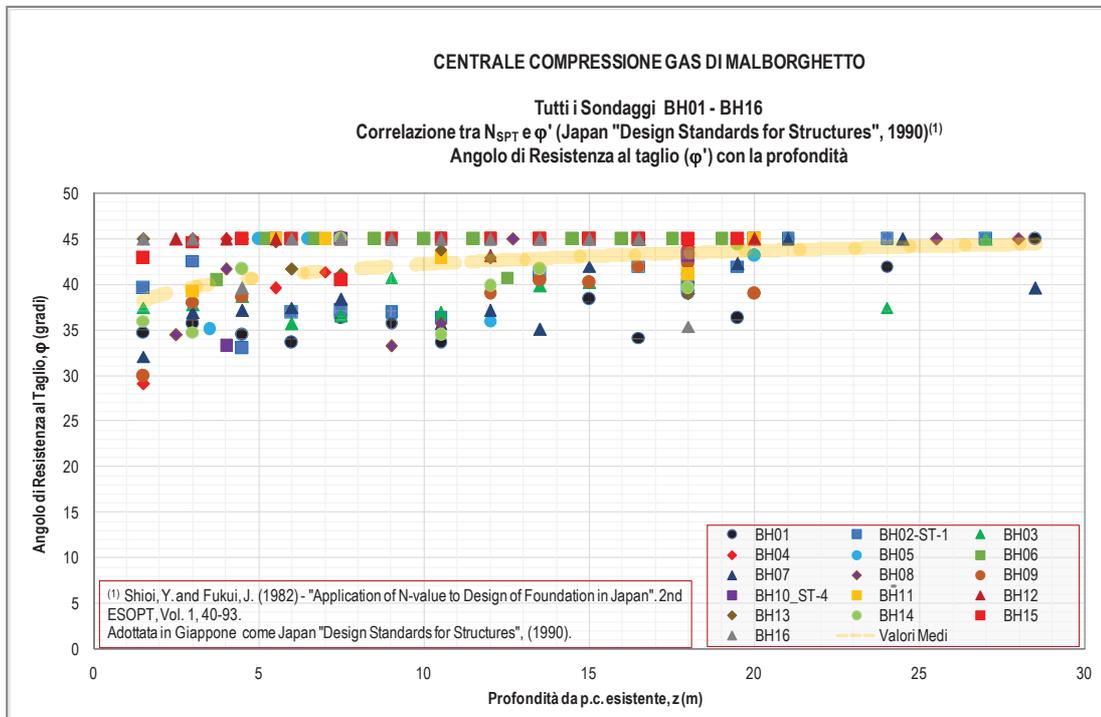


Figura 4.7.a – Area Centrale e nell’area delle flow line – Tutti i sondaggi BH01-BH16 – Correlazione Japan “Design Standards for Structures” - Andamento ϕ' con la profondità dal p.c.

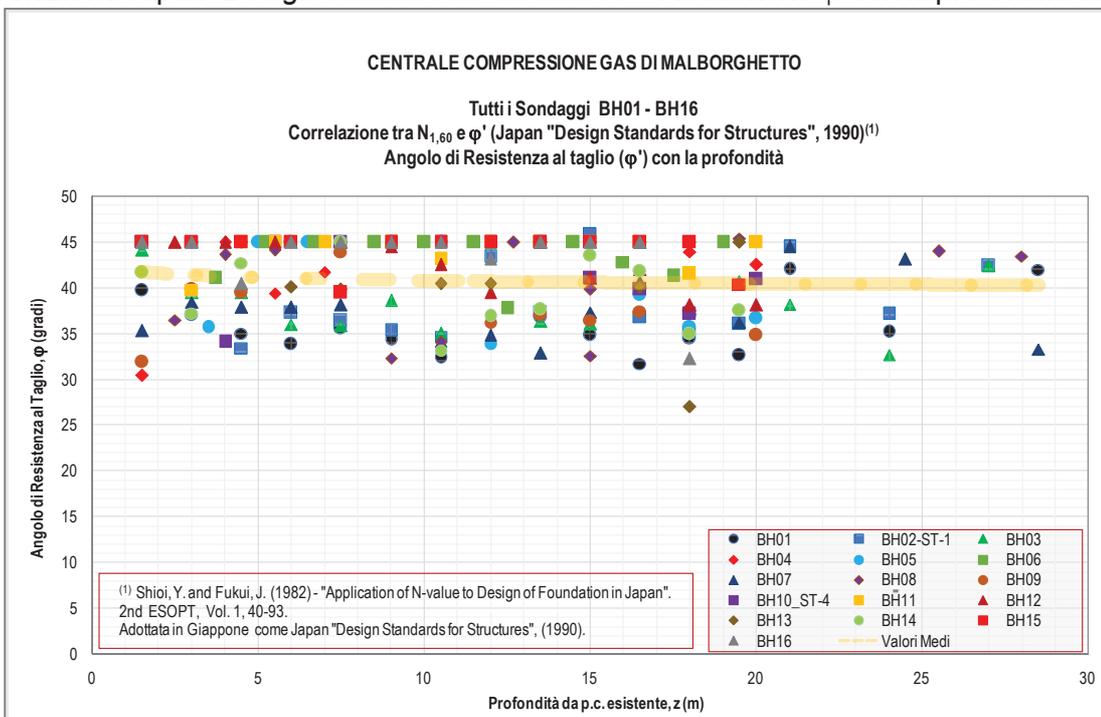


Figura 4.7.c – Area Centrale e nell’area delle flow line – Tutti i sondaggi BH01-BH16 – Correlazione Japan “Design Standards for Structures” con $N_{1,60}$ - Andamento ϕ' con la profondità dal p.c..

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 22 di 249 | Rev. 0 |

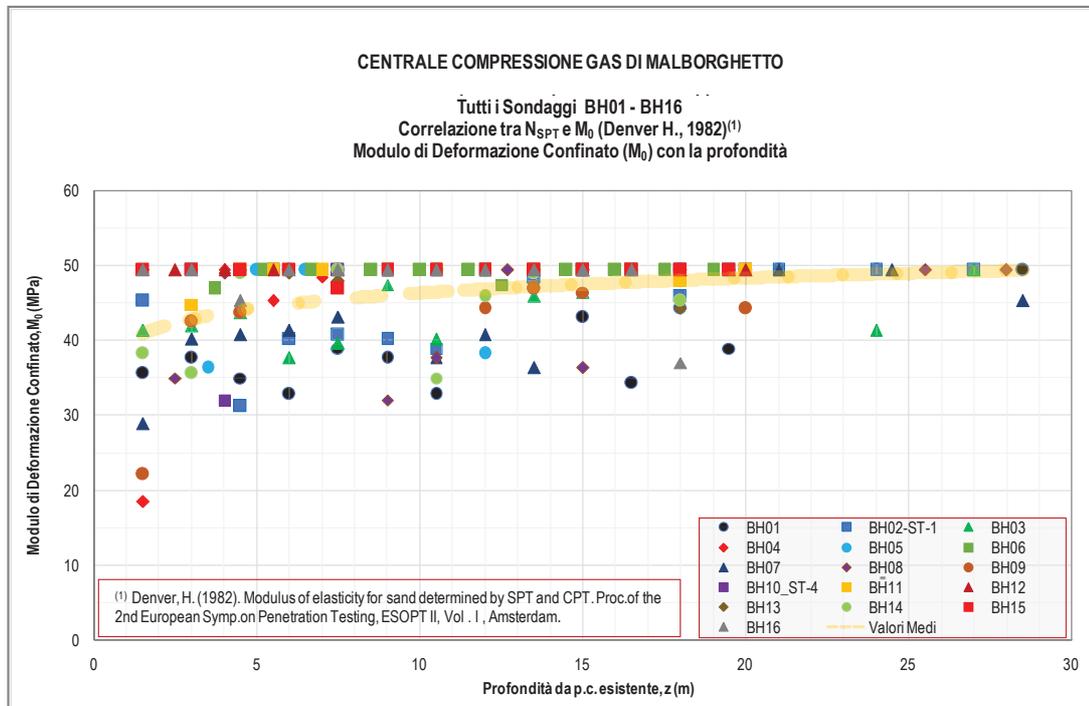


Figura 4.8.a – Area Centrale e nell’area delle flow line – Tutti i sondaggi BH01-BH16 – Correlazione tra l’indice N_{SPT} in situ ed il Modulo di Deformazione Confinato M_0 , con la profondità dal p.c..

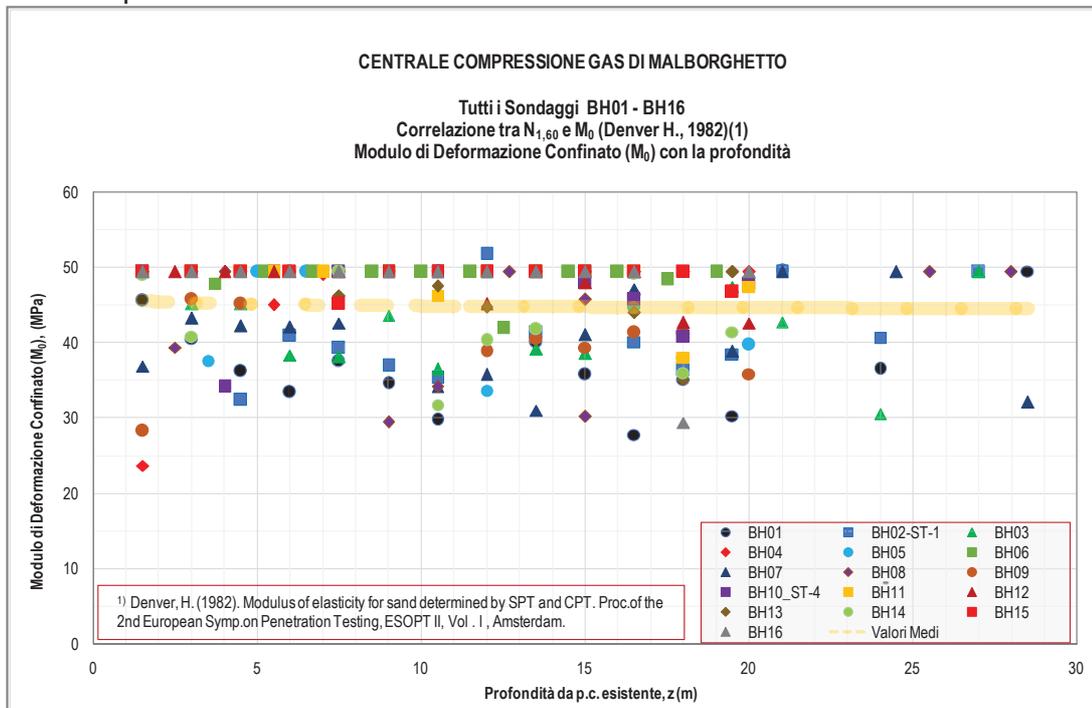


Figura 4.8.b – Area Centrale e nell’area delle flow line – Tutti i sondaggi BH01-BH16 – Correlazione tra l’indice normalizzato $N_{1,60}$ ed il Modulo di Deformazione Confinato M_0 , con la profondità dal p.c..

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 23 di 249 | Rev. 0 |

5 CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E GEOTECNICA

5.1 Caratterizzazione stratigrafica

Le indagini hanno confermato quanto disponibile in letteratura per questo sito, con la presenza di depositi granulari (detritici e alluvionali) grossolani prevalentemente ghiaioso-sabbiosi e/o sabbioso-ghiaiosi, con frazione fina poco plastica o, prevalentemente, Non Plastica (NP). Sostanzialmente, con l'indagine geognostica e geotecnica, si è riscontrata l'omogeneità laterale di tali depositi e la continuità degli stessi su tutta l'area indagata, nonostante le differenze di quota dei sondaggi (fino a 20-28 m), essendo l'area della Centrale gradonata su differenti livelli del terreno.

Nel dettaglio la successione litostratigrafica che caratterizza le aree oggetto dell'intervento può essere schematizzata in un unico strato, almeno fino alla profondità investigata con i sondaggi (fino a 20-30 m dal p.c. esistente):

- **DEPOSITO GRANULARE GROSSOLANO DETRITICO-ALLUVIONALE:** il deposito è generalmente incoerente, costituito prevalentemente da Ghiaie e Sabbie con Limo e/o Ghiaie e Sabbie poco Limose, ben assortite e addensate/molto addensate, e, con poca frazione fina prevalentemente Non Plastica (NP), e solo localmente Poco Plastica, classificabili, secondo la USCS, in prevalenza come GW-GM e GM, ed in via minoritaria come SW-SM e SM, con passante allo 0.075 mm dell'ordine del 12.0% (tra 6.5 e 19.5%). Le prove penetrometriche dinamiche standard in foro (SPT) hanno spesso, se non in prevalenza, denunciato "Rifiuto" all'avanzamento, superando i 50 colpi in uno dei 3 tratti di 15 cm di avanzamento di cui si compone la prova.

5.2 Falda (GWT)

Nel corso dei sondaggi, il livello dell'acqua, a fine perforazione, è stato assente in quasi tutti i sondaggi; solamente nei sondaggi con quota della testa più bassa rispetto agli altri, BH04, BH06, BH08, BH09, BH11, il livello dell'acqua si è stabilizzato a profondità comprese, 5.05 m e 18.25 m dal p.c. locale esistente: in termini di quote assolute, il livello dell'acqua si è stabilizzato a quote comprese tra 667 e 672 m *s/m*. La quota media, pari a 670 m *s/m* può essere assunta come livello della falda nell'area della Centrale.

Nella Figura 4.6 sono rappresentate le quote delle teste dei sondaggi insieme alle quote del livello dell'acqua nei suddetti sondaggi, ove tale livello è stato rinvenuto.

Nell'Allegato 1 sono riportati in dettaglio i risultati della indagine geognostica e geotecnica (stratigrafie sondaggi, risultati Prove SPT, risultati prove di permeabilità Lefranc e geofisiche sismiche MASW).

Nell'Allegato 2 sono riportati in dettaglio i risultati delle prove di laboratorio sui campioni rimaneggiati prelevati nel corso dell'indagine (analisi granulometriche per setacciatura e limiti di Atterberg sul passante al setaccio ASTM N, 40 (0.420 mm di apertura delle maglie)).

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 24 di 249 | Rev. 0 |

5.3 Modello geotecnico (schema stratigrafico di calcolo)

I risultati della interpretazione hanno consentito di arrivare al seguente schema stratigrafico, rappresentato come Modello Geotecnico (Schema stratigrafico di calcolo e valori caratteristici dei parametri geotecnici) nella Figura 5.1.

Pur considerando il sito della Centrale caratterizzato da un unico strato, come precedentemente affermato, nella definizione dello schema stratigrafico di calcolo, si è voluto suddividere tale strato unico in due sottostrati (Strato 1 e Strato 2), evidenziando un sottostrato superficiale (Strato 1), tra il p.c. e 12 m di profondità, caratterizzato, anche se solo in alcuni sondaggi, dalla sporadica presenza della frazione fine con bassa plasticità, insieme alla preponderanza della frazione fine NP. Per i parametri attribuiti allo Strato 1 sono stati adottati criteri decisamente cautelativi, allineati più sui valori minimi che su quelli medi.

STRATO 1: (dal p.c. sino a 12.0 m di profondità)

Ghiaia e Sabbia, con scarsa frazione fina limoso-argillosa non plastica o poco plastica, generalmente molto addensata.

Tali litotipi, secondo la classifica USCS, sono classificabili soprattutto come GW-GM e/o GM, ed in via subordinata come SW-SM e/o SM

| | | | | |
|--|------------|---|-----------|-------------------|
| – Peso di volume, | γ | = | 1.9 - 2.0 | kN/m ³ |
| – Indice SPT, | N_{SPT} | ≥ | 30 - 40 | colpi/30cm |
| – Indice SPT corretto e normalizzato, | $N_{1,60}$ | ≥ | 35 - 45 | colpi/30cm |
| – Densità Relativa, | D_R | ≥ | 60 - 70 | % |
| – Angolo di Resistenza al taglio, efficace | ϕ' | ≥ | 35 - 38 | gradi |
| – Modulo di Deformazione confinato, | M_0 | ≥ | 35 - 40 | MN/m ² |

STRATO 2: (da 12.0 m sino alle massime profondità investigate (30 m da p.c..))

Sabbia e Ghiaia, con scarsa frazione fina limoso-argillosa non plastica o poco plastica, generalmente molto addensata.

Tali litotipi, secondo la classifica USCS, sono classificabili soprattutto come SW-SM e/o SM, ed in via subordinata come GW-GM e/o GM; in profondità (al di sotto dei 16.5-17.0 m) ritorna spesso la prevalenza della Ghiaia sulla Sabbia.

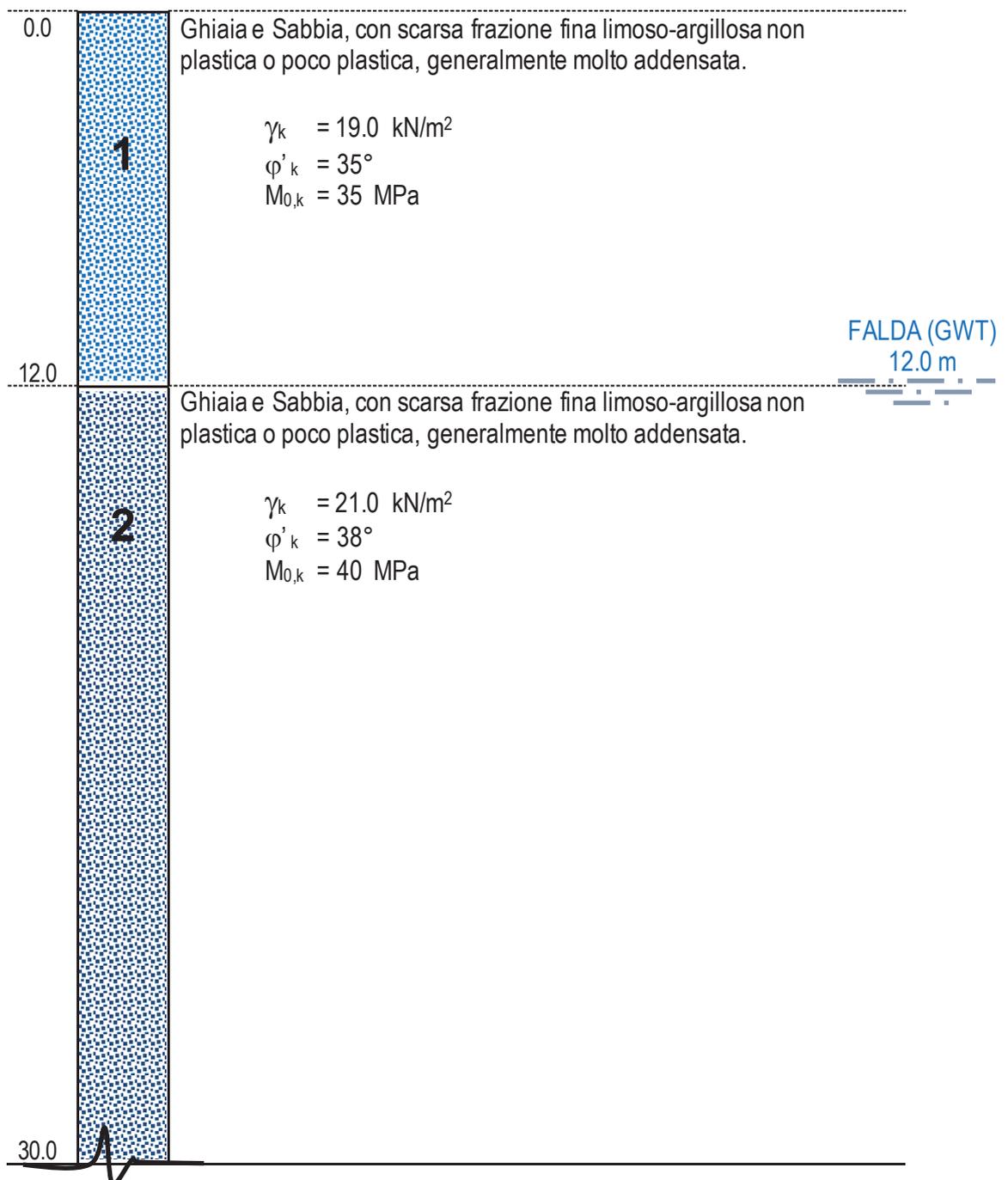
| | | | | |
|--|------------|---|---------|-------------------|
| – Peso di volume, | γ | = | 2.1 | kN/m ³ |
| – Indice SPT, | N_{SPT} | ≥ | 40 - 50 | colpi/30cm |
| – Indice SPT corretto e normalizzato, | $N_{1,60}$ | ≥ | 40 - 50 | colpi/30cm |
| – Densità Relativa, | D_R | ≥ | 70 - 80 | % |
| – Angolo di Resistenza al taglio, efficace | ϕ' | ≥ | 38 - 40 | gradi |
| – Modulo di Deformazione confinato, | M_0 | ≥ | 40 - 45 | MN/m ² |

5.3.1 Falda acquifera (GWT)

Nel corso dei sondaggi, il livello dell'acqua, a fine perforazione, è stato assente in quasi tutti i sondaggi; solamente nei sondaggi con quota della testa più bassa il livello dell'acqua si è stabilizzato a profondità comprese, 5.05 m e 18.25 m dal p.c. locale esistente. Per le valutazioni di calcolo, con criterio cautelativo, si assume il valore medio di 12.0 m di profondità rispetto al p.c..

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 25 di 249 | Rev. 0 |

Figura 5.2 – Modello geotecnico (Schema stratigrafico di calcolo e valori caratteristici dei parametri geotecnici).



| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 26 di 249 | Rev. 0 |

6 SISMICITÀ

La classificazione sismica del territorio del Comune di Malborghetto Valbruna (UD), indicata nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003, aggiornata con la Deliberazione della Giunta Regionale del Friuli Venezia Giulia n. 845 del 6 maggio 2010 (BUR n. 20 del 19 maggio 2010), è **Zona sismica: 2**.

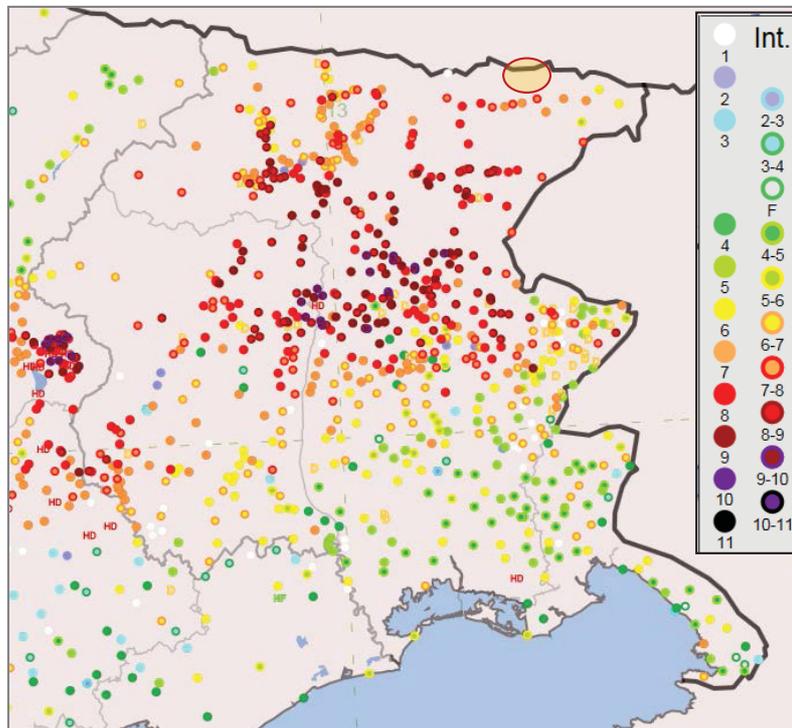
I criteri per l'aggiornamento della mappa di pericolosità sismica sono stati definiti nell'Ordinanza del O.P.C.M. n. 3519/2006, che ha suddiviso l'intero territorio nazionale in quattro zone sismiche sulla base del valore dell'accelerazione orizzontale massima (a_g) su suolo rigido o pianeggiante, che ha una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni.

Per la **Zona Sismica 2** si ha:

| Zona sismica | Descrizione | accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni [a_g] | accelerazione orizzontale massima convenzionale (Norme Tecniche) [a_g] |
|--------------|---|---|--|
| 2 | Zona con pericolosità sismica media dove possono verificarsi forti terremoti. | $0,05 < a_g \leq 0,15$ g | $a_{g,max} = 0,15$ g |

Dalla Carta della massima intensità macrosismica DBMI15, versione 2.0, dell'INGV, Novembre 2019 (<https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.2>), che fornisce i dati di intensità macrosismica relativo ai terremoti italiani aggiornato alla finestra temporale 1000-2017, si evidenzia come il territorio di studio sia stato coinvolto da eventi sismici a elevata intensità, con gradi di intensità anche pari a lo 9-10 della scala M.C.S, corrispondenti ad una Magnitudo momento $M_w = 6.45$, come mostrato nella Figura 6.1.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 27 di 249 | Rev. 0 |



 Ubicazione dell'Area della Centrale SRG di Malborghetto.

Figura 6.1.a –
 Stralcio della Carta Database Macrosismico Italiano DBMI15, versione 2.0, dell'INGV, Novembre 2019. Massime intensità macrosismiche osservate nella Regione Friuli Venezia Giulia e nella Provincia di Udine.

Per caratterizzare la sismicità dell'area si è fatto inoltre riferimento, oltre che alla normativa vigente, ai dati disponibili in letteratura ed in particolare ai lavori svolti dal GNDT del CNR (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti).

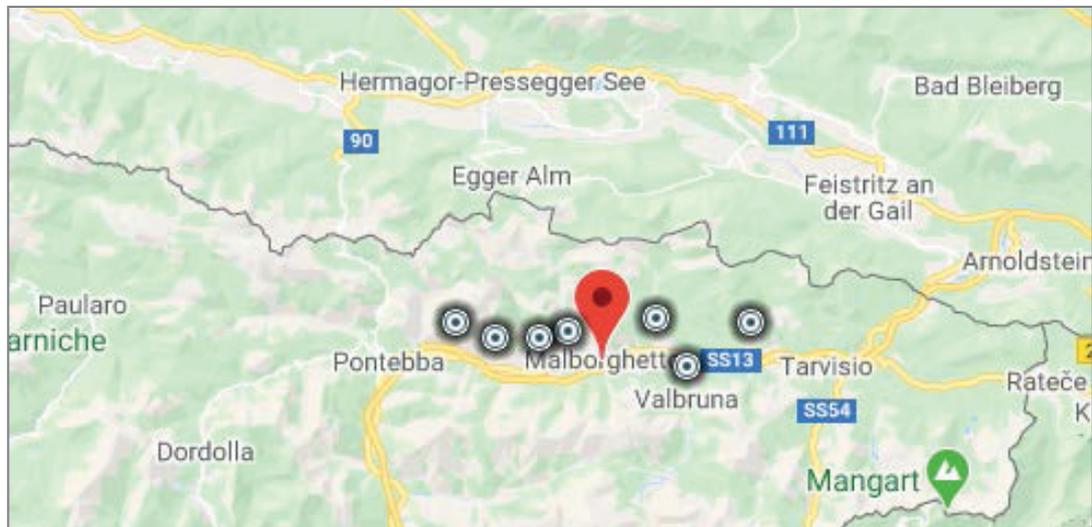
Si è presa in considerazione la zonazione sismogenetica del territorio italiano riportata nel rapporto conclusivo – Zonazione sismogenetica ZS9 del gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). L'area Veneto Orientale Friulana è interessata dalle aree sismogenetiche identificate dai valori **904**, **905** e **906**; in particolare, il Comune di Malborghetto-Valbruna ricade parzialmente nella zona sismogenetica identificata con il valore **905** (Figura 6.2), sede della genesi, come è già stato definito precedentemente, della maggior parte della sismicità osservata nell'area Veneto Orientale-Friulana.

Ma, specificatamente, l'area della Centrale risulta esterna alla **905** e **non ricade in nessuna Zona Sismogenetica**.

La sovrapposizione di tali terremoti¹¹ con le Zone Sismogenetiche suddette, evidenzia che la sismicità dell'area è prevalentemente generata nella zona sismogenetica identificata con il valore **905**, sede della forte attività sismica avvenuta nel 1976.

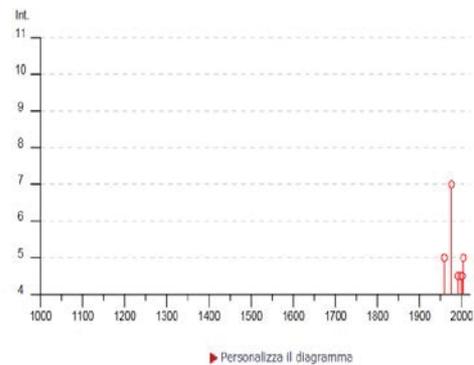
¹¹ A. Rovida, R. Camassi, P. Gasperini e M. Stucchi (a cura di), 2011. CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>, DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI11.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 28 di 249 | Rev. 0 |



Malborghetto Valbruna

Place ID IT_31110
 Coordinate (lat, lon) 46.506, 13.440
 Comune (ISTAT 2015) Malborghetto Valbruna
 Provincia Udine
 Regione Friuli-Venezia Giulia
 Numero di eventi riportati 13



| Effetti | In occasione del terremoto del | | | | | | | | | |
|---------|--------------------------------|----|----|----|----|----|---------------------------|------|------|------|
| Int. | Anno | Me | Gi | Ho | Mi | Se | Area epicentrale | NMDP | Io | Mw |
| F | 1896 | 12 | 01 | 02 | 25 | | Alpi Giulie | 8 | 5 | 4.16 |
| 3 | 1924 | 05 | 12 | 08 | 46 | | Carnia | 20 | 6 | 5.04 |
| NF | 1939 | 04 | 25 | 18 | 25 | | Prealpi Giulie | 13 | 6 | 4.57 |
| 5 | 1959 | 04 | 26 | 14 | 45 | | Carnia | 122 | 7-8 | 5.21 |
| F | 1975 | 03 | 24 | 02 | 33 | 3 | Carnia | 24 | 5-6 | 4.51 |
| 7 | 1976 | 05 | 06 | 20 | 00 | 1 | Friuli | 770 | 9-10 | 6.45 |
| F | 1979 | 04 | 18 | 15 | 19 | 1 | Friuli | 72 | 6-7 | 4.66 |
| NF | 1990 | 11 | 11 | 22 | 16 | 2 | Slovenia occidentale | 101 | 5-6 | 4.59 |
| NF | 1991 | 06 | 11 | 08 | 05 | 5 | Prealpi Friulane | 115 | 4-5 | 4.14 |
| 4-5 | 1991 | 10 | 05 | 05 | 14 | 5 | Prealpi Giulie | 106 | 5-6 | 4.51 |
| 4-5 | 1998 | 08 | 31 | 02 | 32 | 0 | Slovenia centrale | 77 | | 4.31 |
| 4-5 | 2002 | 02 | 14 | 03 | 18 | 0 | Carnia | 338 | 5-6 | 4.67 |
| 5 | 2004 | 07 | 12 | 13 | 04 | 0 | Slovenia nord-occidentale | 353 | | 5.12 |

Località vicine (entro 10km)

| Località | Eqs | Distanza (km) |
|-------------------------|-----|---------------|
| Cucco | 1 | 2 |
| Ugovizza | 2 | 3 |
| Santa Caterina | 2 | 3 |
| Valbruna | 1 | 4 |
| Bagni di Lusnizza | 2 | 5 |
| Laglesie San Leopoldo | 1 | 7 |
| Campososso in Valcanale | 4 | 7 |

Figura 6.1.b - Stralcio della Carta Database Macrosismico Italiano DBMI15, versione 2.0, dell'INGV, Novembre 2019¹², e del relativo elenco dei terremoti risentiti nel Comune di Malborghetto Valbruna.

¹² Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., Antonucci A. (2019). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.2>.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 29 di 249 | Rev. 0 |

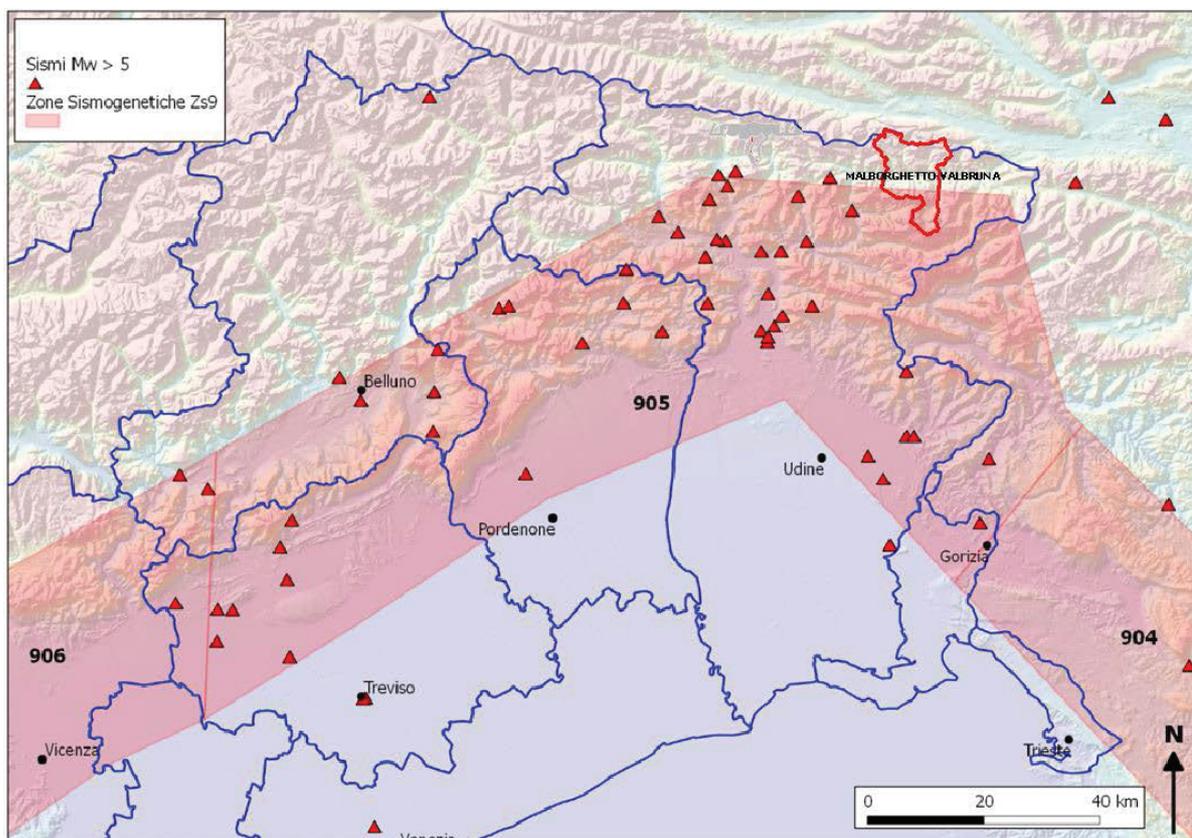


Figura 6.2 – Aree sismogenetiche ricadenti nell'area Veneto Orientale-Friulana e sismicità storica.¹³

¹³ Dr. geol. Roberto Ponta - COMUNE DI MALBORGHETTO VALBRUNA – “Variante n.48 al P.R.G.C. - Relazione geologica” - Grado, febbraio 2015.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 30 di 249 | Rev. 0 |

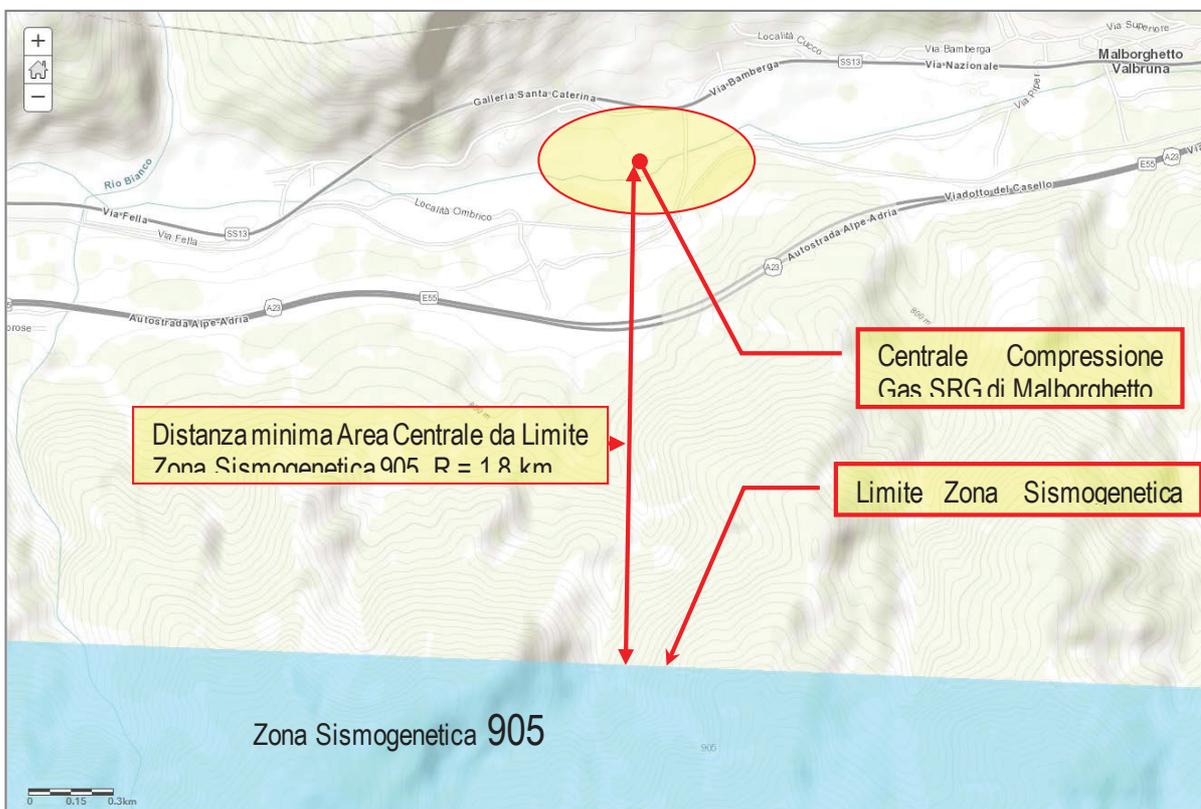


Figura 6.3 – Ubicazione dell’area di intervento della Centrale di Malborghetto rispetto alla Zona Sismogenetica 905 più vicina¹⁴.

L’area della Centrale SRG di Malborghetto, come detto, risulta esterna alla Zona Sismogenetica 905, infatti è ubicata ad una distanza minima di $R = 1.8$ km dal limite della suddetta zona.

Con riferimento alla Tabella 2.8-1 – Valori di M_{wmax} per le zone sismogenetiche di ZS9¹⁵, alla zona sismogenetica 905 è attribuita una magnitudo massima attesa pari a $M_{wmax} = 6.60$.

Tale magnitudo dovrà essere adottata nelle verifiche sismiche, in particolare nella verifica alla liquefazione. Infatti seguendo quanto indicato in “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione sismica”¹⁵ per le aree esterne alle zone sismogenetiche occorre fare la seguente verifica:

$$M_s < M_{wmax} \quad (1)$$

¹⁴ ArcGIS - Carta Sismogenetica d’Italia- Zone ZS9, reperibile al link:

(<http://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=8c5d55e0d3b34ea78346e802fd4f6d73#!>)

¹⁵ Presidenza del Consiglio dei Ministri – Gruppo di lavoro MS, 2008. Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e Dvd. .

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 31 di 249 | Rev. 0 |

dove:

M_{wmax} = magnitudo attribuita alla zona sismogenetica più prossima ($M_{wmax} = 6.60$);

$$M_s = 1 + 3 \log(R)$$

dove, R = distanza dalla zona sismogenetica più prossima.

Nel nostro caso, considerando la distanza R = 1.8 km da **905**, si ricava $M_s = 1.8$.

La relazione di verifica non è dunque soddisfatta e quindi occorre considerare la magnitudo attribuita a tale Zona Sismogenetica, che nel nostro caso è $M_{wmax} = 6.60$.

Relativamente al D.M. 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle “*Norme Tecniche per le Costruzioni*”, NTC2018, per la individuazione della categoria di sottosuolo necessaria per la definizione dell’azione sismica di progetto, in assenza di analisi specifiche per valutare l’effetto della risposta sismica locale, si è fatto riferimento alle categorie di sottosuolo di riferimento previste dalla normativa stessa attraverso i risultati dei profili sismici MASW per la determinazione del valore della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), necessaria per la classificazione della risposta sismica locale.

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), è definita dalla seguente espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad [m/s]$$

dove si indica con:

- h_i = spessore (in metri) 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.;

Con i valori misurati in sito, dall’elaborazione dei profili MASW, risulta la seguente velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio:

(il report completo sulla metodologia adottata e i risultati ottenuti nella campagna geofisica sono riportati in Allegato 1)

$$V_{s,eq} = 385 \text{ m/s}$$

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 32 di 249 | Rev. 0 |

Sulla base di questo valore di $V_{s,eq} = 385$ m/s, in relazione alla classificazione introdotta dalle NTC 2018 (par. 3.2.2, Tab. 3.2.II, riprodotta nella Tabella 1 seguente), la categoria di suolo del terreno di fondazione è ricondotta alla **categoria B** – *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.*

Tabella 6.1 – Categoria di sottosuolo (Tabella 3.2.II – D.M. 17.01.2018)

| 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> |

Per le caratteristiche topografiche l'intervento ricade nella **categoria topografica T1** – *superfici pianeggianti, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$.*

Tabella 6.2 - Categorie topografiche (Tabella 3.2.III D.M. 17.01.2018)

| Categoria | Caratteristiche della superficie topografica |
|-----------|---|
| T1 | <i>Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$</i> |
| T2 | <i>Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$</i> |
| T3 | <i>Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$</i> |
| T4 | <i>Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$</i> |

| | | | |
|---|---|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 33 di 249 | Rev. 0 |

7 PARAMETRI SISMICI DEL SITO

7.1 Analisi di pericolosità sismica di base

Per il calcolo della domanda sismica occorre prima definire l'evento sismico atteso, con un assegnato periodo di ritorno, T_R , attraverso l'accelerazione massima orizzontale al suolo, a_{max} , e la magnitudo momento M_w .

L'analisi della pericolosità sismica di base dell'area della Centrale è stata effettuata con riferimento alla normativa nazionale NTC2018, vigente in materia di costruzioni in zona sismica (D.M. 17.01.2018), che definisce, per un assegnato periodo di ritorno T_R , e per ciascun nodo di un reticolo di riferimento i parametri necessari a costruire lo spettro di risposta corrispondente all'azione sismica attesa, tra i quali l'accelerazione a_g ed il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale, F_o , necessario per la stima del fattore di amplificazione stratigrafica S_S .

In particolare, per la scelta di T_R , con riferimento a “**strutture strategiche importanti**” quale è la Centrale, cui corrisponde una vita nominale $V_N = 100$ anni, e quindi, assumendo una classe d'uso IV (a cui corrisponde un coefficiente d'uso $C_U = 2$), un periodo di riferimento $V_R = V_N \times C_U = 200$ anni, si è scelto una verifica allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

I parametri così valutati, necessari per definire l'accelerazione massima attesa al sito a_{max} , sono esposti nella Tabella 7.1.

In assenza di analisi specifiche della risposta sismica locale è possibile valutare l'accelerazione massima attesa al sito mediante la relazione:

$$a_{max} = S_S \times S_T \times a_g = S \times a_g$$

e nel caso dello Stato Limite di Salvaguardia Vita (SLV), l'accelerazione massima attesa al sito vale:

$$a_{max} = S_S \times S_T \times a_g = 1.07 \times 1.00 \times 0.338g = 0.361g = 3.542 \text{ m/s}^2$$

Per quanto riguarda lo studio della Magnitudo momento attesa, M_w , essa è stata definita al precedente paragrafo 6. Sismicità, cui si rimanda.

La Magnitudo momento attesa è risultata, $M_w = 6.60$.

La profondità della falda è stata posta a profondità di 12.0 m, con criterio conservativi, in quanto nella maggior parte dei 16 sondaggi eseguiti non è stata rilevata la presenza di acqua nel terreno fino alle massime profondità di indagine (= 20 – 30 m dal p.c. esistente).

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 34 di 249 | Rev. 0 |

Tabella 7.1: Parametri dell'analisi sismica locale.

| Ubicazione del sito | Coordinate WGS84 | |
|---------------------|------------------|---------------|
| Sito | Latitudine | Longitudine |
| Centrale | 46,504346944° | 13,414814383° |

Classe d'uso e Periodo di riferimento per l'azione sismica

| | |
|---|---|
| Classe d'uso dell'opera | Classe IV – Funzioni pubbliche o strategiche importanti |
| Coefficiente d'uso | $C_U = 2$ |
| Vita nominale | $V_N \geq 100$ anni |
| Periodo di riferimento per l'azione sismica | $V_R = V_N \times C_U = 200$ anni |

Forme spettrali: Parametri

| Stato Limite | Periodo di ritorno dell'azione sismica | Accelerazione orizzontale massima del terreno | Valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale | Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale |
|----------------------------|--|---|---|---|
| Parametri | T_R (anni) | a_g (g) | Fo (-) | T^*c (s) |
| Operatività (SLO) | 120 | 0.103 | 2.448 | 0.280 |
| Danno (SLD) | 201 | 0.132 | 2.426 | 0,298 |
| Salva guardia Vita (SLV) | 1898 | 0.338 | 2.437 | 0.358 |
| Prevenzione Collasso (SLC) | 2475 | 0.375 | 2.432 | 0.365 |

Calcolo Coefficienti Sismici

| | | |
|-------------------------|-----------|---|
| Categoria di sottosuolo | 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> |
| Categoria topografica | T1 | Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$. |

| Stato Limite | Amplificazione stratigrafica | Coefficiente Funzione Categoria | Amplificazione topografica |
|----------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Parametri | S_s | C_c | S_T |
| Operatività (SLO) | 1.20 | 1.42 | 1.00 |
| Danno (SLD) | 1.20 | 1.40 | 1.00 |
| Salva guardia Vita (SLV) | 1.07 | 1.35 | 1.00 |
| Prevenzione Collasso (SLC) | 1.04 | 1.35 | 1.00 |

| Stato Limite | Coefficiente sismico in direzione orizzontale | Coefficiente sismico in direzione verticale | Accelerazione massima attesa al sito | Coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito |
|----------------------------|---|---|--------------------------------------|---|
| Parametri | k_h | k_v | $a_{max}(m/s^2)$ | β_s |
| Operatività (SLO) | 0.030 | 0.015 | 1.215 | 0.240 |
| Danno (SLD) | 0.038 | 0.019 | 1.550 | 0.240 |
| Salva guardia Vita (SLV) | 0.101 | 0.050 | 3.542 | 0.280 |
| Prevenzione Collasso (SLC) | 0.109 | 0.055 | 3.818 | 0.280 |

| | | | |
|---|---|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 35 di 249 | Rev. 0 |

7.2 Valutazione del potenziale di liquefazione secondo le NTC2018

Per quanto attiene alla possibilità di perdita di resistenza del terreno, per fenomeni di liquefazione, questi ultimi possono instaurarsi in terreni saturi, non coesivi, soggetti a sollecitazioni di taglio cicliche o monotoniche, conseguenti all'annullamento degli sforzi efficaci interstiziali. Il termine **liquefazione** denota infatti la circostanza, causata dall'aumento di pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo, durante lo scuotimento sismico, caratterizzata da deformazioni permanenti significative.

Nel sito in esame, il livello dell'acqua, a fine perforazione, è risultato assente in quasi tutti i sondaggi, nonostante la massima profondità investigata variasse da 20 a 30 m di profondità rispetto al p.c. esistente nella Centrale.

Solamente nei sondaggi con quota della testa più bassa rispetto agli altri, BH04, BH06, BH08, BH09, BH11, il livello dell'acqua si è stabilizzato a profondità comprese, 5.05 m e 18.25 m dal p.c. locale esistente.

Riassumendo, con riferimento al par. 7.11.3.4.2 *Esclusione della verifica a liquefazione*, delle NTC2018, in cui si elencano le 4 circostanze che, quando si manifesti almeno una di esse, consentono di omettere la verifica a liquefazione, si evidenzia quanto segue:

- 1) con riferimento al punto 2 relativo alla profondità della falda: su 16 sondaggi eseguiti nell'ambito dell'area di intervento (vedi Figura 4.6, più in basso riprodotta nella Figura 7.2),
 - ben in 11 di questi 16 non è stata rinvenuta falda, fino alle massime profondità investigate (da 20 m a 30 m dal p.c.);
 - in soli 5 di questi 16 è stata rinvenuta la falda, ed in uno di questi 5 la profondità della falda è risultata superiore a 15 m dal piano campagna;
- 2) con riferimento al punto 3 relativo alla resistenza penetrometrica normalizzata del terreno di fondazione: le prove penetrometriche dinamiche standard SPT, eseguite in foro con la cadenza media di 1.5 m di profondità dal p.c., in tutti i 16 sondaggi eseguiti nell'ambito dell'area di intervento, hanno evidenziato valori della resistenza penetrometrica normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa, $N_{1,60} > 30$, ad eccezione di pochi ed isolati livelli, come è evidenziato nella Figura 4.1.b, più in basso riprodotta nella Figura 7.2:
 - in totale, solo il 10% dei valori risulta inferiore, di poco, a 30;
 - ben la metà di questo 10% riguarda i sondaggi BH01 e BH02-ST-1, nei quali non è stata rilevata presenza di falda fino alla massima profondità di indagine pari a 30 m;
 - i rari punti (max n. 5) con $N_{1,60} < 30$ che ricadono nei sondaggi in cui è stata rilevata falda in foro, sono ubicati tutti al di sopra della profondità di falda.
- 3) con riferimento al punto 4 relativo alla composizione granulometrica del terreno di fondazione: le analisi granulometriche eseguite su 26 campioni rappresentativi prelevati nel corso dell'indagine, a varie profondità dal p.c., hanno evidenziato che rispetto ai **Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione** riportati nelle NTC2018 al citato punto 4. del par. 7.11.3.4.2, con riferimento al *Fuso tipo b)* $U_c > 3.5$ (vedi Figure 7.1):
 - tutti i campioni analizzati sono esterni al *Fuso tipo a)* $U_c < 3.5$;
 - ben 23 di questi 26 sono decisamente esterni anche al *Fuso tipo b)* $U_c > 3.5$, , che è quello più propriamente applicabile ai terreni di fondazione in questione;

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 36 di 249 | Rev. 0 |

- gli altri 3 di questi sono comunque parzialmente esterni al suddetto *Fuso tipo b)* $U_c > 3.5$. Di questi, uno è ben al di sopra della falda e gli altri due sono posti a profondità ≥ 15 m rispetto al p.c., e tutti tre¹⁶ hanno denunciato un indice SPT alla resistenza penetrometrica normalizzata $N_{1,60} >> 30$ (essendo andati a **Rifiuto** nel corso della prova SPT).

7.2.1 Conclusioni sul rischio di liquefazione dei terreni di fondazione

Con riferimento alle argomentazioni precedenti, essendo i terreni di fondazione ascrivibili ad almeno 3 delle 4 circostanze previste dalle NTC2018 che, quando si manifesti almeno una di esse, consentono di omettere la verifica a liquefazione, si può concludere che la natura granulare, per lo più grossolana e ghiaiosa, il grado di addensamento per lo più elevato e/o molto elevato, e, la prevalente assenza della falda, consentono di concludere che il sito non presenta fattori predisponenti al fenomeno della liquefazione, e quindi consentono di escludere, in accordo alle NTC2018, il potenziale rischio di liquefazione al di sotto delle previste fondazioni dirette degli edifici e delle strutture della Centrale.

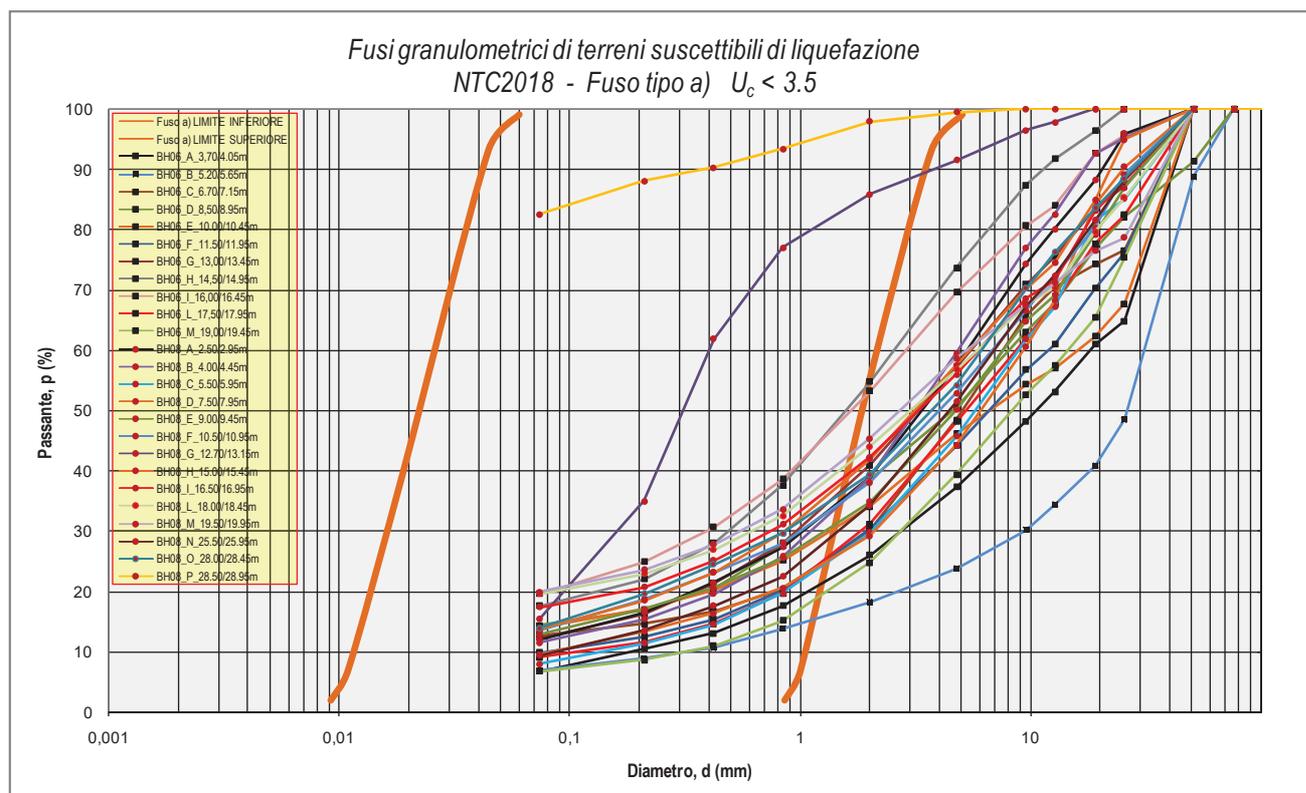


Figura 7.1.a. – Rappresentazione delle curve granulometriche dei terreni di fondazione nel Fuso granulometrico di terreni suscettibili di liquefazione - NTC2018 - Fuso tipo a) $U_c < 3.5$.

¹⁶ Si tratta dei campioni del sondaggio BH06, campioni H (12.5 m) e I (16.0 m), e, del sondaggio BH08, campione G (12.7 m): tutti tre hanno evidenziato indice SPT normalizzato $N_{1,60} > 50$ (Rifiuto), ed inoltre, l'ultimo si trova più di 5 m al di sopra della falda.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 37 di 249 | Rev. 0 |

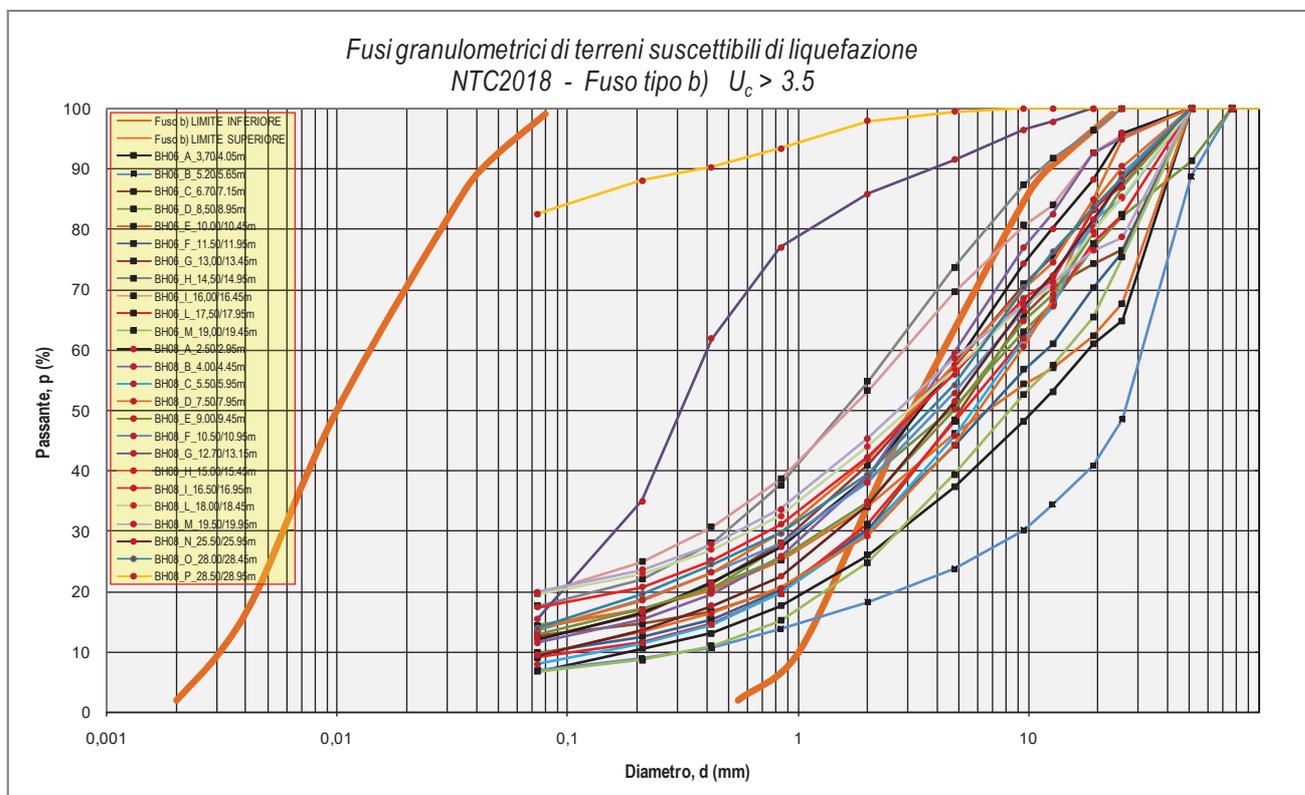


Figura 7.1.b. – Rappresentazione delle curve granulometriche dei terreni di fondazione nel Fuso granulometrico di terreni suscettibili di liquefazione - NTC2018 - Fuso tipo b) $U_c > 3.5$.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 38 di 249 | Rev. 0 |

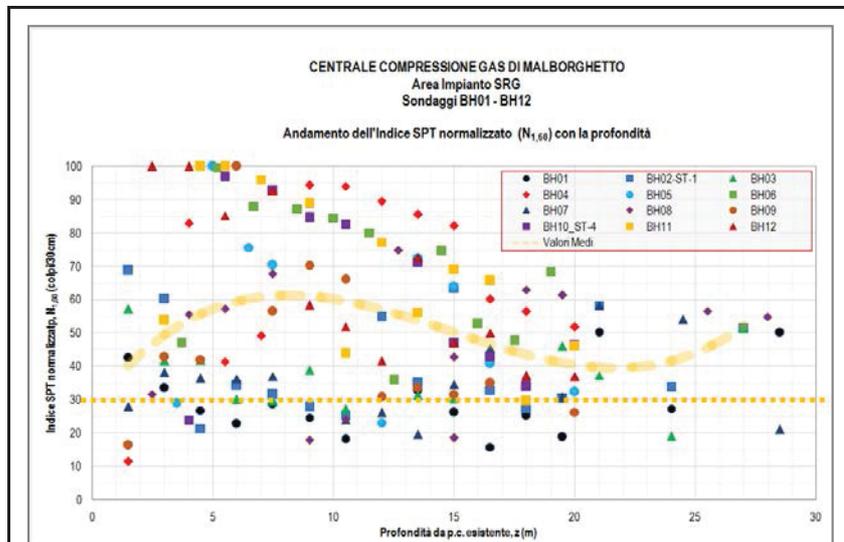


Figura 4.1.b (riprodotta) – Area Centrale – Prove penetrometriche dinamiche standard SPT - Andamento dell’Indice N_{SPT} normalizzato ($N_{1,60}$) con la profondità dal p.c.

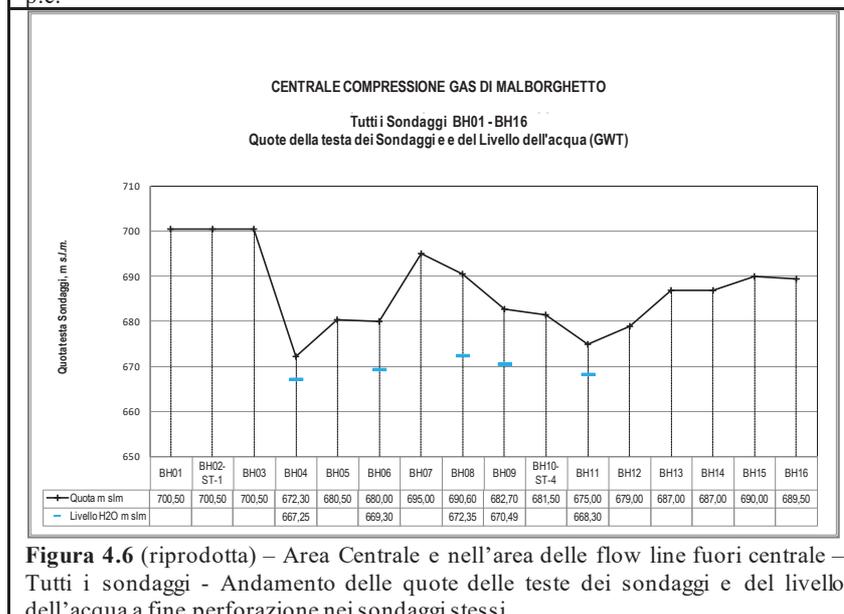


Figura 4.6 (riprodotta) – Area Centrale e nell’area delle flow line fuori centrale – Tutti i sondaggi - Andamento delle quote delle teste dei sondaggi e del livello dell’acqua a fine perforazione nei sondaggi stessi.

Figura 7.2 – Riproduzione delle Figure 4.1.b e 4.6 richiamate nella presente trattazione del potenziale di liquefazione del terreno di fondazione.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 39 di 249 | Rev. 0 |

8 FONDAZIONI: TIPOLOGIA, CAPACITÀ PORTANTE E CEDIMENTI

8.1 Modello geotecnico e parametri caratteristici del terreno

La caratterizzazione del sito, la definizione dell'assetto litologico e la modellazione geotecnica, costituenti una delle basi progettuali dell'opera, discendono dalle valutazioni basate sui risultati delle indagini geognostiche eseguite sul sito, che sono state ritenute commisurate alla dimensione ed alla scala del problema, all'importanza ed all'estensione dell'opera, e conseguentemente alle finalità progettuali; la profondità e l'estensione delle analisi condotte comprendono infatti i volumi di terreno direttamente od indirettamente coinvolti dalle sollecitazioni di progetto.

Sulla base dei risultati delle indagini geognostiche, ai fini del dimensionamento delle opere e delle relative verifiche di stabilità, si assume la stratigrafia riportata nella precedente Figura 5.2, unitamente ai valori caratteristici dei parametri geotecnici.

8.2 Caratteristiche tipologiche delle fondazioni dirette

La natura e le caratteristiche del terreno di fondazione, unitamente alle indicazioni progettuali di massima, sono tali da consentire l'uso generalizzato di fondazioni dirette.

Tali fondazioni, in relazione alla natura granulare ed addensata del terreno di fondazione, con frazione fina scarsa e/o molto e, prevalentemente Non Plastica, e solo localmente poco plastica, potranno essere realizzate mediante fondazioni,

- isolate, tipo plinti, per le opere minori in dimensioni e carichi trasmessi;
- a platea, per i turbocompressori;
- nastriformi, tipo travi rovesce, per le opere sensibili alle deformazioni,

posizionate ad almeno 1.5÷2.0 m di profondità dal piano di campagna naturale, sicuramente al di sotto del terreno superficiale che può essere di riporto o pedogenizzato. Questo anche per tenere conto che nell'ambito della Centrale esistente, risulta steso uno spessore superficiale di materiale arido grossolano compattato artificialmente, poco coesivo, con spessore variabile fino ad 1-1,5 m dal p.c. attuale.

8.3 Carico limite delle fondazioni dirette (Resistenza R)

In accordo alle NTC2018, par. 6.2.4.1.2, di seguito sono esposti i risultati ottenuti per i valori della resistenza, R, nei riguardi degli stati limite con il "metodo dei coefficienti parziali".

A tal fine si utilizzano il "modello geotecnico" ed i "parametri caratteristici" riassunti nella precedente Figura 5.2 ed i "coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno" esposti nelle NTC2018, Par. 6.2.4.1.2 *Resistenze*, nelle due condizioni:

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 40 di 249 | Rev. 0 |

- Verifiche allo Stato Limite Ultimo di resistenza del terreno, GEO [Approccio 2 - Combinazione (A1+M1+R3)]¹⁷;
- Verifiche agli Stati Limite di Esercizio [Condizioni SLE coincidente con la condizione SLU (A1+M1+R3)]¹⁸.

I valori caratteristici dei parametri geotecnici del terreno sono stati divisi per i coefficienti parziali γ_M specificati nella successiva Tabella 8.1, desunta dalla normativa citata (cfr. Tab. 6.2.II NTC 2018).

I valori del carico limite per le fondazioni dirette di forma quadrata (con lato $B = 1.0 \div 6.0$ m) e continua (di lato minore $B = 1.0 \div 2.5$ m), poggianti alla profondità $D = 1.5 \div 2.5$ m rispetto al p.c. finale, sono riassunti nelle sottostanti Tabella 8.2.a e 8.2.b, mentre i valori relative alle platee, ($B \times L = [da 10 - 20m] \times [da 20 a 40 m]$, $D = da 2.0 m a 3.0 m$ rispetto al p.c. finale, sono riassunti nella sottostante Tabella 8.2.c.

In particolare (cfr. par. 6.2.4.1 NTC 2018) nelle verifiche agli Stati Limite, per le resistenze, il relativo valore di progetto dovrà essere calcolato come:

Il Progettista, nelle verifiche di progetto, dovrà tener conto dei coefficienti parziali γ_R corrispondenti al tipo di verifica agli stati ultimi di fondazioni superficiali ed al tipo di Approccio/Combinazione che utilizzerà.

La metodologia di calcolo del carico limite (capacità portante ultima) utilizzata, fa fondamentale riferimento all'approccio proposto da Meyerhof (1951, 1963) ed è esposta nell'Allegato 3.

¹⁷ Per le verifiche agli stati limite ultimi di tipo geotecnico (GEO) per carico limite e per scorrimento si deve fare riferimento all'Approccio 2. L'analisi deve essere condotta con la Combinazione (A1+M1+R3), nella quale i coefficienti parziali sui parametri di resistenza del terreno (M1) sono unitari, i coefficienti parziali sulle azioni (A1) sono indicati dalla tabella 6.2.1 e la resistenza globale del sistema è ridotta tramite i coefficienti γ_R del gruppo R3 riportati in tab. 6.4.1. (dal Par. C6.4.2.1 della Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP., esplicativa delle NTC2018).

¹⁸ Vedi Par. C6.4.2.2 della Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP., esplicativa delle NTC2018

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 41 di 249 | Rev. 0 |

Tabella 8.1: Coefficienti parziali e parametri geotecnici di calcolo.

| Parametro al quale applicare il coefficiente parziale | | Coefficiente parziale | | Parametro di calcolo | | Strato n. |
|---|--|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|--|-----------|
| | | γ_M | | (M1) | (M2) | |
| | | (M1) | (M2) | (M1) | (M2) | |
| Tangente dell'angolo di resistenza al taglio ($^\circ$) | $\tan \varphi'_k$ | $\gamma_{\varphi'} = 1.0$ | $\gamma_{\varphi'} = 1.25$ | $\varphi' = 35$ $\varphi' = 38$ | $\varphi' = 29.2$ $\varphi' = 32.0$ | 1 2 |
| Coesione efficace (kN/m^2) | c'_k | $\gamma_{c'} = 1.0$ | $\gamma_{c'} = 1.25$ | $c' = 0.0$ $c' = 0.0$ | $c' = 0.0$ $c' = 0.0$ | 1 2 |
| Resistenza non drenata (kN/m^2) | c_{uk} | $\gamma_{c_u} = 1.0$ | $\gamma_{c_u} = 1.4$ | $c_u = --$ | $c_u = --$ | -- |
| Peso di volume (kN/m^3) | γ | $\gamma_\gamma = 1.0$ | $\gamma_\gamma = 1.0$ | $\gamma = 19.0$ $\gamma = 21.0$ | $\gamma = 19.0$ $\gamma = 21.0$ | 1 2 |
| M1 e M2 | Corrispondono ai coefficienti parziali delle azioni dei gruppi A1 e A2 delle verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU) | | | | | |
| M1 | Coincide con i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri di resistenza delle verifiche nei confronti degli stati limite di esercizio (SLE), che sono sempre unitari [vedi Circolare 21/1/2019 n. 7 C:S_LL_PP; esplicativa delle NTC2018, al par. C6.4.2.2 Verifiche agli stati limite di esercizio (SLE)] | | | | | |

8.4 Influenza dell'eccentricità delle sollecitazioni sul carico limite

Si fa osservare che nel caso di carico eccentrico, con eccentricità e_B in una data direzione (B), si deve fare riferimento alle dimensioni equivalenti (area equivalente) della fondazione (Meyerhof, 1963).

Analogamente, nel caso di carico eccentrico in entrambe le direzioni:

$$A' = (B - 2e_B) \times (L - 2e_L) = B' \times L'$$

Il concetto dell'area equivalente ($A' = B' \times L'$ = area rispetto alla quale il carico esterno risulta baricentrico) è rappresentato dalla precedente espressione.

Pertanto, il tasso di sollecitazione massimo indotto sul terreno dai carichi di fondazione, sia in relazione alla capacità portante che ai cedimenti attesi, sarà valutato secondo l'espressione suggerita da Meyerhof (1963):

$$\sigma_t = \frac{N}{(B - 2e_B) \times (L - 2e_L)}$$

dove,

- N = carico totale massimo agente sul piano di posa della
- B, L = larghezza e lunghezza della fondazione, rispettivamente
- e_B, e_L = eccentricità di N rispetto a B ed a L, rispettivamente

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 42 di 249 | Rev. 0 |

Tabella 9.2.a: Stratigrafia di calcolo della capacità portante di fondazioni dirette.

| Strato n° | Prof (m) | γ (kN/m ³) | c' (kN/m ²) | ϕ' (°) |
|-----------|----------|-------------------------------|---------------------------|-------------|
| 1 | 0,0 | 19,0 | 0 | 35 |
| 2 | 12,0 | 11,0 | 0 | 38 |
| | 30,0 | | | |

Tabella 9.2.b: Valori del carico limite per fondazioni dirette quadrate, in Condizioni Parametri M1.

| <i>FONDAZIONI QUADRATE</i> | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|--------------------------------|
| Condizioni Parametri Geotecnici → | | | M1 |
| B (m) | L (m) | D (m) | q_{lim} (kN/m ²) |
| 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1911 |
| 2,0 | 2,0 | 1,0 | 1783 |
| 3,0 | 3,0 | 1,0 | 1870 |
| 4,0 | 4,0 | 1,0 | 2010 |
| 5,0 | 5,0 | 1,0 | 2171 |
| 1,0 | 1,0 | 2,0 | 3767 |
| 2,0 | 2,0 | 2,0 | 3823 |
| 3,0 | 3,0 | 2,0 | 3588 |
| 4,0 | 4,0 | 2,0 | 3567 |
| 5,0 | 5,0 | 2,0 | 3632 |
| 1,0 | 1,0 | 3,0 | 5827 |
| 2,0 | 2,0 | 3,0 | 5507 |
| 3,0 | 3,0 | 3,0 | 5734 |
| 4,0 | 4,0 | 3,0 | 5445 |
| 5 | 5 | 3 | 5 |

Tabella 9.2.c: Valori del carico limite per fondazioni dirette continue, in Condizioni Parametri M1.

| <i>FONDAZIONI CONTINUE</i> | | |
|-----------------------------------|-------|--------------------------------|
| Condizioni Parametri Geotecnici → | | M1 |
| B (m) | D (m) | q_{lim} (kN/m ²) |
| 1,0 | 1,5 | 1333 |
| 1,5 | 1,5 | 1368 |
| 2,0 | 1,5 | 1466 |
| 2,5 | 1,5 | 1590 |
| 1,0 | 2,0 | 2425 |
| 1,5 | 2,0 | 2450 |
| 2,0 | 2,0 | 2666 |
| 2,5 | 2,0 | 2676 |
| 1,0 | 2,5 | 3638 |
| 1,5 | 2,5 | 3638 |
| 2,0 | 2,5 | 3658 |
| 2,5 | 2,5 | 3698 |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 43 di 249 | Rev. 0 |

Tabella 9.2.d: Valori del carico limite per fondazioni a platea, in Condizioni Parametri M1.

| FONDAZIONI A PLATEA | | | |
|-----------------------------------|----------|----------|--|
| Condizioni Parametri Geotecnici → | | | M1 |
| B (m) | L (m) | D (m) | q _{lim} (kN/m ²) |
| 10,0 | 20,0 | 2,0 | 4490 |
| 12,5 | 25,0 | 2,0 | 5094 |
| 15,0 | 30,0 | 2,0 | 5711 |
| 17,5 | 35,0 | 2,0 | 6336 |
| 20,0 | 40,0 | 2,0 | 6966 |
| 10,0 | 20,0 | 2,5 | 5032 |
| 12,5 | 25,0 | 2,5 | 5613 |
| 15,0 | 30,0 | 2,5 | 6215 |
| 17,5 | 35,0 | 2,5 | 6829 |
| 20,0 | 40,0 | 2,5 | 7451 |
| 10,0 | 20,0 | 3,0 | 5599 |
| 12,5 | 25,0 | 3,0 | 6152 |
| 15,0 | 30,0 | 3,0 | 6735 |
| 17,5 | 35,0 | 3,0 | 7336 |
| 20,0 | 40,0 | 3,0 | 7948 |

8.5 Cedimenti di fondazioni dirette

La valutazione dei cedimenti di fondazioni dirette è stata effettuata con il metodo che prevede la valutazione dell'incremento delle tensioni verticali efficaci secondo la teoria di Boussinesq (1883), e dei cedimenti per ogni verticale in esame secondo l'espressione semplificata:

$$s_t = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_{zi}}{M_{0i}}$$

dove:

- $\Delta\sigma'_{zi}$ = incremento di tensione efficace verticale nello strato i-esimo
- M_{0i} = modulo di deformazione confinato del terreno nello strato i-esimo
- h_i = altezza dello strato i-esimo

I valori dei cedimenti che si possono attendere per le tipologie di fondazione che si prevede di utilizzare e per i carichi di esercizio probabili, sono riportati, per impronta di carico infinitamente rigida, nelle Tabelle 9.3.a, 9.3.b, 9.3.c, rispettivamente per le fondazioni quadrate, continue nastriformi e a platea.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 44 di 249 | Rev. 0 |

Tabella 9.3.a: Valori dei cedimenti di fondazioni dirette quadrate

| FONDAZIONI QUADRATE Carico unitario = 100 kN/cm ² | | | | Cedimento (cm) | |
|---|-------|-------|------------------------|----------------|--------|
| B (m) | L (m) | D (m) | q (kN/m ²) | Flessibili | Rigide |
| 1,0 | 1,0 | 0,27 | 100 | 0,27 | 0,21 |
| 2,0 | 2,0 | 0,51 | 100 | 0,51 | 0,41 |
| 3,0 | 3,0 | 0,75 | 100 | 0,75 | 0,60 |
| 4,0 | 4,0 | 0,96 | 100 | 0,96 | 0,77 |
| 5,0 | 5,0 | 1,17 | 100 | 1,17 | 0,94 |
| 1,0 | 1,0 | 0,27 | 100 | 0,27 | 0,21 |
| 2,0 | 2,0 | 0,51 | 100 | 0,51 | 0,41 |
| 3,0 | 3,0 | 0,73 | 100 | 0,73 | 0,58 |
| 4,0 | 4,0 | 0,96 | 100 | 0,96 | 0,77 |
| 5,0 | 5,0 | 1,17 | 100 | 1,17 | 0,94 |
| 1,0 | 1,0 | 0,26 | 100 | 0,26 | 0,20 |
| 2,0 | 2,0 | 0,49 | 100 | 0,49 | 0,39 |
| 3,0 | 3,0 | 0,73 | 100 | 0,73 | 0,58 |
| 4,0 | 4,0 | 0,94 | 100 | 0,94 | 0,75 |
| 5,0 | 5,0 | 1,15 | 100 | 1,15 | 0,92 |

| FONDAZIONI QUADRATE Carico unitario = 200 kN/cm ² | | | | Cedimento (cm) | |
|---|-------|-------|------------------------|----------------|--------|
| B (m) | L (m) | D (m) | q (kN/m ²) | Flessibili | Rigide |
| 1,0 | 1,0 | 1,0 | 200 | 0,57 | 0,45 |
| 2,0 | 2,0 | 1,0 | 200 | 1,09 | 0,87 |
| 3,0 | 3,0 | 1,0 | 200 | 1,58 | 1,27 |
| 4,0 | 4,0 | 1,0 | 200 | 2,07 | 1,65 |
| 5,0 | 5,0 | 1,0 | 200 | 2,55 | 2,04 |
| 1,0 | 1,0 | 2,0 | 200 | 0,55 | 0,44 |
| 2,0 | 2,0 | 2,0 | 200 | 1,07 | 0,86 |
| 3,0 | 3,0 | 2,0 | 200 | 1,58 | 1,27 |
| 4,0 | 4,0 | 2,0 | 200 | 2,07 | 1,65 |
| 5,0 | 5,0 | 2,0 | 200 | 2,51 | 2,01 |
| 1,0 | 1,0 | 3,0 | 200 | 0,55 | 0,44 |
| 2,0 | 2,0 | 3,0 | 200 | 1,07 | 0,86 |
| 3,0 | 3,0 | 3,0 | 200 | 1,56 | 1,25 |
| 4,0 | 4,0 | 3,0 | 200 | 2,04 | 1,63 |
| 5,0 | 5,0 | 3,0 | 200 | 2,51 | 2,01 |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 45 di 249 | Rev. 0 |

Tabella 9.3.b: Valori dei cedimenti di fondazioni dirette continue nastroformi

| FONDAZIONI CONTINUE NASTRIFORMI Carico unitario = 100 kN/cm ² | | | Cedimento (cm) | |
|---|----------|---------------------------|-------------------|--------|
| B (m) | D (m) | q (kN/m ²) | Flessibili | Rigide |
| 1,0 | 1,0 | 100 | 0,51 | 0,41 |
| 1,5 | 1,0 | 100 | 0,73 | 0,58 |
| 2,0 | 1,0 | 100 | 0,93 | 0,73 |
| 2,5 | 1,0 | 100 | 1,10 | 0,88 |
| 1,0 | 2,0 | 100 | 0,51 | 0,41 |
| 1,5 | 2,0 | 100 | 0,71 | 0,56 |
| 2,0 | 2,0 | 100 | 0,89 | 0,51 |
| 2,5 | 2,0 | 100 | 1,08 | 0,86 |
| 1,0 | 2,5 | 100 | 0,49 | 0,39 |
| 1,5 | 2,5 | 100 | 0,68 | 0,55 |
| 2,0 | 2,5 | 100 | 0,87 | 0,79 |
| 2,5 | 2,5 | 100 | 1,05 | 0,84 |

| FONDAZIONI CONTINUE NASTRIFORMI Carico unitario = 200 kN/cm ² | | | Cedimento (cm) | |
|---|----------|---------------------------|-------------------|--------|
| B (m) | D (m) | q (kN/m ²) | Flessibili | Rigide |
| 1,0 | 1,0 | 200 | 1,17 | 0,94 |
| 1,5 | 1,0 | 200 | 1,66 | 1,33 |
| 2,0 | 1,0 | 200 | 2,11 | 1,69 |
| 2,5 | 1,0 | 200 | 2,54 | 2,03 |
| 1,0 | 2,0 | 200 | 1,14 | 0,92 |
| 1,5 | 2,0 | 200 | 1,63 | 1,30 |
| 2,0 | 2,0 | 200 | 2,07 | 1,66 |
| 2,5 | 2,0 | 200 | 2,53 | 2,02 |
| 1,0 | 3,0 | 200 | 1,12 | 0,89 |
| 1,5 | 3,0 | 200 | 1,60 | 1,28 |
| 2,0 | 3,0 | 200 | 2,06 | 1,65 |
| 2,5 | 3,0 | 200 | 2,48 | 1,99 |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 46 di 249 | Rev. 0 |

Tabella 9.3.c: Valori dei cedimenti di fondazioni dirette rettangolari a platea

| FONDAZIONI QUADRATE Carico unitario = 50 kN/cm ² | | | | Cedimento (cm) | |
|--|-------|-------|------------------------|----------------|--------|
| B (m) | L (m) | D (m) | q (kN/m ²) | Flessibili | Rigide |
| 10,0 | 20,0 | 2,0 | 50 | 1,15 | 0,92 |
| 12,5 | 25,0 | 2,0 | 50 | 1,34 | 1,07 |
| 15,0 | 30,0 | 2,0 | 50 | 1,53 | 1,23 |
| 17,5 | 35,0 | 2,0 | 50 | 1,71 | 1,37 |
| 20,0 | 40,0 | 2,0 | 50 | 1,86 | 1,49 |
| 10,0 | 20,0 | 2,5 | 50 | 1,11 | 0,89 |
| 12,5 | 25,0 | 2,5 | 50 | 1,34 | 1,07 |
| 15,0 | 30,0 | 2,5 | 50 | 1,49 | 1,19 |
| 17,5 | 35,0 | 2,5 | 50 | 1,67 | 1,34 |
| 20,0 | 40,0 | 2,5 | 50 | 1,85 | 1,48 |
| 10,0 | 20,0 | 3,0 | 50 | 1,11 | 0,89 |
| 12,5 | 25,0 | 3,0 | 50 | 1,30 | 1,04 |
| 15,0 | 30,0 | 3,0 | 50 | 1,49 | 1,19 |
| 17,5 | 35,0 | 3,0 | 50 | 1,67 | 1,33 |
| 20,0 | 40,0 | 3,0 | 50 | 1,81 | 1,44 |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 47 di 249 | Rev. 0 |

8.6 Interazione terreno-struttura - [terreno alla Winkler]

Per le valutazioni dell'interazione tra le strutture di fondazione ed il terreno di fondazione, questo può essere caratterizzato mediante l'assunzione di un modulo di reazione verticale unitario (valutato per una impronta di carico di forma quadrata e di lato 1.0 m, in superficie)¹⁹, pari a:

$$K_{\text{unit}} = 100 \frac{\text{MN}}{\text{m}^3} \quad \left(= 10 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \right)$$

Poiché il modulo di reazione, oltre che dalle caratteristiche meccaniche del terreno di fondazione, è influenzato anche dalla dimensione e forma dell'impronta di fondazione e dalla profondità del piano di posa, il valore del modulo di reazione da utilizzare nelle verifiche può essere ricavato mediante l'utilizzazione delle seguenti espressioni suggerite da Terzaghi (Geotechnique, 1955):

- **influenza della forma:** per una fondazione rettangolare di larghezza B pari a 1.0 m e di lunghezza pari a L (in metri), il modulo di reazione K_{rett} è:

$$K_{\text{rett}} = K_{\text{unit}} \cdot [1 + 0.5 (B/L)] / 1.5$$

in cui K_{unit} è il modulo di reazione di una fondazione quadrata di lato = 1 m.
- **influenza della dimensione:** per una fondazione di larghezza pari a B (in metri), e di lunghezza pari a L (in metri), il modulo di reazione K_B è:

 - per terreni granulari, $K_B = 2.35 \cdot K_b \cdot [(B + 0.3)/2B]^2$
 - per terreni coesivi, $K_B = K_b/B$

in cui $K_b = K_{\text{rett}}$ prima ricavato.
- **influenza della profondità:** per una fondazione rettangolare di larghezza B (in metri) posta ad una profondità di posa D (in metri), il modulo di reazione K_{prof} è:

 - per terreni granulari, $K_{\text{prof}} = K_{\text{sup}} \cdot [1 + 2 D/B]$ $D \leq B/2$
 - $K_{\text{prof}} \approx 2 K_{\text{sup}}$ $D > B/2$

in cui K_{sup} è il modulo di reazione della stessa fondazione con profondità di posa nulla, ed è uguale a K_B prima ricavato.

 - per terreni coesivi, il valore del modulo di reazione può essere assunto costante con la profondità nell'ambito dei normali valori.

¹⁹ Berardi, G. (1974) "Ingegneria delle Fondazioni", Enciclopedia dell'Ingegneria, Vol. VII, ISEDI, Mondadori, p. 45-149.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 48 di 249 | Rev. 0 |

9 FONDAZIONI DI MACCHINE VIBRANTI

9.1 Parametri geotecnici dinamici del terreno. Velocità delle onde di taglio

La definizione delle caratteristiche dinamiche del terreno è stata misurata con l'esecuzione di prove sismiche di superficie attive mediante il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). I risultati di tali misurazioni sono riportati nell'Allegato 1, e sono riassunti nel diagramma della Figura 9.1.

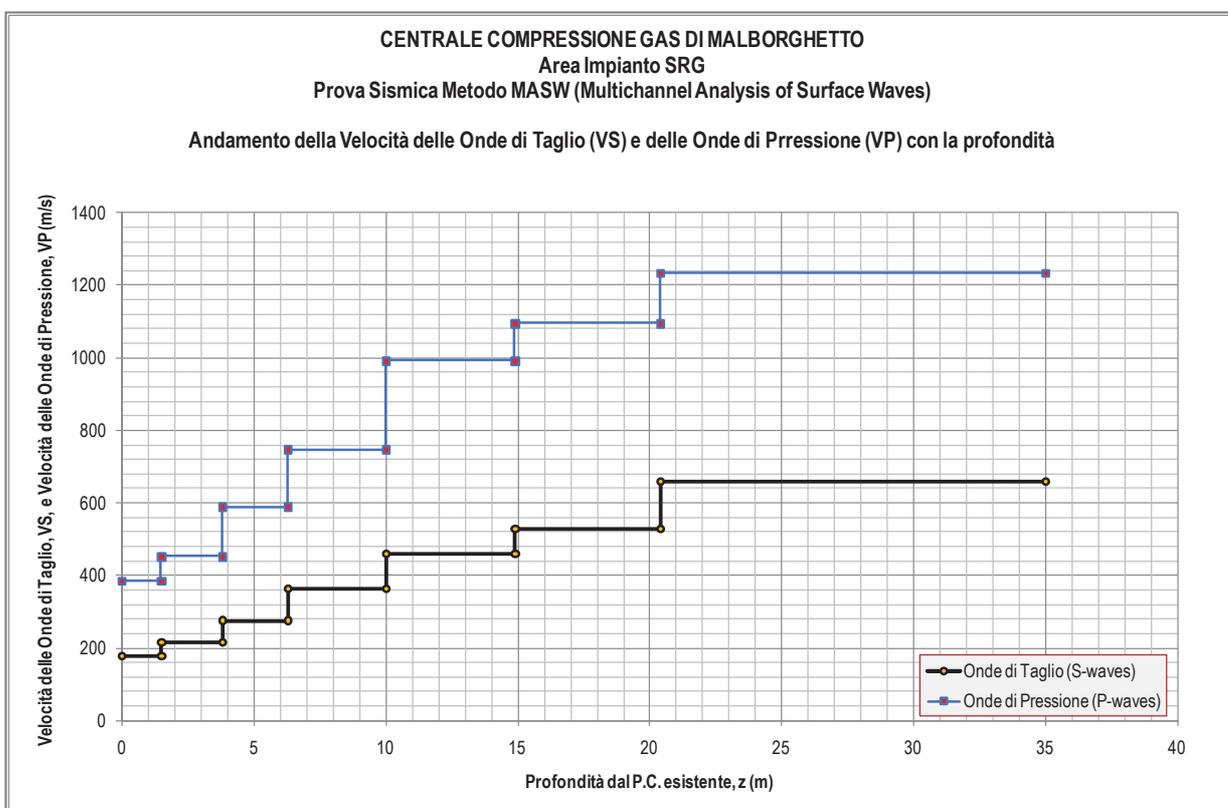


Figura 9.1 – Prove MASW -Andamento della Velocità delle onde di taglio, VS, e delle onde di pressione, VP, con la profondità.

9.2 Parametri geotecnici dinamici del terreno. Modulo di taglio

In un mezzo elastico, omogeneo, isotropo, il valore del Modulo di Taglio è legato alla densità ed alla velocità di propagazione delle onde di taglio, Vs, mediante la relazione:

$$G_{\max} = \rho V_s^2$$

dove,

$$\rho = \text{densità del terreno attraversato dalle onde di taglio} = \rho = \frac{\gamma_t}{g};$$

γ_t = peso di volume naturale del terreno;

g = accelerazione di gravità ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$).

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 49 di 249 | Rev. 0 |

I valori del Modulo di Taglio massimo, G_{max} , ottenuti sono riprodotti nella Figura 9.2, in funzione della profondità dal p.c. esistente, insieme ai valori del modulo di Young dinamico, E_{max} .

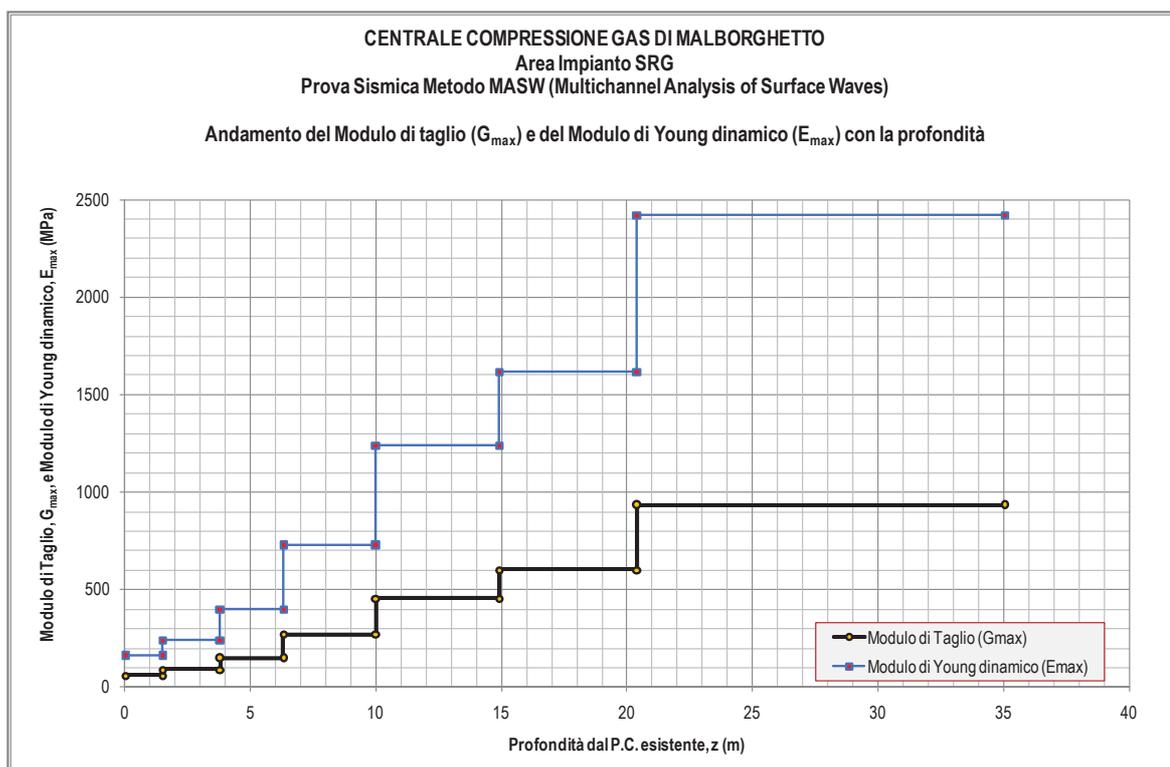


Figura 9.2.a – Prove MASW - Andamento del Modulo di Taglio massimo, G_{max} , e, del Modulo di Young dinamico, E_{max} , con la profondità.

L'andamento dei valori è ben correlato con lo schema stratigrafico assunto per le valutazioni geotecniche statiche.

I valori del Coefficiente di Poisson, ν , ottenuti dall'elaborazione delle prove MASW, in funzione della profondità dal p.c. esistente, sono riprodotti nella Figura 9.3.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 50 di 249 | Rev. 0 |

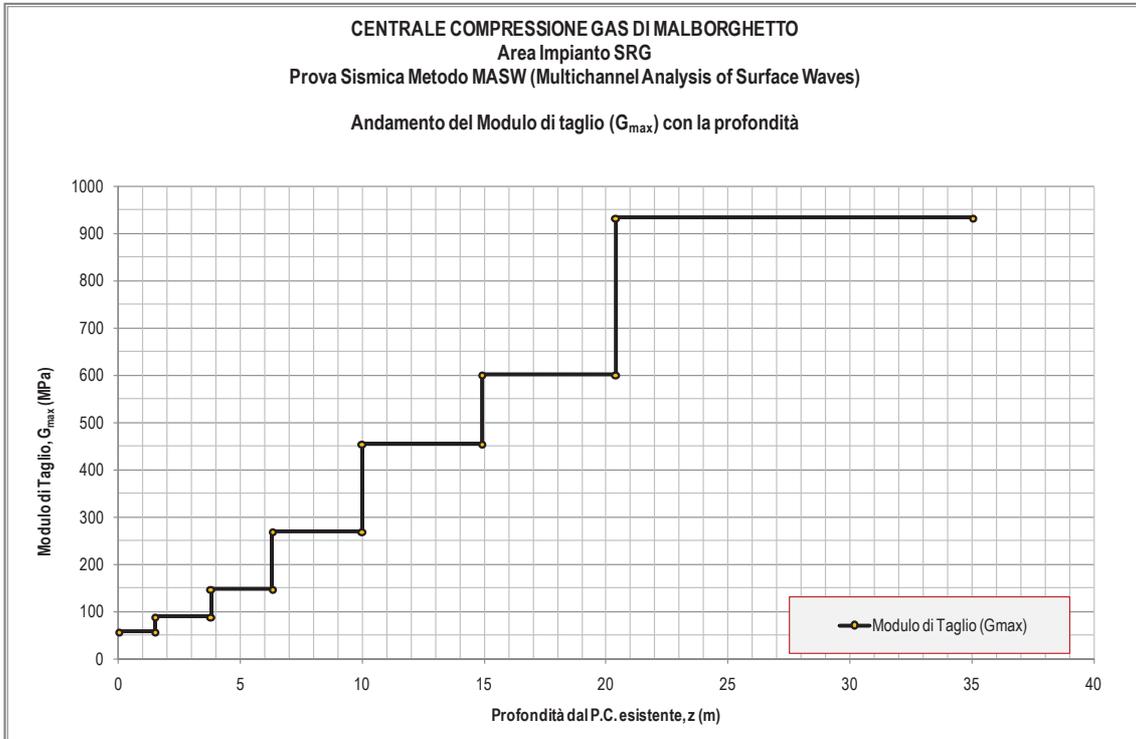


Figura 9.2.b – Prove MASW - Andamento del Modulo di Taglio massimo, G_{max} , con la profondità.

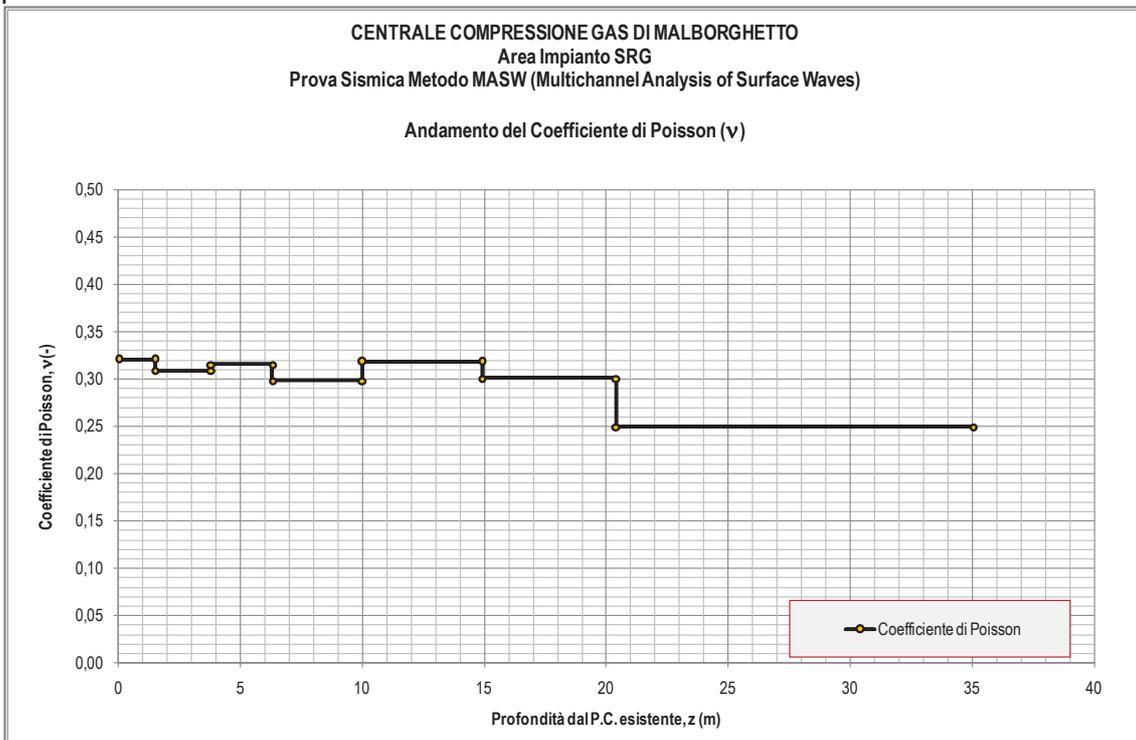


Figura 9.3 – Prove MASW - Andamento dei valori del Coefficiente di Poisson, ν , ottenuti dall'elaborazione delle prove MASW, in funzione della profondità dal p.c. esistente.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 51 di 249 | Rev. 0 |

9.3 Miglioramento del terreno di fondazione delle macchine vibranti.

Le fondazioni di macchine vibranti sono soggette alle vibrazioni causate dalle forze squilibrate delle macchine oltre che ai carichi di fondazione statici dovuti al peso delle macchine stesse.

Nel dimensionamento di queste fondazioni, al fine di controllare le vibrazioni indotte, è spesso utilizzato il criterio di aumentare la massa, e quindi il peso, del blocco di fondazione e/o di rinforzare il terreno di fondazione naturale posto al di sotto della base della fondazione.

Il piano di posa dei blocchi di fondazione delle macchine vibranti è previsto sia posizionato ad una profondità di circa – 1.50 m dal p.c..

La eventuale presenza di terreno di riporto sul piano dello scavo di fondazione, dovrà essere completamente asportato, in modo che il blocco di fondazione in c.a. delle macchine vibranti poggi direttamente sul terreno ghiaioso-sabbioso molto addensato naturale, oppure su materiale controllato di buone caratteristiche meccaniche, in caso di sostituzione del terreno naturale.

Al fine di migliorare le prestazioni dinamiche del terreno di fondazione si può adottare la seguente soluzione di miglioramento:

- la soluzione, prevede la costruzione di un letto di sottofondazione in magrone di calcestruzzo, con il fine di sostituire la restante parte di terreno di riporto al di sotto della quota di imposta della fondazione in c.a., e, di costituire un blocco d'inerzia utile all'assorbimento delle vibrazioni trasmesse al sottostante terreno naturale; lo schema realizzativo è mostrato nella Figura 9.4 seguente;

Questa soluzione (miglioramento mediante letto di sottofondazione in magrone di calcestruzzo) presenta una grande semplicità di realizzazione.

9.4 Intervento di miglioramento mediante letto di sottofondazione in magrone di calcestruzzo

Il piano di posa dei blocchi di fondazione delle macchine vibranti è previsto sia posizionato ad una profondità di circa – 1.50 m dal p.c..

Lo scavo di fondazione dovrà essere spinto ad una profondità di 2.0 m dal p.c., per consentire di alloggiare, al di sotto del blocco di fondazione in c.a. delle macchine vibranti, il letto di fondazione in magrone di calcestruzzo, dello spessore di almeno 50 cm, e, con dimensioni che eccedano, rispetto ai bordi del blocco di fondazione in c.a., di almeno 50 cm su ogni suo lato.

Con riferimento alla letteratura tecnica, il magrone di calcestruzzo sarà dosato con basso contenuto di cemento (= 50-70 kg/m³): a bassi valori di cementazione si ottengono valori

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 52 di 249 | Rev. 0 |

adeguati del Modulo di Taglio, G_{max} , ma soprattutto si ottengono valori decisamente più elevati di Smorzamento (Damping Ratio), D_{max} .²⁰

Tale intervento di miglioramento del terreno immediatamente sottostante il blocco di fondazione sarà realizzato secondo lo schema descritto nel seguito e rappresentato nella Figura 9.4 seguente.

In generale, le fasi realizzative del miglioramento del terreno di fondazione consisteranno in:

- esecuzione dello scavo di fondazione fino alla profondità di circa 2.0 m dalla quota del piano finito dell'impianto, con completa asportazione del terreno;
- la base dello scavo eseguito per alloggiare il blocco di fondazione ed il letto di sottofondazione in calcestruzzo magro (con basso contenuto di cemento = 50-70 kg/m³) sarà attentamente livellata (anche con aggiunta di misto granulare) e preventivamente compattata. Sulla superficie così ottenuta si stenderà un geosintetico in geocomposito drenante, con elevata resistenza alla compressione²¹, esteso almeno 1.0 m oltre l'impronta del letto di sottofondazione, con funzione di separatore tra la sottofondazione ed il terreno naturale sottostante;
- getto del letto di sottofondazione in calcestruzzo magro (con basso contenuto di cemento = 50-70 kg/m³) dello spessore di almeno 50 cm, con dimensioni che si estendano, oltre i bordi del blocco di fondazione in c.a., di almeno 50 cm su ogni suo lato;
- sulla superficie superiore del letto di sottofondazione in calcestruzzo magro si stenderà un foglio di isolante (EPDM, o NEOPRENE, o POLIETILENE RETICOLATO, ecc.), esteso almeno 50cm oltre l'impronta del blocco di fondazione in c.a., con funzione di attenuazione della trasmissione degli sforzi orizzontali.

²⁰Per maggiori dettagli sulla influenza del contenuto in cemento del magrone, sia sul valore ottenuto del Modulo di taglio, G_{max} , che soprattutto, sul valore dello Smorzamento (Damping Ratio, D_{max}), si veda: "Dynamic moduli and damping ratios for cemented sands at low strains" by Saxema et al., 1988 in Can. Geotech. J. 25, 353-368 (1988). Effect of cement content: "The values of G increase as the cement content increasesIt may be noted that there is a large increase in these values with the increase of cement content from 2 to 5%. A definite increase of D is observed with lower ranges of cementation and a subsequent decrease in these values at higher ranges of cementation."

²¹Geocomposito drenante del tipo Enkadrain 5006H, tenax DR2, ecc.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 53 di 249 | Rev. 0 |

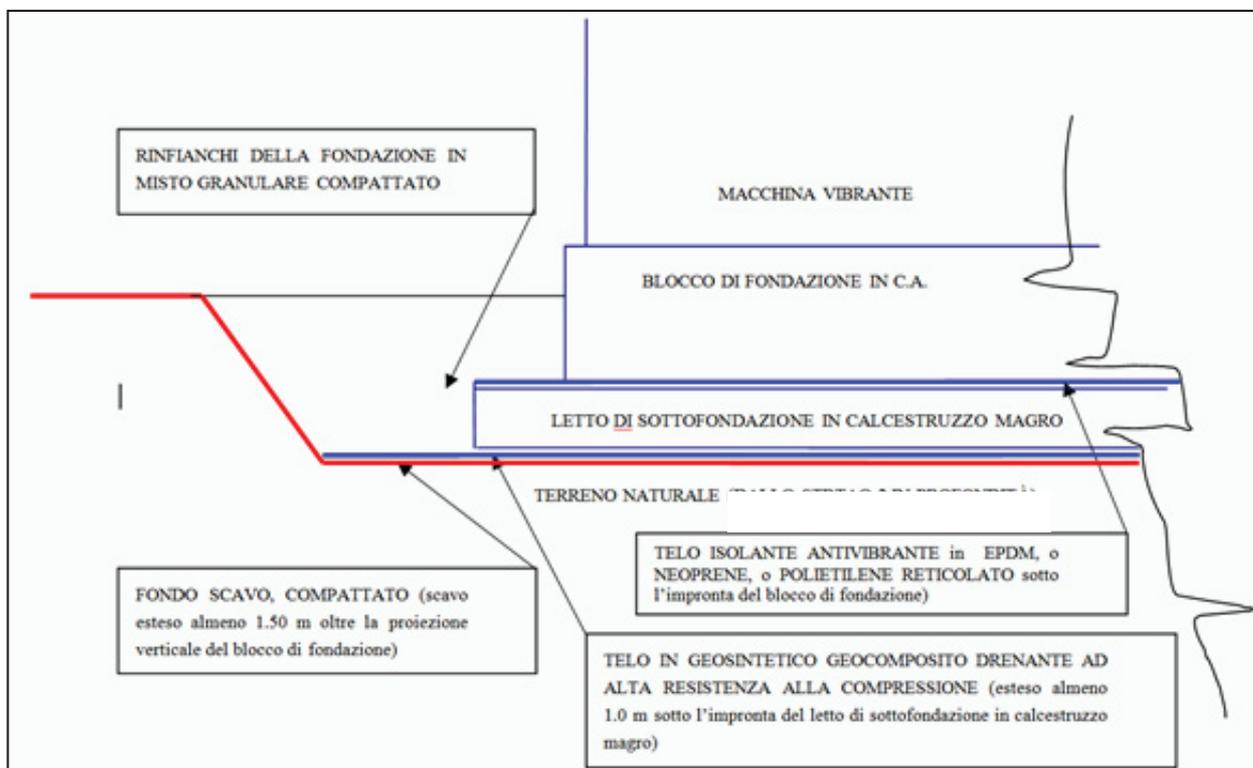


Figura 9.4 – Schema realizzativo dell'intervento di miglioramento del terreno di fondazione mediante letto di sottofondazione con magrone di calcestruzzo.

9.4.1 Parametri dinamici equivalenti del terreno di fondazione

L'esecuzione degli interventi di miglioramento così come indicati nello schema di Figura 9.4, consentirà di ottenere una risposta più rigida del terreno di fondazione alle sollecitazioni indotte dalle macchine vibranti.

Pertanto, i valori equivalenti dei parametri dinamici per il dimensionamento delle strutture di fondazione delle macchine vibranti, sono stati valutati in funzione:

- dei valori dei parametri dinamici valutati per gli strati del terreno naturale;
- del valore dei parametri dinamici attribuibili al letto di sottofondazione in calcestruzzo magro;
- degli spessori del letto di sottofondazione in calcestruzzo magro e degli strati del terreno naturale;
- della profondità dei singoli strati (del letto di sottofondazione in calcestruzzo magro e del terreno naturale) dal piano di posa del blocco di fondazione fino alla profondità del bulbo di pressione partecipante alle vibrazioni indotte²²;
- delle dimensioni e dell'approfondimento dei blocchi di fondazione delle macchine vibranti.

²²Per il calcolo della estensione apparente della massa di terreno partecipante alle vibrazioni indotte dalla macchina si può fare riferimento al "bulb of pressure concept" proposto da Balakrishna e Nagraj (1960).

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 54 di 249 | Rev. 0 |

L'espressione utilizzata per la valutazione del modulo di taglio massimo equivalente, $G_{0,eq}$, è la seguente,

$$G_{0,eq} = \sum_{i=1}^n \frac{G_{0,i} \cdot \frac{s_i}{d_i}}{\frac{s_i}{d_i}}$$

in cui:

- $G_{0,eq}$ = modulo di taglio equivalente attribuibile al terreno;
- $G_{0,i}$ = modulo di taglio dello strato i-esimo (= G_{max});
- s_i = spessore dello strato i-esimo;
- d_i = profondità, rispetto alla base del blocco di fondazione della macchina vibrante, del baricentro dello strato i-esimo;

che rappresenta una media pesata di tutti gli elementi di valutazione sopra elencati, con peso direttamente proporzionale al valore dei parametri e dello spessore di ogni singolo strato, e inversamente proporzionale alla profondità dei singoli strati (bonifico e naturali) dal piano di posa del blocco di fondazione:

Per la definizione del valore del modulo di taglio massimo, G_0 (= G_{max}), attribuibile al letto di sottofondazione in calcestruzzo magro, si fa riferimento ai valori del modulo elastico attribuibile ad un calcestruzzo con resistenza a compressione $R_{ck} \leq 5$ MPa, al quale per correlazione può essere attribuito un valore del modulo elastico $E = 5700 \sqrt{5} \leq 12745$ MPa, e di conseguenza, un valore del modulo di taglio $G = E/2(1+\nu) \leq 7519$ MPa .

Per le considerazioni di calcolo del modulo equivalente è stato assunto molto prudentemente:

il valore minimo di $G_0 \geq 500$ MPa per caratterizzare il letto di sottofondazione in calcestruzzo magro;

lo spessore di tale letto di calcestruzzo è stato assunto pari a $s = 0.50$ m.

In particolare, considerando una influenza delle sollecitazioni della macchina vibrante fino a 15 m di profondità, le valutazioni eseguite sulla distribuzione dei valori dei parametri dinamici nei vari strati del terreno di fondazione, consentono di assegnare al terreno di fondazione i seguenti valori equivalenti dei parametri dinamici, valori che possono essere utilizzati per il dimensionamento delle strutture di fondazione delle macchine vibranti:

| | | | | |
|---------------------------|------------|---|--------------------|-----|
| Modulo di taglio massimo, | $G_{0,eq}$ | = | $320 \pm 10\%$ | MPa |
| Smorzamento minimo, | $D_{0,eq}$ | = | $0,025 \div 0,030$ | - |
| Coefficiente di Poisson, | ν | = | $0,28 \div 0,29$ | - |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 55 di 249 | Rev. 0 |

I valori suddetti del modulo di taglio e dello smorzamento sono da riguardare come valori iniziali, cioè sono relativi a valori di deformazione unitaria di taglio molto piccoli, inferiori a:

$$\gamma_a \leq 10^{-5}. \gamma_a \leq 10^{-5}$$

Nell'ambito delle deformazioni unitaria di taglio molto piccole, come sopra definite, i valori dei parametri dinamici ($G_{0,eq}$, $D_{0,eq}$) possono ritenersi costanti.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  SAIPEM | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 56 di 249 | Rev. 0 |

10 ALLEGATI

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 57 di 249 | Rev. 0 |

ALLEGATO 1

GEOTECNICA VENETA S.r.l. - SAIPEM S.p.A. – ADEGUAMENTO IMPIANTO SRG DI
 MALBORGHETTO (UD) – INDAGINI GEOGNOSTICHE, GEOTECNICHE E GEOFISICHE
 PER LA CARATTERIZZAZIONE LITOSTRATIGRAFICA. – Pratica n° P19/075 – Elaborato 1
 – Dicembre 2019.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 58 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

Via Dosa 26/A - 30030 Olmo di Martellago (Ve)
 Tel. 041/908157 - Fax. 041/908905
 www.geotecnicaveneta.it - e-mail gv@geotecnicaveneta.it
 C.Fiscale - P.Iva - 01657520274 del Registro Imprese di Venezia REA n. 176883 - Capitale Sociale €. 10.200,00

LABORATORIO AUTORIZZATO DAL MINISTERO DELLE
 INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI ALL'ESECUZIONE E
 CERTIFICAZIONE DI:
 - PROVE SU TERRE
 AI SENSI DELL'ART. 59 D.P.R. n. 380/2001



AZIENDA CON SISTEMA
 DI QUALITÀ CERTIFICATO

SAIPEM S.p.A.

ADEGUAMENTO IMPIANTO SRG DI MALBORGHETTO (UD).

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, GEOTECNICHE E GEOFISICHE
 PER LA CARATTERIZZAZIONE LITOSTRATIGRAFICA.**

Pratica n° : P19/075
 Elaborato 1

Dicembre 2019

mod_Test (rev. 1 del 06/99)

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 59 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA s.r.l.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 60 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA s.r.l.

Via Dosa, 26/A - 30030 Olmo di Martellago (Ve)
 Tel. 041/908157 - Fax 041/908905
 e-mail gv@geotecnicaveneta.it
 C.F. - P.I. - Registro Imprese Venezia 01657520274
 Registro Imprese Venezia REA n. VE176883 - C.s. €. 10.200,00



AZIENDA CON SISTEMA
DI QUALITÀ CERTIFICATO

Prat. P19/075
N° Doc. Rel. 01/19/075
Rev. 0.0
Data 09/12/19

Spett.le
SAIPEM S.p.A.
 Via Toniolo, 1
 61023 FANO (PU)

Oggetto: indagini geognostiche geotecniche e geofisiche per la progettazione dell'adeguamento dell'impianto SRG di Malborghetto (UD).

1. PREMESSA

Nell'ambito del progetto di adeguamento dell'impianto di compressione gas di Malborghetto (UD), siamo stati da Voi incaricati, con affidamento n. 31259060 del 06.06.19, all'esecuzione di una campagna di indagini geognostiche geotecniche e geofisiche all'interno dell'impianto in oggetto.

Le indagini finalizzate all'affinamento del modello geologico, geotecnico sono state condotte nei mesi di ottobre e novembre 2019, secondo il programma da Voi predisposto, tutte le attività di cantiere sono state coordinate ed ubicate con Vostri tecnici così come riportato nelle planimetrie di seguito allegate (Elab.1 Tav.la 1 Planimetria alla scala 1:1.000).

Le indagini si sono concretizzate nell'esecuzione di n. 12 sondaggi a carotaggio continuo (denominati BH1÷BH12) nell'area Impianto SRG e n. 4 sondaggi (denominati BH13÷BH16) nella nuova area trappole. Tutti i sondaggi sono stati approfonditi a profondità variabili da -20.00 m a -30.00 m dal piano campagna.



In ottemperanza all'art. 6.2.2 delle N.T.C. 2008, la Società Geotecnica Veneta S.r.l., è autorizzata ad effettuare e certificare prove su terre, indagini geognostiche, prelievo di campioni e prove in situ secondo la Circolare del MM.LL.PP. 7618/STC con decreto D.M. Infrastrutture e Trasporti n° 9197 del 27/09/2011

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 61 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

Nel corso delle operazioni di sondaggio, oltre alla descrizione dei terreni ed all'esecuzione di prove speditive di resistenza con Pocket Penetrometer e Torvane, effettuate da un nostro geologo senior in presenza dei rari livelli coesivi presenti, in corrispondenza dei livelli granulari sono state eseguite prove penetrometriche dinamiche in foro Standard Penetration Test (SPT) per la determinazione del grado di addensamento e della resistenza dei materiali granulari e prove di permeabilità tipo Lefranc per la determinazione dei coefficienti di permeabilità dei terreni.

L'indagine geotecnica è stata inoltre completata con la ricostruzione del modello sismo stratigrafico del sito ai fini della valutazione e del calcolo del parametro $V_{s_{eq}}$, conformemente a quanto previsto dall'OPCM 3274 del 2003 e succ. integrazioni, ordinanza 3519 del 28/04/2006, DM 14/09/2005 – DM 14/01/2008, mediante l'esecuzione di n° 4 stendimenti di sismica attiva del tipo MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves).

2. METODOLOGIA DI INDAGINE

2.1 Sondaggi geognostico geotecnici e prove in situ

I sondaggi geognostico - geotecnici sono stati eseguiti a rotazione con carotaggio integrale a secco del terreno, secondo le modalità previste dalle "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche" AGI (giugno 1977), con percentuali di recupero sempre superiori all' 85%.

Per le operazioni di sondaggio è stata adoperata una perforatrice a testa idraulica autocarrata del tipo PUNTEL PX 600, la perforazione è stata eseguita a secco senza fluidi di perforazione con carotieri semplici del diametro ϕ 101 ÷ 131 mm, azionati ad aste e sempre seguita dal rivestimento provvisorio del foro con diametro decrescente da ϕ 152 mm a 127 mm infissi mediante l'uso di fluido in circolazione rappresentato da acqua pulita.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 62 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

La stabilità del fondo foro è stata assicurata in ogni fase della lavorazione con particolare attenzione mantenendo il battente di flusso in colonna sempre prossimo a bocca foro mediante rabbocchi progressivi specialmente durante l'estrazione del carotiere e delle aste.

Le stratigrafie dei sondaggi redatte da un nostro geologo di cantiere "sperimentatore", sempre presente in cantiere, contengono la classificazione del terreno secondo le (UNI EN ISO 14688-1) di seguito riportata e la descrizione delle prove in sito eseguite.

Tabella 2.1: Descrizione e classificazione del terreno (UNI EN ISO 14688-1)

| Definizione | Diametro dei grani (mm) | Criteri di identificazione |
|-----------------------------|-------------------------|--|
| Blocchi | > 200 | Visibili ad occhio nudo |
| Ciottoli | 63 ÷ 200 | |
| Ghiaia | Grossa 20 ÷ 63 | |
| | Media 6.3 ÷ 20 | |
| | Fine 2 ÷ 6.3 | |
| Sabbia | Grossa 0.63 ÷ 2 | |
| | Media 0.2 ÷ 0.63 | |
| | Fine 0.063 ÷ 0.2 | |
| Limo | 0.002 ÷ 0.063 | Solo se grossolano è visibile a occhio nudo – poco plastico, dilatante, lievemente granulare al tatto – si disgrega velocemente in acqua si essicca velocemente – possiede coesione ma può essere polverizzato fra le dita |
| Argilla | < 0.002 | I frammenti asciutti possono essere rotti, ma non polverizzati fra le dita – si disgrega in acqua lentamente – liscia al tatto – plastica – non dilatante – appiccica alle dita – asciuga lentamente – si ritira durante l'essiccazione. |
| Terreno organico o vegetale | | Contiene una rilevante percentuale di sostanze organiche vegetali |
| Torba | | Predominano resti lignei non mineralizzati, colore scuro, bassa densità. |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 63 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

Nella descrizione dei terreni si è provveduto ad elencare per primo il nome del costituente principale, seguito dal costituente secondario nella forma:

- preceduto dalla congiunzione “con” se rappresenta una percentuale compresa fra il 25 ed il 50%;
- seguito dal suffisso “oso” se rappresenta una percentuale compresa fra il 10 ed il 25%;
- preceduto da “debolmente” e seguito dal suffisso “oso” se rappresenta una percentuale compresa fra il 5 ed il 10%.

La consistenza dei terreni coesivi e semicoesivi è stata descritta con riferimento alla tabella sottostante, misurando la resistenza al penetrometro tascabile (Pocket Penetrometer) ed allo scissometro tascabile (Torvane) sulla carota appena estratta e scortecciata con frequenza di una prova ogni 20 ÷ 30 cm.

Tabella 2.2: Consistenza terreni coesivi

| Definizione | Resistenza al penetrometro tascabile (kPa) | Nspt Colpi/piede | Prove manuali |
|---------------------------|--|------------------|---|
| Privo di consistenza | < 25 | <2 | Espelle acqua quando strizzato fra le dita |
| Poco consistente | 25 ÷ 50 | 2 ÷ 4 | Si modella fra le dita con poco sforzo; si scava facilmente |
| Moderatamente consistente | 50 ÷ 100 | 4 ÷ 8 | Si modella fra le dita con un certo sforzo. Offre una certa resistenza allo scavo |
| Consistente | 100 ÷ 200 | 8 ÷ 15 | Non si modella fra le dita. E' difficile da scavare |
| Molto consistente | 200 ÷ 400 | 15 ÷ 30 | E' molto resistente fra le dita e si scava con molta difficoltà |
| Compatto | > 400 | > 30 | Si incide con difficoltà |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 64 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

Della frazione ghiaiosa e ciottolosa è stato specificato il grado di arrotondamento, con riferimento alla Tabella 2.3 e si è espressa la consistenza in termini di addensamento con riferimento alla Tabella 2.4.

Tabella 2.3: Addensamento terreni granulari

| Nspt | Valutazione dello stato di addensamento | Prove manuali |
|---------|---|--|
| 0 ÷ 4 | Sciolto | Si scava facilmente con un badile |
| 4 ÷ 10 | Poco addensato | Si scava abbastanza facilmente con badile e si penetra con una barra |
| 10 ÷ 30 | Moderatamente addensato | Difficile da scavare con badile, o da penetrare con barra |
| 30 ÷ 50 | Addensato | Molto difficile da penetrare; si scava con piccone |
| > 50 | Molto addensato | Difficile da scavare con piccone |

Tabella 2.4: Arrotondamento dei clasti

| Forma | Definizione | Arrotondamento | Descrizione |
|---|-----------------|----------------|--|
|  | Angolare | 0,00 ÷ 0,15 | Nessuno smussamento |
|  | Sub-angolare | 0,15 ÷ 0,25 | Mantiene forma originale con evidenze di smussamento |
|  | Sub-arrotondata | 0,25 ÷ 0,40 | Smussamento considerevole e riduzione dell'area di superficie del clasto |
|  | Arrotondata | 0,40 ÷ 0,60 | Rimozione delle superfici originali, con qualche superficie piatta |
|  | Ben arrotondata | 0,60 ÷ 1,00 | Superficie interamente compresa da curve ben arrotondate |

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 65 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

Per la classificazione della litologia di origine nel caso di formazioni litoidi o di clasti di terreni granulari grossolani si è fatto riferimento a criteri classificativi relativi ad alcune categorie di comune reperimento.

Tabella 2.5 Rocce sedimentarie terrigene carbonatiche

| Granulometria clasti costituenti | | Definizione | | | |
|----------------------------------|--------|---|------------|--------------------|------------|
| | | Clasti terrigeni | | Clasti carbonatici | |
| Argilla | | Argillite | | Calcilutite | |
| Limo | | Siltite | | Calcsiltite | |
| sabbia | fine | arenaria | Fine | calcarenite | fine |
| | media | | Media | | media |
| | grossa | | Grossolana | | grossolana |
| ghiaia | fine | conglomerato (clasti arrotondati) breccia (clasti angolari) | Fine | calcirudite | Fine |
| | media | | Medio | | Media |
| | grossa | | Grossolana | | grossolana |

Tabella 2.6: Depositi sedimentari terrigeni e carbonatici e termini di transizione

| % CaCO ₃ | Definizione |
|---------------------|----------------------------|
| 0 - 5 | Argilla – argillite |
| 5 - 15 | Argilla debolmente marnosa |
| 15 - 25 | Argilla marnosa |
| 25 - 35 | marna argillosa |
| 35 - 65 | Marna |
| 65 - 75 | marna calcarea |
| 75 - 85 | c. marnosa |
| 85 - 95 | c. debolmente marnosa |
| 95 - 100 | Calcilutite |

Note: è opportuno specificare il grado di cementazione che, spesso, è funzione della % di CaCO₃, anche se non necessariamente. Il contenuto di CaCO₃ può essere stimato in base alla effervescenza dell'acido cloridrico diluito al 5%.

Le carote estratte nel corso della perforazione sono state sistemate in apposite cassette catalogatrici in PVC munite di scomparti divisorii e di coperchio, le

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 66 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

singole cassette sono state fotografate in formato digitale al termine del loro completamento. Al bordo della cassetta è stata posta la carta dei colori di riferimento Kodak (color separation guides).

Le prove di resistenza in foro Standard Penetration Test (SPT) eseguite sono state condotte misurando la resistenza alla penetrazione di un campionatore a pareti grosse infisso a percussione secondo le modalità contenute nella normativa ASTM n. D1586/68: "Standard Penetration Test and Split – Barrel sampling of Soil", e compresa nella "Raccomandazione" ISSMFE per la standardizzazione delle prove penetrometriche in Europa (1976).

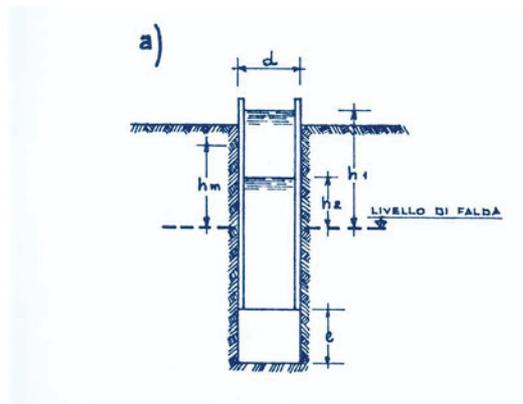
Il dispositivo di percussione utilizzato è costituito da una testa di battuta di acciaio avvitata sulle aste d'infissione del diametro esterno di 50 mm (peso $7,0 \pm 0,5$ kg/m), un maglio di acciaio da 63,5 kg ($\pm 0,5$ kg) ed dispositivo a sganciamento automatico del maglio tale da assicurare una corsa a caduta libera di 0,76 m (0,02 m).

La determinazione del coefficiente di permeabilità, che presenta peraltro sempre difficoltà ed incertezze, salvo nei casi di terreni omogenei ed isotropi con condizioni al contorno perfettamente note, è stata condotta in corrispondenza dei terreni sciolti mediante l'esecuzione di prove di permeabilità tipo Lefranc a carico variabile, alle cui quote sono stati prelevati anche campioni rimaneggiati per la determinazione in laboratorio delle rispettive tessiture granulometriche.

Le prove Lefranc sono state effettuate secondo le modalità previste dalle Raccomandazioni AGI (1977), dopo una accurata pulitura del fondo foro alla quota di prova ed al sollevamento delle tubazioni di rivestimento di un'altezza nota al fine della formazione della tasca drenante, con successivo riempimento con acqua pulita del foro per un'altezza nota e misura della velocità di abbassamento del livello (prova in abbassamento).

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 67 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.



Tutti i fori di sondaggio, al termine delle operazioni di estrazione e campionamento dei suoli, sono stati riempiti con una miscela di cemento e bentonite.

Le quote di prelievo di tutti i campioni, delle prove in foro eseguite e della strumentazione installata con i relativi livelli piezometrici alla data delle indagini è stata riportata nelle apposite colonne del certificato di sondaggio allegati alla presente relazione.

2.2 Indagine geofisica (MASW)

Il metodo di esplorazione geofisica utilizzato per lo studio geofisico atto alla definizione delle caratteristiche sismo-stratigrafiche dei terreni è consistito nella determinazione delle velocità sismiche dei vari strati del sottosuolo caratterizzati da diverse caratteristiche fisico – meccaniche mediante un profilo di sismica a rifrazione con tecnica Masw ai fini della valutazione e del calcolo del parametro VS Equivalente (VS_{EQ}).

La procedura Masw si basa sulla determinazione della velocità delle onde di superficie, il profilo sismico viene eseguito disponendo sul terreno una serie di sensori (geofoni), posti ad intervallo costante, collegati ad un sismografo mediante

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 68 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

un cavo multipolare. Dopo l'allestimento del dispositivo di ricezione si provvede a generare artificialmente (sismica attiva) vibrazioni impulsive in corrispondenza di punti prestabiliti lungo i profili: nello stesso istante di partenza della vibrazione viene trasmesso al sismografo il comando di avvio della registrazione (trigger). Da questo istante inizia l'acquisizione digitale, con campionamento ad intervallo costante e predeterminato, dei segnali ricevuti dai sensori.

Le misure di campagna sono state eseguite mediante un sismografo digitale ECHO 12-24 2002 - AMBROGEO, caratterizzato da 24 canali di acquisizione digitale con dinamica a 24 bit e campionamento del segnale ad intervalli di 130 microsecondi e filtro analogico Low Pass a 50 Hz.

La lunghezza dei profili è stata di 23+10 m, con l'utilizzo di 24 geofoni con frequenza propria 4.5 Hz e distanza intergeofonica di 2.0 m e acquisizione a 7651 Hz per 1 secondo, come sorgente si è utilizzata una mazza battente da 10 kg con trigger (dispositivo per il comando di avvio della registrazione), con energia utilizzata pari a un colpo di mazza per tiro secondo la seguente sequenza:

- i. Tiro n. 1 eseguito -2.0 metri dal geofono n. 1 con finestra di acquisizione pari a 1000 millisecondi;
- ii. Tiro n. 2 eseguito -4.0 metri dal geofono n. 1 con finestra di acquisizione pari a 1000 millisecondi;
- iii. Tiro n. 3 eseguito -6.0 metri dal geofono n. 1 con finestra di acquisizione pari a 1000 millisecondi;
- iv. Tiro n. 4 eseguito -8.0 metri dal geofono n. 1 con finestra di acquisizione pari a 1000 millisecondi;
- v. Tiro n. 5 eseguito -10.0 metri dal geofono n. 1 con finestra di acquisizione pari a 1000 millisecondi.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 69 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

3. MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO DEL SOTTOSUOLO

3.1 Interpretazione geofisica con onde Vs tecnica Masw 1c

Su ognuna delle acquisizioni effettuate è stata eseguita un'analisi ω -p (trasformata τ -p e trasformata di Fourier) al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh.

L'inversione della curva di dispersione con il metodo phase shift utilizzando la tecnica di calcolo degli algoritmi genetici.

Si riportano di seguito gli spettri di velocità di fase e di gruppo sui quali è identificata la curva di dispersione delle onde di Rayleigh (Figura 3.1:).

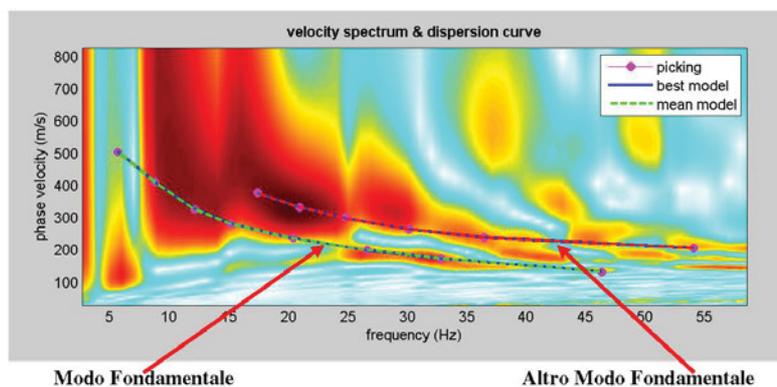


Figura 3.1: Masw 1c: Grafici ad Isolinee nel dominio velocità di fase – frequenza.

Di seguito vengono riportati in Figura 3.2 il confronto tra la curva di dispersione sperimentale modello migliore (celeste) e modello medio (rosso), ed in Figura 3.3 il profilo di velocità delle onde S associato alla curva teorica.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 70 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

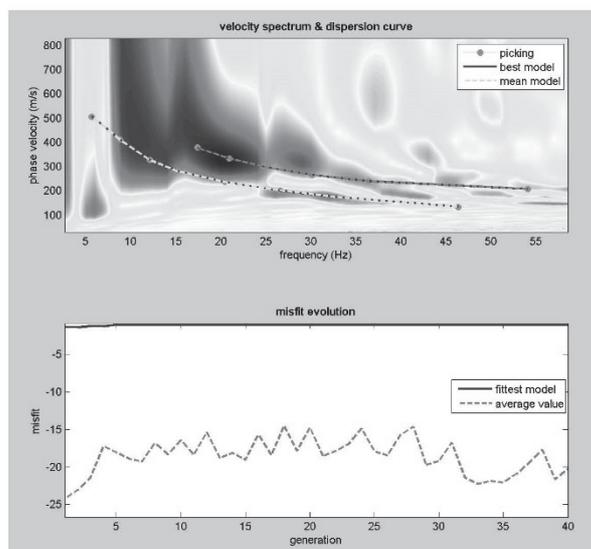


Figura 3.2: Confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

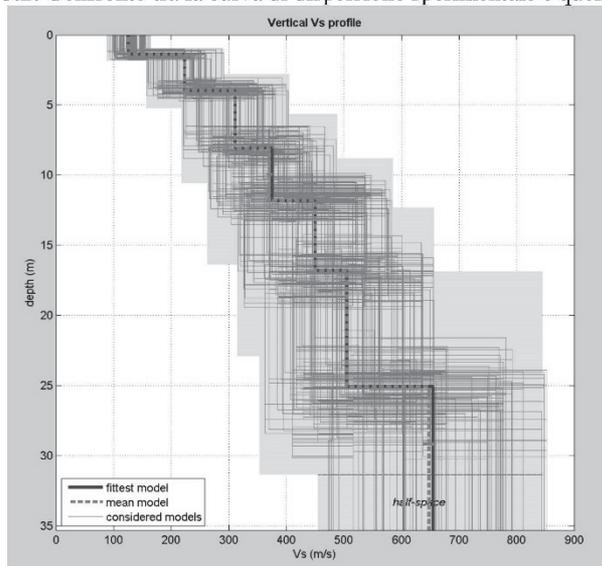


Figura 3.3: Profilo di velocità delle onde S stimato nel sito in esame.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 71 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

Il miglior *fit* tra i dati sperimentali e la curva teorica si ottiene con il modello dato in Tabella 3.1, l'andamento delle Vs è illustrato in Figura 3.3.

Tabella 3.1: Modello di velocità delle onde S per il sito in esame

| Strato | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Spessore |
|--------|----------|----------|----------|
| 1 | 261 | 126 | 1.4 |
| 2 | 475 | 224 | 2.6 |
| 3 | 649 | 311 | 4.1 |
| 4 | 780 | 371 | 3.7 |
| 5 | 933 | 450 | 5.0 |
| 6 | 1028 | 505 | 8.2 |
| 7 | 1225 | 648 | Inf. |

$V_{SEQ} = 370 \text{ m/s}$

Suolo di tipo B

La dicitura "infinito" indica che è stata raggiunta la profondità massima di indagine, mentre con il programma Deepsoil v.3.5 dell'Università dell'Illinois è stato calcolato il bedrock o meglio il bedrock-like (700 m/s). Esso risulta rilevante ai fini degli effetti di sito, perché tale strato presenta forti contrasti di impedenza rispetto ai terreni sovrastanti, potendo così determinare in questi ultimi l'intrappolamento delle onde sismiche e dunque l'amplificazione del moto del suolo in caso di terremoto.

N.B. Le velocità sismiche Vp sono ottenute da formule empiriche

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 72 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

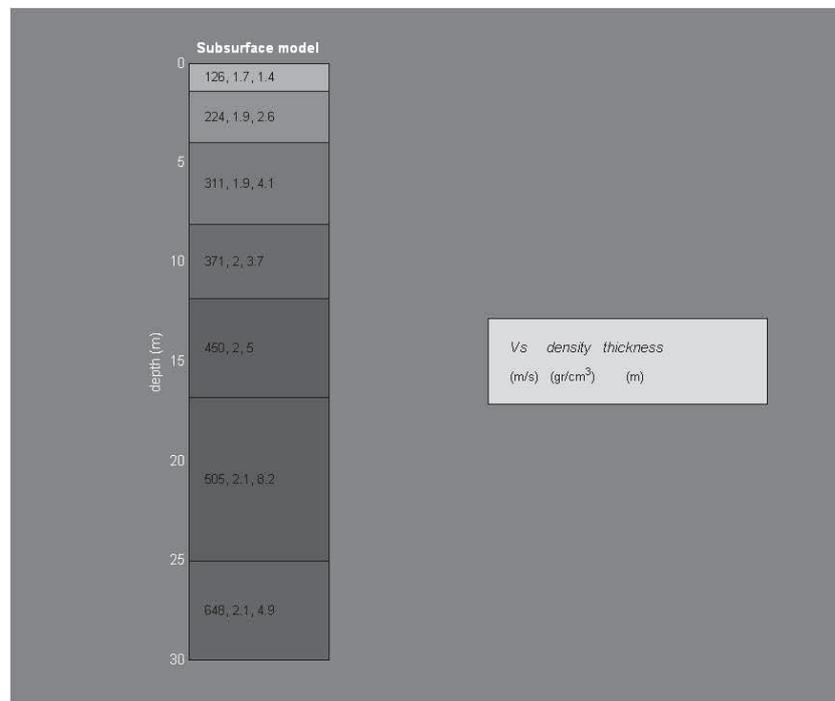


Figura 3.4: Stratigrafia dei terreni

3.2 Interpretazione geofisica con onde Vs tecnica Masw 2c

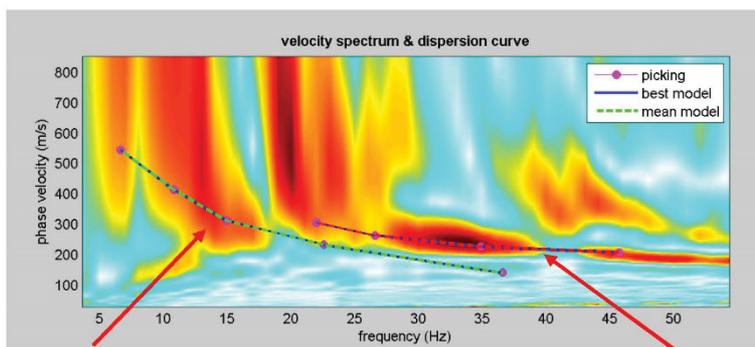
Su ognuna delle acquisizioni effettuate è stata eseguita un'analisi ω -p (trasformata τ -p e trasformata di Fourier) al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh.

L'inversione della curva di dispersione con il metodo phase shift utilizzando la tecnica di calcolo degli algoritmi genetici.

Si riportano di seguito gli spettri di velocità di fase e di gruppo sui quali è identificata la curva di dispersione delle onde di Rayleigh (Figura 3.1:5).

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 73 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.



Modo Fondamentale

Altro Modo Fondamentale

Figura 3.5: Masw 2c: Grafici ad Isolinee nel dominio velocità di fase – frequenza.

Di seguito vengono riportati in Figura 3.6 il confronto tra la curva di dispersione sperimentale modello migliore (celeste) e modello medio (rosso), ed in Figura 3.7 il profilo di velocità delle onde S associato alla curva teorica.

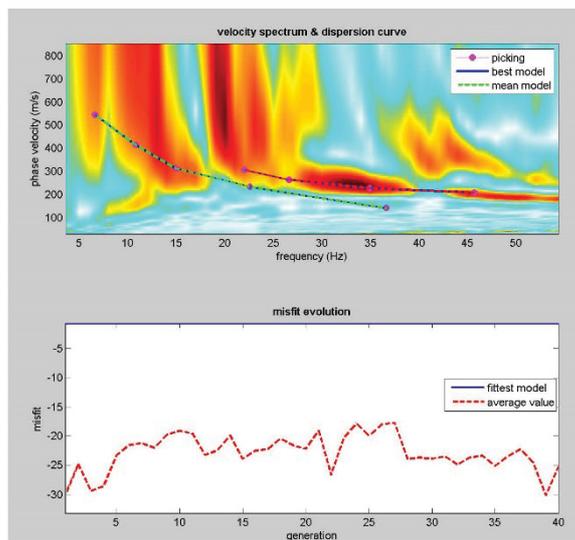


Figura 3.6: Confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 74 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

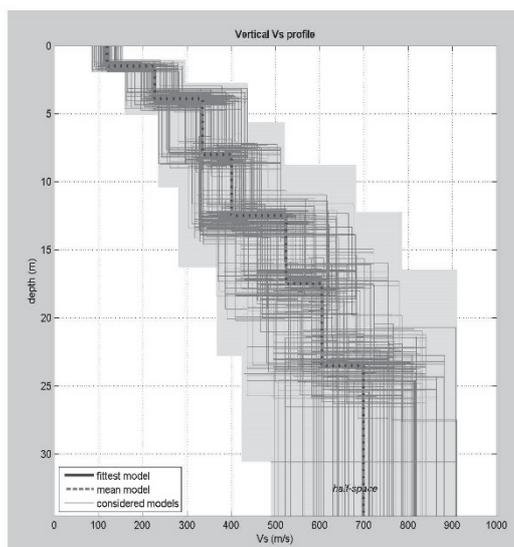


Figura 3.7: Profilo di velocità delle onde S stimato nel sito in esame.

Il miglior *fit* tra i dati sperimentali e la curva teorica si ottiene con il modello dato in Tabella 3.2, l'andamento delle Vs è illustrato in Figura 3.7.

Tabella 3.2: Modello di velocità delle onde S per il sito in esame

| Strato | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Spessore |
|--------|----------|----------|----------|
| 1 | 244 | 120 | 1.5 |
| 2 | 510 | 228 | 2.4 |
| 3 | 682 | 336 | 4.1 |
| 4 | 813 | 401 | 4.5 |
| 5 | 1100 | 525 | 5.0 |
| 6 | 1350 | 605 | 6.0 |
| 7 | 1284 | 700 | Inf. |

VS_{EQ} = 399 m/s Suolo di tipo B

La dicitura “infinito” indica che è stata raggiunta la profondità massima di indagine, mentre con il programma Deepsoil v.3.5 dell'Università dell'Illinois è stato calcolato il bedrock o meglio il bedrock-like (700 m/s). Esso

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 75 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

risulta rilevante ai fini degli effetti di sito, perché tale strato presenta forti contrasti di impedenza rispetto ai terreni sovrastanti, potendo così determinare in questi ultimi l'intrappolamento delle onde sismiche e dunque l'amplificazione del moto del suolo in caso di terremoto.

N.B. Le velocità sismiche V_p sono ottenute da formule empiriche

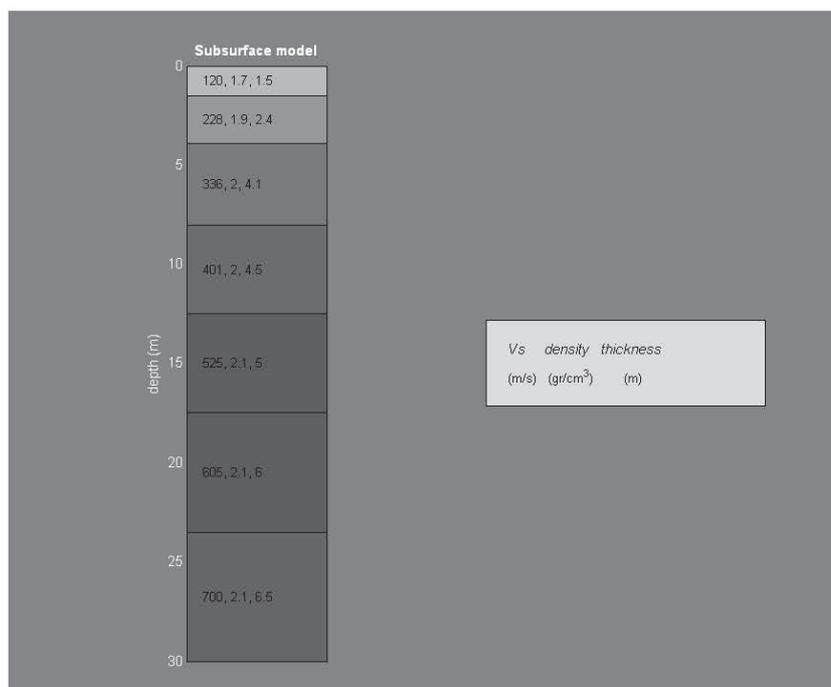


Figura 3.8: Stratigrafia dei terreni

3.3 Interpretazione geofisica con onde V_s tecnica Masw 3c

Su ognuna delle acquisizioni effettuate è stata eseguita un'analisi ω - p (trasformata τ - p e trasformata di Fourier) al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 76 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

L'inversione della curva di dispersione con il metodo phase shift utilizzando la tecnica di calcolo degli algoritmi genetici.

Si riportano di seguito gli spettri di velocità di fase e di gruppo sui quali è identificata la curva di dispersione delle onde di Rayleigh (Figura 3.9).

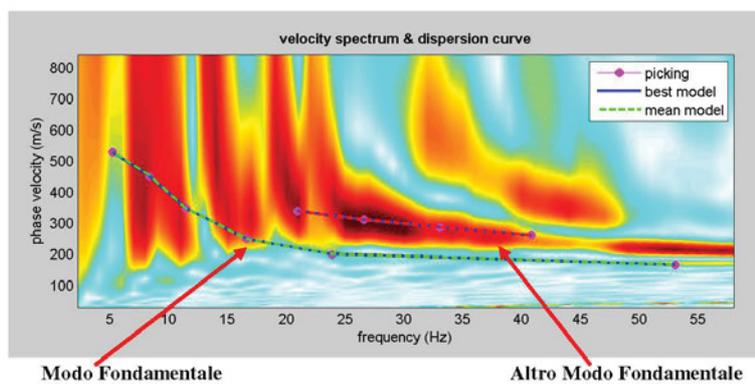


Figura 3.9: Masw 3c: Grafici ad Isolinee nel dominio velocità di fase – frequenza.

Di seguito vengono riportati in Figura 3.10 il confronto tra la curva di dispersione sperimentale modello migliore (celeste) e modello medio (rosso), ed in Figura 3.11 il profilo di velocità delle onde S associato alla curva teorica.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 77 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

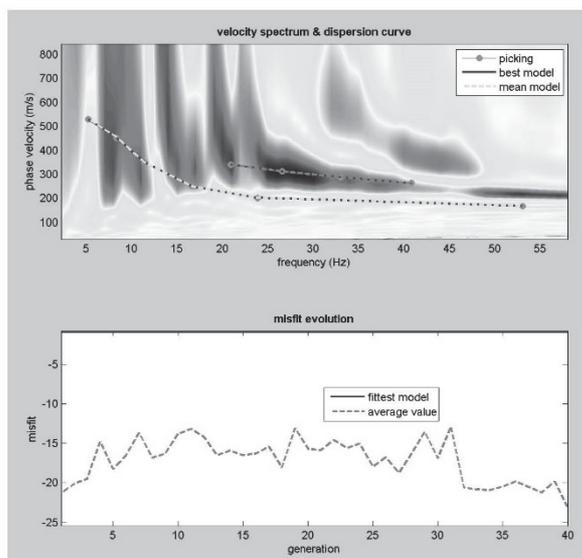


Figura 3.10: Confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

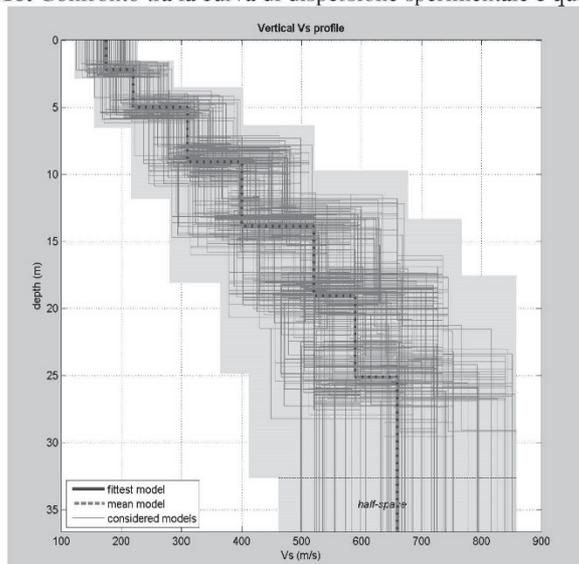


Figura 3.11: Profilo di velocità delle onde S stimato nel sito in esame.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 78 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

Il miglior *fit* tra i dati sperimentali e la curva teorica si ottiene con il modello dato in Tabella 3.3, l'andamento delle Vs è illustrato in Figura 3.11.

Tabella 3.3: Modello di velocità delle onde S per il sito in esame

| Strato | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Spessore |
|--------|----------|----------|----------|
| 1 | 359 | 175 | 2.2 |
| 2 | 485 | 221 | 2.8 |
| 3 | 649 | 310 | 4.1 |
| 4 | 836 | 401 | 4.8 |
| 5 | 1056 | 521 | 5.2 |
| 6 | 1256 | 590 | 6.0 |
| 7 | 1246 | 660 | Inf. |

$V_{SEQ} = 385 \text{ m/s}$

Suolo di tipo B

La dicitura "infinito" indica che è stata raggiunta la profondità massima di indagine, mentre con il programma Deepsoil v.3.5 dell'Università dell'Illinois è stato calcolato il bedrock o meglio il bedrock-like (700 m/s). Esso risulta rilevante ai fini degli effetti di sito, perché tale strato presenta forti contrasti di impedenza rispetto ai terreni sovrastanti, potendo così determinare in questi ultimi l'intrappolamento delle onde sismiche e dunque l'amplificazione del moto del suolo in caso di terremoto.

N.B. Le velocità sismiche Vp sono ottenute da formule empiriche

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 79 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.



Figura 3.12: Stratigrafia dei terreni

3.4 Interpretazione geofisica con onde Vs tecnica Masw 3t

Su ognuna delle acquisizioni effettuate è stata eseguita un'analisi ω -p (trasformata τ -p e trasformata di Fourier) al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh.

L'inversione della curva di dispersione con il metodo phase shift utilizzando la tecnica di calcolo degli algoritmi genetici.

Si riportano di seguito gli spettri di velocità di fase e di gruppo sui quali è identificata la curva di dispersione delle onde di Rayleigh (Figura 3.13).

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 80 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

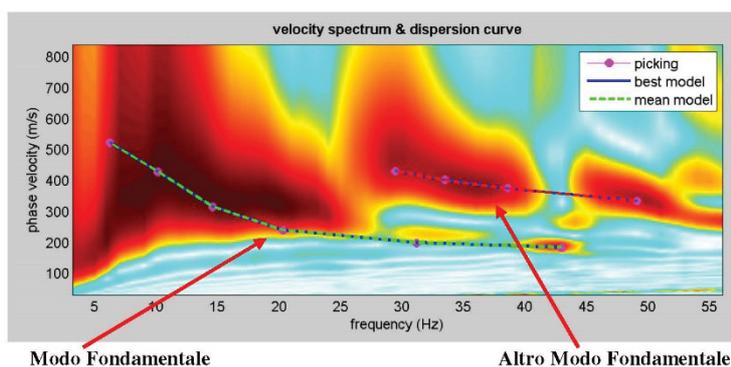


Figura 3.13: Masw 3t: Grafici ad Isolinee nel dominio velocità di fase – frequenza.

Di seguito vengono riportati in Figura 3.14 il confronto tra la curva di dispersione sperimentale modello migliore (celeste) e modello medio (rosso), ed in Figura 3.15 il profilo di velocità delle onde S associato alla curva teorica.

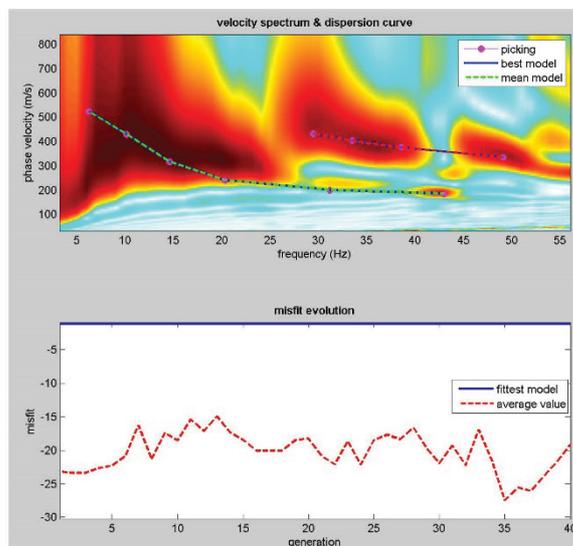


Figura 3.14: Confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 81 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

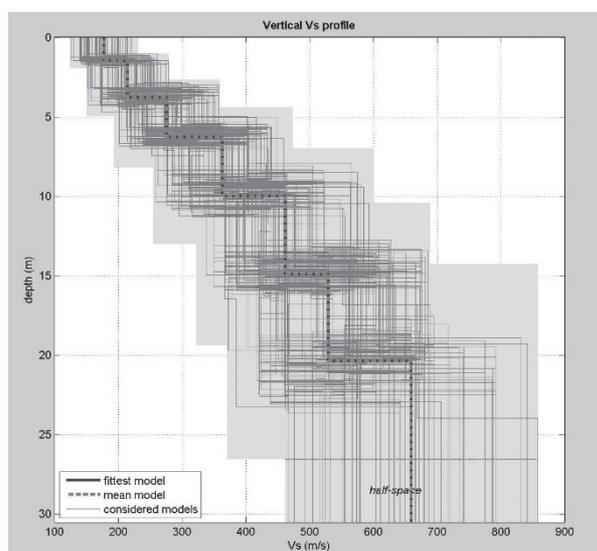


Figura 3.15: Profilo di velocità delle onde S stimato nel sito in esame.

Il miglior *fit* tra i dati sperimentali e la curva teorica si ottiene con il modello dato in Tabella 3.4, l'andamento delle Vs è illustrato in Figura 3.15.

Tabella 3.4: Modello di velocità delle onde S per il sito in esame

| Strato | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Spessore |
|--------|----------|----------|----------|
| 1 | 385 | 178 | 1.5 |
| 2 | 452 | 215 | 2.3 |
| 3 | 589 | 276 | 2.5 |
| 4 | 747 | 364 | 3.7 |
| 5 | 991 | 462 | 4.9 |
| 6 | 1094 | 530 | 5.5 |
| 7 | 1233 | 660 | Inf. |

VS_{EQ} = 406 m/s Suolo di tipo B

La dicitura "infinito" indica che è stata raggiunta la profondità massima di indagine, mentre con il programma Deepsoil v.3.5 dell'Università dell'Illinois è stato calcolato il bedrock o meglio il bedrock-like (700 m/s). Esso

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 82 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

risulta rilevante ai fini degli effetti di sito, perché tale strato presenta forti contrasti di impedenza rispetto ai terreni sovrastanti, potendo così determinare in questi ultimi l'intrappolamento delle onde sismiche e dunque l'amplificazione del moto del suolo in caso di terremoto.

N.B. Le velocità sismiche V_p sono ottenute da formule empiriche

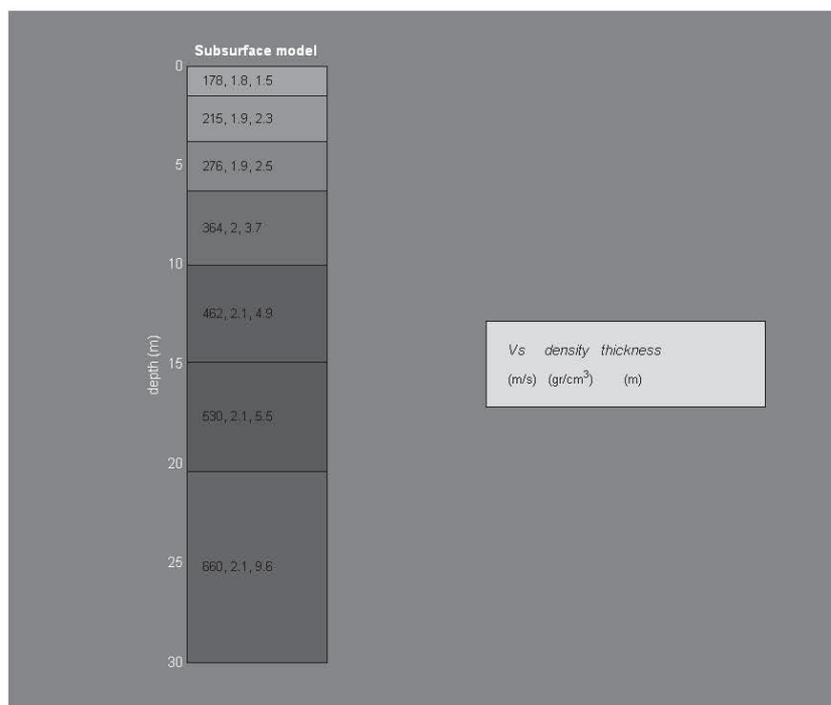


Figura 3.16: Stratigrafia dei terreni

3.5 Fattori di Frequenza

L'andamento della funzione di amplificazione di un sito, è periodica ed assume sempre valori maggiori o uguali all'unità, cioè l'ampiezza dello spostamento alla superficie dello strato è sempre almeno pari a quella in

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 83 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

corrispondenza della formazione rocciosa (secondo normativa vigente $V_s > 800 \text{ m/s}$).
 La *frequenza naturale* (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione: $F_n = \omega_n / 2\pi = (V_s / 4H) * (2n-1)$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la *risonanza* dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito.

| | |
|---|---------------|
| Frequenza risonanza superficie formazione bedrock-like - MW 1c | 3.5 Hz |
| Frequenza risonanza superficie formazione bedrock-like - MW 2c | 4.2 Hz |
| Frequenza risonanza superficie formazione bedrock-like - MW 3c | 3.7 Hz |
| Frequenza risonanza superficie formazione bedrock-like - MW 3t | 4.3 Hz |

Nel caso che una sollecitazione si prolunga nel tempo essa può diventare particolarmente pericolosa per l'edificio, progettato come elastico, quando il terreno trasmette una componente del segnale sismico che abbia la stessa frequenza di oscillazione della struttura:

- Frequenza di oscillazione del terreno $< F_n$ frequenza naturale di oscillazione della struttura → i danni sono "limitati"
- Frequenza di oscillazione del terreno = F_n frequenza naturale di oscillazione della struttura → i danni sono "illimitati".

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

freq. Naturale edificio $\approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$

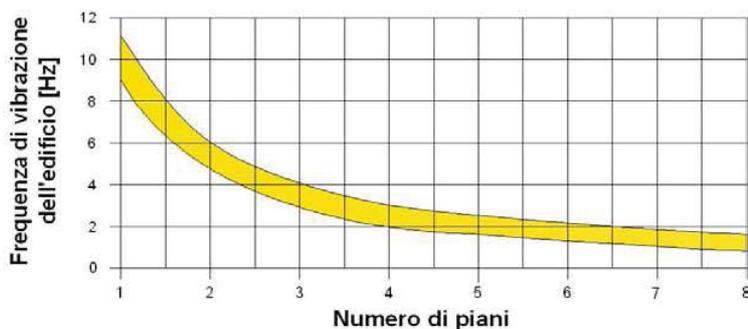
| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 84 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

È la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

freq. naturale edificio \approx freq. fondamentale di risonanza del sito

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.



3.6 Fattori di Amplificazione sismico locale

La normativa nazionale e regionale propone, per la definizione delle amplificazioni sismiche locali, l'impiego di apposite tabelle (come sopra citate) riferite a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche del territorio nazionale. Tuttavia è consentita la stima del fattore di amplificazione sismico locale mediante un'apposita indagine sismica del sito, come è stato fatto per il caso in esame.

Con il termine di risposta sismica locale si intende l'insieme delle modifiche che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base posta ad una certa profondità nel sottosuolo, subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie.

La teoria assume un livello di riferimento "sismico" pari alla velocità V_s misurata nel substrato roccioso (800 m/s) o in alternativa ad un livello (come nel nostro sito) in cui la V_s dello strato superficiale vada in risonanza con uno strato sismico profondo da cui è stato calcolato quanto segue:

| | | | |
|---|--|----------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  | COMMESSA 023093 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ MALBORGHETTO (UD) | SPC. 00-CI-E-10001 | |
| | PROGETTO Adeguamento Impianto di Compressione gas di Malborghetto | Fg. 85 di 249 | Rev. 0 |

GEOTECNICA VENETA S.r.l.

MW 1c:

| | |
|--|----------|
| Fattore di amplificazione sismico locale | Fa= 1.00 |
| Fattore di amplificazione sismico di picco | Fa= 1.40 |
| Periodo | 0.29 s |

MW 2c:

| | |
|--|----------|
| Fattore di amplificazione sismico locale | Fa= 0.90 |
| Fattore di amplificazione sismico di picco | Fa= 1.33 |
| Periodo | 0.24 s |

MW 3c:

| | |
|--|----------|
| Fattore di amplificazione sismico locale | Fa= 0.96 |
| Fattore di amplificazione sismico di picco | Fa= 1.38 |
| Periodo | 0.27 s |

MW 3t:

| | |
|--|----------|
| Fattore di amplificazione sismico locale | Fa= 0.92 |
| Fattore di amplificazione sismico di picco | Fa= 1.38 |
| Periodo | 0.23 s |

dott. geologo
Diego Mortillaro



