



REGIONE PUGLIA
 PROVINCIA DI FOGGIA
 COMUNI DI FOGGIA E MANFREDONIA



PROGETTO IMPIANTO AGRIVOLTAICO AVANZATO DA REALIZZARE NEL COMUNE DI FOGGIA (FG) IN LOCALITA' "PEZZAGRANDE" AL FOGLIO N.161 P.LLA N. 2, E NEL COMUNE DI MANFREDONIA IN LOCALITA' "VACCHERECCIA DI GRECO" AL FOGLIO N. 129 ALLE P.LLE NN. 17, 142, 498, 500 E 512, E IN LOCALITA' "MACCHIAROTONDA" AL FOGLIO N. 131 P.LLE NN.13, 206 E 207, E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN DA REALIZZARE NEL COMUNE DI MANFREDONIA (FG) IN LOCALITA' "MACCHIAROTONDA" AL FOGLIO N. 128 ALLE P.LLE NN. 45, 79, 113 E 169 E AL FOGLIO N. 129 ALLE P.LLE NN. 481, 485 E 486, AVENTE UNA POTENZA PARI A **30.038,68 kWp**, DENOMINATO "**MARTILLO**"

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE GEOTECNICA DEL PROGETTO DEFINITIVO



**IMPIANTO
 AGRIVOLTAICO
 AVANZATO**

**LAOR
 (Land Area
 Occupation Ratio)
 13,96%**

LIV. PROG.	RIF. COD. PRATICA TERNA	CODICE ISTANZA AU	TAVOLA	DATA	SCALA
PD	202200828	GWWF184	A.3	20.10.2023	-

REVISIONI

REV.	DATA	DESCRIZIONE	ESEGUITO	VERIFICATO	APPROVATO

RICHIEDENTE E PRODUTTORE

ENTE

FIVE-E

RESPONSIBLE INVESTMENT

HF SOLAR II S.r.l. - Viale Francesco Scaduto n°2/D - 90144 Palermo (PA)

FIRMA RESPONSABILE

PROGETTAZIONE

PROFESSIONISTA INCARICATO

HORIZONFIRM

Ing. D. Siracusa
 Ing. A. Costantino
 Ing. C. Chiaruzzi
 Ing. G. Schillaci
 Ing. G. Buffa
 Ing. M.C. Musca

Arch. M. Gullo
 Arch. A. Calandrino
 Arch. S. Martorana
 Arch. F. G. Mazzola
 Arch. G. Vella
 Dott. Agr. B. Miciluzzo

HORIZONFIRM S.r.l. - Viale Francesco Scaduto n°2/D - 90144 Palermo (PA)

FIRMA DIGITALE PROFESSIONISTA

FIRMA OLOGRAFA E TIMBRO



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

INDICE

1- Premessa e Inquadramento Normativo	Pag. 2
2- Inquadramento Area d'intervento	Pag. 7
2.1-Ubicazione area d'intervento	Pag. 7
3 – Lineamenti Geologici e Geomorfologici generali	Pag. 10
4 – Caratterizzazione dei litotipi locali e assetto litostratigrafico	Pag. 14
4.1 - Geolitologia	Pag. 14
4.2 - Geomorfologia	Pag. 21
5 – Pianificazione ed esecuzione delle indagini	Pag. 26
5.1 – Stendimento Sismico e MASW	Pag. 26
5.2 – Risultati Indagini Eseguite	Pag. 28
6 – Successione Litostratigrafica	Pag. 30
7 – Sismicità	Pag. 34
7.1 – Inquadramento Sismico	Pag. 34
8 – Caratteri Fisico – Meccanici geotecnici del terreno	Pag. 43
9 – Conclusioni	Pag. 44

APPENDICE

Risultati Indagini Dirette ed Indirette **Allegato n. 1**

Calcoli Portanza Palo **Allegato n. 2**



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo"

- **1 – PREMESSA**

- **E INQUADRAMENTO NORMATIVO**

Su incarico della Società HF SOLAR 11 S.r.l con sede in Viale Francesco Scaduto n. 2/D – 90144 Palermo la scrivente, *Dott.ssa Giovanna Amedei*, Geologa, iscritta all'O.R.G. della Puglia al n. 438 e con studio professionale in Rodi Garganico, alla Via Pietro Nenni n. 4, ha redatto la presente relazione volta alla definizione del quadro geologico, geologico-tecnico ed ambientale dei terreni interessati dal ***“PROGETTO IMPIANTO AGRIVOLTAICO AVANZATO DA REALIZZARE NEL COMUNE DI FOGGIA (FG) IN LOCALITA' "PEZZAGRANDE" AL FOGLIO N.161 P.LLA N. 2, E NEL COMUNE DI MANFREDONIA IN LOCALITA' " VACCHERECCIA DI GRECO " AL FOGLIO N. 129 ALLE P.LLE NN. 17, 142, 498, 500 E 512, E IN LOCALITA' "MACCHIAROTONDA" AL FOGLIO N. 131 P.LLE NN.13, 206 E 207, E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN DA REALIZZARE NEL COMUNE DI MANFREDONIA (FG) IN LOCALITA' "MACCHIAROTONDA" AL FOGLIO N. 128 ALLE P.LLE NN. 45, 79, 113 E 169 E AL FOGLIO N. 129 ALLE P.LLE NN. 481,485 E 486, AVENTE UNA POTENZA PARI A 30.038,68 kWp, DENOMINATO "MARTILLO"***



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

Il progetto prevede la realizzazione di un impianto agrivoltaico con relative opere di connessione alla RTN. L’impianto sarà collegato all’area individuata per la connessione alla RTN attraverso cavidotti interrati a 30 kV, ricadente in territorio comunale di Foggia e di Manfredonia che interesseranno principalmente la viabilità pubblica eccetto che per un tratto individuato nel comune di Manfredonia che attraverserà terreni di privati sino alla SSE di Utenza.

L’impianto sarà così suddiviso:

- la parte di impianto sita in agro di Foggia in Località Pezzagrande e in agro di Manfredonia in località Macchiarotonda, risiederà su un appezzamento di terreno denominato “Plot 1”, avente un’estensione di circa 49,5 Ha;
- la parte di impianto sita in agro di Manfredonia in località Vacchereccia di Greco, avente un’estensione di circa 32,2 Ha.

Le caratteristiche tecniche del progetto sono meglio descritte nella Relazione Tecnica, a firma dei progettisti, che è parte integrante della presente relazione.

È stata così programmata una campagna di studi nel rispetto del DM. 17.01.2018 - *Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni»*, che ha previsto uno schema di lavoro come di seguito riportato:

- Inquadramento geologico dell’area, per la definizione delle caratteristiche geologiche, tettonico/strutturali generali, geomor-



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo"

fologiche e idrogeologiche generali - [pericolosità geologica del territorio];

- Rilevamento geologico di dettaglio, di un'area sufficientemente ampia, entro la quale ricade l'intervento in oggetto, per la definizione geologica, geomorfologica, idrogeologica locali, con particolare riferimento alla caratterizzazione della natura e del tipo di strutture sedimentarie dei corpi geologici presenti - [controllo litologico di dettaglio];
- Indagini geognostiche in sito, per la definizione delle caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione interessati dalle opere in progetto - [accertamento litotecnico].
- Analisi delle indagini geognostiche, con l'interpretazione delle indagini di campagna e la valutazione delle proprietà elastiche e meccaniche dei terreni investigati [definizione portanza del terreno di fondazione].

Durante la fase preliminare di studio è stata effettuata una ricerca bibliografica alla quale è seguita un esame fotointerpretativo e un successivo rilievo di superficie per verificare lo stato dei luoghi e l'idoneità delle indagini geognostiche in questo caso già eseguite.

La campagna di indagini già eseguita e riscontrabile nella relazione geologica è consistita in:

- n. 2 profili sismici con la tecnica passiva MASW (metodo Re.Mi.);
- n. 2 profili sismici a rifrazione in onde P.



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

Le considerazioni tecniche conclusive sono state ponderate in funzione della conoscenza geologica della zona e dell’attendibilità dei dati ottenuti, operando con un giusto grado di cautela nella definizione delle principali caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni, avvalendosi anche di studi pregressi realizzati nello stesso ambito di riferimento

Dal punto di vista Legislativo, invece, si sono tenute in debito conto le indicazioni programmatiche e tecniche, oltre che le norme, contenute nei seguenti provvedimenti:

*Decreto Ministeriale 14.01.2008 (G.U. 4 febbraio 2009 n. 29 – Suppl. Ord.)
“Norme tecniche per le costruzioni”*

*Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Istruzioni per l’applicazione delle
“Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008, Circolare
2 febbraio 2009;*

*Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Pericolosità sismica e Criteri generali
per la classificazione sismica del territorio nazionale, Allegato al voto n. 36 del
27.07.2007*

*Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 2 febbraio 2009, n.
617 (G.U. del 26 febbraio 2009, n. 47);*

*“Istruzioni per l’applicazione delle Norme Tecniche delle Costruzioni di cui al
D.M. 14 gennaio 2008”. Eurocodice 7 –“ Progettazione geotecnica” –ENV 1997
–1;*

*D.G.R. 2 marzo 2004, n. 153 -L.R. 20/00 -O.P.C.M. 3274/03 –Individuazione del-
le zone sismiche del territorio regionale e delle tipologie di edifici ed opere stra-
tegici e rilevanti -Approvazione del programma temporale e delle indicazioni per*



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

le verifiche tecniche da effettuarsi sugli stessi

In termini documentali, invece, si è considerata la seguente documentazione:

1. ISPRA: *Pericolosità e rischio idrogeologico* - <https://idrogeo.isprambiente.it>;
2. *Zonazione sismogenetica ZS4 adottata dal GNDT nel 1996 e relativa legenda* (fonte: <http://emidius.mi.ingv.it>);
3. ISPRA – Progetto CARG: “Carta Geologica d’Italia”, scala 1:50.000;
4. *Cartografia PAI Regione Puglia*



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

2 - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA

L'impianto agrivoltaico avanzato sarà realizzato all'interno del territorio comunale di Foggia (FG) in Località Pezzagrande, nel territorio comunale di Manfredonia (FG) in Località Vacchereccia di Greco e in Località Macchiarotonda mentre le relative opere di connessione alla RTN sono individuate in agro di Manfredonia in località Macchiarotonda, con la realizzazione della Sottostazione Elettrica di Utenza). L'impianto sarà collegato all'area individuata per la connessione alla RTN attraverso cavidotti interrati a 30 kV, ricadente in territorio comunale di Foggia e di Manfredonia che interesseranno principalmente la viabilità pubblica eccetto un tratto individuato all'interno del Foglio 129 del comune di Manfredonia che attraverserà terreni di privati sino alla SSE di Utenza.

Dal punto di vista cartografico, le aree oggetto dell'indagine, si collocano sulla CTR alla scala 1:5.000 nelle Sezioni N°409092, 409103, 409131, 409132, 409143, 409144 e nell'IGM n° 409 nella serie in scala 1:50.000.

L'impianto sarà così suddiviso:

- la parte di impianto sita in agro di Foggia in Località Pezzagrande e in agro di Manfredonia in località Macchiarotonda, risiederà su un appezzamento di terreno denominato “Plot 1”. Questo è posto ad un'altitudine media di circa **29.00** m.s.l.m., di forma poligonale irregolare,avente un'estensione di circa **49,5 Ha**.



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

- la parte di impianto sita in agro di Manfredonia in località Vacchereccia di Greco, risiederà su un appezzamento di terreno denominato “Plot 2”. Questo è posto ad un’altitudine media di circa **25.00** m.s.l.m., di forma poligonale abbastanza regolare, avente un’estensione di circa **32,2 Ha**.

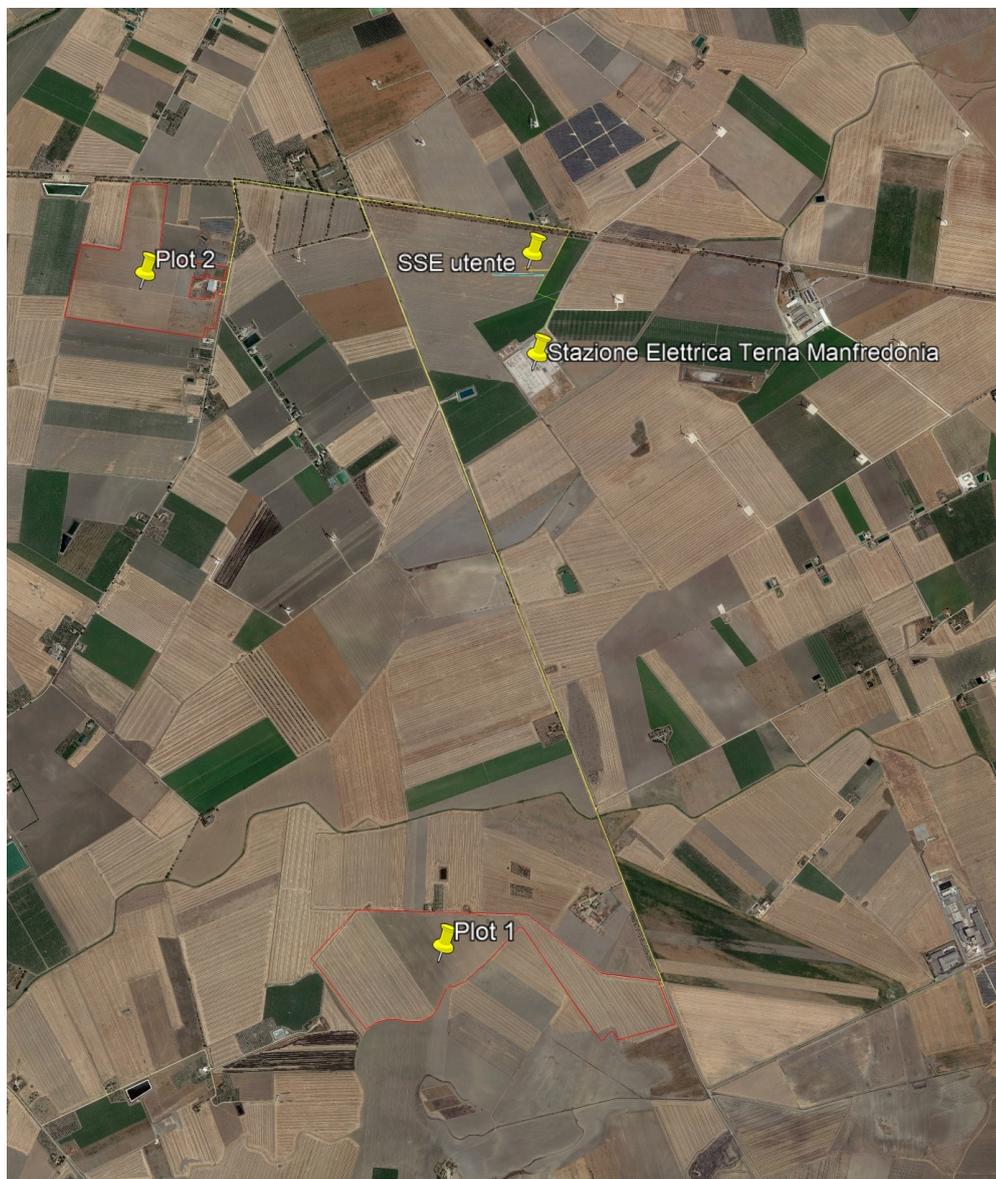


Fig. 1: Ubicazione dell’area d’intervento



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vaccherecchia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

Dal punto di vista catastale le aree sono individuabili secondo il prospetto allegato:

<i>Comune</i>	<i>Località</i>	<i>Fgl di Mappa</i>	<i>P.lle</i>
<i>Foggia</i>	<i>Pezzagrande</i>	<i>161</i>	<i>2</i>
<i>Manfredonia</i>	<i>Vaccherecchia di Greco</i>	<i>129</i>	<i>17, 142, 498, 500, 512</i>
<i>Manfredonia</i>	<i>Macchiarotonda</i>	<i>131</i>	<i>13, 206, 207</i>
<i>Manfredonia</i>	<i>Macchiarotonda</i>	<i>129</i>	<i>481, 485, 486</i>
<i>Manfredonia</i>	<i>Macchiarotonda</i>	<i>128</i>	<i>45, 79, 113, 169</i>



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

3.1 – Geologia Generale

La storia geologica della Regione Puglia si inquadra all’interno del contesto dei complessi e differenziati processi geologici che, secondo la teoria della tettonica a zolle, hanno contraddistinto l’evoluzione dell’area mediterranea riguardo la genesi della Penisola italiana. In tale contesto evolutivo, il territorio pugliese costituiva in origine una propaggine del margine settentrionale del Paleocontinente africano.

Durante il Triassico, a seguito della frammentazione della Pangea e dell’apertura dell’Oceano ligure- piemontese, questo settore crostale subì una progressiva sommersione controllata da una tettonica di tipo estensionale. Per tutto il Trias superiore, la sedimentazione terrigena fu sostituita da depositi evaporitici, anidritico gessosi e carbonatici di ambiente epicontinentale.

Successivamente, durante il Giurassico e il Cretacico, il margine settentrionale della zolla africana si scompose in più frammenti probabilmente a seguito di una tettonica disgiuntiva, attivata da differenti tipi di faglie. Sui diversi frammenti, di cui uno costituì il promontorio africano, si impiantarono estese piattaforme carbonatiche con interposti bacini pelagici, caratterizzati da attiva sedimentazione.

Nel territorio pugliese, le successioni carbonatiche sia di piattaforma (Piattaforma carbonatica apula) sia di bacino marginale (Bacino



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

est - garganico) del Giura superiore e del Cretaceo sono ben esposte nel massiccio del Gargano. Le successioni affioranti nell’altopiano murciano e nelle Serre salentine, invece, hanno età cretacea e presentano essenzialmente facies di piattaforma interna. L’area del Tavoliere, in cui ricade l’area di impianto, è costituita da unità plio-pleistoceniche della Fossa Bradanica e dell’avampaese (Fig. 2)

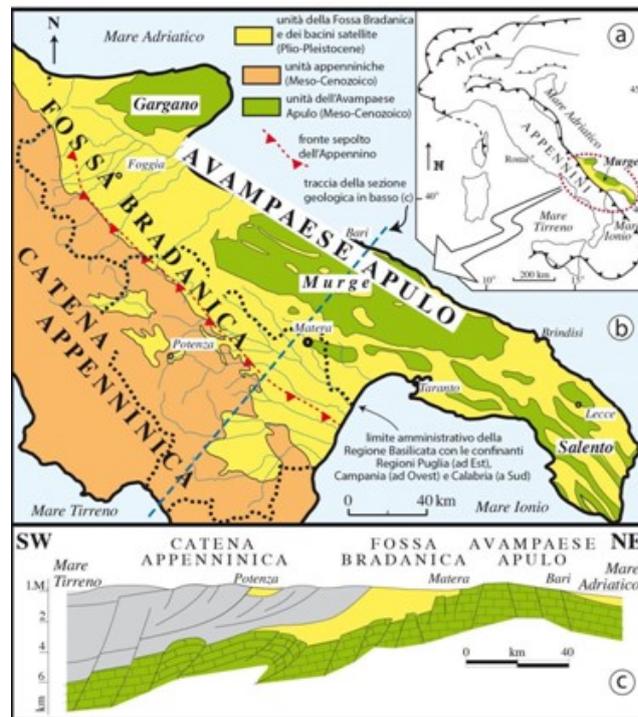


Fig. 2: Schema geologico schematico della Fossa Bradanica e delle aree limitrofe (da Cotecchia V., 2014).

Dal punto di vista geologico nel Tavoliere affiorano litotipi di diversa natura ed età che, sulla base dei caratteri litostratigrafici e in considerazione dell’area geografica di appartenenza, possono essere attribuiti ai seguenti complessi stratigrafici:



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo

- Complesso delle unità della Catena Appenninica (Cretaceo – Pliocene medio);
- Complesso delle unità dell'Avampaese Apulo (Cretaceo – Pleistocene sup.);
- Complesso delle unità del Tavoliere (Pliocene – Olocene).

I rapporti tra i diversi complessi sono espressi, in modo schematico, nella sezione geologica di Fig. 3.

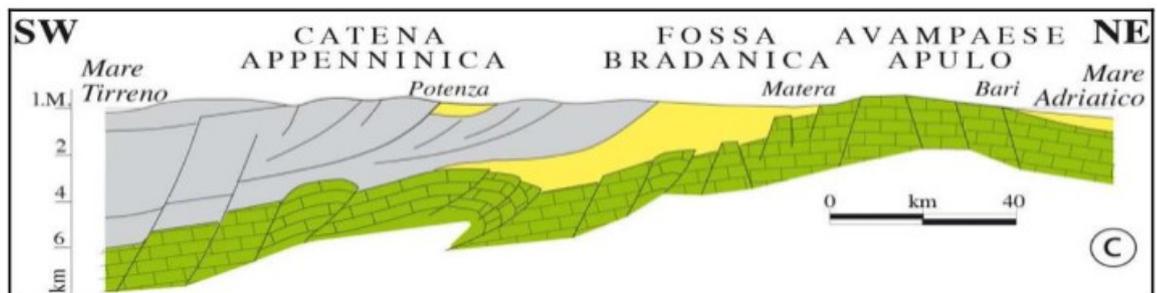


Fig. 3: Sezione Geologica Schematica dei rapporti Stratigrafici

Inoltre il Tavoliere, inteso come macrostruttura costituente parte del sistema di avanfossa, risulta a sua volta solcato da sistemi di faglie che lo suddividono in vari settori dislocati nel sottosuolo a profondità variabili.

In particolare, il Tavoliere centro-meridionale risulta delimitato da importanti lineazioni tettoniche a direzione anti-appenninica (ENE-WSW) quali la lineazione Manfredonia - Sorrento a Nord e quella Trinitapoli-Paestum a Sud.



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

L’altro sistema principale di faglie, ad andamento prevalentemente appenninico (WNW- ESE), determina invece la suddivisione del substrato carbonatico in una serie di blocchi, dislocati nel sottosuolo a profondità crescenti procedendo da Est verso Ovest.

Per le particolari caratteristiche altimetrico - strutturali, quest’area è stata interessata, soprattutto nel Pliocene, da fenomeni di subsidenza e intensa sedimentazione, seguita da un sollevamento generalizzato su vasta scala innescatosi a partire dal Pleistocene inferiore.

In epoca tardo-pleistocenica ed olocenica ha invece risentito soprattutto delle oscillazioni glacio-eustatiche del livello marino, che hanno dato origine ad una serie di terrazzamenti che costituiscono gli elementi geomorfologici caratteristici di tutta l’area del Tavoliere.



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

4 - Caratterizzazione dei litotipi locali e Assetto Litostratigrafico

4.1 – Geologia di Dettaglio

Dal punto di vista geologico l’area d’intervento è inquadrabile nel Foglio n. 409 - Zapponeta - della Carta Geologica d’Italia a Scala 1:50.000, redatta dall’ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) - (Fig. 3);

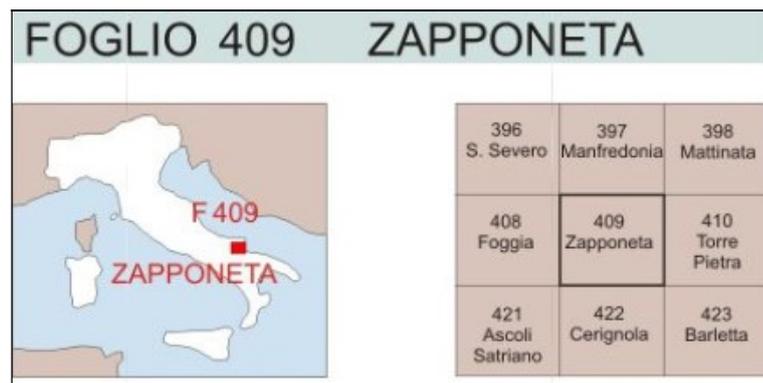


Fig. 3: Inquadramento geologico dell’area di progetto

I terreni direttamente coinvolti dall’impianto e le opere annesse, esclusi i cavidotti, sono riferibili (Fig. 4) alla Formazione del **Sintema dell’Incoronata (RPL1)** rappresentato da Depositi Alluvionali costituiti da corpi lenticolari di silt argillosi, di silt e di sabbie fini ai quali sono a luoghi intervallate lenti di sabbie grossolane e/o di microconglomerati. La superficie superiore del sintema è localmente caratterizzata da sottili coperture di limi di color scuro particolarmente ricchi di sostanza organica che testimoniano le ripetute fasi di esondazione o periodi



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

di formazione di aree paludose. L’area in cui affiora questa unità costituisce una considerevole porzione dell’ampia piana di Foggia, che si sviluppa maggiormente nelle aree poste ad oriente della città, dove verrà realizzato l’impianto di progetto, verso la linea di costa attuale. A luoghi è possibile osservare alcuni tratti di paleoalvei; la piana alluvionale del T. Cervaro è incisa da un ristretto alveo attuale, che risulta depresso rispetto alla piana medesima, tanto che in questo tratto del corso d’acqua si verificano raramente tracimazioni.

Il Subsistema dell’Incoronata (RPL1), insieme al Subsistema di Masseria Torricelli (RPL2) e Subsistema delle Marane La Pidocchiosa - Castello (RPL3) costituiscono il Sistema dei torrenti Carapelle e Cervaro (RPL) che nella sola porzione sudorientale del Foglio sviluppa un’ampia valle fluviale in cui scorre, in un ristretto alveo a luoghi incassato, il T. Cervaro. L’Età è riferibile al Pleistocene superiore – Olocene.

I cavidotti, invece, interessano anche la Formazione del **Sistema di Masseria inacquata** che raggruppa tutti i sedimenti che costituiscono la piana alluvionale più bassa. Il limite inferiore è costituito da una superficie di discordanza sul sub sistema dell’Incoronata (RPL1), sul subsistema delle Marane La Pidocchiosa-Castello (RPL3), sui depositi di versante (a), sui depositi alluvionali recenti (b_b), sul subsistema di Amendola (MLM1). Il limite superiore coincide con la superficie topografica o con la base dei depositi alluvionali attualmente in evoluzione (ba), dei depositi antropici (h), dei depositi



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

palustri (e5), o delle sabbie litorali (g2). La formazione è costituita da depositi alluvionali passanti verso la costa a depositi di spiaggia sommersa. Si tratta di depositi costituiti prevalentemente da argille, sabbie e silt di colore dal bruno scuro, al grigio, al giallastro, spesso con lamine da piano-parallele ad ondulate, presenti soprattutto nei livelli sabbiosi e limosi.

L’ambiente di sedimentazione è di piana alluvionale a bassa energia con episodi di overbank. Verso est si passa a depositi di spiaggia sommersa costituiti da sabbie grigio chiaro da fini a grossolane, con intercalati livelli di ciottoli silicei di provenienza garganica. Le associazioni fossilifere riconosciute indicano ambienti tipici infralitorali poco profondi delle Sabbie Fini Ben Calibrate che passano lateralmente a Sabbie Argillose in Ambiente Calmo. Lo spessore dell’unità varia da pochi metri lungo i corsi d’acqua minori fino ad un massimo di circa 15 metri in corrispondenza della piana costiera.

Relativamente all’età, le datazioni ottenute con il metodo del radiocarbonio indicano che l’unità è riferibile alla fase di alluvionamento dovuta alla risalita marina postwürmiana, e quindi all’Olocene.



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”





Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo

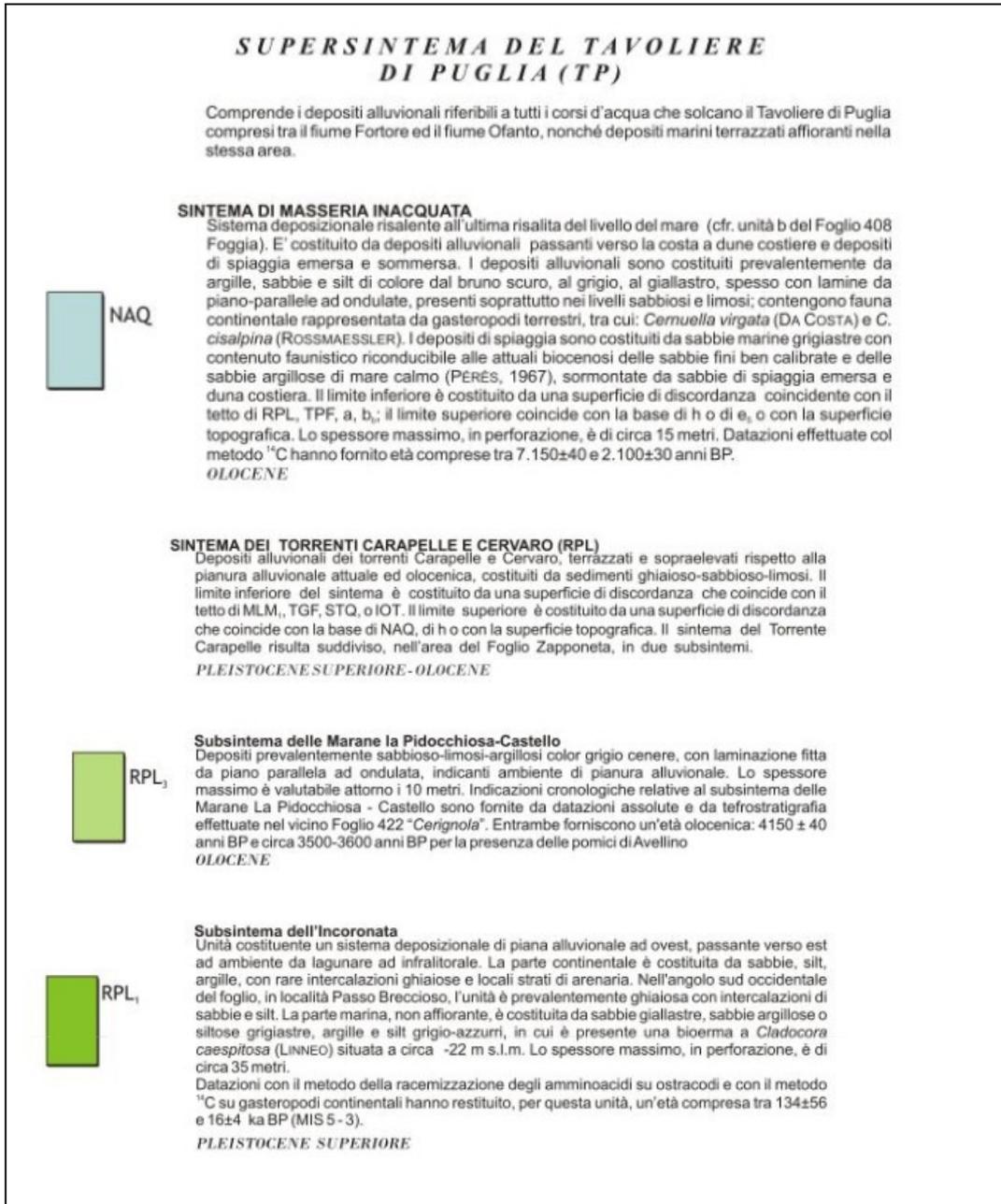


Fig. 4: Carta Geologica dell'area d'intervento – Scala 1:50.000

In Fig. 5 sono riportati i rapporti stratigrafici tra le diverse formazioni così come affiorano anche nell'area d'intervento



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

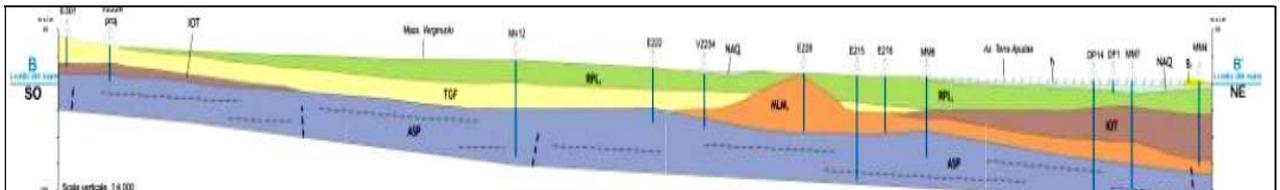


Fig. 5: Sezioni Geologiche con rapporti stratigrafici

Dal punto di vista tettonico nell’area si rilevano una serie di faglie dirette incerte che risultano sepolte sotto la coltre alluvionale.

La consultazione di ITHACA – Catalogo delle Faglie Capaci, redatto dall’ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d’Italia evidenzia come l’area di intervento non sia interessata direttamente da fratture ma risente degli effetti di una faglia primaria, indicata con Fault Code 44100 – Nome: Faglia Foggia – Cerignola (Nord) (Fig. 6) che scorre poco più ad ovest dell’area d’intervento ed è responsabile della sismicità di Foggia



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”



*Fig. 6: Faglia ricadenti nei pressi dell'area d'intervento
(Tratta da: <http://sgi.isprambiente.it/ithaca/viewer/index.html>)*

 *Area d'intervento*



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

4.2 – Geomorfologia

L’area in esame ricade nel Tavoliere meridionale o basso Tavoliere (Fig. 7)

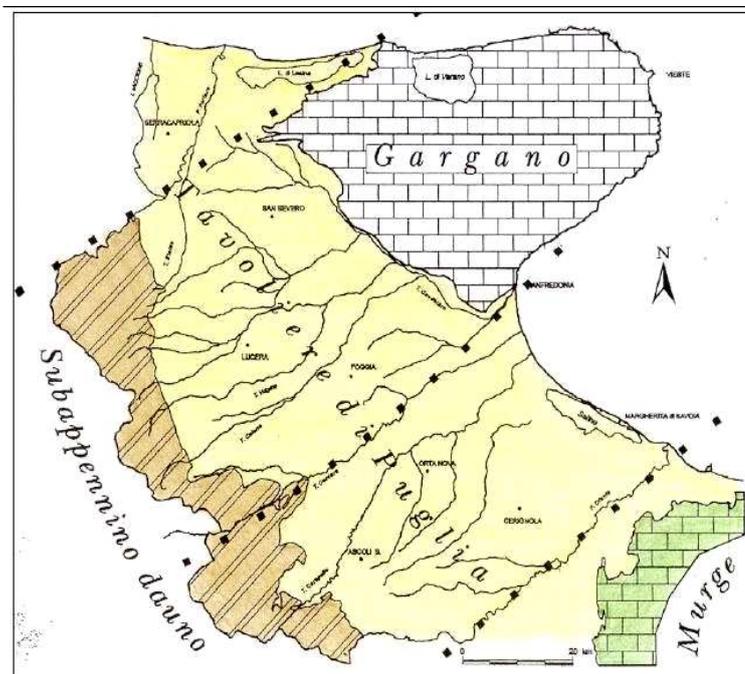


Fig. 7: Geografia del Tavoliere di Puglia (Pennetta L. - 2018)

L’assetto altimetrico del Tavoliere meridionale è connotato da un lento, graduale e progressivo digradare delle quote topografiche da ovest verso est. Infatti, le quote altimetriche passano dai valori massimi di circa 300 metri s.l.m. delle zone dell’entroterra poste ai confini con il Sub-appennino Dauno ai valori minimi prossimi al l.m. delle zone che si raccordano con la piana costiera antistante il Golfo di Manfredonia.



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

Sui fianchi delle zone dell’entroterra, altimetricamente più elevate, si riconoscono dei ripiani corrispondenti a terrazzi marini che digradanti verso l’Adriatico.

In particolare, procedendo dall’entroterra in direzione del mare, si possono osservare una serie di otto ripiani disposti ad altezze variabili fra le quote 350 e 5 metri s.l.m; ogni ripiano è bordato da una scarpata che corrisponde ad un’antica linea di costa (Fig. 8).

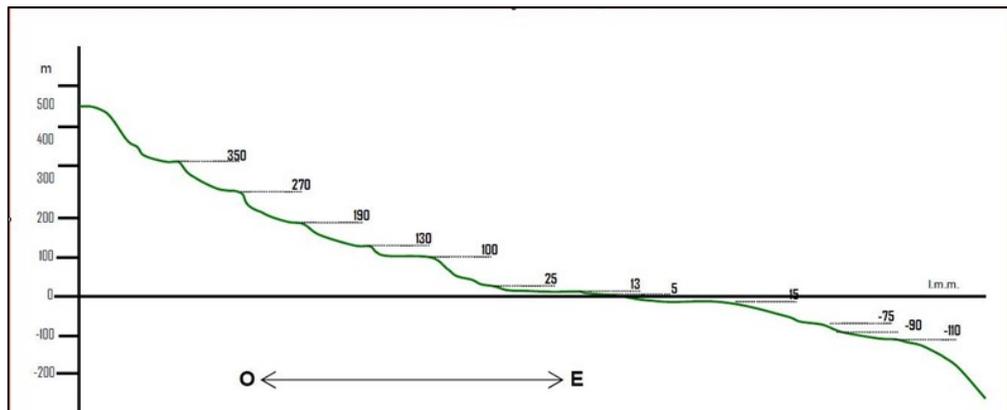


Fig. 8: Sequenza di terrazzi marini individuati tra la catena appenninica e la piattaforma continentale sommersa (da Pennetta L., 2018).

Dal punto di vista morfologico la zona interessata dal presente studio si presenta costituita da ampie spianate che immergono verso Est con deboli pendenze, delimitate a N-E dal Promontorio del Gargano, a N-O dai monti della Daunia e a S-E dal Promontorio della Murgia.

I tipi litologici affioranti nella zona di intervento sono rappresentati prevalentemente da terreni di piana alluvionale del pleistocene



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

che conferiscono all’area un andamento piano altimetrico sub pianeggiante, con pendenze che presentano valori attorno al 10% (Fig. 9).

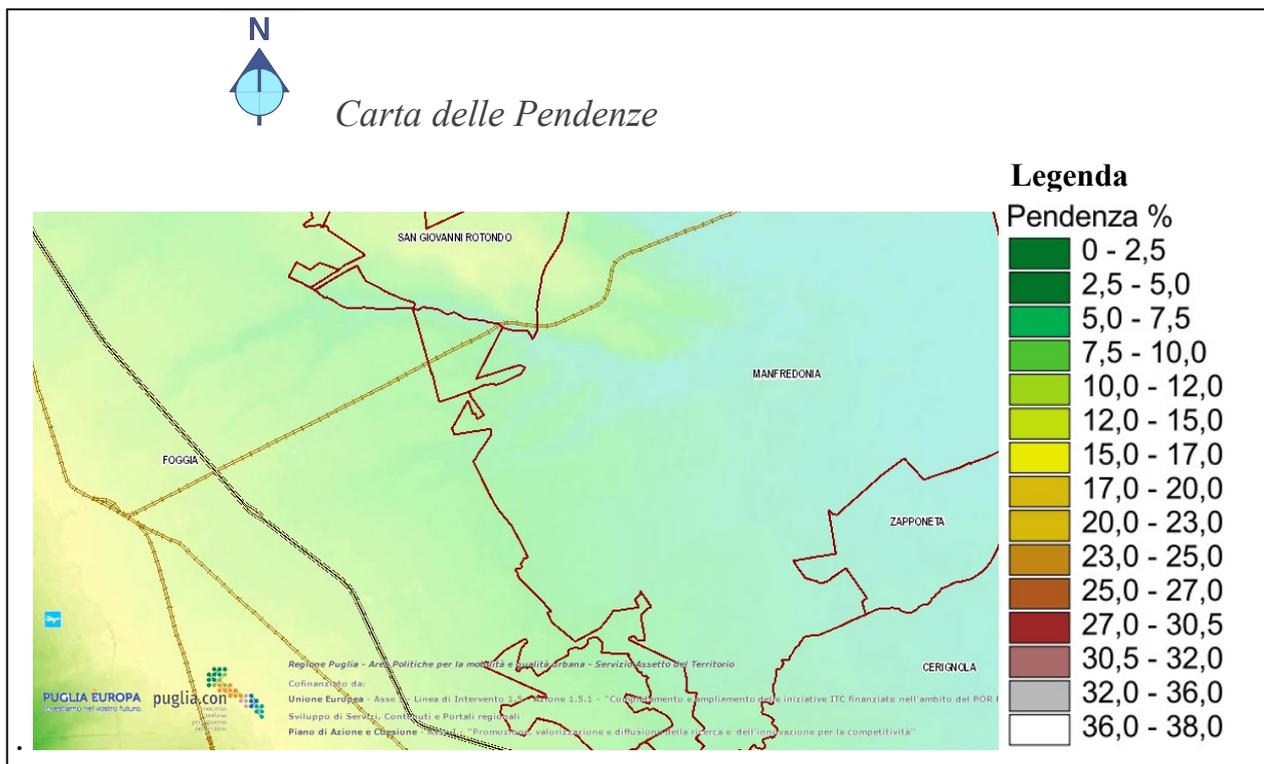


Fig. 9: Carta delle Pendenze

Allo stato attuale nell’area d’intervento non si evidenziano significativi segni di erosione, fenomeni gravitativi o fenomeni superficiali di dissesto in atto, presentandosi globalmente stabile. Tale status è confermato dalla consultazione della Carta Idrogeomorfologica dell’Autorità di Bacino Distrettuale dell’Appennino Meridionale dalla quale si rileva come l’area non risulti classificata a pericolosità geomorfologica, come riportato in Fig. 10



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”



Fig. 10: Cartografia PAI con indicazione della pericolosità geomorfologica dell’area d’intervento (Scala 1:10.000)

Preme in proposito evidenziare che, in relazione alle opere previste ed in virtù delle caratteristiche geologiche, stratigrafiche e geomorfologiche descritte, oltre che delle caratteristiche geologico-tecniche dei terreni interessati dalle opere così come desumibili da dati di letteratura, è possibile sin d’ora escludere ragionevolmente eventuali interferenze negative delle opere con il quadro geostrutturale locale.

Va in tal senso rilevato che dalla consultazione della banca dati I.F.F.I. (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) non risulta censito per le aree in esame alcun dissesto né in atto né storico (Fig. 11).



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

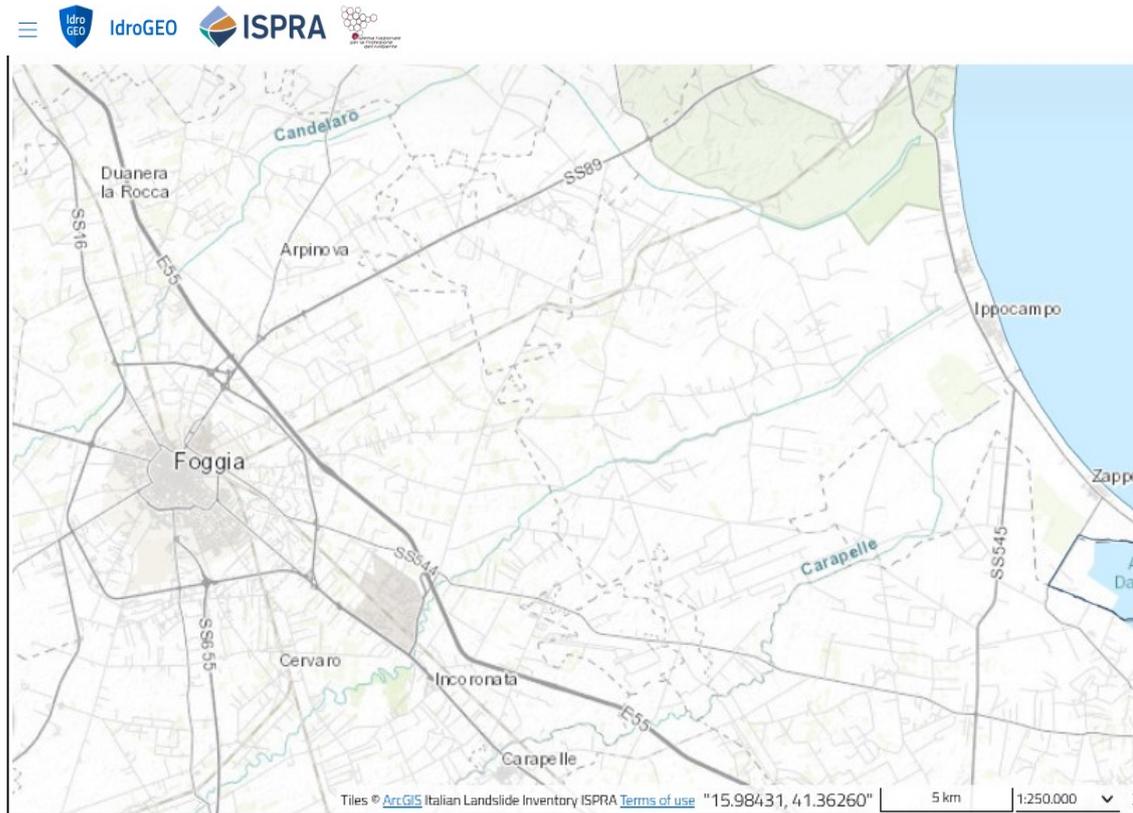


Fig. 11: Cartografia dell'Inventario dei Fenomeni Franosi – IFFI – Scala 1:250.000

Pertanto, sulla base delle informazioni e dei dati sinora desunti dall'analisi delle condizioni geomorfologiche, geologiche, e geostratigrafiche dei luoghi è possibile affermare che le aree risultano :

- geomorfologicamente stabili;
- non interessate da fenomeni erosivi, da frane o da instabilità del suolo o del sottosuolo;
- caratterizzate dalla presenza di substrati costituiti da litotipi dotati di sufficienti caratteristiche di resistenza geomeccanica.



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

5. PIANIFICAZIONE ED ESECUZIONE DELLE INDAGINI

Ai fini della definizione del profilo stratigrafico dei terreni di fondazione e della determinazione delle caratteristiche geotecniche degli stessi sono state eseguite le seguenti indagini:

- n. 2 profili sismici con la tecnica passiva MASW (metodo Re.Mi.);
- n. 2 profili sismici a rifrazione in onde P.

5.1 Stendimento Sismico a Rifrazione con MASW

Ai fini della definizione del profilo stratigrafico dei terreni di fondazione sono stati realizzati n. 2 profili sismici con la tecnica passiva MASW (metodo Re.Mi.) e n. 2 profili sismici a rifrazione in onde P.

Nello specifico ogni prospezione sismica ha visto la realizzazione di un profilo di tipo MASW, avente uno sviluppo di 48 m lineari. E' stato utilizzato un sismometro con le caratteristiche tecniche descritte in appendice – Allegato 1. L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie di geofoni lungo uno stendimento rettilineo e collegati ad un comune sismografo multicanale. Le onde superficiali di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali, simili alla tecnica SASW, basate su un approccio di



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

riconoscimento di modelli multistrato di terreno. E’ stata parametrizzata la velocità delle onde Vs in profondità ricavando un “**modello di velocità del sottosuolo**” correlabile con i diversi litotipi presenti in profondità.

Le indagini sono state eseguite nella zona di ubicazione dell’impianto come da planimetria allegata (Fig. 12) mentre i risultati sono riportati in appendice.



Fig. 12: Ubicazione Stendimenti Sismici



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

5.2 Risultati Indagine Geosismica

La topografia della superficie del sito investigato è sostanzialmente pianeggiante e quindi non è stato necessario correggere le quote di acquisizione. Il rumore ambientale rilevato è stato assolutamente trascurabile. Per la stesa si è utilizzato un sistema di riferimento relativo, la cui origine è posta in corrispondenza dell’endshot esterno al 1° geofono.

L’elaborazione si è sviluppata in due fasi:

- 1) determinazione della curva di dispersione e valutazione dello spettro di velocità;
- 2) Inversione della curva di dispersione interpretata con picking della curva di dispersione, selezionando i punti che appartengono ad un certo modo di propagazione dell’onda superficiale con successiva applicazione di algoritmi genetici.

La sovrapposizione della curva teorica e sperimentale fornisce un parametro abbastanza indicativo sull’attendibilità del modello geofisico risultante. Dall’esame del profilo sismico, opportunamente integrato con i risultati di indagini geognostiche pregresse, si denota una sostanziale omogeneità della successione litologica, pur osservando locali variazioni negli spessori che possono essere messe in relazione alle modalità di sedimentazione e alle diverse lavorazioni agricole. In particolare emerge un modello costituito da due sole unità sismostratigrafiche con le seguenti caratteristiche medie:



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo"

NUMERO MASW	VALORE VS, equ (m/sec)
1	250
2	400



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

6 - SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA

Il rivelamento di campagna unito alle indagini eseguite ha confermato i dati rinvenibili in letteratura e cioè la presenza di una sequenza di natura prevalentemente alluvionale formata da limo con argilla con presenza di livelletti limoso-sabbiosi e ghiaia poligenica eterometrica in matrice limo-sabbiosa.

L’analisi delle stratigrafie, ottenute da indagini dirette ed indirette, consente di definire che i terreni in esame, nella loro variabilità granulometrica e nei rapporti geometrici verticali, pur nella tipica eterogeneità, mostrano una sostanziale uniformità che permette di inquadrarli nella seguente unità litotecnica:

Unità litotecnica “D”: Depositi Alluvionali

da 0.00 a 1.00 m terreno organico e/o di riporto;

da 1.00 a 7.60 m Sabbie e Sabbie Argillose;

da 7.60 a 10.00 m ghiaia poligenica eterometrica in matrice limo-sabbiosa.

L’analisi della sezione sismostratigrafica riportata nel Report delle indagini Geofisiche eseguite (allegato interno alla presente), mostra la presenza di n. tre sismostrati:

- Il primo sismostrato ha velocità V_p compresa tra 390-400 m/s e V_s compresa tra 94-105 m/s;
- Il secondo sismostrato ha velocità V_p compresa tra 760-



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

810 m/s e Vs compresa tra 258-273 m/s;

- Il substrato rifratore ha velocità Vp compresa tra 1420-1440 m/s e Vs compresa tra 393-400 m/s.

Per ciò che concerne la correlazione delle caratteristiche fisico-dinamiche con quelle geologico-tecniche, ricordando che un sismostrato non corrisponde necessariamente ad uno strato litologicamente omogeneo, si può ritenere che:

- Il primo sismostrato è associabile a terreno agrario sabbioso-limoso;
- Il secondo sismostrato è associabile a sabbie e sabbie limose;
- Il substrato rifratore è associabile a ghiaia in matrice limo-sabbiosa.

Dal punto di vista geotecnico si possono assumere i seguenti valori dei principali parametri, considerando anche i risultati di prove di laboratorio pregresse:



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo"

Caratteristiche Geotecniche:

Sabbie e sabbie argillose (prof. da -1,00 metri fino a -7,60 mt)

DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA (UNI EN ISO 17892-4)	
Argilla (<0.002 mm)	20.39 %
Limo (0.002<p<0.06 mm)	36.32 %
Sabbia (0.06<p<2 mm)	43.29 %
GHIAIA (2mm<p<60 mm)	0.00 %
Ciottoli (>60 mm)	0.00 %
CLASSIFICA: Sabbia con limo argilloso	
Passante ASTM 200:	

CARATTERISTICHE FISICHE GENERALI	
Peso specifico dei grani	$\gamma_s = 26.59 \text{ kN/m}^3$
Contenuto d'acqua	$w = 0.187$
Peso di volume naturale	$\gamma = 19.96 \text{ kN/m}^3$
Peso di volume secco	$\gamma_d = 16.82 \text{ kN/m}^3$
Porosità	$n = 0.368$
Indice di porosità	$e = 0.581$
Grado di saturazione	$S_r = 0.855$

LIMITI DI ATTERBERG (A.S.T.M. D4318-10)	
Limite di liquidità	$w_L = 0.353$
Limite di plasticità	$w_p = 0.194$
Indice di plasticità	$I_p = 0.159$
Indice di consistenza	$I_c = 1.045$

PROVA DI TAGLIO DIRETTO CD (UNI CEN ISO/TS 17892-10)	
Coesione efficace $c' =$	33 kPa
Angolo di attrito efficace $\phi' =$	20° 54'
Coesione efficace res. $c'_r =$	n.d.
Angolo di attrito residuo $\phi'_r =$	n.d.

PROVA EDOMETRICA (UNI EN ISO 17892-5)	
Intervallo di carico tra 78 e 147 kPa	
Modulo Edometrico	$M = 6.7 \text{ MPa}$
Coeff. di consolidazione	$C_v = \text{n.d.}$
Permeabilità	$k = \text{n.d.}$
Intervallo di carico tra 147 e 294 kPa	
Modulo Edometrico	$M = 9.3 \text{ MPa}$
Coeff. di consolidazione	$C_v = \text{n.d.}$
Permeabilità	$k = \text{n.d.}$
Intervallo di carico tra 294 e 588 kPa	
Modulo Edometrico	$M = 15.2 \text{ MPa}$
Coeff. di consolidazione	$C_v = \text{n.d.}$
Permeabilità	$k = \text{n.d.}$
Intervallo di carico tra 588 e 1176 kPa	
Modulo Edometrico	$M = 26.2 \text{ MPa}$
Coeff. di consolidazione	$C_v = \text{n.d.}$
Permeabilità	$k = \text{n.d.}$
Intervallo di carico tra 1176 e 2451 kPa	
Modulo Edometrico	$M = \text{n.d.}$
Coeff. di consolidazione	$C_v = \text{n.d.}$
Permeabilità	$k = \text{n.d.}$

PROVA TRIASSIALE CID (UNI CEN ISO/TS 17892-9)	
Coesione efficace $c' =$	n.d.
Angolo di attrito efficace $\phi' =$	n.d.

PROVA TRIASSIALE UU (UNI CEN ISO/TS 17892-8)	
Coesione totale $c_u =$	n.d.
Angolo di attrito totale $\phi_u =$	n.d.

PROVA TRIASSIALE CIU (UNI CEN ISO/TS 17892-9)	
Coesione efficace $c' =$	6 kPa
Angolo di attrito efficace $\phi' =$	26° 15'
Coesione totale $c =$	24 kPa
Angolo di attrito totale $\phi =$	17° 38'

PROVA DI PERM. DIRETTA (UNI CEN ISO/TS 17892/11)	
In permeometro	n.d.
In cella edometrica	n.d.
In cella triassiale	$k = \text{n.d. cm/s}$

PROVA UNIASSIALE (UNI CEN ISO/TS 17892-7)	
Tensione a rottura	$\sigma_{ur} = 70 \text{ kPa}$

LIMITI RITIRO (A.S.T.M. 4943-18)	
Limite di ritiro L_r	19.4 %



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo"

Caratterizzazione Geotecnica

<i>Descrizione Litologica</i>	<i>Depositi Alluvionali</i>
<i>Peso volume medio</i>	$\gamma_m = 1,94 \text{ g/cm}^3$
<i>Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungo termine)</i>	$\Phi_m = 26^\circ - 28^\circ$
<i>Coesione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine)</i>	$c'_m = 0,07 \text{ kg/cm}^2$
<i>Coesione non drenata</i>	$C_m = 1,2 \text{ kg/cm}^2$
<i>Modulo di Edometrico medio</i>	$E_m = 80 - 153 \text{ kg/cm}^2$
<i>Modulo di Poisson</i>	$\nu = 0.35$
<i>Modulo elastico</i>	$E_s = 20 - 200 \text{ kg/cm}^2$



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

7 SISMICITÀ

7.1: Inquadramento Sismico

Con l'introduzione dell'O.P.C.M. n. 3274 del 20 Marzo 2003 e s.m.i. sono stati rivisti i criteri per l'individuazione delle zone sismiche e sono state definite le nuove norme tecniche per la progettazione di nuovi opere, per le opere di fondazione, per le strutture di sostegno, ecc. Nel 2003 sono stati emanati i criteri di nuova classificazione sismica del territorio nazionale, basati sugli studi e le elaborazioni più recenti relative alla pericolosità sismica del territorio, ossia sull'analisi della probabilità che il territorio venga interessato in un certo intervallo di tempo (generalmente 50 anni) da un evento che superi una determinata soglia di intensità o magnitudo. A tal fine è stata pubblicata l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8 maggio 2003.

Il Decreto 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” - fornisce le indicazioni per la progettazione e la verifica di nuove strutture secondo criteri antisismici.

Ai sensi del decreto, le azioni sismiche di progetto si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione. La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR nel



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

periodo di riferimento VR. In alternativa è ammesso l’uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica del sito.

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

a_g = accelerazione orizzontale massima al sito;

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

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

Per l’area in esame, sulla base delle indagini eseguite, si verifica l’assoluta stabilità dell’area; ai fini della determinazione dell’azione sismica di progetto e della categoria di sottosuolo (Ordinanza P.C.M. n.3274 del 20/03/03 e aggiornamenti, modifiche, integrazioni, sostituzioni del D.M. 14/09/2005 “Norme Tecniche per le Costruzioni” D.M. Infrastrutture del 17/01/2018), si potranno prendere in considerazione i seguenti elementi di valutazione:

➤ In base alla localizzazione geografica del sito di progetto vengono definiti i parametri di riferimento del moto sismico in superficie, successivamente correlati con gli stati limite e la vita nominale dell’opera. Ciò al fine di definire gli obiettivi da raggiungere in termi-



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo"

ni di sicurezza e prestazioni delle opere o parti di essa.

o Individuazione del sito

▪ Regione Puglia, Provincia di Foggia, Comune di Foggia e di Manfredonia;

➤ La velocità media di propagazione potrà essere assunta mediamente di 300 m/s, entro 30 m di profondità delle onde di taglio (VS,eq) per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$, dello strato iesimo, per un totale di N strati presente nei 30 m superiori;

➤ Sulla base del valore VS,eq avendo considerato l'insieme delle indagini effettuate durante la campagna geognostica, considerando in modo cautelativo i risultati peggiori riscontrati, non considerando l'aumento delle caratteristiche geotecniche dei terreni con la profondità, si ipotizza un sottosuolo riferibile alla categoria "C":

CATEGORIE SUOLI DI FONDAZIONE	
Tab. 3.2.II - D.M. 17 gennaio 2018 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".	
A	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.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m., caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori di velocità equivalente comprese tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fine 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.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definiti per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

➤ Le condizioni topografiche del sito che si colloca su un'area perfetta-



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

mente pianeggiante con inclinazione media $i < 15^\circ$ (max 2°), sono riferibili alla categoria “T1”, per cui il coefficiente di amplificazione topografica (S_T) è pari a 1,0 (valori massimi del coefficiente tab. 3.2. III Norme Tecniche per le Costruzioni 2018).

CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA	
Categoria Topografica	Ubicazione dell’opera o dell’intervento
T ₁	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T ₂	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T ₃	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T ₄	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

VALORI MASSIMI DEL COEFFICIENTE DI AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA		
Categoria Topografica	Ubicazione dell’opera o dell’intervento	S_T
T ₁	-	1,0
T ₂	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T ₃	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T ₄	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Per il calcolo dei parametri sopra citati sono stati considerati i seguenti parametri:

- Classe d’uso: classe nella quale sono suddivise le opere, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso; per le opere in progetto è la II (tab.2.4.II) il cui uso prevede normali affollamenti), per cui il coefficiente d’uso risulta $CU=1,0$



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

VALORI DEL COEFFICIENTE D'USO C _U .				
CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C _U	0,7	1,0	1,5	2,0

- Vita nominale dell’opera VN: intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantiene gli specifici livelli prestazionali di progetto (da questo valore viene calcolato il Periodo di riferimento per l’azione sismica VR come:

$VR=VN*CU$ (dove CU è il coefficiente d’uso);

- Probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR: in funzione dello stato limite di riferimento.

Nel caso dell’opera in oggetto sono considerati i seguenti valori:

Classe d’uso “II”: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l’ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l’ambiente.

Vita nominale VN: 50 anni: costruzioni con livelli di prestazione ordinari. Coefficiente d’uso CU: 1 relativo alla classe d’uso II.

Periodo di riferimento per l’azione sismica: $VR=VN*CU= 50*1 = 50$ anni

In funzione della probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR vengono calcolati i valori ag , $F0$, $T*C$ e del periodo di ritorno:



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

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

SPETTRI DI RISPOSTA SECONDO LE NTC 2018

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O. - SLE	30,0	0,422	2,527	0,257
S.L.D. - SLE	50,0	0,539	2,504	0,270
S.L.V. - SLO	475,0	1,177	2,620	0,297
S.L.C. - SLO	975,0	1,471	2,615	0,307

Dove:

- SLE = stati limite di esercizio
 - o SLO = stato limite di operatività: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti in relazione alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d’uso significativi;
 - o SLD = stato limite di danno: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell’interruzione d’uso di parte delle apparecchiature.
 - o SLU = stati limite ultimi
 - o SLV = stato limite di salvaguardia della vita: a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;

o SLC = stato limite di prevenzione del collasso: a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

COEFFICIENTI SISMICI (Per Stabilità Pendii e Fondazioni)

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0,633	1,0	0,0646	0,0323
S.L.D.	0,8085	0,47	0,0388	0,0194
S.L.V.	1,7655	0,38	0,0684	0,0342
S.L.C.	2,1545	1,0	0,2197	0,1099

Dove:

β = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa

al sito = $0,2 a_{max}$ = accelerazione orizzontale massima attesa al sito

a_g = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido (a_g/g)

g = accelerazione di gravità



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo"

Ss = coefficiente di amplificazione stratigrafica = 1,5 (SLO)-
 1,5 (SLD)-1,48 (SLV)-1,42 (SLC) St = coefficiente di amplificazione
 topografica = 1,0

Si ottengono i seguenti parametri sismici:

Dati Generali

Località Indirizzo Foggia Lat. Long. 41.902783 12.496365	Dati opera Tipo opera: 2 - Opere ordinarie Classe d'uso: Classe II V. Nominale: 50 V. Rif.: 50
--	--

Parametri sismici su sito di riferimento

SL	TR [Anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec.]	Categoria sottosuolo
SLO	30.00	0.422	2.527	0.257	C
SLD	50.00	0.539	2.504	0.270	T1
SLV	475.00	1.177	2.620	0.297	
SLC	975.00	1.471	2.615	0.307	

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Muri di sostegno (NTC 2018)					
SL	amax [m/s ²]	Beta	k _{hk} [-]	k _{vk} [-]	K _{hi} [-]
SLO	0.633	1.0	0.0646	0.0323	0.0
SLD	0.8085	0.47	0.0388	0.0194	0.0
SLV	1.7655	0.38	0.0684	0.0342	0.0
SLC	2.1545	1.0	0.2197	0.1099	0.0

Stato limite di riferimento: **SLO**



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

Dati Generali

Località

Indirizzo
Manfredonia - FG

Lat. Long. 41.630734 15.91651

Dati opera

Tipo opera 2 - Opere ordinarie

Classe d'uso Classe II

V. Nominale 50 V. Rif. 50

Parametri sismici su sito di riferimento

SL	TR [Anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec.]
SLO	30.00	0.530	2.463	0.274
SLD	50.00	0.696	2.493	0.288
SLV	475.00	1.932	2.462	0.332
SLC	975.00	2.560	2.437	0.341

Categoria sottosuolo C

Categoria topografica T1

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera Muri di sostegno (NTC 2018)

SL	amax [m/s ²]	Beta	khk [-]	kvk [-]	Khi [-]
SLO	0.795	1.0	0.0811	0.0405	0.0
SLD	1.044	0.47	0.05	0.025	0.0
SLV	2.7221	0.38	0.1055	0.0527	0.0
SLC	3.3748	1.0	0.3442	0.1721	0.0

Stato limite di riferimento SLO



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

8 - CARATTERI FISICO-MECCANICI-GEOTECNICI DEL TERRENO

Sulla base dei report delle indagini geognostiche effettuate sul sito interessato dall’impianto, stabilita la litologia delle formazioni geolitologiche presenti nel sottosuolo e considerando che la falda acquifera non è stata intercettata nel corso dell’indagine diretta del terreno, fino ad una profondità di circa 20,0 m dal p.c. si passa al calcolo della portanza.

Il carico limite verticale, attesa la categoria di suolo di tipo C, verrà calcolata attraverso la formula di **Berezantzev** in funzione della geometria del palo, delle caratteristiche del terreno e dell’interfaccia palo-terreno, applicata agli Stati Limite Ultimi, ai sensi del Nuovo Testo Unico per le Costruzioni (NCT 2018).

In appendice all’allegato 2 si riportano i risultati dei calcoli eseguiti con il programma MP della Geostru, licenziato alla scrivente.



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo"

9 - CONCLUSIONI

Lo studio geologico e geotecnico eseguito per il progetto ***"PROGETTO IMPIANTO AGRIVOLTAICO AVANZATO DA REALIZZARE NEL COMUNE DI FOGGIA (FG) IN LOCALITA' "PEZZAGRANDE" AL FOGLIO N.161 P.LLA N. 2, E NEL COMUNE DI MANFREDONIA IN LOCALITA' " VACCHERECCIA DI GRECO " AL FOGLIO N. 129 ALLE P.LLE NN. 17, 142, 498, 500 E 512, E IN LOCALITA' "MACCHIAROTONDA" AL FOGLIO N. 131 P.LLE NN.13, 206 E 207, E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN DA REALIZZARE NEL COMUNE DI MANFREDONIA (FG) IN LOCALITA' "MACCHIAROTONDA" AL FOGLIO N. 128 ALLE P.LLE NN. 45, 79, 113 E 169 E AL FOGLIO N. 129 ALLE P.LLE NN. 481,485 E 486, AVENTE UNA POTENZA PARI A 30.038,68 kWp, DENOMINATO "MARTILLO"*** ha permesso la ricostruzione di un modello geotecnico del terreno sulla base del quale sono state realizzate le verifiche delle fondazioni dell'impianto.

Il risultato di tali verifiche, a cui si rimanda per ogni ulteriore dettaglio, garantisce la fattibilità geotecnico-strutturale dell'impianto con la mancanza di instabilità e cedimenti contenute all'ordine dei mm.



Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località "Pezzagrande" e nel Comune di Manfredonia in Località "Macchiarotonda" e "Vacchereccia di Greco", e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo"

Tanto in adempimento all'incarico conferitomi

Rodi Garganico Ottobre 2023





Progetto Impianto Agrivoltaico da realizzare nel Comune di Foggia in località “Pezzagrande” e nel Comune di Manfredonia in Località “Macchiarotonda” e “Vacchereccia di Greco”, e relative opere di connessione alla RTN – Denominato Martillo”

APPENDICE

REPORT SISMICO



Allegato 1 – Risultati Indagini Sismiche

L'indagine sismica eseguita è stata mirata alla definizione delle caratteristiche fisico-dinamiche dei terreni, alla ricostruzione stratigrafica del sito e alla classificazione del sottosuolo di fondazione secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

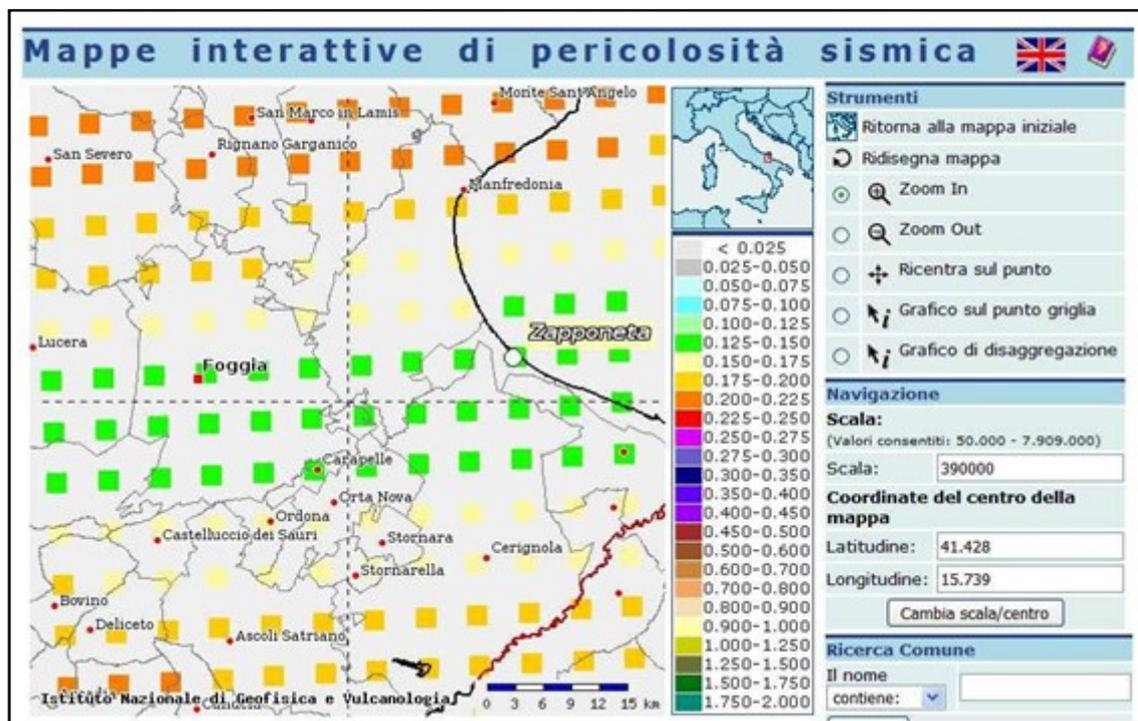
A tal fine sono state effettuate le seguenti indagini indirette, secondo l'ubicazione riportata nella Figura che segue:

- n. 2 profili sismici con la tecnica passiva MASW (metodo Re.Mi.);
- n. 2 profili sismici a rifrazione in onde P.



1 - AZIONE SISMICA

Le recenti Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 e l'OPCM del 20 marzo 2003 n. 3274, superano il concetto della classificazione del territorio in zone, imponendo nuovi e precisi criteri di verifica dell'azione sismica nella progettazione delle nuove opere ed in quelle esistenti, valutata mediante una analisi della risposta sismica locale. In assenza di queste analisi, la stima preliminare dell'azione sismica può essere effettuata sulla scorta delle "categorie di sottosuolo" e della definizione di una "pericolosità di base" fondata su un reticolo di punti di riferimento, costruito per l'intero territorio nazionale. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g e dei principali "parametri spettrali" riferiti all'accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica (fattore di amplificazione massima F_0 e periodo di inizio del tratto a velocità costante T^*C). Il reticolo di riferimento ed i dati di pericolosità sismica vengono forniti dall'INGV e pubblicati nel sito <http://essel.mi.ingv.it/>.



Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni riferita a suoli rigidi (Ordinanza 3274)

Secondo le NTC l'area in questione è caratterizzata da un'accelerazione compresa tra **0.050-0.075 g**, come evidenziato nella figura a, in cui è riportata la mappa di pericolosità sismica per il sito in questione con una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni (riferita a suoli rigidi - categoria A).

Tale mappa di pericolosità sismica è riferita ad un periodo di ritorno $TR=975$, corrispondente ad una vita nominale dell'opera $V_N=50$ anni e ad un coefficiente d'uso $CU=1.5$ (strutture importanti), parametri legati tra loro dalla seguente formula:

$$TR = -V_R / \ln(1 - P_{VR}) \text{ dove } V_R = V_N \cdot C_U$$

Valori dei parametri per la definizione del periodo di ritorno		
P_{VR} (Stato Limite)	C_U	V_N [anni]
81% Operatività (SLO)	0.7 (I. Strutture secondarie)	≤ 10 (Opere provvisorie)
63% Danno (SLD)	1.0 (II. Strutture ordinarie)	≥ 50 (Opere ordinarie)
10% Salvaguardia della vita (SLV)	1.5 (III. Strutture importanti)	≥ 100 (Grandi opere)
5% Prevenzione del Collasso (SLC)	2.0 (IV. Strutture strategiche)	

I nuovi criteri di caratterizzazione sismica locale, come accennato in precedenza, sono menzionati nelle “Nuove Norme Tecniche per le costruzioni 2018”, entrate ufficialmente in vigore in data 22/03/2018, per le quali è necessario, inoltre, caratterizzare il sito in funzione degli spettri di risposta sismica delle componenti orizzontali e verticali del suolo. Gli spettri di risposta sismica vanno stimati in relazione ai differenti Stati Limite a cui un manufatto è potenzialmente sottoposto; tale stima è stata effettuata mediante l'applicazione della GEOSTRU al seguente link <http://www.geostru.com/geoapp/parametri-sismici.aspx>

Essa fornisce i parametri sismici (ag , F_0 e TC^*) per gli stati limite SLO, SLD, SLV, SLC, tipici del luogo o della costruzione in esame.

Indirizzo Coordinate Isole

Indirizzo

Macchiarotonda

WGS84: Lat 41.452096 - Lng 15.745096

ED50: Lat 41.453071 - Lng 15.745942

Visualizza vertici della maglia di appartenenza

Stati limite

Classe Edificio

II. Affollamento normale. Assenza di funz. pubblic...

Vita Nominale 50

Interpolazione Media ponderata

CU = 1

Stato Limite	Tr [anni]	a_g [g]	F_0	T_c^* [s]
Operatività (SLO)	30	0.045	2.467	0.290
Danno (SLD)	50	0.056	2.538	0.325
Salvaguardia vita (SLV)	475	0.134	2.594	0.430
Prevenzione collasso (SLC)	975	0.170	2.612	0.442

Periodo di riferimento 50 per l'azione sismica:

Coefficienti sismici

Tipo Muri di sostegno NTC 2018

Muri di sostegno che non sono in grado di subire spostamenti.

H (m) 1 us (m) 0.1

Cat. Sottosuolo C

Cat. Topografica T1

	SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,50	1,50	1,49	1,43
CC Coeff. funz categoria	1,58	1,52	1,39	1,37
ST Amplificazione topografica	1,00	1,00	1,00	1,00

Acc.ne massima attesa al sito [m/s²] 0.6

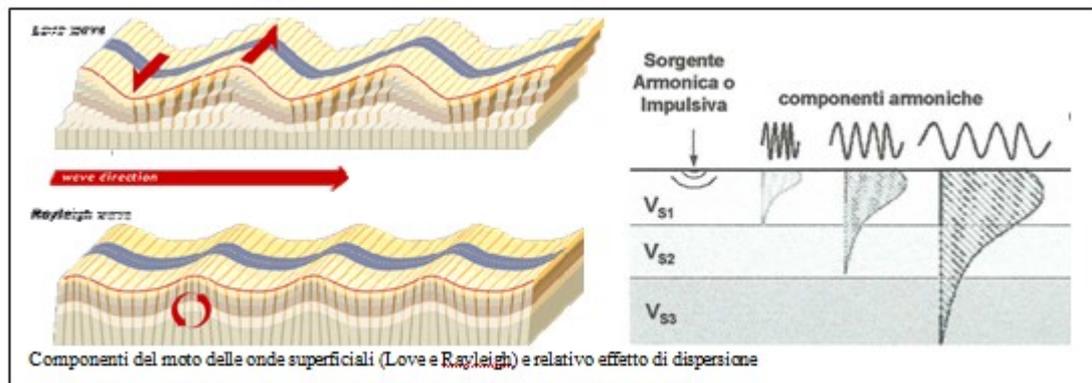
Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.000	0.039	0.076	0.000
kv	--	0.020	0.038	--
Amax [m/s ²]	0.657	0.822	1.952	2.386
Beta	--	0.470	0.380	--

Ubicazione dell'area all'interno della maglia sismica di riferimento e relativi parametri sismici per la Categoria di sottosuolo C

2- INDAGINE M.A.S.W

Metodologia indagine

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (nel nostro caso geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.



La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW si distingue in “attivo” e “passivo” (Zywicki, 1999; Park e Miller, 2006; Roma, 2006):

➤ Nel “metodo attivo” le onde superficiali sono prodotte da una sorgente impulsiva disposta a piano campagna e vengono registrate da uno stendimento lineare composto da numerosi ricevitori posti a breve distanza (distanza intergeofonica).

➤ Nel “metodo passivo” (Re.Mi.) lo stendimento presenta le stesse caratteristiche geometriche del metodo attivo ma i ricevitori non registrano le onde superficiali prodotte da una sorgente impulsiva, bensì il rumore di fondo (detto anche “microtremori”) prodotto da sorgenti naturali (vento) e antropiche (traffico, attività industriali). E’ possibile utilizzare alcune varianti geometriche del metodo passivo (disposizione dei geofoni a cerchio, quadrato, triangolo e croce) per una valutazione più accurata del trend dispersivo delle onde superficiali (Park e Miller, 2006).

In questa indagine è stato utilizzato il “metodo passivo”, risultato il più idoneo nel contesto in esame. Le caratteristiche geometriche dei profili sono tabellate di seguito:

Denominazione	Sorgente	Lunghezza profili	Distanza intergeofonica
Profilo 1	rumore	48 m	2.0 m
Profilo 2	rumore	48 m	2.0 m

Attrezzature e tecniche operative

Per le misure eseguite sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Un sismografo DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).
- Un cavo con 24 collegamenti per i geofoni.
- 24 geofoni a componente verticale con frequenza di 4.5 Hz.
- SeisOpt ReMi v.2.0 della Optim LLC.

Sono state acquisite, per ogni profilo, sei registrazioni, sommate tra loro al fine di ottenere un buon rapporto segnale/rumore. Esse hanno le seguenti caratteristiche:

Metodo	Frequenza di campionamento	Lunghezza registrazioni	Sorgente
Masw “passivo”	1.0 millisecondo	20 secondi	Rumore ambientale

I sismogrammi ottenuti sono stati elaborati con una trasformazione bidimensionale dal dominio tempo-distanza (t-x), al dominio velocità di fase- frequenza (p-f). E’ stato così possibile analizzare l’energia di propagazione del “rumore ambientale” lungo tutte le

direzioni della linea sismica e riconoscere le onde superficiali con carattere dispersivo.

Sullo spettro (p-f) ottenuto sono stati individuati una serie di punti nell'area ad alta energia (piking). A partire da essi si è proceduti con la fase di inversione dei dati per ottenere il modello di Vs-profondità.

Risultati

I modelli di Vs-profondità, ottenuti mediante l'analisi MASW, sono schematizzati di seguito:

Masw 1		Masw 2	
Vs (m/s)	Profondità (mt)	Vs (m/s)	Profondità (mt)
94	0.0÷2.7	105	0.0÷2.9
258	2.7÷8.7	273	2.9÷9.0
393	8.7÷30.0	400	9.0÷30.0

In conformità al D.M. 17/01/2018 “Norme tecniche per le costruzioni” la classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

h_i spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

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

Poiché le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni sono chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II (di seguito), si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei

valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, VS.

Pertanto il sito in esame rientra in **categoria di sottosuolo C**, caratterizzato da

VS,30 di 282 m/s (profilo 1) **VS,30 di 293 m/s** (profilo 2).

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

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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>

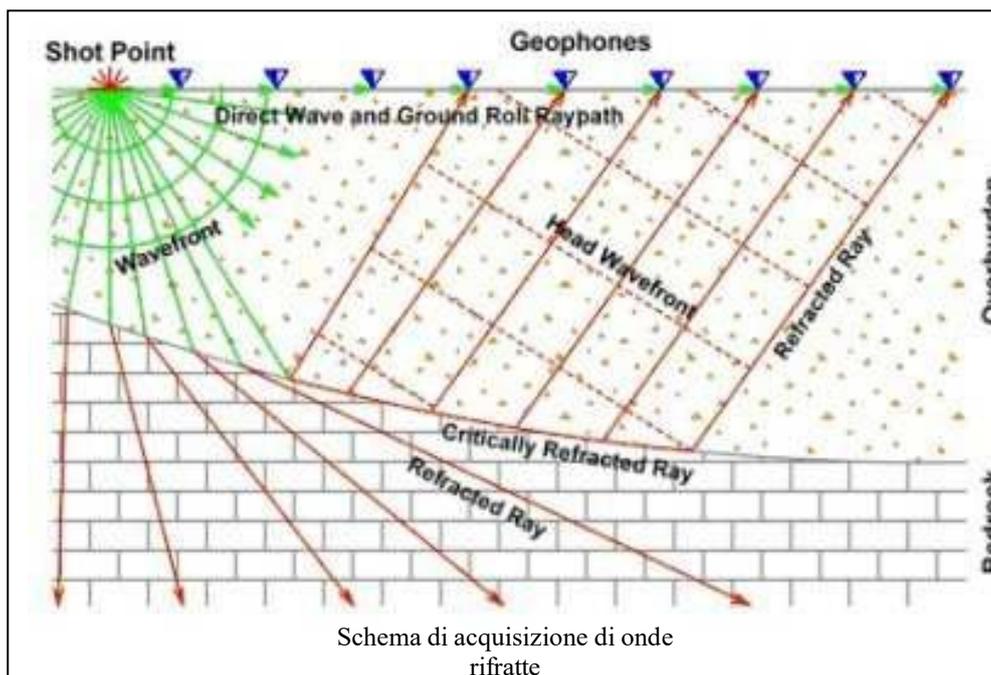
2 PROSPEZIONE SISMICA

Metodologia sismica a rifrazione

La tecnica di prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in un punto in superficie (punto sorgente), in corrispondenza di una molteplicità di punti disposti allineati sulla superficie topografica (geofoni). Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà geometriche e fisico-meccaniche dei terreni.

Mediante questo tipo di indagine si può risalire alla composizione litologica di massa dei terreni, al loro grado di fratturazione, alla geometria delle prime unità sottostanti la coltre superficiale, alla profondità in cui si trova la roccia di fondo (“bedrock”).

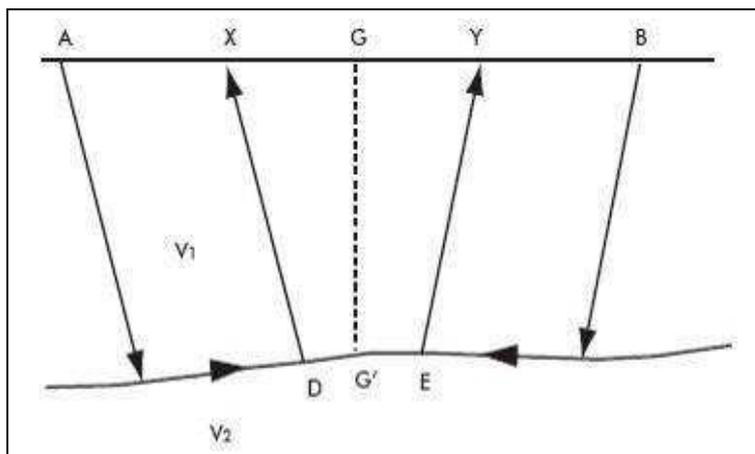
L'unica condizione per eseguire studi di sismica a rifrazione è che la successione rocciosa da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità.



Normalmente il sottosuolo è caratterizzato da strati piano-paralleli con velocità crescente all'aumentare della profondità. In contesti più complessi (inversioni di velocità o presenza di corpi non stratificati) bisogna tener conto del modello tridimensionale del sottosuolo ed intervenire con indagini più specifiche (misure sismiche in foro), per non incorrere in errori interpretativi.

Il metodo di elaborazione utilizzato nel corso delle analisi dei dati a rifrazione è stato

il Generalized Reciprocal Method (GRM: Palmer - 1980). L'analisi GRM (metodo reciproco generalizzato) si basa sulla determinazione del tempo di tragitto delle onde sismiche tra due geofoni separati da una distanza variabile XY ottimale per la quale i segmenti dei raggi che viaggiano verso l'alto e arrivano a ciascun geofono, emergano quasi dallo stesso punto del riflettore (G'). Ciò permette di valutare tutte le eventuali variazioni laterali di velocità del rifrattore, e quindi di ricostruire anche morfologie complesse.



Successivamente, con l'ausilio del software "Rayfract" della Intelligent Resources Inc., si è proceduti all'analisi del sottosuolo in tomografia sismica. Il software, utilizzando i tempi d'arrivo delle onde lette sui sismogrammi sperimentali, permette di eseguire delle ottimizzazioni del modello di velocità. Tali interpretazioni danno modo di rappresentare le velocità sismiche sia secondo sismostrati e sia secondo un'imaging bidimensionale a colori.

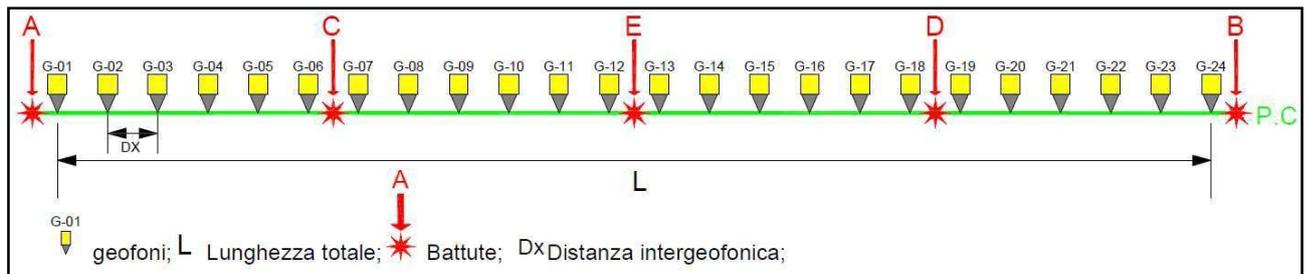
Attrezzature e tecniche operative

Per i profili eseguiti sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Un sismografo DAQ LINK – III a 24 bit della "Seismic Source Co" con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).
- Un cavo con 24 collegamenti per i geofoni;
- Ventiquattro geofoni a componente verticale con frequenza di 14 Hz;
- Un piattello in alluminio;
- Un martello di 8 Kg dotato di trigger.

Denominazione	Lunghezza (metri)	Distanza geofonica (metri)
Profilo sismico 1	48	2.0
Profilo sismico 2	48	2.0

Di seguito è mostrato lo schema geometrico di acquisizione:



Il picking delle onde sismiche è stato effettuato sui sismogrammi sperimentali (vedi allegato) mediante il software TomTime della Geotom, LCC, dopo un opportuno filtraggio delle tracce. I primi arrivi sono riportati nei diagrammi tempo-distanza “dromocrone” (vedi allegato).

Risultati

L'elaborazione dei dati ha permesso di ricostruire il sottosuolo secondo 3 "sismostrati", così caratterizzati:

- 1. Il primo sismostrato** (con una profondità di 2.7-2.9 mt dal p.c.) ha velocità V_p compresa tra 390-400 m/s e V_s compresa tra 94-105 m/s;
- 2. Il secondo sismostrato** (con una profondità di 8.7-9.0 mt dal p.c.) ha velocità V_p compresa tra 760-810 m/s e V_s compresa tra 258-273 m/s;
- 3. Il substrato rifrattore** ha velocità V_p compresa tra 1420-1440 m/s e V_s compresa tra 393-400 m/s.

Per ciò che concerne la correlazione delle caratteristiche fisico-dinamiche con quelle geologico-tecniche del sottosuolo esplorato, si può ritenere che:

- 1. Il primo sismostrato** è associabile a depositi alluvionali di natura sabbioso-limosa;
- 2. Il secondo sismostrato** è associabile a limi sabbioso-argillosi;
- 3. Il substrato rifrattore** è associabile a ghiaia in matrice limo-sabbiosa.

Nella tabella che segue sono mostrati tutti i valori delle velocità sismiche, il coefficiente di Poisson ed i valori dei moduli dinamici E (di Young), G (di taglio) e K (di compressibilità), espressi in Kg/cm^2 . Questi valori sono calcolati considerando un peso di volume unitario, pertanto per ottenere i moduli corretti è necessario moltiplicare i valori dei moduli dinamici per il peso di volume reale dei terreni.

La velocità V_s è stata ricavata dall'indagine MASW precedentemente descritta.

Profilo 1

Profondità media (m)	V_p	V_s	σ	γ	E	G	K
1° sismostrato 0÷2.7	400	94	0.47	1.0	265	90	1512
2° sismostrato 2.7÷8.7	810	258	0.44	1.0	1961	679	5789
substrato >8.7	1440	393	0.46	1.0	4601	1576	19058

Profilo 2

Profondità media (m)	V_p	V_s	σ	γ	E	G	K
1° sismostrato 0÷2.9	390	105	0.46	1.0	329	113	1402
2° sismostrato 2.9÷9.0	760	273	0.43	1.0	2169	761	4880
substrato >9.0	1420	400	0.46	1.0	4757	1633	18399

V_p = velocità onde longitudinali in m/s V_s = velocità onde trasversali in m/s

σ = coefficiente di Poisson

γ = peso di volume in g/cm³

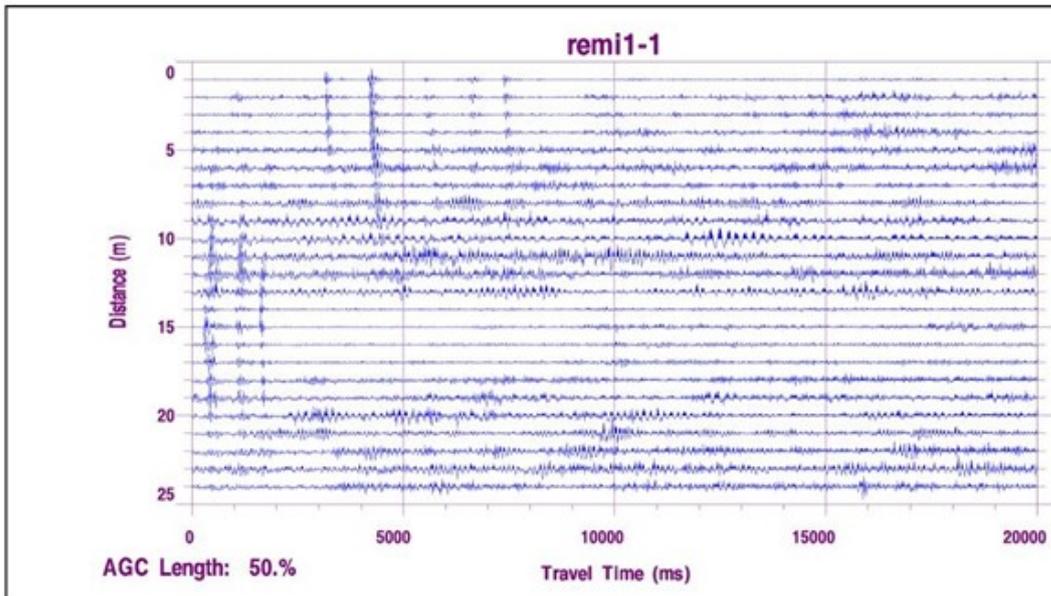
E = modulo dinamico di Young in Kg/cm² G = modulo dinamico di taglio in Kg/cm²

K = modulo dinamico di compressibilità in Kg/cm²

ALLEGATO "PROFILO SISMICO 1"

- *Sismogrammi analisi MASW (Re.Mi)*
 - *Analisi profilo MASW (Re.Mi)*
 - *Sismogrammi sismica a rifrazione onde P*
 - *Dromocrone P*
 - *Tomografia sismica ed interpretazione sismostratigrafica*
-

SISMOGRAMMI ANALISI MASW 1 (METODO RE.MI.)



Indagine MASW 1 "Analisi Re.Mi."

Immagine p-f

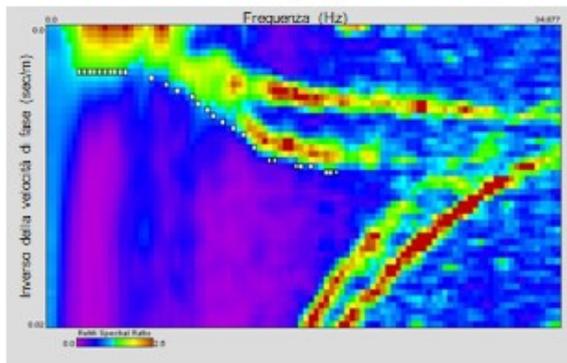


Grafico del modello di velocità
Delle onde trasversali

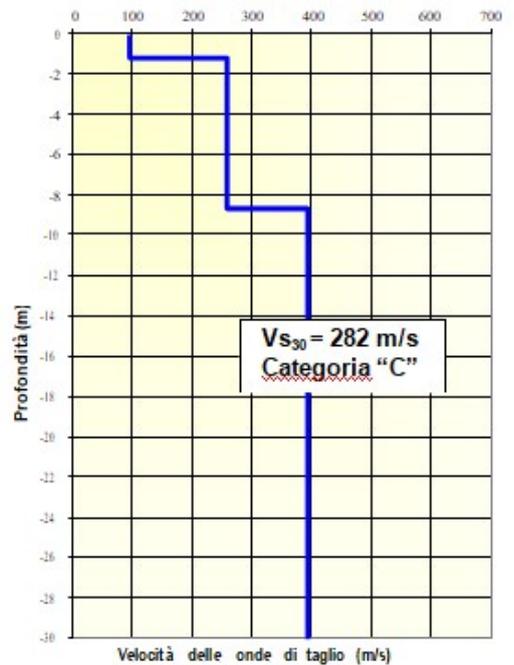
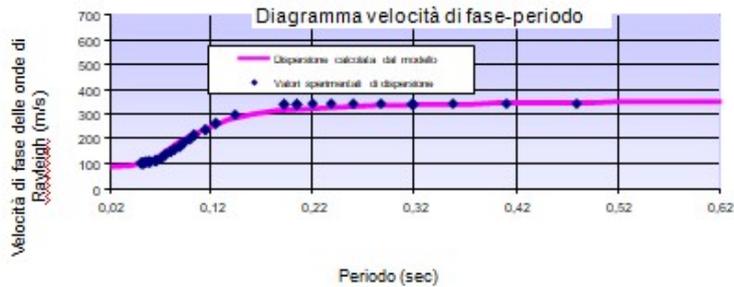
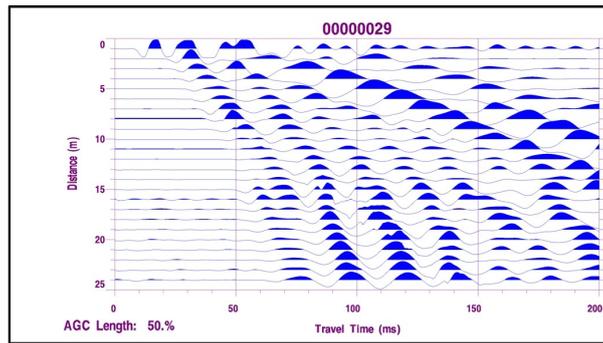


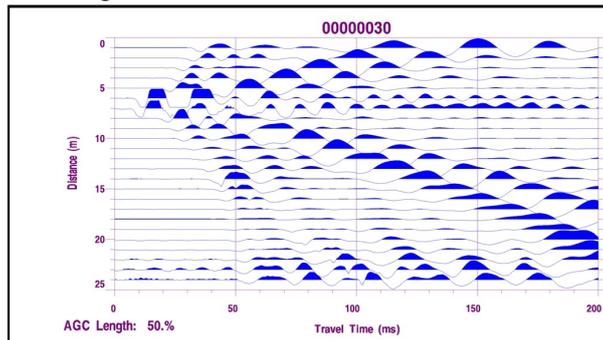
Diagramma velocità di fase-periodo



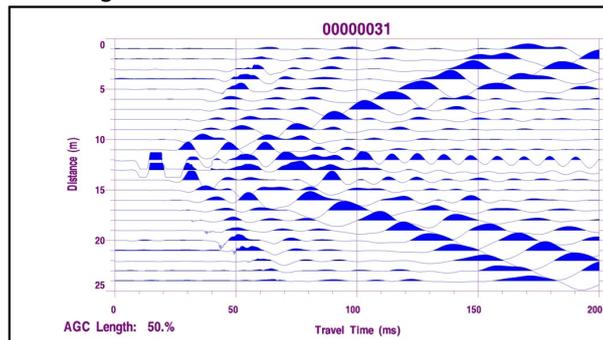
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO 1



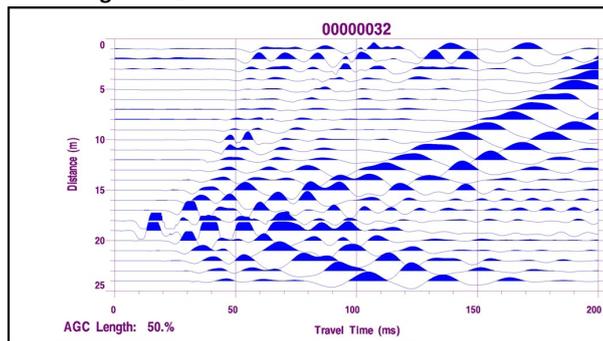
Punto sorgente "A"



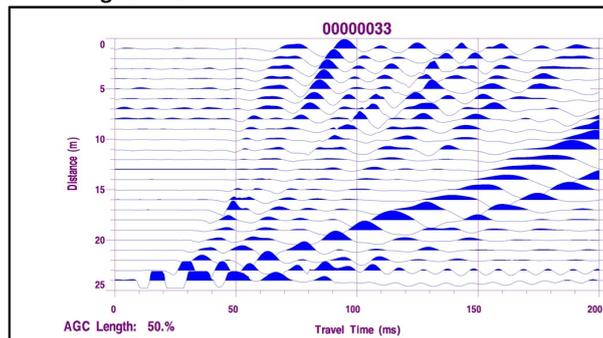
Punto sorgente "C"



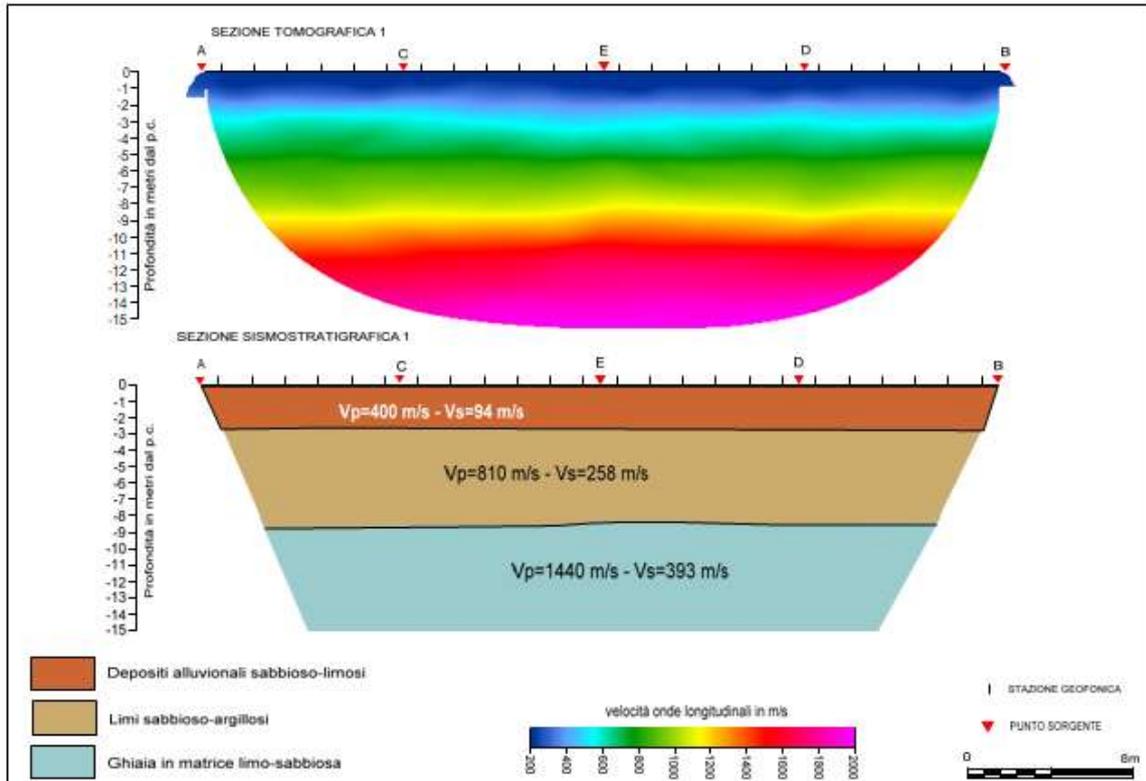
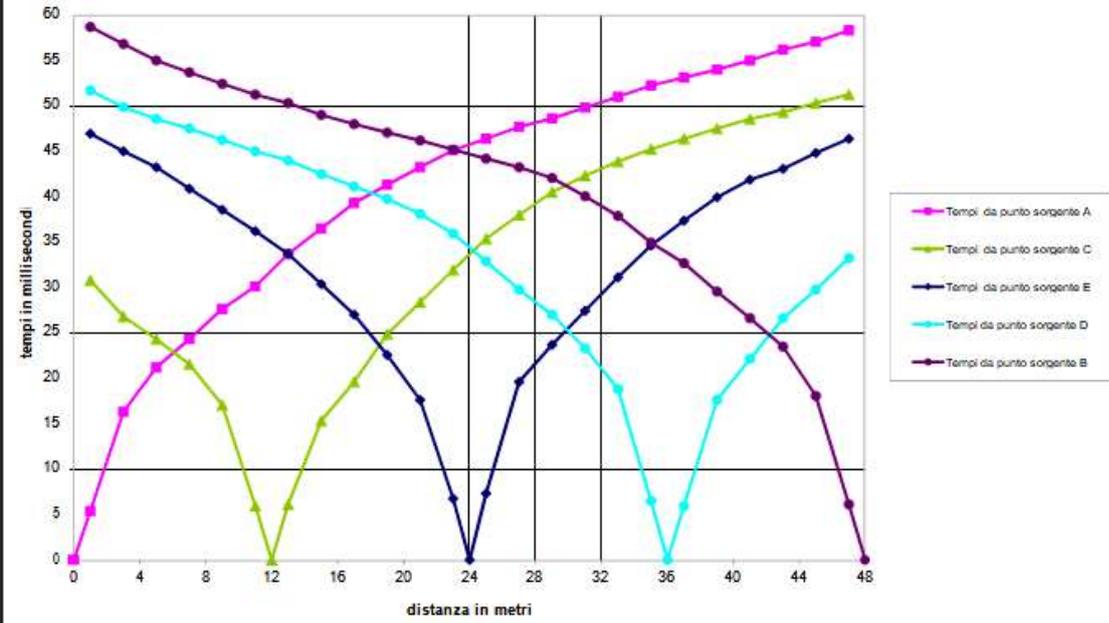
Punto sorgente "E"



Punto sorgente "D"



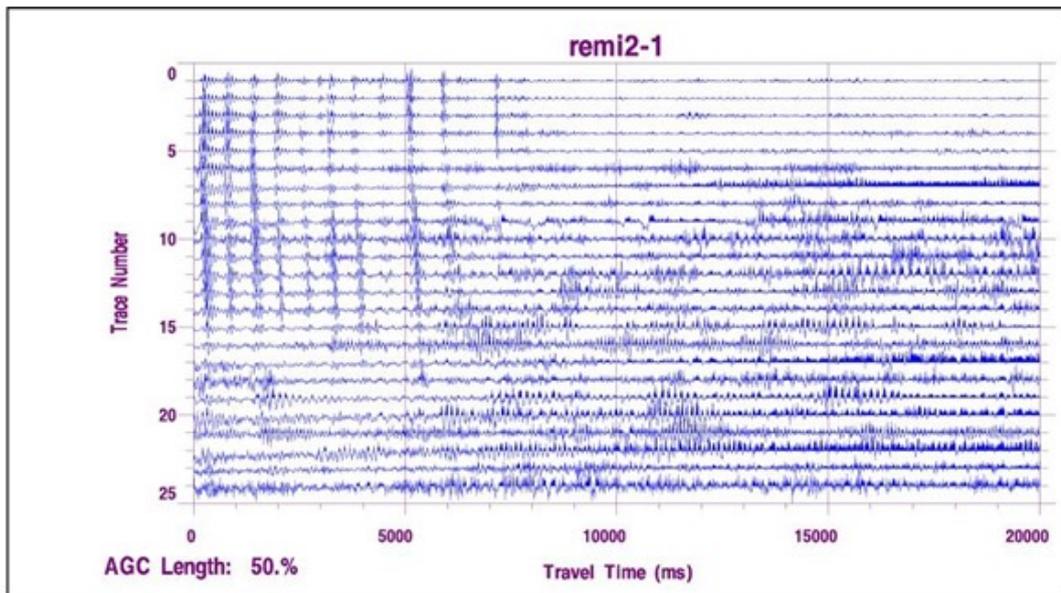
Dromocrone profilo sismico 1 - ONDE LONGITUDINALI



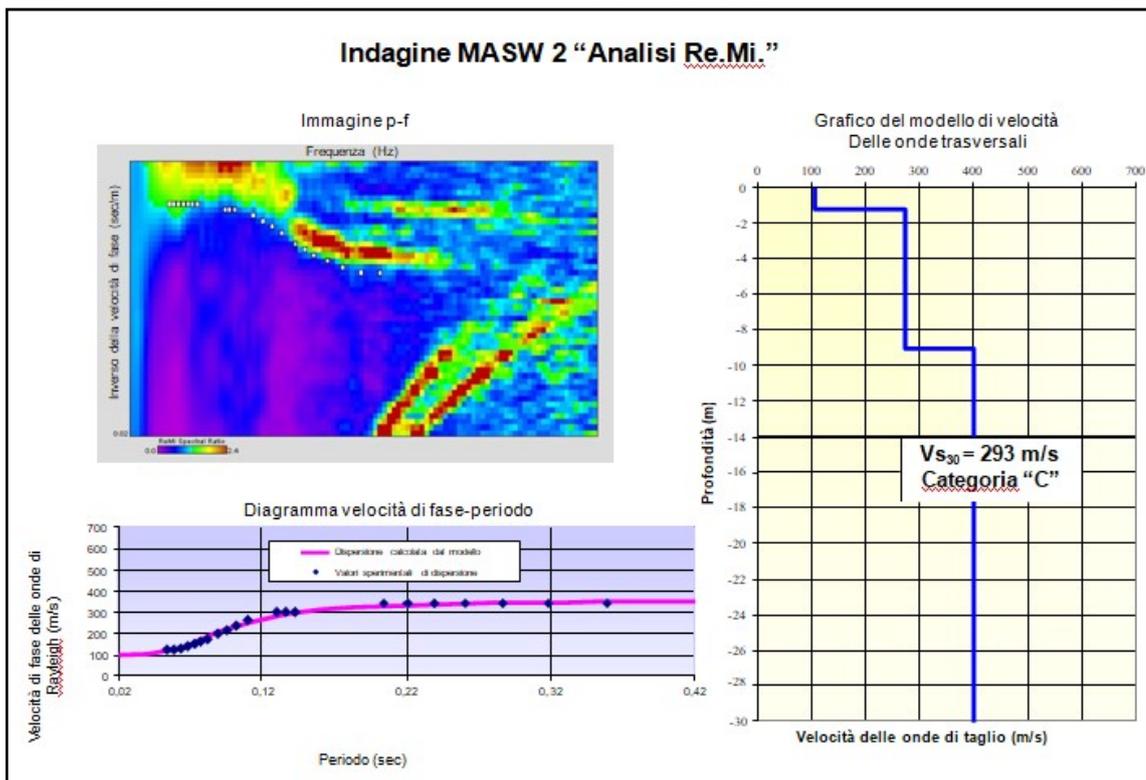
ALLEGATO “PROFILO SISMICO 2”

- *Sismogrammi analisi MASW (Re.Mi)*
 - *Analisi profilo MASW (Re.Mi)*
 - *Sismogrammi sismica a rifrazione onde P*
 - *Dromocrone P*
 - *Tomografia sismica ed interpretazione sismostratigrafica*
-

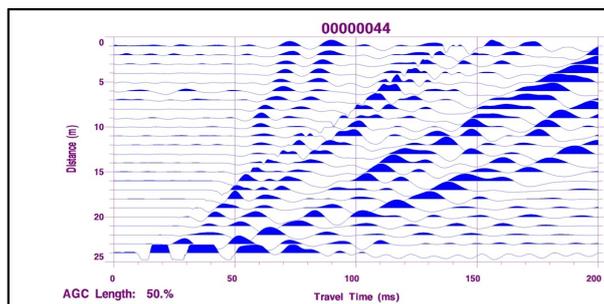
SISMOGRAMMI ANALISI MASW 2 (METODO RE.MI.)



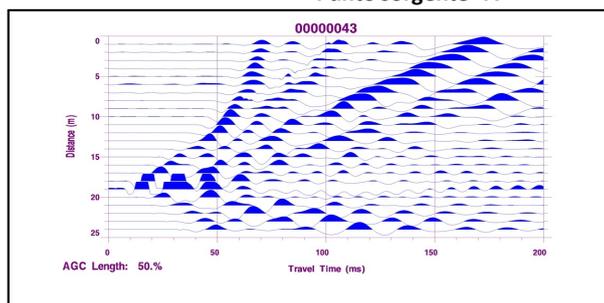
Indagine MASW 2 "Analisi Re.Mi"



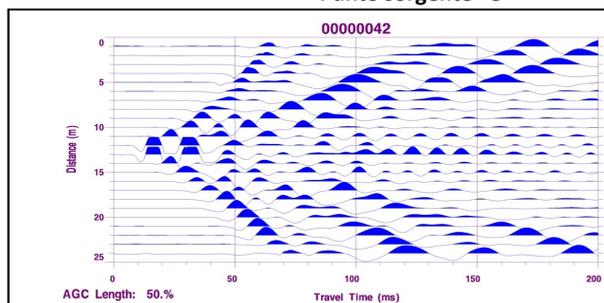
SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO 2



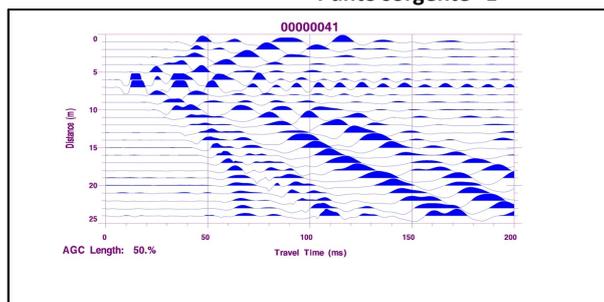
Punto sorgente "A"



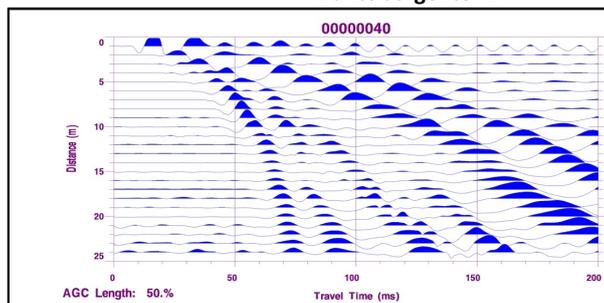
Punto sorgente "C"



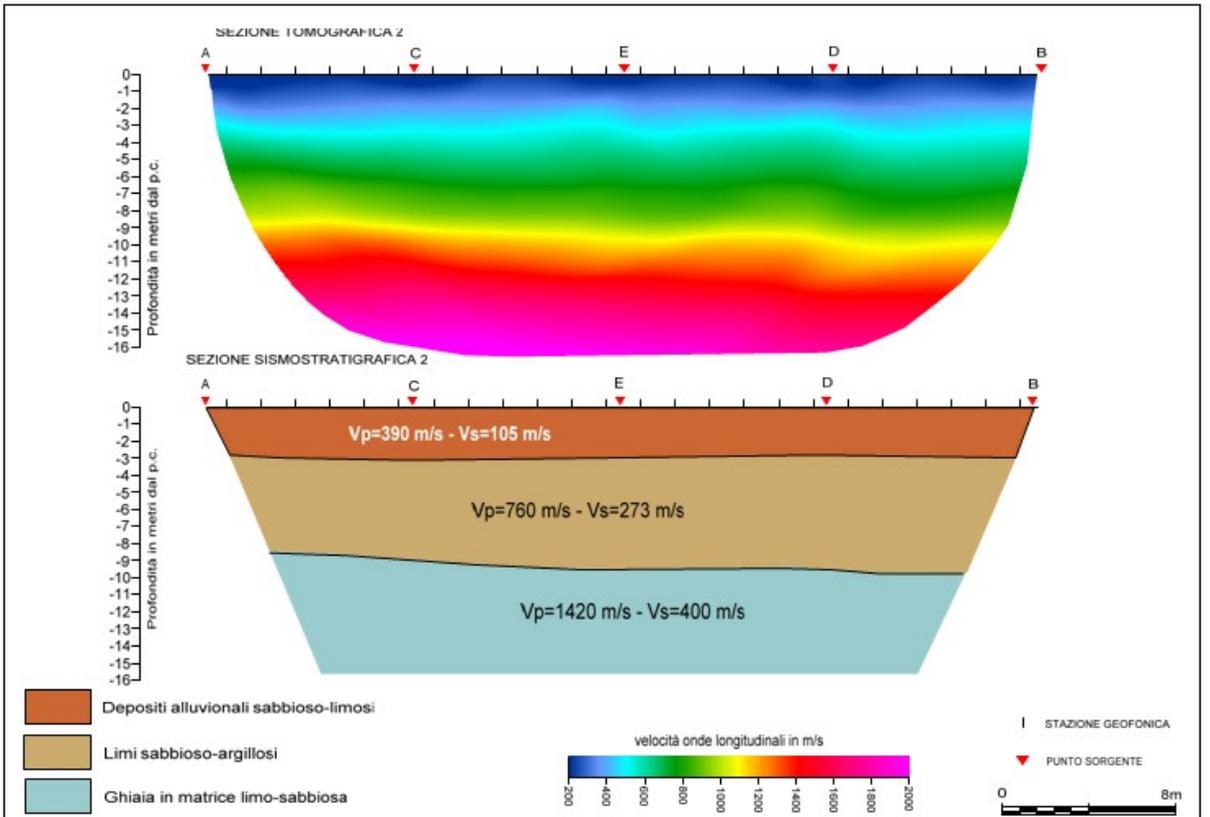
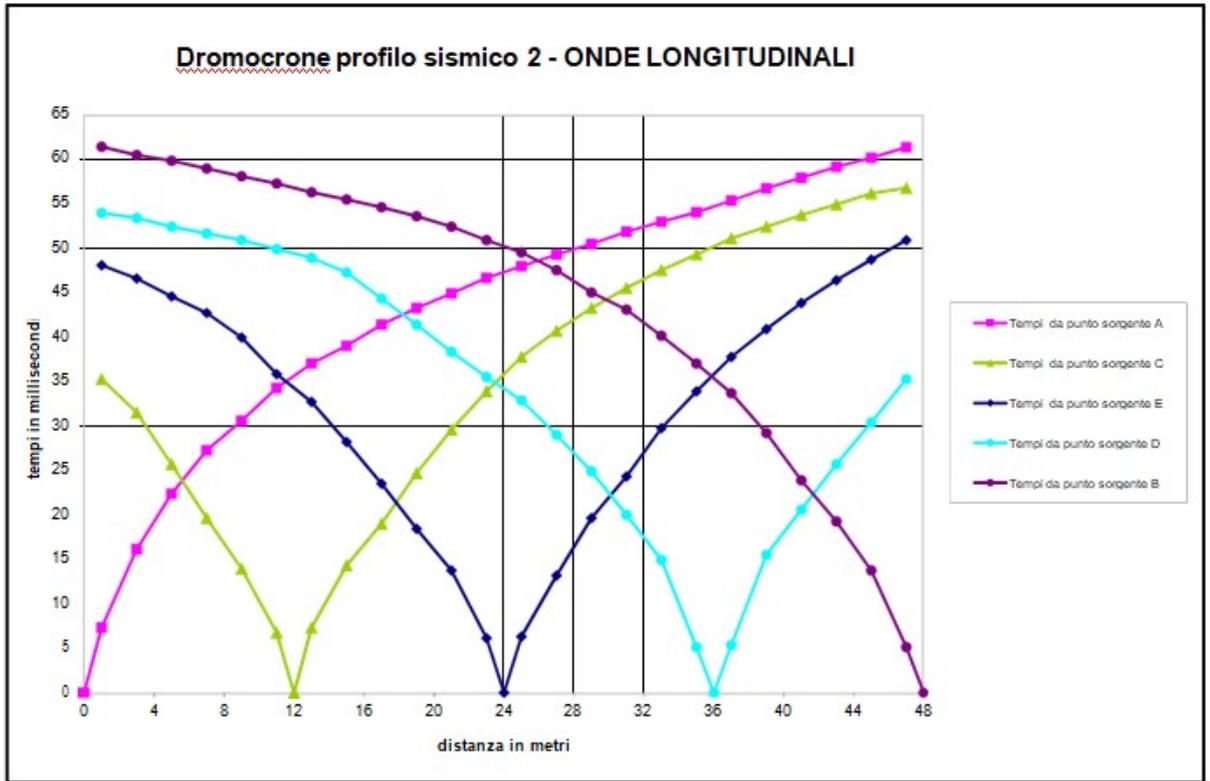
Punto sorgente "E"



Punto sorgente "D"



Punto sorgente "B"



PALI DI FONDAZIONE

NORMATIVE DI RIFERIMENTO

NTC2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» - D.M. 17 gennaio 2018

NTC2008 - Norme tecniche per le costruzioni - D.M. 14 Gennaio 2008.

CIRCOLARE 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle 'Nuove norme tecniche per le costruzioni' di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. (GU n. 47 del 26-2-2009 - Suppl. Ordinario n.27)

Eurocodice 7: Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.

Eurocodice 8: Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

Carico limite verticale

Il carico limite verticale è stato calcolato con le formule statiche, che esprimono il medesimo in funzione della geometria del palo, delle caratteristiche del terreno e dell'interfaccia palo-terreno. A riguardo, poiché la realizzazione di un palo, sia esso infisso o trivellato, modifica sempre le caratteristiche del terreno nell'intorno dello stesso, si propone di assumere un angolo di resistenza a taglio pari a:

$$\begin{aligned}\phi' &= \frac{3}{4}\phi + 10 \text{ nei pali infissi} \\ \phi' &= \phi - 3^\circ \text{ nei pali trivellati}\end{aligned}$$

dove ϕ è l'angolo di resistenza a taglio prima dell'esecuzione del palo. Di seguito indicheremo con ϕ il parametro di resistenza scelto.

Ai fini del calcolo, il carico limite Q_{lim} viene convenzionalmente suddiviso in due aliquote, la resistenza alla punta Q_p e la resistenza laterale Q_l .

Resistenza unitaria alla punta

Formula di Terzaghi

La soluzione proposta da Terzaghi assume che il terreno esistente al disopra della profondità raggiunta dalla punta del palo possa essere sostituito da un sovraccarico equivalente pari alla tensione verticale efficace (trascurando pertanto il fatto che l'interazione tra palo e terreno di fondazione possa modificare tale valore) e riconduce l'analisi al problema di capacità portante di una fondazione superficiale.

La formula di *Terzaghi* può essere scritta:

$$Q_p = c \cdot N_c \cdot s_c + \gamma \cdot L \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot D \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma$$

dove:

$$N_q = \frac{a^2}{2 \cos^2(45 + \phi/2)}$$

$$a = e^{(0.75\pi - \phi/2) \tan \phi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \phi}{2} \left(\frac{K_{p\gamma}}{\cos^2 \phi} - 1 \right)$$

Metodo di Berezantzev

Fondamentalmente *Berezantzev* fa riferimento ad una superficie di scorrimento “alla Terzaghi” che si arresta sul piano di posa (punta del palo); tuttavia egli considera che il cilindro di terreno coassiale al palo ed avente diametro pari all'estensione in sezione della superficie di scorrimento, sia in parte “sostenuto” per azione tangenziale dal rimanente terreno lungo la superficie laterale. Ne consegue un valore della pressione alla base

inferiore a γD , e tanto minore quanto più questo “effetto silo” è marcato, cioè quanto più grande è il rapporto D/B ; di ciò tiene conto il coefficiente N_q , che quindi è funzione decrescente di D/B .

La resistenza unitaria Q_p alla punta, per il caso di terreno dotato di attrito (ϕ) e di coesione (c), è data dall'espressione:

$$Q_p = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q$$

Avendo indicato con:

- γ peso unità di volume del terreno;
- L lunghezza del palo;
- N_c e N_q sono i fattori di capacità portante già comprensivi dell'effetto forma (circolare);

Metodo di Vesic

Vesic ha assimilato il problema della rottura intorno alla punta del palo a quello di espansione di una cavità cilindrica in mezzo elasto-plastico, in modo da tener conto anche della compressibilità del mezzo.

Secondo Vesic i coefficienti di capacità portante N_q e N_c si possono calcolare come segue:

$$N_q = \frac{3}{3 - \sin \phi} \left\{ \exp \left[\left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \tan \phi \right] \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) I_{rr}^{(4 \sin \phi)} [3(1 + \sin \phi)] \right\}$$

L'indice di rigidezza ridotto I_{rr} nella precedente espressione viene calcolato a partire dalla deformazione volumetrica ε_v .

L'indice di rigidezza I_r si calcola utilizzando il modulo di elasticità tangenziale G' e la resistenza a taglio s del terreno.

Quando si hanno condizioni non drenate o il suolo si trova in uno stato addensato, il termine ε_v può essere assunto pari a zero e si ottiene $I_{rr} = I_r$.

E' possibile fare una stima di I_r con i valori seguenti:

TERRENO	I_r
Sabbia	75-150
Limo	50-75
Argilla	150-250

Il termine N_c della capacità portante viene calcolato:

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (a)$$

Quando $\phi = 0$ (condizioni non drenate)

$$N_c = \frac{4}{3} (\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1$$

Metodo di Janbu

Janbu calcola N_q (con l'angolo ψ espresso in radianti) come segue:

$$N_q = \left(\tan \phi + \sqrt{1 + \tan^2 \phi} \right)^2 \exp(2\psi \tan \phi)$$

N_c si può ricavare dalla (a) quando $\phi > 0$.

Per $\phi = 0$ si usa $N_c = 5.74$

Formula di Hansen

La formula di Hansen vale per qualsiasi rapporto D/B , quindi sia per fondazioni superficiali che profonde, ma lo stesso autore introdusse dei coefficienti per meglio interpretare il comportamento reale della fondazione, senza di essi, infatti, si avrebbe un aumento troppo forte del carico limite con la profondità.

Per valori $L/D > 1$:

$$d_c = 1 + 0.4 \tan^{-1} \frac{L}{D}$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \frac{L}{D}$$

Nel caso $\phi = 0$

D/B	0	1	1.1	2	5	10	20	100
d'_c	0	0.40	0.33	0.44	0.55	0.59	0.61	0.62

Nei fattori seguenti le espressioni con apici (') valgono quando $\phi = 0$.

Fattore di forma:

$$s'_c = 0.2 \cdot \frac{D}{L}$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \cdot \frac{D}{L}$$

$$s_q = 1 + \frac{D}{L} \cdot \tan \phi$$

$$s_q = 1 + \frac{D}{L} \cdot \tan \phi$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4 \cdot \frac{D}{L}$$

Fattore di profondità:

$$d'_c = 0.4 \cdot k$$

$$d_c = 1 + 0.4k$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi \cdot (1 - \sin \phi) \cdot k$$

$$d_\gamma = 1 \text{ perqualsiasik}$$

$$k = \tan^{-1} \frac{L}{D} \text{ se } \frac{L}{D} > 1$$

Resistenza del fusto

Il metodo utilizzato per il calcolo della capacità portante laterale è il metodo α , proposto da Tomlinson (1971); la resistenza laterale viene calcolata nel seguente modo:

$$Q_1 = (\alpha c + \sigma K \tan \delta) \cdot A_l \cdot f_w$$

A_l = superficie laterale del palo;

f_w = fattore di correzione legato alla tronco-conicità del palo, ossia la diminuzione percentuale del diametro del palo con

c = valore medio della coesione (o della resistenza a taglio in condizioni non drenate);

σ = pressione verticale efficace del terreno;

K = coefficiente di spinta orizzontale, dipendente dalla tecnologia di esecuzione del palo e dal precedente stato di addensamento, viene calcolato come segue:

Per pali infissi

$$K = 1 - \tan^2\phi$$

o, nel caso specifico, è possibile assegnare i seguenti valori proposti in tabella:

Palo	K	
	Terreno sciolto	Terreno denso
Acciaio	0.5	1
Calcestr. Pref.	1	2
Legno	1	3

Per pali trivellati

$$K = 1 - \text{sen}\phi$$

δ = attrito palo-terreno funzione della scabrezza della superficie del palo;

Per pali infissi

$$\delta = 3/4 \tan\phi$$

Per pali trivellati

$$\delta = \tan\phi$$

α = coefficiente d'adesione ricavato come di seguito riportato:

Pali trivellati:

$$\text{Caquot - Kerisel} \quad \alpha = \frac{100 + c^2}{100 + 7c^2}$$

Meyerhof - Murdock (1963)

$$\alpha = 1 - 0.1 \cdot c \quad \text{per } c < 5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.525 - 0.005 \cdot c \quad \text{per } c \geq 5 \text{ t/m}^2$$

Whitaker - Cooke (1966)

$$\alpha = 0.9 \quad \text{per } c < 2.5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.8 \quad \text{per } 2.5 \leq c < 5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.6 \quad \text{per } 5 \leq c \leq 7.5 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.9 \quad \text{per } c > 7.5 \text{ t/m}^2$$

Woodward (1961)

$$\alpha = 0.9 \quad \text{per } c < 4 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.6 \quad \text{per } 4 \leq c < 8 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.5 \quad \text{per } 8 \leq c < 12 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.4 \quad \text{per } 12 \leq c \leq 20 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 0.20 \quad \text{per } c > 20 \text{ t/m}^2$$

Pali infissi

Coefficiente α per palo infisso	
$2.5 \leq c < 5 \text{ t/m}^2$	$\alpha = 1.00$
$5 \leq c < 10$	$\alpha = 0.70$
$10 \leq c < 15$	$\alpha = 0.50$
$15 \leq c < 20$	$\alpha = 0.40$
$c \geq 20$	$\alpha = 0.30$

Attrito negativo

Quando un palo viene infisso o passa attraverso uno strato di materiale compressibile prima che si sia esaurito il processo di consolidazione, il terreno si muoverà rispetto al palo facendo insorgere sforzi attritivi tra palo e terreno che inducono al cosiddetto fenomeno dell'attrito negativo. L'effetto dell'attrito negativo è quello di aumentare il carico assiale sul palo, con conseguente aumento del cedimento, dovuto all'accorciamento elastico del palo stesso per effetto dell'aumento di carico. La forza che nasce per effetto dell'attrito negativo è stimata pari alla componente attritiva della resistenza laterale (vedi Resistenza del fusto) lungo la superficie laterale a contatto con lo strato in cui si genera tale fenomeno, ma di verso opposto all'attrito positivo. La risultante così determinata non viene detratta dal carico limite, ma da quello di esercizio.

Fattore di correzione in condizioni sismiche.

Criterio di Vesic

Secondo questo autore per tenere conto del fenomeno della dilatanza nel calcolo della capacità portante è sufficiente diminuire di 2° l'angolo d'attrito degli strati di fondazione. Il limite di questo suggerimento è nel fatto che non tiene conto dell'intensità della sollecitazione sismica (espressa attraverso il parametro dell'accelerazione sismica orizzontale massima). Questo criterio pare però trovare conferma nelle osservazioni fatte in occasione di diversi eventi sismici.

Criterio di Sano

L'autore propone di diminuire l'angolo d'attrito degli strati portanti di una quantità data dalla relazione:

$$D_p = \arctg\left(\frac{a_{max}}{\sqrt{2}}\right)$$

dove a_{max} è l'accelerazione sismica orizzontale massima.

Questo criterio, rispetto a quello di *Vesic*, ha il vantaggio di prendere in considerazione anche l'intensità della sollecitazione sismica. L'esperienza però dimostra che l'applicazione acritica di questa relazione può condurre a valori eccessivamente cautelativi di *Qlim*.

Le correzioni di *Sano* e di *Vesic* si applicano esclusivamente a terreni incoerenti ben addensati. È errato applicarle a terreni sciolti o mediamente addensati, dove le vibrazioni sismiche producono il fenomeno opposto a quello della dilatanza, con aumento del grado di addensamento e dell'angolo d'attrito.

Cedimenti metodo di Davis-Poulos

Il cedimento verticale è stato calcolato con il metodo di *Davis-Poulos*, secondo il quale il palo viene considerato rigido (indeformabile) immerso in un mezzo elastico, semispazio o strato di spessore finito.

Si ipotizza che l'interazione palo-terreno sia costante a tratti lungo n superfici cilindriche in cui viene suddivisa la superficie laterale del palo.

Il cedimento della generica superficie i per effetto del carico trasmesso dal palo al terreno lungo la superficie j -esima può essere espresso:

$$W_{i,j} = (\tau_j / E) \cdot B \cdot I_{i,j}$$

Avendo indicato con:

τ_j = Incremento di tensione relativo al punto medio della striscia

E = Modulo elastico del terreno

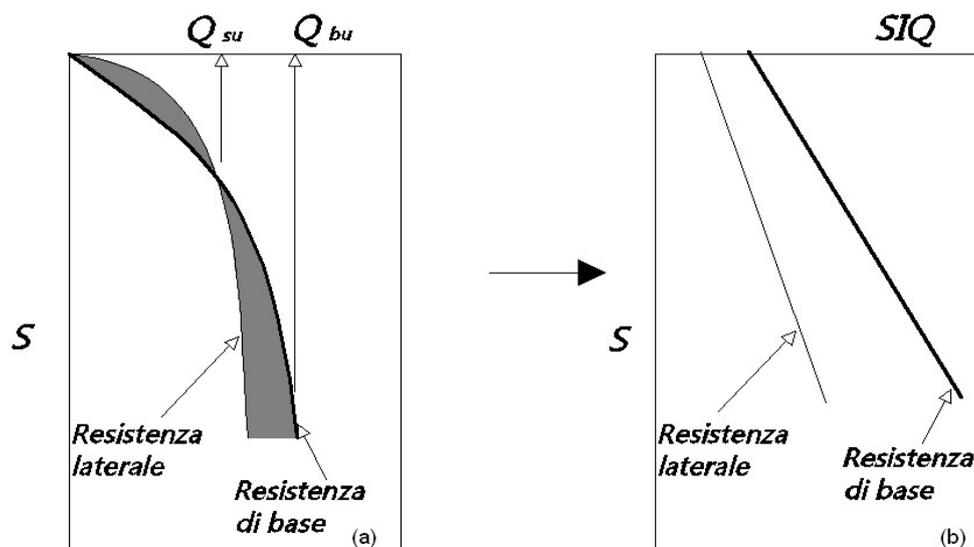
B = Diametro del palo

$I_{i,j}$ = Coefficiente di influenza

Il cedimento complessivo si ottiene sommando $W_{i,j}$ per tutte le j aree

Cedimento Metodo Iperbolico

Il metodo iperbolico modificato rappresenta uno sviluppo dello studio di Chin (1970,1972,1983) che consente di stimare il cedimento di pali singoli partendo dall'idea che il diagramma carico-cedimento, per il corpo di un palo e la sua base, abbia un andamento iperbolico. I valori del *carico ultimo laterale* (Q_{su}) e la *resistenza di base ultima* (Q_{bu}) rappresentano i termini asintotici della curva (figura a) (*Terzaghi, 1943*). Sotto queste ipotesi è possibile giungere ad una rappresentazione linearizzata del problema considerando la variazione della quantità S/Q rispetto allo spostamento S (figura b).



Grafici cedimento iperbolico (a) e linearizzato (b).

Grafici cedimento iperbolico (a) e linearizzato (b)

Lo studio di *Fleming* ha dimostrato che gli spostamenti totali stimati col metodo di *Chin* erano distorti dall'abbreviamento elastico del corpo del palo e suggerì una tecnica semplificata per la quale la deformazione elastica del palo può essere determinata, con sufficiente accuratezza, sottraendo alla stima di *Chin* l'abbreviamento del palo.

Considerando lo schema in figura l'abbreviamento elastico del palo dipende dal carico applicato Q in rapporto all'attrito laterale ultimo Q_{su} . In particolare se $Q \leq Q_{su}$ la deformazione elastica del corpo del palo corrisponde alla somma dell'abbreviamento elastico lungo la zona ad attrito basso o nullo e quello che si sviluppa lungo la parte attiva del fusto:

$$S_e = \frac{4Q(L_o + K_e L_a)}{\pi d_s^2 E_c}$$

Se, invece, si ha che $Q > Q_{su}$ bisogna considerare un ulteriore abbreviamento legato alla parte attiva del palo che deve essere aggiunta alla deformazione elastica:

$$S_e = \frac{4}{\pi d_s^2 E_c} [Q(L_o + L_a) - L_a Q_{su} (1 - k_e)]$$

I parametri della formula sono:

- d_s : diametro testa del palo.
- E_c : modulo di elasticità del materiale del palo il cui valore può essere ricavato da una interpolazione lineare tra i valori di $E_c = 26 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$ per calcestruzzo con forza specifica di 20 N/mm^2 e il valore di $E_c = 40 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$ per calcestruzzo da 40 N/mm^2 .
- L_o : lunghezza del palo ad attrito basso o nullo.
- L_a : lunghezza attiva del palo.
- k_e : rapporto della lunghezza equivalente del fusto del palo rispetto alla lunghezza attiva L_a . Si può considerare un valore di 0.5 quando si ha un attrito che si sviluppa uniformemente lungo L_a oppure quando il palo è inserito in sabbia o ghiaia. Per pali in argilla caratterizzati da uno sforzo che cresce in profondità si può usare un valore di 0.45.

Lo spostamento del *palo rigido* può essere calcolato sapendo che la somma dell'attrito laterale e della resistenza di base corrisponde al carico totale applicato alla testa del palo.

$$Q=Q_s+Q_b$$

Considerando il palo rigido lo spostamento totale in testa è uguale a quello che si ottiene lungo il fusto ed è uguale a quello misurato alla base del palo:

$$S_t=S_s=S_b$$

Dal grafico linearizzato si può vedere che lo spostamento lungo il fusto del palo può essere calcolato come:

$$S_s = \frac{M_s d_s Q_s}{Q_{su} - Q_s}$$

In cui

- M_s : fattore adimensionale di flessibilità terreno/fusto.
- d_s : diametro testa.
- Q_s : attrito.
- Q_{su} : attrito ultimo determinato col metodo statico (condizione drenata)

L'equazione dello spostamento alla base del palo ricavata da Fleming è:

$$S_b = \frac{0.6 Q_{bu} Q_b}{d_b E_b (Q_{bu} - Q_b)}$$

dove

- d_b : diametro della base del palo.
- Q_b : resistenza alla base.
- Q_{bu} : resistenza ultima alla base
- E_b : modulo di taglio corrispondente a $Q_{bu}/4$

Infine, ponendo la condizione di uguaglianza $S_s=S_b$ e considerando il carico totale applicato Q si ottiene lo spostamento totale di un palo rigido considerando solo i valori positivi della relazione:

$$S_t = \frac{-g \pm \sqrt{g^2 - 4fh}}{2f}$$

In cui le variabili sono così definite:

- $f = \eta(Q - \alpha) - \beta$
- $g = Q(\delta + \lambda\eta) - \alpha\delta - \beta\lambda$
- $h = \lambda\delta Q$
- $\alpha = Q_{su}$
- $\beta = d_b E_b Q_{bu}$
- $\lambda = M_s d_s$
- $\delta = 0.6 Q_{bu}$

$$\bullet \quad \eta = d_b E_b$$

Lo spostamento complessivo del palo comprende la componente di spostamento rigido e quella di accorciamento elastico.

Il modulo elastico del terreno E_b al di sotto della base del palo è legato alle caratteristiche del terreno ed è fortemente influenzato dalla tecnica di costruzione del palo. Fleming sostiene che è consigliabile che questo parametro di progetto sia determinato da un insieme accurato di prove in cui i pali sono caricati fino al punto in cui viene mobilitata una sostanziale quota della resistenza di punta. In mancanza di questi dati si può scegliere, cautelativamente, il valore di E_b da range di valori relativi al tipo di terreno e alla tecnica di costruzione del palo.

CARICO LIMITE ORIZZONTALE

Il carico limite orizzontale è stato calcolato secondo la teoria sviluppata da Broms il quale assume che il comportamento dell'interfaccia palo-terreno sia di tipo rigido perfettamente plastico, e cioè che la resistenza del terreno si mobilita interamente per un qualsiasi valore non nullo dello spostamento a rimanga costante al crescere dello spostamento stesso.

Si assume che il comportamento flessionale del palo sia di tipo rigido-perfettamente plastico, vale a dire che le rotazioni elastiche del palo sono trascurabili finché il momento flettente non raggiunge il valore M_y di plasticizzazione.

Per i terreni coesivi Broms propone di adottare una reazione del terreno costante con la profondità pari a:

$$p = 9 \cdot c_u \cdot B$$

con reazione nulla fino alla profondità di 1.5 d; avendo indicato con:

c_u = Coesione non drenata,

B = Diametro del palo

p = Reazione del terreno per unità di lunghezza del palo.

Per i terreni incoerenti si assume che la resistenza vari linearmente con la profondità secondo la legge:

$$p = 3K_p \gamma z \cdot B$$

avendo indicato con:

p = Reazione del terreno per unità di lunghezza del palo;

K_p = Coefficiente di spinta passiva;

γ = Peso unità di volume del terreno;

z = Profondità;

B = Diametro del palo.

Palo in condizioni d'esercizio

Analisi del palo in condizioni di esercizio: **Metodo degli elementi finiti.**

Il metodo degli elementi finiti modella il palo di fondazione, sottoposto a carichi trasversali, in modo realistico in quanto fa uso sia degli spostamenti che delle rotazioni ai nodi per definire la linea elastica del palo, pertanto rappresenta il metodo più razionale ed efficace attualmente disponibile per analizzare questo tipo di strutture.

Di seguito si richiamano i fondamenti teorici del metodo indicando con \mathbf{P} la matrice delle forze nodali esterne, con \mathbf{F} quella delle forze interne e con \mathbf{A} la matrice dei coefficienti di influenza che, per l'equilibrio tra forze esterne ed interne, lega le prime due secondo la ben nota forma:

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{F}$$

Gli spostamenti interni \mathbf{e} (traslazioni e rotazioni) dell'elemento nel generico nodo sono legati agli spostamenti esterni \mathbf{X} (traslazioni e rotazioni) applicati ai nodi, dalla seguente relazione:

$$\mathbf{e} = \mathbf{B}\mathbf{X}$$

dove la matrice \mathbf{B} è dimostrato essere la trasposta della matrice \mathbf{A} .

D'altra parte, le forze interne \mathbf{F} sono legate agli spostamenti interni \mathbf{e} dalla seguente espressione:

$$\mathbf{F} = \mathbf{S}\mathbf{e}$$

Applicando le consuete sostituzioni, si ottiene:

$$\mathbf{F} = \mathbf{SA}^T \mathbf{X}$$

e quindi

$$\mathbf{P} = \mathbf{AF} = \mathbf{A SA}^T \mathbf{X}$$

Pertanto, calcolando l'inversa della matrice $\mathbf{A SA}^T$ si ricava l'espressione degli spostamenti esterni \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A SA}^T)^{-1} \mathbf{P}$$

Noti, quindi, gli spostamenti \mathbf{X} è possibile ricavare le forze interne \mathbf{F} necessarie per il progetto della struttura.

La matrice $\mathbf{A SA}^T$ è nota come matrice di rigidità globale in quanto caratterizza il legame tra spostamenti e forze esterni nodali.

Il metodo ad elementi finiti ha, tra l'altro, il vantaggio di consentire di mettere in conto, come condizioni al contorno, rotazioni e spostamenti noti.

Le reazioni nodali delle molle che schematizzano il terreno vengono considerate come forze globali legate al modulo di reazione e all'area d'influenza del nodo. Nella soluzione ad elementi finiti per pali soggetti a carichi trasversali, il modulo di reazione viene considerato nella forma:

$$k_s = A_s + B_s Z^n$$

o, non volendo far crescere illimitatamente il k_s con la profondità, nella forma:

$$k_s = A_s + B_s \tan^{-1}(Z/B)$$

nella quale Z è la profondità e B è il diametro del palo.

I valori di A_s e $B_s Z^n$ sono ottenuti dall'espressione della capacità portante (Bowles) con fattori correttivi s_i , d_i , e i_i pari a 1:

$$k_s = q_{ult}/\Delta H = C(cN_c + 0.5\gamma B N_\gamma)$$

$$B_s Z^n = C(\gamma N_q Z^1)$$

Dove $C = 40$ è ottenuto in corrispondenza di un cedimento massimo di 25 mm.

Momenti cinematici

In presenza dell'azione sismica la risposta del palo è il risultato di una complessa interazione terreno-palo, resa di difficile interpretazione a causa dei fenomeni di non linearità nel terreno e degli effetti cinematici associati al moto del terreno.

Generalmente, alle sollecitazioni trasmesse dalla sovrastuttura si aggiungono, applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, quelle derivanti dall'interazione cinematica che produce nei pali sollecitazioni aggiuntive dipendenti principalmente dalla rigidità relativa palo-terreno.

Dalla letteratura esistente in merito a questo tipo di studi, emerge che nel caso di palo immerso in terreni stratificati, la sollecitazione flettente subisce un pronunciato incremento in prossimità dell'interfaccia fra strati di differente rigidità e tale incremento è tanto maggiore quanto più elevato è il contrasto di rigidità. In alcuni casi il valore del momento prodotto da questo effetto potrebbe superare quello che insorge nei pali in testa in presenza di incastro.

Da un'analisi di numerosi risultati, *Nikolaou et al. 2001*, ha proposto una relazione che consente di calcolare, in maniera approssimata, il momento flettente massimo in corrispondenza dell'interfaccia tra due strati di differente rigidità, in condizioni di moto stazionario con frequenza prossima alla frequenza fondamentale del deposito in cui è immerso il palo:

$$M = 0.042 \cdot \tau_c \cdot d^3 \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.30} \cdot \left(\frac{E_p}{E_1}\right)^{0.65} \cdot \left(\frac{E_p}{E_1}\right)^{0.65} \cdot \left(\frac{V_{s2}}{V_1}\right)^{0.50}$$

in cui $\tau_c = a_{\max} \rho_1 H_1$; a_{\max} accelerazione sismica, ρ_1 densità del terreno, H_1 spessore dello strato, V_{s1} e V_{s2} , rispettivamente, la velocità delle onde di taglio nei due strati; E_1 è modulo di rigidezza dello strato superiore di terreno, E_p modulo di elasticità del palo, d diametro del palo, L lunghezza del palo.

Dati generali...

Diametro punta	1,00 m
Lunghezza	15,00 m
Tipo	Trivellato
Portanza di punta calcolata con:	Berezantzev
Calcestruzzo tipo	1
Acciaio tipo	1

SISMA

Accelerazione sismica	0,072
Coefficiente di intensità sismico [Kh]	0,0129
Coefficiente di intensità sismico [Kv]	0,0065

Coefficienti sismici [N.T.C.]**Dati generali**

Tipo opera:	2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:	Classe II
Vita nominale:	50,0 [anni]
Vita di riferimento:	50,0 [anni]

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo:	C
Categoria topografica:	T1

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0,633	1,0	0,0646	0,0323
S.L.D.	0,8085	0,47	0,0388	0,0194
S.L.V.	1,7655	0,38	0,0684	0,0342
S.L.C.	2,1545	1,0	0,2197	0,1099

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Opere di sostegno

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O. - SLE	30,0	0,422	2,527	0,257
S.L.D. - SLE	50,0	0,539	2,504	0,270
S.L.V. - SLO	475,0	1,177	2,620	0,297
S.L.C. - SLO	975,0	1,471	2,615	0,307

Dati Generali

Località
Indirizzo
Foggia
Lat. Long. 41.902783 12.496365

Dati opera
Tipo opera: 2 - Opere ordinarie
Classe d'uso: Classe II
V. Nominale: 50 V. Rif.: 50

Parametri sismici su sito di riferimento

SL	TR [Anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec.]
SLO	30.00	0.422	2.527	0.257
SLD	50.00	0.539	2.504	0.270
SLV	475.00	1.177	2.620	0.297
SLC	975.00	1.471	2.615	0.307

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Muri di sostegno (NTC 2018)

SL	amax [m/s ²]	Beta	khk [-]	kvk [-]	Khi [-]
SLO	0.633	1.0	0.0646	0.0323	0.0
SLD	0.8085	0.47	0.0388	0.0194	0.0
SLV	1.7655	0.38	0.0684	0.0342	0.0
SLC	2.1545	1.0	0.2197	0.1099	0.0

Stato limite di riferimento: SLO

Dati Generali

Località
Indirizzo
Manfredonia - FG
Lat. Long. 41.630734 15.91651

Dati opera
Tipo opera: 2 - Opere ordinarie
Classe d'uso: Classe II
V. Nominale: 50 V. Rif.: 50

Parametri sismici su sito di riferimento

SL	TR [Anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec.]
SLO	30.00	0.530	2.463	0.274
SLD	50.00	0.696	2.493	0.288
SLV	475.00	1.932	2.462	0.332
SLC	975.00	2.560	2.437	0.341

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Muri di sostegno (NTC 2018)

SL	amax [m/s ²]	Beta	khk [-]	kvk [-]	Khi [-]
SLO	0.795	1.0	0.0811	0.0405	0.0
SLD	1.044	0.47	0.05	0.025	0.0
SLV	2.7221	0.38	0.1055	0.0527	0.0
SLC	3.3748	1.0	0.3442	0.1721	0.0

Stato limite di riferimento: SLO

Archivio materiali

Conglomerati

Nr.	Classe Calcestruzzo	fck,cubi [Kg/cm ²]	Ec [Kg/cm ²]	fck [Kg/cm ²]	fed [Kg/cm ²]	fctd [Kg/cm ²]	fctm [Kg/cm ²]
1	C20/25	250	299600	200	113,3	10,1	22,1
2	C25/30	300	314750	250	141,6	11,4	25,6
3	C28/35	350	323080	280	158,6	12,6	27,6
4	C40/50	500	352200	400	226,6	16,3	35

Acciai:

Nr.	Classe Acciaio	Es [Kg/cm ²]	fyk [Kg/cm ²]	fyd [Kg/cm ²]	ftk [Kg/cm ²]	ftd [Kg/cm ²]	ep_tk	epd_ult	β1*β2 in.	β1*β2 fin.
1	B450C	2000000	4500	3913	4500	3913	.075	.0675	1	0,5
2	B450C*	2000000	4500	3913	5400	4500	.075	.0675	1	0,5
3	B450C**	2000000	4500	3913	4582	3985	.012	.01	1	0,5
4	S235H	2141370	2447,28	2128,11	3670,92	2128,11	0,012	0,01	1	0,5
5	S275H	2141370	2855,16	2482,97	4384,71	2482,97	0,012	0,01	1	0,5
6	S355H	2141370	3670,92	3191,66	5200,47	3670,92	0,012	0,01	1	0,5

Stratigrafia

Nr.: Numero dello strato. Hs: Spessore dello strato. Fi: Angolo di attrito. c: Coesione Alfa: Coefficiente adesione attrito laterale. Vs: Velocità onde di taglio.

Caratterizzazione Geotecnica

Descrizione Litologica	Depositi Alluvionali
<i>Peso volume medio</i>	$\gamma_m = 1,94 \text{ g/cm}^3$
<i>Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungotermine)</i>	$\phi_m = 26^\circ - 28^\circ$
<i>Coesione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine)</i>	$c'm = 0,07 \text{ kg/cm}^2$
<i>Coesione non drenata</i>	$C_m = 1,2 \text{ kg/cm}^2$
<i>Modulo di Edometrico medio</i>	$E_m = 80 - 153 \text{ kg/cm}^2$
<i>Modulo di Poisson</i>	$\nu = 0.35$
<i>Modulo elastico</i>	$E_s = 20 - 200 \text{ kg/cm}^2$

Carico limite

Stratigrafia	Nq	Nc	Fi/Cstrato punta Palo (°)/[kg/cm ²]	Peso palo [kg]	Carico limite punta [kg]	Carico limite laterale [kg]	Carico limite [kg]	Attrito negativo [kg]	Carico limite orizzontale [kg]
A1+M1+R3	27,16	38,78	34/0,00	19634,95	0,00	92708,34	73073,39	--	--

RESISTENZA DI PROGETTO CARICHI ASSIALI

Resistenza caratteristica carichi assiali. Nome combinazione:

Numero verticali di indagine	1
Fattore correlazione verticale indagate media (xi3)	1,00
Fattore correlazione verticale indagate minima (xi4)	1,00

	Rc, Min [kg]	Rc, Media [kg]	Rc, Max [kg]
Base	--	--	--
Laterale	92708,34	92708,34	92708,34
Totale	73073,39	73073,39	73073,39

Coefficiente parziale resistenza caratteristica Laterale	R3 2,50
Resistenza di progetto laterale	37083,34 kg
Resistenza di progetto	17448,38 kg

Cedimento (Poulos e Davis 1968)

Carico applicato	100,00 kg
Coefficiente influenza	0,15
Cedimento	0,00 cm

Modello ad elementi finiti

Max spostamento lineare del terreno	0,013 cm
Tipo analisi	Lineare
Massimo numero di iterazioni	1,00
Fattore di riduzione molla fondo scavo	1,00
Numero di elementi	9,00
Nodo sulla superficie del terreno [$< n^\circ$ nodi]	1,00
Modulo di reazione Ks	Bowles

ANALISI AD ELEMENTI FINITI [Stratigrafia di riferimento...1]

El. No	Lunghezza [m]	Ks [kg/cm ³]	Sforzo normale [kg]	Momento [kgm]	Taglio [kg]	Reazione terreno [kg]	Rotazione (°)	Spostamento [m]	Pressione terreno [kg/cm ²]
1	1,67	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1,67	0,087	3272,49	0	0	0	0	0	0
3	1,67	11,566	6544,98	0	0	0	0	0	0
4	1,67	11,566	9817,48	0	0	0	0	0	0
5	1,67	11,566	13089,97	0	0	0	0	0	0
6	1,67	11,566	16362,46	0	0	0	0	0	0
7	1,67	11,566	19634,95	0	0	0	0	0	0
8	1,67	11,566	22907,45	0	0	0	0	0	0
9	1,67	11,566	26179,94	0	0	0	0	0	0
10		11,566	29452,43	0	0	0	0	0	0

ARMATURE

Nodo	Z [m]	Nd [kg]	Md [kgm]	Td [kg]	Nr. Barre Diametro	Nu [kg]	Mu [kgm]	Cond. Verifica Flessione	Ver. Presso-Flessione	Def. Max Cls	Def. Max Fe	Asse Neutro [cm]	Passo Staffe [cm]	Res. Taglio [kg]	Sicurezza taglio	Cond. Verifica Taglio
1	0	--	--	--	12Ø16	-0,55	28648,91	2864,89	Verificata	5,79E-04	-1,96E-03	27,16	--	--	--	Verificata
2	1,67	3272,49	--	--	12Ø16	3272,50	29770,87	2977,09	Verificata	6,02E-04	-1,96E-03	26,47	--	--	--	Verificata
3	3,33	6544,98	--	--	12Ø16	6544,62	30883,53	3088,35	Verificata	6,24E-04	-1,96E-03	25,80	--	--	--	Verificata
4	5	9817,48	--	--	12Ø16	9816,79	31986,31	3198,63	Verificata	6,46E-04	-1,96E-03	25,17	--	--	--	Verificata
5	6,67	13089,97	--	--	12Ø16	13090,52	33080,22	3308,02	Verificata	6,68E-04	-1,96E-03	24,55	--	--	--	Verificata
6	8,33	16362,46	--	--	12Ø16	16362,46	34164,72	3416,47	Verificata	6,89E-04	-1,96E-03	23,96	--	--	--	Verificata
7	10	19634,95	--	--	12Ø16	19634,10	35240,39	3524,04	Verificata	7,10E-04	-1,96E-03	23,38	--	--	--	Verificata
8	11,67	22907,45	--	--	12Ø16	22907,31	36307,91	3630,79	Verificata	7,30E-04	-1,96E-03	22,83	--	--	--	Verificata
9	13,33	26179,94	--	--	12Ø16	26179,39	37366,50	3736,65	Verificata	7,50E-04	-1,96E-03	22,29	--	--	--	Verificata
10	15	29452,43	--	--	12Ø16	29451,47	38416,62	3841,66	Verificata	7,70E-04	-1,96E-03	21,77	--	--	--	Verificata