



REGIONE PUGLIA

PROVINCIA DI FOGGIA



Comune di FOGGIA

<p>Proponente</p>	<p><b>ARTEMIS SRL</b> Via Milazzo 17 - Bologna P.IVA 03986191207 artemis_pec@pec.it</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">  <div style="text-align: right;"> <p>Partnered by:</p>  </div> </div>				
<p>Progettazione</p>	<p><b>Ing. Fabio Domenico Amico</b> Via Milazzo, 17 40121 Bologna E-Mail: f.amico@green-go.net</p> 	<p>Studio Ambientale e Paesaggistico</p>	<p><b>Arch. Antonio Demaio</b> Via N. delli Carri, 48 - 71121 Foggia (FG) Tel. 0881.756251   Fax 1784412324 E-Mail: sit.vega@gmail.com</p> 		
<p>Studio Incidenza Ambientale Flora fauna ed ecosistema</p>	<p><b>Dott. Forestale Luigi Lupo</b> Corso Roma, 110 - 71121 Foggia E-Mail: luigilupo@libero.it</p> 	<p>Studio Idraulico</p>	<p><b>Ing. Antonella Laura Giordano</b> Viale degli Aviatori, 73/F14 - 71122 Foggia (FG) Tel. 0881.331935 E-Mail: lauragioradano.ing@libero.it</p> 		
<p>Studio Agronomico</p>	<p><b>Dott. agr. Giuseppe Caputo</b> Via Mazzini, 350 - 71010 Carpino (FG) E-Mail: giuseppecpt92@gmail.com</p> 	<p>Studio Geologico</p>	<p><b>Studio di Geologia Tecnica &amp; Ambientale</b> <b>Dott.sa Geol. Giovanna Amedei</b> Via Pietro Nenni, 4 - 71012 Rodi Garganico (FG) Tel./Fax 0884.965793   Cell. 347.6262259 E-Mail: giovannaamedei@fiscali.it</p> 		
<p>Studio Archeologico</p>	<p><b>Dott. Antonio Bruscella</b> Piazza Alcide De Gasperi, 27 - 85100 Potenza (Pz) Tel. 340.5809582 E-Mail: antoniobruscella@hotmail.it</p>  <p style="text-align: right;">Odos s.n.c. di Bruscella Antonio e Russo Carla Via Vincenzo Capozzi, n. 8 71121 Foggia C.F. e P.I.: 04124960719 e-mail: info@odosarcheologia.it</p> <p style="text-align: center;"><i>Antonio Bruscella</i></p>				
<p>Opera</p>	<p><b>Progetto di realizzazione di un impianto agro-voltaico provvisto di inseguitori mono-assiali e relative opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera.</b></p>				
<p>Oggetto</p>	<p>Folder: G1F8PR6_RelazioneGeotecnica.zip</p> <p>Nome Elaborato: G1F8PR6_RelazioneGeotecnica</p> <p>Descrizione Elaborato: DNRSS0R06-00 - Relazione Geotecnica</p>				
<p>00</p>	<p>Luglio 2022</p>	<p>Emissione per progetto definitivo</p>		<p>Vega</p>	<p>Arch. A. Demaio Artemis srl</p>
<p>Rev.</p>	<p>Data</p>	<p>Oggetto della revisione</p>		<p>Elaborazione</p>	<p>Verifica Approvazione</p>
<p>Scala:</p>	<p><b>G1F8PR6</b></p>				
<p>Formato:</p>	<p>Codice Pratica</p>	<p><b>G1F8PR6</b></p>			



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

## **INDICE**

<b>1- Premessa e Inquadramento Normativo</b>	<b>Pag. 2</b>
<b>2- Inquadramento Area d'intervento</b>	<b>Pag. 6</b>
<b>2.1-Ubicazione area d'intervento</b>	<b>Pag. 6</b>
<b>3 – Lineamenti Geologici e Geomorfologici generali</b>	<b>Pag. 8</b>
<b>4 – Caratterizzazione dei litotipi locali e assetto litostratigrafico</b>	<b>Pag. 11</b>
<b>4.1 - Geolitologia</b>	<b>Pag. 11</b>
<b>4.2 - Geomorfologia</b>	<b>Pag. 14</b>
<b>5 – Pianificazione ed esecuzione delle indagini</b>	<b>Pag. 18</b>
<b>5.1 – Metodologia di Indagini adottate</b>	<b>Pag. 18</b>
<b>5.2 – Risultati Indagine Geosismica</b>	<b>Pag. 20</b>
<b>6 – Successione Litostratigrafica</b>	<b>Pag. 22</b>
<b>7 – Sismicità</b>	<b>Pag. 27</b>
<b>7.1 – Inquadramento Sismico</b>	<b>Pag. 27</b>
<b>8 – Caratteri Fisico – Meccanici geotecnici del terreno</b>	<b>Pag. 35</b>
<b>9 – Conclusioni</b>	<b>Pag. 36</b>

## **APPENDICE**

<b>Risultati MASW</b>	<b>Allegato n. 1</b>
<b>Calcoli Portanza Palo</b>	<b>Allegato n. 2</b>



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

## **1 – PREMESSA**

### **E INQUADRAMENTO NORMATIVO**

Il presente studio, redatto su incarico della proponente Società Artemis Srl con sede legale in Via Milazzo n. 17, 40121 Bologna, 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 eseguito gli studi e redatto la presente relazione volta alla definizione del quadro geologico, geologico-tecnico ed ambientale dei terreni interessati dal “*Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*”.

Nel dettaglio il progetto prevede la realizzazione di un impianto impianto agrovoltaico provvisto di inseguitori mono-assiali e relative opere connesse, di potenza di immissione in rete pari a 25,025 MW (potenza di picco pari a 30,02 MWp); l'impianto fotovoltaico sarà connesso alla rete elettrica nazionale in virtù dell'STMG proposta da Terna (Codice Pratica 201901040), nella titolarità della società proponente, con potenza in immissione pari a 25 MW. Lo schema di allacciamento prevede il collegamento alla rete di Trasmissione tramite la realizzazione di una sottostazione di trasformazione 30/150 kV collegata in antenna a 150 kV con l'allargamento della sottostazione elettrica (SE) di Foggia a 380/150 kV della RTN benestariata da Terna.



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

Tutto il progetto sarà eseguito secondo le caratteristiche tecniche complessive meglio esplicitate nella Relazione Descrittiva Generale a firma dei progettisti.

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, geomorfologiche 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 successi-



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

vo 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 indagini sismiche di analisi spettrale delle onde superficiali con tecnica Multichannel Analysis Surface Waves (MASW);

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*

---



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

*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 delle zone sismiche del territorio regionale e delle tipologie di edifici ed opere strategici e rilevanti -Approvazione del programma temporale e delle indicazioni per le verifiche tecniche da effettuarsi sugli stessi*



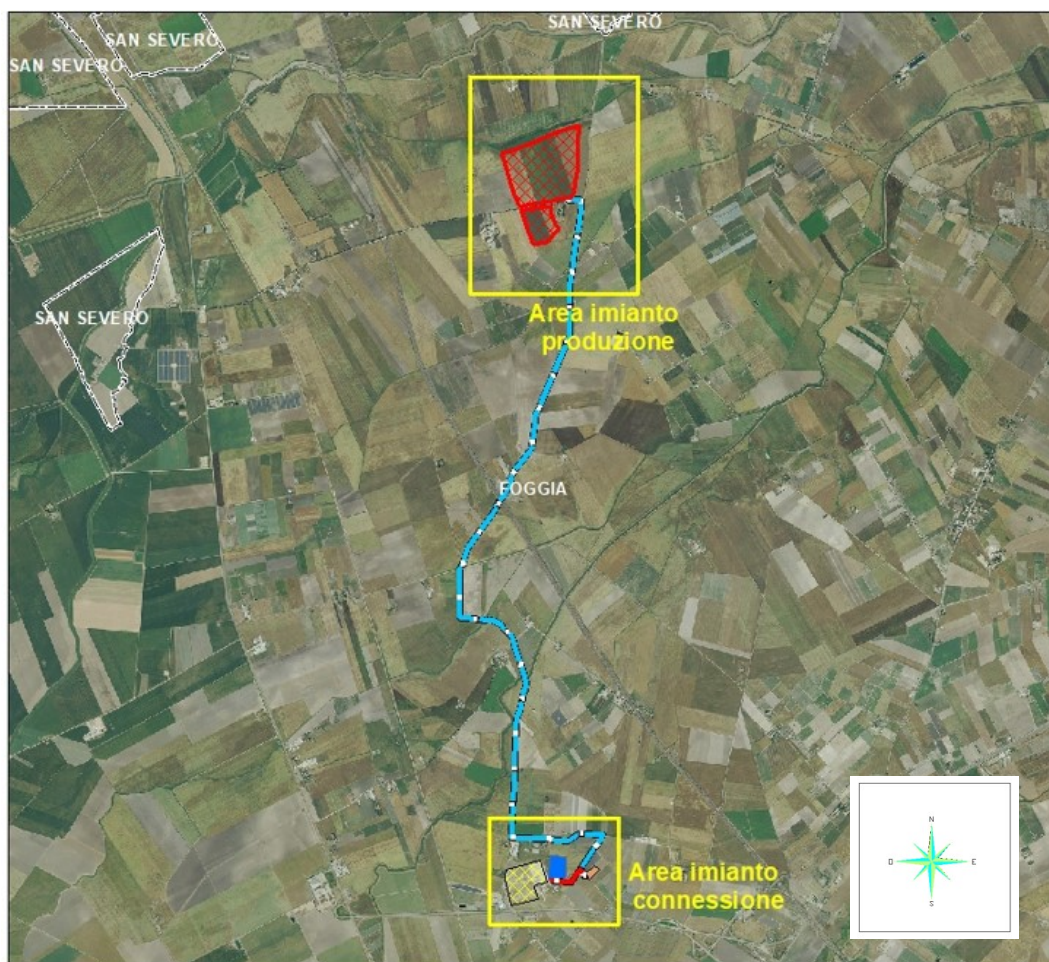
Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

## **2- INQUADRAMENTO GEOGRAFICO**

### ***2.1: Ubicazione Area d'intervento***

Il territorio del Comune di Foggia è situato lungo l'asse principale del Tavoliere Settentrionale a circa 45 Km dal litorale adriatico.

L'area di progetto, la cui superficie è pari a circa 67 ha , costeggia la strada Provinciale 24 e si trova a circa 10 km a Nord rispetto al centro abitato di Foggia (Fig. 1)



***Fig. 1: Foto aerea dell'area d'intervento***



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

Dal punto di vista catastale l'area dell'impianto di produzione è individuabile secondo il seguente prospetto:

<b>Comune</b>	<b>Foglio</b>
Foggia	11
Foggia	24
Foggia	25
Foggia	37
Foggia	51

*Fig. 2: Stralcio Catastale – Impianto di produzione*



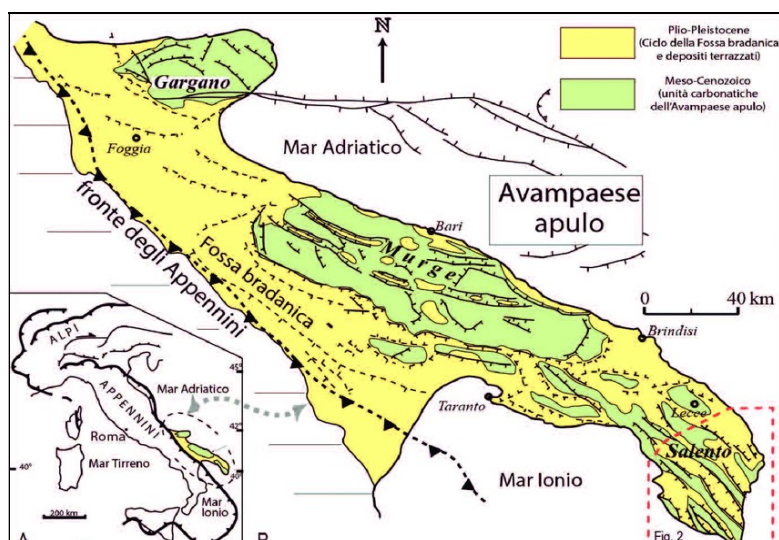


### **3 - CENNI GEOLOGICI E GEOMORFOLOGICI**

#### **GENERALI**

##### **3.1 – Geologia Generale**

Il Tavoliere di Puglia rappresenta il settore settentrionale della Fossa bradanica, limitato ad O dal Subappennino dauno e ad E dal Promontorio del Gargano (Fig 3).



**Fig.3: Schema geologico generale della Regione Puglia**

La Fossa bradanica è caratterizzata nel corso del Pliocene e del Quaternario da due distinte fasi evolutive:

- 1) una marcata subsidenza, stimata attorno a 1mm/anno nel Pliocene e nel Pleistocene inferiore, connessa alla subsidenza del margine interno della Piattaforma Apula;



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

2) un sollevamento, valutato incirca 0,3-0,5 mm/anno, che comincia alla fine del Pleistocene inferiore e si esplica nel Pleistocene medio-superiore.

Dal punto di vista regionale la subsidenza plio-pleistocenica è segnata dalla sedimentazione della Formazione della Calcarenite di Gravina che passa verso l'alto, e lateralmente, ad una spessa successione siltoso-argilloso-sabbiosa (argille subappennine); il sollevamento del Pleistocene medio e superiore è invece segnato sia da depositi regressivi che da depositi terrazzati (Tropeano et al., 2002).

Nel Tavoliere centrale affiora la successione marina Plio – Pleistocenica rappresentata, a partire dal basso, dalle argille subappenniniche sulle quali poggiano due unità, costituite dalle Sabbie di Monte Marano e dal Conglomerato di Irsina che rappresentano i termini regressivi della successione bradanica (Caldara & Pennetta, 1989; 1993).

Nella restante parte affiorano depositi marini terrazzati che formano modesti rilievi digradanti verso E.

Tutte le unità riconosciute sono state distinte come Sintemi, raggruppati nel Supersintema del Tavoliere di Puglia ed associati al sollevamento regionale che ha interessato l'intera area della Fossa bradanica a partire dalla fine del Pleistocene Inferiore inizio del Pleistocene medio.



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

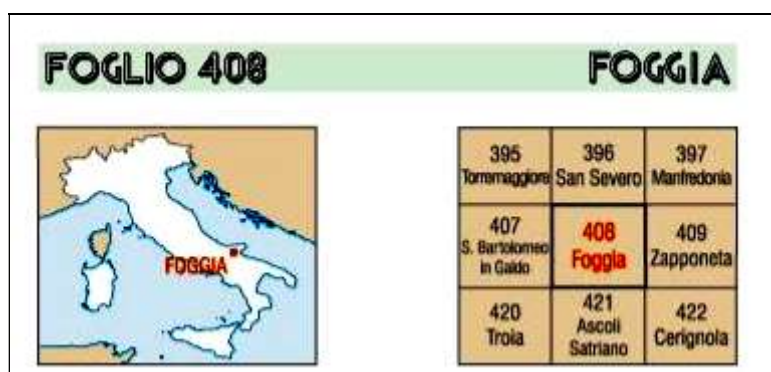
Questo progressivo e rapido sollevamento ha determinato lo spostamento verso Est del livello di base e la separazione fra l'Avanfossa subsidente e l'area di accumulo dei depositi costieri in facies alluvionale; ed è proprio quest'ultima area che assume la denominazione di Tavoliere di Puglia .



#### **4- CARATTERIZZAZIONE DEI LITOTIPI LOCALI** **E ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO**

##### **4.1 - Geolitologia**

Dal punto di vista geologico il Comune di Foggia rientra nel Foglio n. 408 della Carta Geologica d'Italia a Scala 1:50.000 (Fig. 4).



*Fig. 4: Ubicazione geologica dell'area*

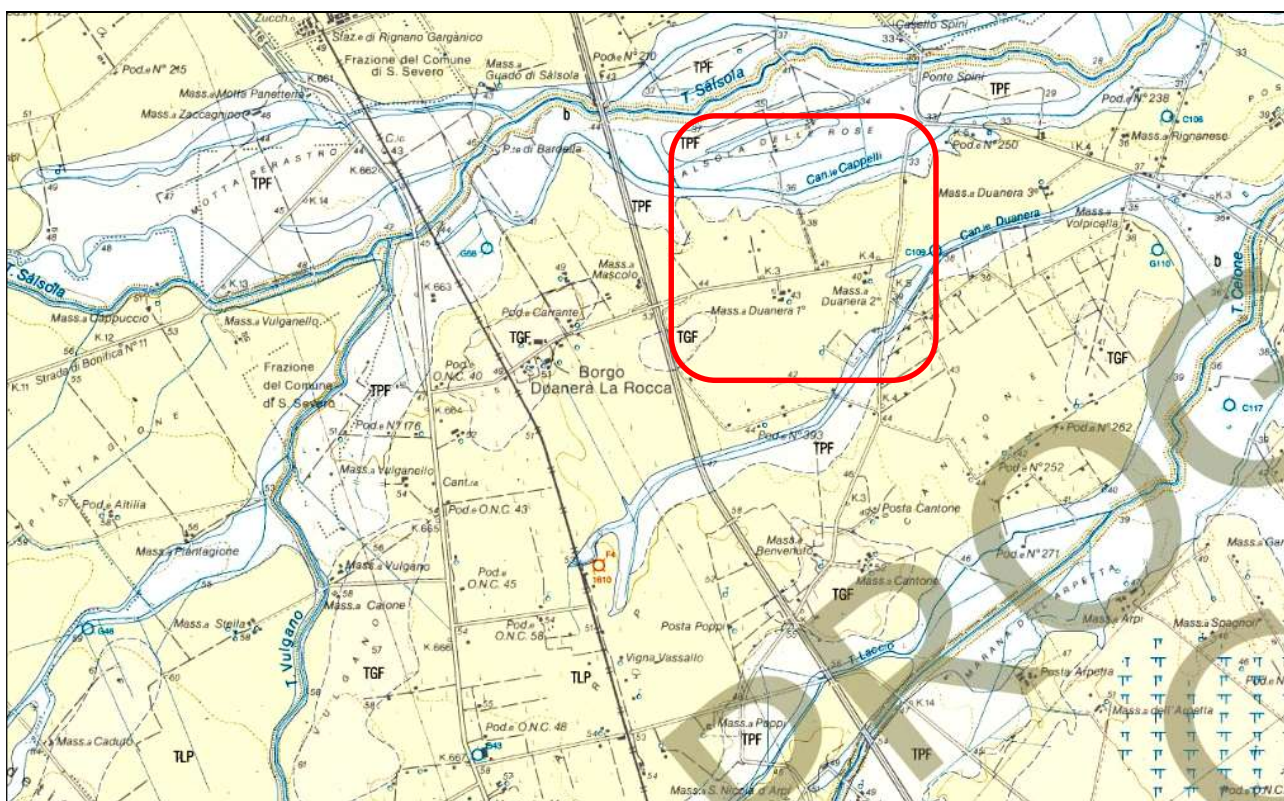
In base alle caratteristiche riscontrate durante il rilevamento geologico di dettaglio della zona, l'impianto agro voltaico interessa (Fig. 5) il **Sintema di Motta del Lupo – TLP**: si tratta di un deposito alluvionale costituito da un'alternanza di silt e argille verdastre a laminazione piano – parallela e spessore di circa 8 m a cui seguono argille brune e verdi con rare lamine siltose dallo spessore massimo di circa 22m. In base al contenuto in fossili, il deposito è attribuibile al Pleistocene Superiore.

Questo sintema affiora estesamente lungo le valli dei torrenti Vulgano e Salsola a quote comprese tra 39 e 33 m s.l.m. ed è coperto dai depositi del sintema di Masseria Finamondo, dai quali è separato



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

da una superficie erosiva. In sporadici affioramenti, dello spessore di qualche metro al massimo, sono state osservate sabbie fini alternate a peliti sottilmente stratificate, interpretabili come depositi di decantazione con debole trazione in un ambiente di piana alluvionale



*Fig. 5: Carta Geologica dell'Area con legenda – Tratta da CARG –*



*area d'interesse*



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltatico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera



TLP

**SINTEMA DI MOTTA DEL LUPO**

Depositi alluvionali terrazzati del VI ordine costituiti da sabbie fini alternate a peliti sottilmente stratificate. Sono riferibili ad aree di piana alluvionale o ad aree di esondazione. Poggia in erosione sulle argille subappennine e sui sintemi più antichi. Lo spessore varia da pochi metri ad un massimo di 10 m.

**PLEISTOCENE SUPERIORE**

Dal punto di vista tettonico, a scala di rilevamento, non si ha il riconoscimento di lineazioni tettoniche e/o strutturali anche per la tipologia delle formazioni affioranti che, per loro natura e giacitura, di depositi sciolti o al più debolmente cementati non subiscono un comportamento fragile alle deformazioni.



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

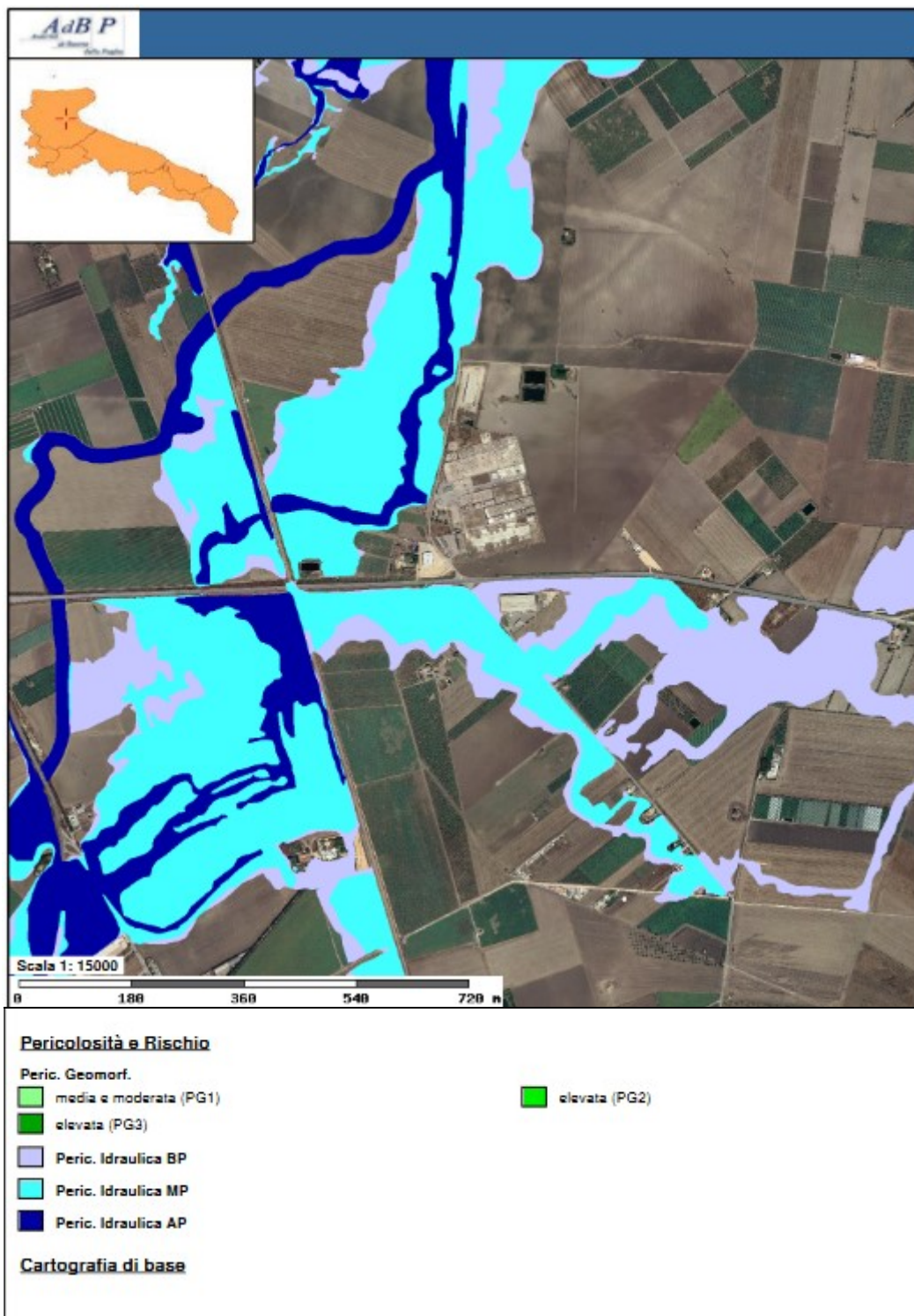
#### **4.2 Geomorfologia**

L'evoluzione geomorfologica dell'area nei suoi principali elementi è strettamente connessa con il deflusso delle acque correnti superficiali e con l'evoluzione morfologica dei principali sistemi fluviali. Ad essi si aggiungono, inoltre, locali elementi di origine strutturale e marina, forme e depositi connessi con l'attività antropica ed elementi di genesi mista, dovuti all'interazione di più fattori.

Dal punto di vista morfologico l'andamento piano–altimetrico del territorio è fortemente influenzato dalla litologia dei terreni affioranti. 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 né a pericolosità geomorfologica né idraulica, come riportato in Fig. 6



*Progetto di realizzazione di un impianto agrolvoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*



**Fig 6: Aree sottoposte a vincolo P.A.I. - AdB Regione Puglia**





Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

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.

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.

Infatti le uniche azioni morfoevolutive che si esplicano nelle aree sono costituite da deboli fenomeni di dilavamento durante i periodi di forte precipitazione che non hanno grande rilevanza geomorfologica.

Peraltro, per ciò che concerne gli aspetti legati alle scelte progettuali previste per le strutture fondazionali (di tipo profondo) esse non pongono alcun problema di ordine geologico e tecnico e non inci-



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltatico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

dono negativamente sugli equilibri idrogeologici dei luoghi, non determinando alcuna apprezzabile turbativa degli assetti geomorfologici, idrogeologici o geotecnici dell'area né pongono alcun problema di ordine geologico e tecnico alla realizzabilità delle opere.



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

## **5 – PIANIFICAZIONE** **ED ESECUZIONE DELLE INDAGINI**

L'area è stata investigata con la realizzazione indagini sismiche a rifrazione e MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) necessarie per determinare dei parametri sismo-elastici del terreno indagato.

La campagna di indagini utilizzata con i relativi risultati sono quelli riportati nella Relazione Geologica.

### ***5.1 Metodologie di indagini adottate***

Ai fini della definizione del profilo stratigrafico dei terreni di fondazione sono stati realizzati n. 2 stendimenti sismici per la determinazione delle  $V_{S30}$ . Nello specifico ogni prospezione sismica ha visto la realizzazione di un profilo di tipo MASW, avente uno sviluppo di 24 m lineari. E' stato utilizzato un sismometro a rifrazione tipo M.A.E.-A6000S, in configurazione a 24 canali con acquisizione computerizzata dei dati, massa battente di 10 kg quale sorgente generatrice di onde sismiche e sensori (geofoni) con frequenza di 4,5 Hz; questo ha permesso di caratterizzare elastomeccanicamente i terreni in posto. Il profilo ha avuto una lunghezza complessiva di 24 m, con offset di 3 m e interdistanza geofonica pari a 1 m. L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

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 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 planimetrie allegate (Fig. 6)



**Fig. 6:** Ubicazione Stendimenti Sismici



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

I risultati delle indagini sismiche sono riportati nella relazione sismica in appendice

### **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 tutte le stese 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, vale a dire che sono stati selezionati 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 dei profili sismici si mette in evidenza una sostanziale omogeneità della successione litologica, pur osservando variazioni degli spessori delle singole unità litostratigrafiche che possono essere messe in relazione alle modalità di sedimentazione e alle diverse lavorazioni agricole. In particolare emerge un modello co-



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

stituito da una sola unità sismostratigrafiche con le seguenti caratteristiche:

<i>NUMERO MASW</i>	<i>VALORE VS,eqv (m/sec)</i>
1	353



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

## **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 ghiaie, sabbie, silt e argille verdastre a laminazione piano – parallela a cui seguono argille brune e verdi con rare lamine siltose dallo spessore massimo di circa 25 m.

L'analisi delle stratigrafie, ottenute da sondaggi sismici, 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 “B”: Silt e Argille**

Costituite da silt e argille verdastre che presentano, talvolta, laminazioni. Si può considerare un terreno dal comportamento coesivo variabile in base alla quantità di argilla e limo presenti.

Lo spessore è compreso tra 1,0 e massimo 8 metri.

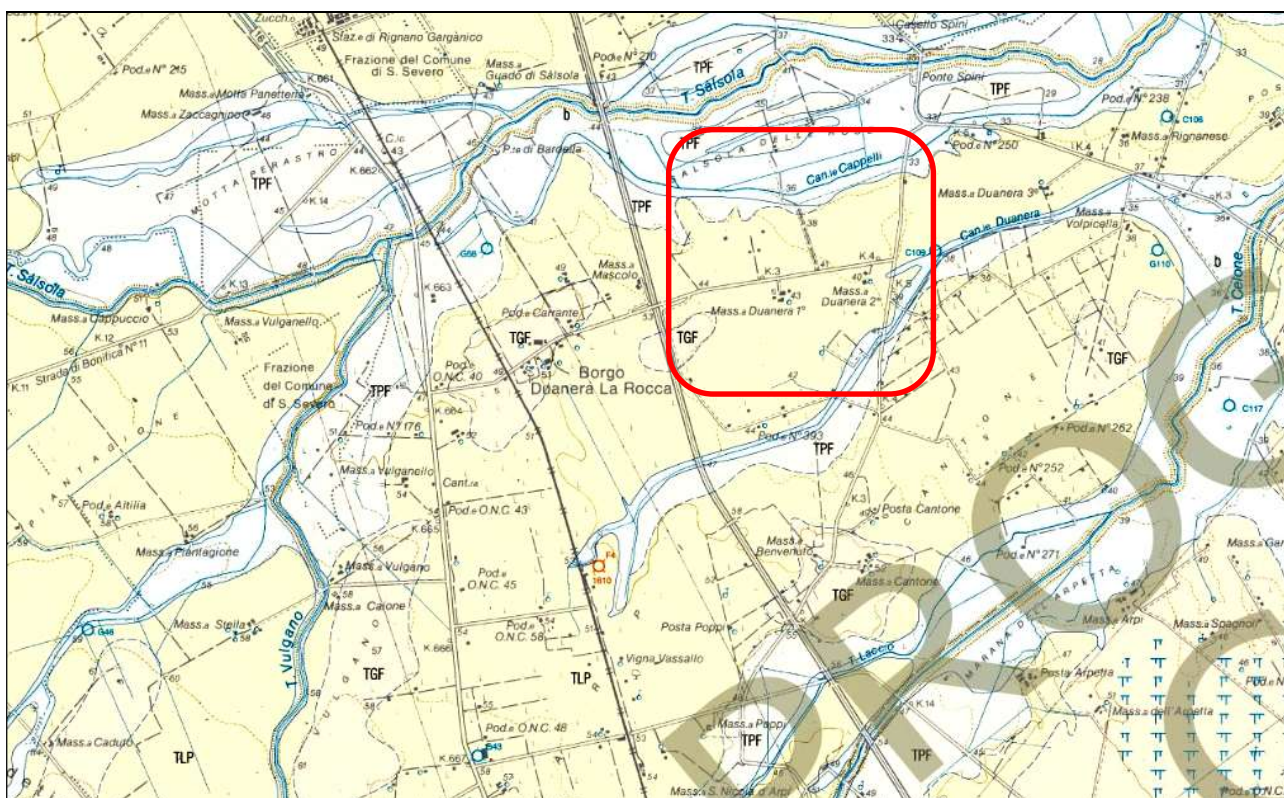
Nell'ambito della carta geologica tale unità è riferibile a Depositi Alluvionali riconoscibili nella seguente formazione:

**Sintema di Motta del Lupo – TLP:** costituito da un'alternanza di silt e argille verdastre a laminazione piano – parallela.



*Progetto di realizzazione di un impianto agrolvoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*

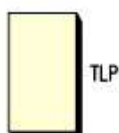
I limiti e rapporti stratigrafici tra le formazioni sono visibili nella carta geologica e sezione (Fig. 7a, 7b) come da cartografia CARG



*Fig. 7a: Carta Geologica dell'Area con legenda – Tratta da CARG –*



*area d'interesse*



**SINTEMA DI MOTTA DEL LUPO**

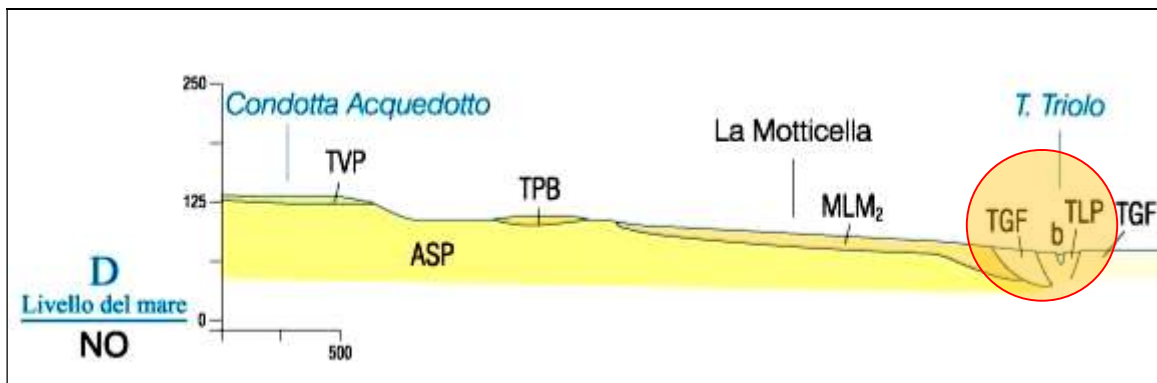
Depositi alluvionali terrazzati del VI ordine costituiti da sabbie fini alternate a peliti sottilmente stratificate. Sono riferibili ad aree di piana alluvionale o ad aree di esondazione. Poggia in erosione sulle argille subappennine e sui sintemi più antichi. Lo spessore varia da pochi metri ad un massimo di 10 m.

**PLEISTOCENE SUPERIORE**





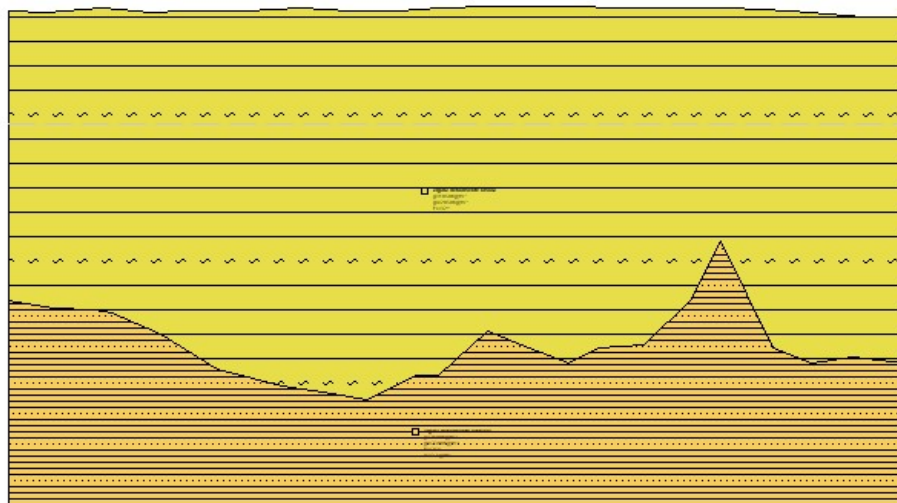
*Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*



*Fig. 7b: Sezione Geologica dei rapporti stratigrafici*

In termini stratigrafici di dettaglio le caratteristiche della formazione nell'area d'intervento, come da risultati delle prove sismiche eseguite, sono quelle sintetizzabili nella sezione che segue (Fig. 8):

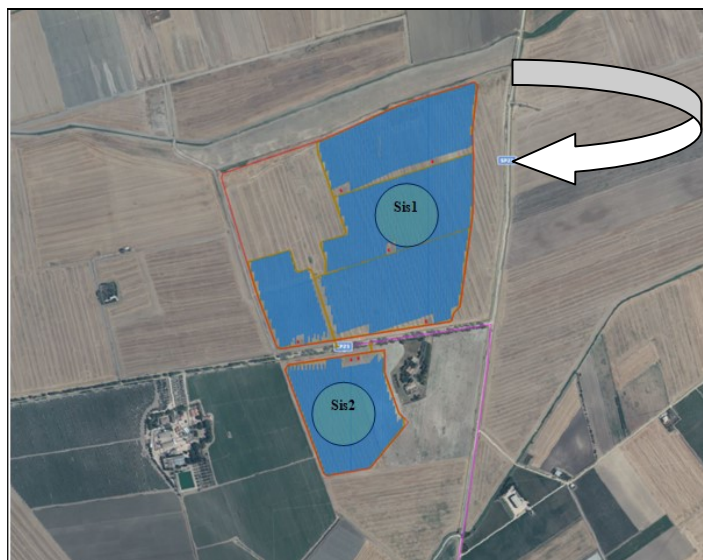
SEZIONE SIS1



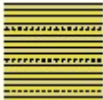
*Fig. 8: Sezione stratigrafia Sismica SIS1*



Progetto di realizzazione di un impianto agrolvoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera



**Caratterizzazione Geotecnica**

<i>Descrizione Litologica</i>	<i>Silt e argille</i>
<i>Descrizione grafica</i>	
<i>Spessore variabile</i>	0,5 m Terreno vegetale $h = 0,5 \div 8,0$ m Deposito Alluvionale
<i>Peso volume medio</i>	$\gamma_m = 21,0 \text{ KN/m}^3$
<i>Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungotermine)</i>	$\phi_m = 28^\circ$
<i>Coesione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine)</i>	$c'_m = 9,8 \text{ kN/m}^2$
<i>Coesione non drenata</i>	$C_m = 15,69 \text{ kN/m}^2$
<i>Modulo di Edometrico medio</i>	$E_m = 24,30 \text{ MPa}$
<i>Modulo di Poisson</i>	$\nu = 0.41$
<i>Modulo di Young dinamico</i>	$E_{din} = 97 \text{ MPa}$
<i>Modulo di Taglio dinamico</i>	$G_d = 11 \text{ MPa}$



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

Da tali elementi, che andranno opportunamente verificati con indagini geognostiche mirate, ed in relazione agli aspetti legati alle scelte progettuali previste per le strutture fondazionali degli aerogeneratori, di tipo profondo, non si evidenziano particolari problemi e/o criticità di ordine geotecnico che possano compromettere la stabilità delle opere.



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

## **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 di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

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 di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

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

- o Individuazione del sito
  - Regione Puglia, Provincia di Foggia, Comune di Foggia;

➤ 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 di realizzazione di un impianto agrovoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

mente pianeggiante con inclinazione media  $i < 15^\circ$  (max  $2^\circ$ ), 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 <sub>1</sub>	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T <sub>2</sub>	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T <sub>3</sub>	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T <sub>4</sub>	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 <sub>1</sub>	-	1,0
T <sub>2</sub>	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T <sub>3</sub>	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T <sub>4</sub>	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 di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

VALORI DEL COEFFICIENTE D'USO C <sub>U</sub> .				
CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C <sub>U</sub>	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  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T^*C$  e del periodo di ritorno:





Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

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

SPETTRI DI RISPOSTA SECONDO LE NTC 2018

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	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 rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.
- 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 di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

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 <sup>2</sup> ]	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:

$\beta$  = 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 di realizzazione di un impianto agrolvoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

$S_s$  = coefficiente di amplificazione stratigrafica = 1,5 (SLO)-  
1,5 (SLD)-1,48 (SLV)-1,42 (SLC)  $S_t$  = coefficiente di amplificazione  
topografica = 1,0

Si ottengono i seguenti parametri sismici:

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

Parametri sismici su sito di riferimento					
SL	TR [Anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec.]	
SLO	30.00	0.422	2.527	0.257	Categoria sottosuolo
SLD	50.00	0.539	2.504	0.270	Categoria topografica
SLV	475.00	1.177	2.620	0.297	T1
SLC	975.00	1.471	2.615	0.307	

Coefficienti sismici orizzontali e verticali							
Opera	Muri di sostegno (NTC 2018)	SL	amax [m/s <sup>2</sup> ]	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**



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

## **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 6,0 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 di realizzazione di un impianto agrovoltico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

## **9 - CONCLUSIONI**

Lo studio geologico e geotecnico eseguito per il progetto “*Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*” ha permesso la ricostruzione di un modello geotecnico del terreno sulla base del quale sono state realizzate le verifiche della fondazione 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.

*Tanto in adempimento all’incarico conferitomi*

*Rodi Garganico Luglio 2022*



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

# **APPENDICE**

---

**REPORT SISMICO**

**FOGGIA**

---



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

## **RISULTATI INDAGINI**

La geofisica osserva il comportamento delle onde che si propagano all'interno dei materiali. Un segnale sismico, infatti, si modifica in funzione delle caratteristiche del mezzo che attraversa. Le onde possono essere generate in modo artificiale attraverso l'uso di masse battenti, di scoppi, etc.

### **Moto del segnale sismico**

Il segnale sismico può essere scomposto in più fasi ognuna delle quali identifica il movimento delle particelle investite dalle onde sismiche. Le fasi possono essere:

- **P-Longitudinale:** onda profonda di compressione;
- **S-Trasversale:** onda profonda di taglio;
- **L-Love:** onda di superficie, composta da onde P e S;
- **R-Rayleigh:** onda di superficie composta da un movimento ellittico e retrogrado.

### **Onde di Rayleigh – “R”**

In passato gli studi sulla diffusione delle onde sismiche si sono concentrati sulla propagazione delle onde profonde (P,S) considerando le onde di superficie come un disturbo del segnale sismico da analizzare. Recenti studi hanno consentito di creare dei modelli matematici avanzati per l'analisi delle onde di superficie in mezzi a differente rigidità.

### **Analisi del segnale con tecnica MASW**

Secondo l'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali,



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente non interagendo tra di loro. Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti parziali corrispondenti alle singole armoniche. L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è lo strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

### **Modellizzazione**

E' possibile simulare, a partire da un modello geotecnico sintetico caratterizzato da spessore, densità, coefficiente di Poisson, velocità delle onde S e velocità delle Onde P, la curva di dispersione teorica la quale lega velocità e lunghezza d'onda secondo la relazione:

$$v = \lambda \times v$$

Modificando i parametri del modello geotecnico sintetico, si può ottenere una sovrapposizione della curva di dispersione teorica con quella sperimentale: questa fase è detta di inversione e consente di determinare il profilo delle velocità in mezzi a differente rigidità.





Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

**Modi di vibrazione**

Sia nella curva di inversione teorica che in quella sperimentale è possibile individuare le diverse configurazioni di vibrazione del terreno. I modi per le onde di Rayleigh possono essere: deformazioni a contatto con l'aria, deformazioni quasi nulle a metà della lunghezza d'onda e deformazioni nulle a profondità elevate.

**Profondità di indagine**

Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.



*Progetto di realizzazione di un impianto agrolvoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*

## REPORT SISMICO S1

- PRIMI ARRIVI -

<b>-3.00 mt</b>	<b>17.00 mt [SX]</b>	<b>17.00 mt [DX]</b>	<b>36.50 mt</b>
5.07 ms	27.60 ms		37.07 ms
11.07 ms	24.13 ms		35.87 ms
12.93 ms	22.67 ms		34.53 ms
15.20 ms	19.60 ms		33.73 ms
16.80 ms	18.13 ms		32.93 ms
18.67 ms	16.13 ms		31.87 ms
20.53 ms	14.53 ms		30.93 ms
21.87 ms	12.93 ms		29.60 ms
23.20 ms	11.47 ms		28.00 ms
24.00 ms	9.33 ms		26.40 ms
24.53 ms	7.73 ms		25.07 ms
25.60 ms	3.73 ms		22.93 ms
26.67 ms		3.73 ms	22.00 ms
28.00 ms		6.27 ms	20.67 ms
29.47 ms		10.27 ms	19.20 ms
31.07 ms		12.27 ms	17.87 ms
32.27 ms		14.67 ms	16.00 ms
33.47 ms		17.33 ms	13.60 ms
34.40 ms		18.80 ms	10.40 ms
35.60 ms		21.73 ms	9.07 ms
37.60 ms		23.20 ms	7.47 ms
39.47 ms		25.20 ms	6.53 ms
40.67 ms		27.07 ms	4.53 ms
41.60 ms		28.40 ms	2.93 ms

- PROFONDITA' STRATI -

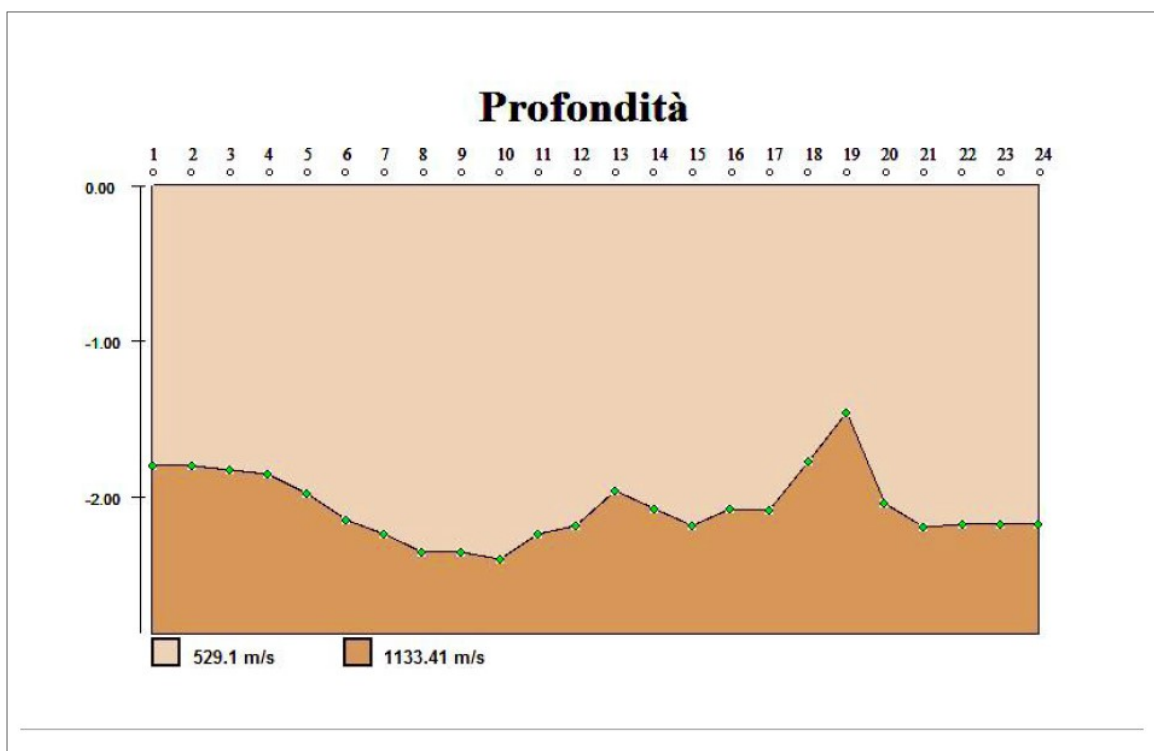
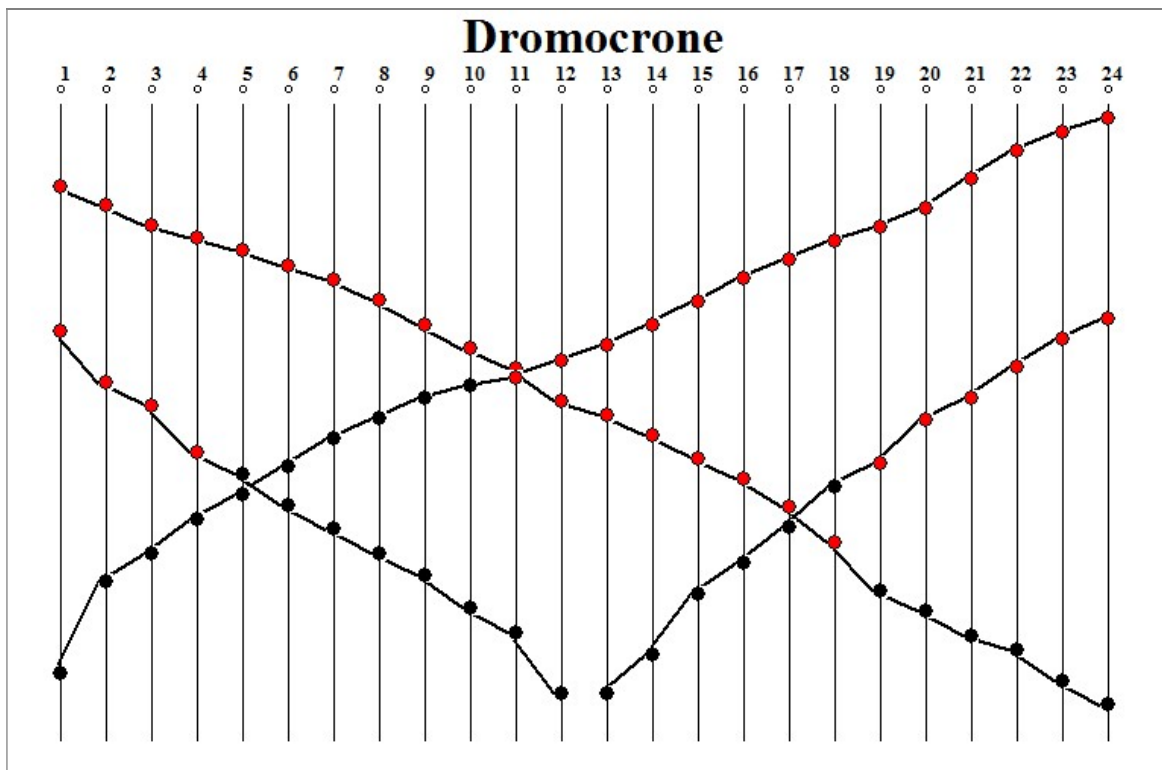
<b>Geofoni</b>	<b>2° strato</b>
1	-1.80 mt
2	-1.80 mt
3	-1.83 mt
4	-1.86 mt
5	-1.99 mt
6	-2.16 mt
7	-2.25 mt
8	-2.36 mt
9	-2.37 mt
10	-2.40 mt
11	-2.24 mt
12	-2.19 mt
13	-1.97 mt
14	-2.08 mt
15	-2.19 mt
16	-2.08 mt
17	-2.10 mt
18	-1.78 mt
19	-1.47 mt
20	-2.05 mt
21	-2.20 mt
22	-2.18 mt
23	-2.18 mt
24	-2.18 mt

- VELOCITA' STRATI -

Velocità strato n.1	<b>529.10 m/s</b>
Velocità strato n.2	<b>1133.41 m/s</b>



*Progetto di realizzazione di un impianto agrolvoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*





*Progetto di realizzazione di un impianto agrolvoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*

## REPORT SISMICO S2

- PRIMI ARRIVI -

-3.00 mt	17.00 mt [SX]	17.00 mt [DX]	37.50 mt
6.00 ms	34.00 ms		49.60 ms
14.80 ms	30.93 ms		48.67 ms
19.47 ms	28.80 ms		48.00 ms
23.20 ms	27.73 ms		46.67 ms
28.67 ms	26.67 ms		45.20 ms
30.13 ms	24.93 ms		44.27 ms
31.33 ms	23.20 ms		43.07 ms
33.47 ms	22.00 ms		41.60 ms
34.67 ms	19.20 ms		39.87 ms
36.00 ms	14.93 ms		38.27 ms
37.07 ms	9.33 ms		37.60 ms
38.40 ms	4.00 ms		37.20 ms
39.07 ms		6.00 ms	35.73 ms
40.27 ms		14.27 ms	34.67 ms
41.20 ms		17.87 ms	33.47 ms
42.67 ms		19.33 ms	32.80 ms
43.87 ms		22.27 ms	31.60 ms
45.07 ms		23.47 ms	30.53 ms
45.87 ms		26.53 ms	28.93 ms
46.53 ms		27.87 ms	26.13 ms
48.27 ms		28.93 ms	21.60 ms
49.07 ms		30.53 ms	17.60 ms
49.73 ms		31.60 ms	13.73 ms
50.53 ms		34.40 ms	8.13 ms

- PROFONDITA' STRATI -

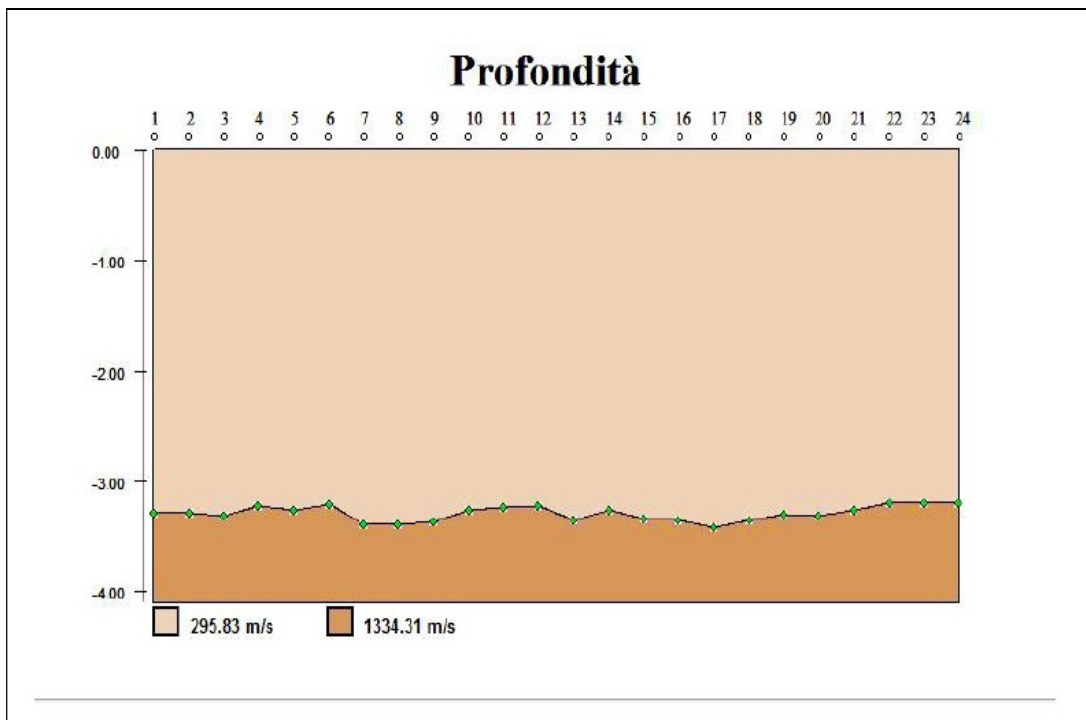
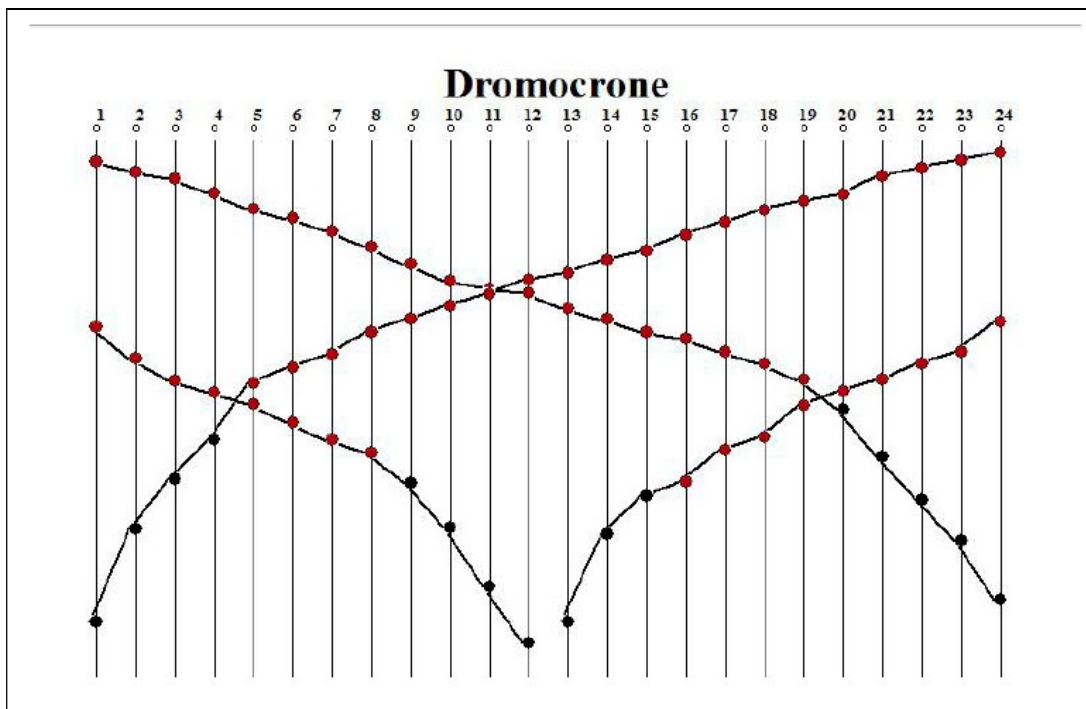
Geofoni	2° strato
1	-3.29 mt
2	-3.29 mt
3	-3.32 mt
4	-3.23 mt
5	-3.26 mt
6	-3.22 mt
7	-3.40 mt
8	-3.40 mt
9	-3.38 mt
10	-3.27 mt
11	-3.24 mt
12	-3.23 mt
13	-3.36 mt
14	-3.27 mt
15	-3.34 mt
16	-3.35 mt
17	-3.42 mt
18	-3.36 mt
19	-3.31 mt
20	-3.32 mt
21	-3.27 mt
22	-3.20 mt
23	-3.20 mt
24	-3.20 mt

- VELOCITA' STRATI -

Velocità strato n.1	295.83 m/s
Velocità strato n.2	1334.31 m/s



*Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*





Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

### **PROVA SISMICA MULTICANALE MASW**

Per gli stendimenti eseguiti al fine di ricavare il parametro sismico  $V_{s30}$  è stata eseguita una elaborazione dei dati con il metodo **MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves), che si basa sulla misurazione e sull'analisi delle onde di Rayleigh in un semispazio stratificato.

Per ciò che riguarda l'elaborazione dei dati è stato utilizzato il software

**“SURF SAIS 2.05”** del Kansas Geological Survey.

#### ***Strumentazione e configurazione geometrica utilizzata***

La strumentazione utilizzata è costituita da un sismografo multicanale **M.A.E. A6000S**, avente le seguenti caratteristiche tecniche :

- capacità di campionamento dei segnali tra 0.002 e 0.00005 sec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del “tempo zero” (time break)
  - filtri High Pass e Band Reject
  - “Automatic Gain Control”
  - convertitore A/D a 24 bit
  - 24 geofoni verticali (P) con periodo proprio di 4.5 Hz;
  - massa battente pesante di 10 Kg.



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

La configurazione spaziale in sito è equivalente ad un dispositivo geometrico punto di scoppio-geofoni "base distante in linea". In particolare è stato utilizzato il seguente set-up:

- 24 geofoni con interspazio (Gx) di 1.5metri;
- n.1 energizzazione ad offset (Sx) -3 m ;
- passo di campionatura pari a 1000 Hz;
- lunghezza delle tracce sismiche pari a 4.096 sec.

Tale configurazione ha consentito di mitigare gli effetti near-field dovuti alle onde di volume ed ha altresì consentito di avere le seguenti risoluzioni spazio-temporali: lungo i numeri d'onda  $k$  la risoluzione è di 0.261, mentre la risoluzione in frequenza è pari a 0.488 Hz.

Le prove MASW sono molto utili per ricavare il parametro  $V_{s30}$ , richiesto dalla nuova normativa sismica (NTC-08), in maniera semplice ed economica ma decisamente affidabile. Tramite questa prova vengono misurate le velocità sismiche delle onde superficiali a diverse frequenze. La variazione di velocità a diverse frequenze (dispersione) è imputabile prevalentemente alla stratificazione delle velocità delle onde S i cui valori sono ricavabili da una procedura di inversione numerica. Lo scopo della prova consiste nel determinare il profilo di rigidità del sito (velocità delle onde di taglio S) tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di *Rayleigh* (VR) ed un successivo processo di inversione.

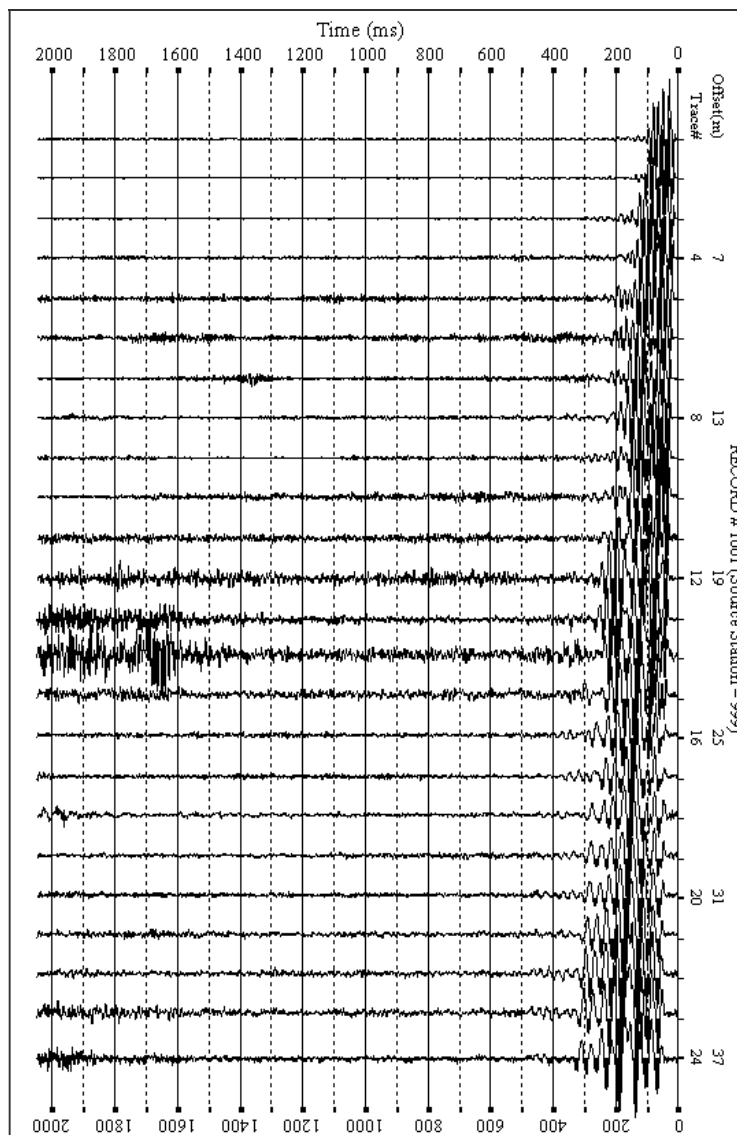


## **PROVA SISMICA MULTICANALE MASW**

### *Elaborazione dati*

L'analisi MASW può essere ricondotta in quattro fasi :

- la prima fase prevede la trasformazione delle serie temporali (fig. 1) nel dominio frequenza  $f$  – numero d'onda  $K$ ;



*Fig. 1 – Sismogramma ottenuto.*





Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

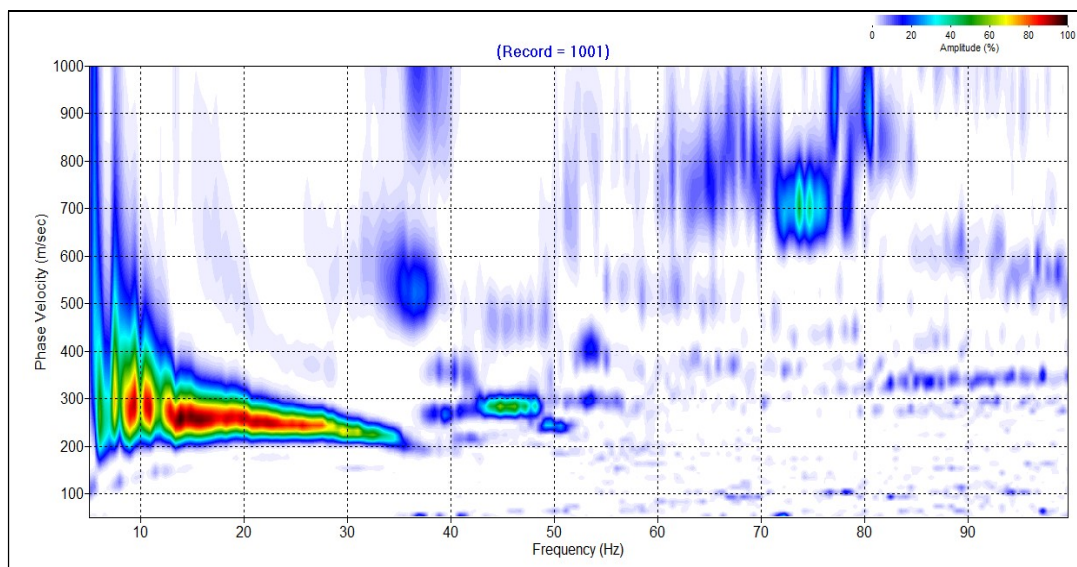
- la seconda fase consiste nella individuazione delle coppie f-k cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale) che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh nel piano Vfase (m/sec) – frequenza (lentezza(s/m) – frequenza (Hz) (fig.2).
- la terza fase consiste nel calcolo della curva di dispersione teorica attraverso la formulazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, modificando opportunamente lo spessore h, le velocità delle onde di taglio Vs, di compressione Vp e la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo (fig. 3);
- la quarta ed ultima fase consiste nella modifica della curva teorica fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo.

## **RISULTATI**

La velocità di fase risulta dispersa nel piano velocità (sec/m)-frequenza (Hz) in un intervallo di frequenza compreso tra 0 Hz e 35 Hz. La corrispondente velocità di fase apparente è compresa, rispettivamente, tra 200 m/sec e 500 m/sec (Fig.2).



Progetto di realizzazione di un impianto agrovoltaiico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera

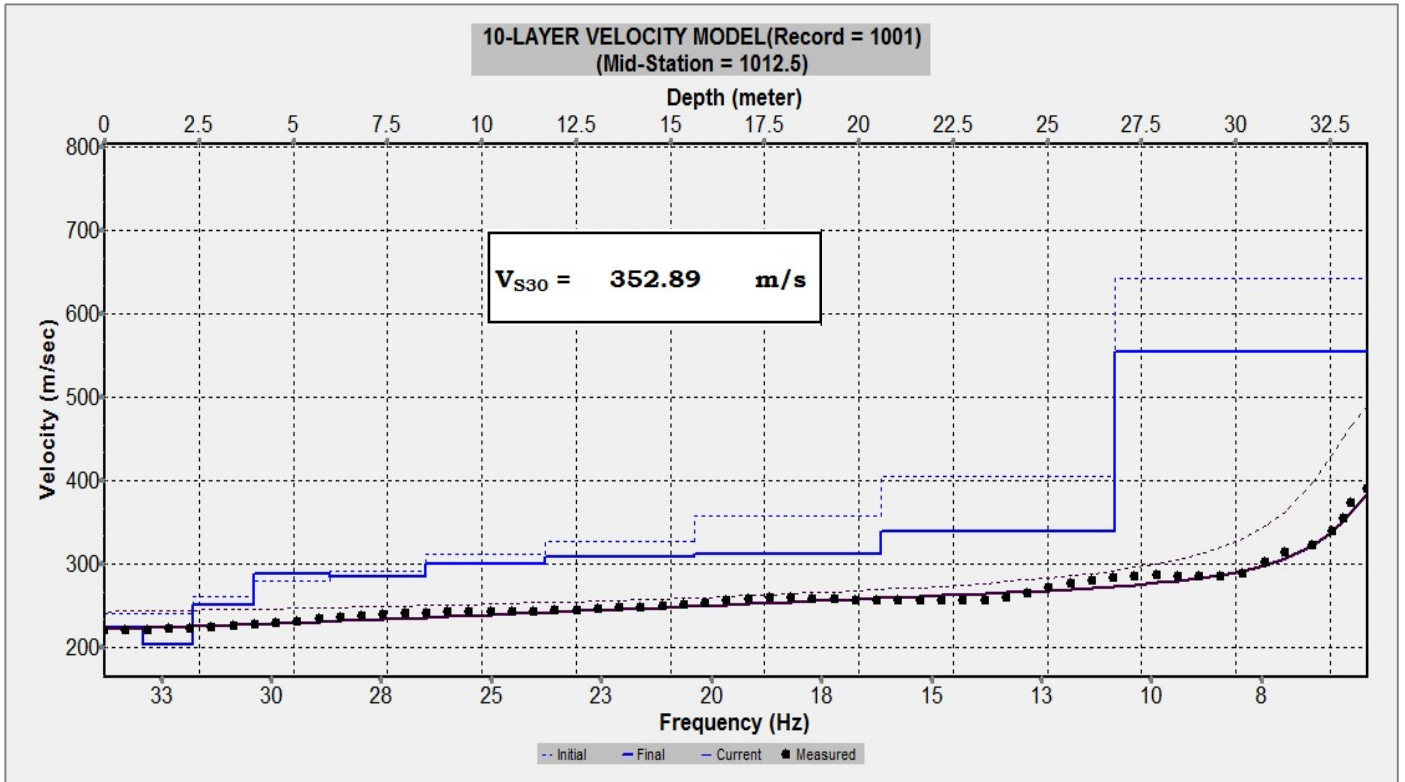


*Fig. 2 – Densità spettrale normalizzata nei piani  
Velocità di fase apparente /frequenza e Lentezza/frequenza*

La curva di dispersione teorica calcolata attraverso l'*inversione* del modello di velocità evidenzia un buon accordo con la curva di dispersione sperimentale.



*Progetto di realizzazione di un impianto agrolvoltaico e opere connesse nel Comune di Foggia (FG), denominato Duanera*



## 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  $\phi$  è l'angolo di resistenza a taglio prima dell'esecuzione del palo. Di seguito indicheremo con  $\phi$  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  $\gamma D$ , 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 ( $\phi$ ) e di coesione ( $c$ ), è data dall'espressione:

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

Avendo indicato con:

- $\gamma$  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  $\varepsilon_v$ .

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  $\varepsilon_v$  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  $\psi$  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  $\alpha$ , 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);

$\sigma$  = 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

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

$\delta$  = attrito palo-terreno funzione della scabrezza della superficie del palo;

Per pali infissi

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

Per pali trivellati

$$\delta = \tan\phi$$

$\alpha$  = coefficiente d'adesione ricavato come di seguito riportato:

**Pali trivellati:**

*Caquot – Kerisel* 
$$\alpha = \frac{100 + c^2}{100 + 7c^2}$$

*Meyerhof – Murdock (1963)*

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

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

*Whitaker – Cooke (1966)*

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

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

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

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

*Woodward (1961)*

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

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

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

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

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

**Pali infissi**

Coefficiente $\alpha$ 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  $2^\circ$  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:

$\tau_j$  = Incremento di tensione relativo al punto medio della striscia

$E$  = Modulo elastico del terreno

$B$  = Diametro del palo

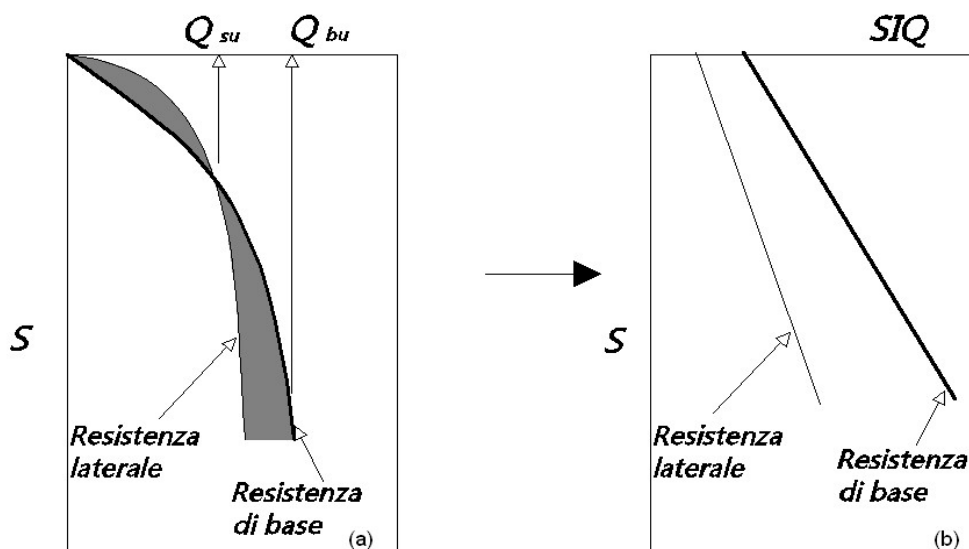
$I_{i,j}$  = Coefficiente di influenza

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'*accorciamento 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'*accorciamento* del palo.

Considerando lo schema in figura l'*accorciamento 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'*accorciamento 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 *accorciamento* 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  $20 \text{ N/mm}^2$  e il valore di  $E_c = 40 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$  per calcestruzzo da  $40 \text{ N/mm}^2$ .
- $L_o$ : 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:

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

$$\bullet \eta = d_b E_b$$

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;

$\gamma$  = 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,  $\rho_1$  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:	Terzaghi
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	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O. - SLE	30,0	0,539	2,395	0,296
S.L.D. - SLE	50,0	0,706	2,482	0,302
S.L.V. - SLO	475,0	1,863	2,502	0,353
S.L.C. - SLO	975,0	2,461	2,481	0,359

**Coefficienti sismici orizzontali e verticali**

Opera: Opere di sostegno

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0,8085	1,0	0,0824	0,0412
S.L.D.	1,059	0,47	0,0508	0,0254
S.L.V.	2,6358	0,38	0,1021	0,0511
S.L.C.	3,2643	1,0	0,3329	0,1664

**Archivio materiali****Conglomerati**

Nr.	Classe Calcestruzzo	fck,cubi [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Ec [Kg/cm <sup>2</sup> ]	fck [Kg/cm <sup>2</sup> ]	fcd [Kg/cm <sup>2</sup> ]	fctd [Kg/cm <sup>2</sup> ]	fctm [Kg/cm <sup>2</sup> ]
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/cm2]	f <sub>yk</sub> [Kg/cm2]	f <sub>yd</sub> [Kg/cm2]	f <sub>tk</sub> [Kg/cm2]	f <sub>td</sub> [Kg/cm2]	ep <sub>tk</sub>	ep <sub>d_ult</sub>	β <sub>1</sub> *β <sub>2</sub> in.	β <sub>1</sub> *β <sub>2</sub> 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.

**Strat. 1:**

Descrizione Litologica	Sintema di Cava Petrilli – Deposito Alluvionale
Descrizione grafica	
Spessore variabile	0,5 m Terreno vegetale h = 0,5 ÷ 10,0 m Deposito Alluvionale
Peso volume medio	$\gamma_m = 21,0 \text{ KN/m}^3$
Angolo di resistenza al taglio medio (tensioni efficaci, a lungotermine)	$\varphi_m = 28^\circ$
Coesione drenata media (tensioni efficaci, a lungo termine)	$c'm = 9,8 \text{ kN/m}^2$
Coesione non drenata	$C_m = 15,69 \text{ kN/m}^2$
Modulo di Edometrico medio	$E_m = 24,30 \text{ MPa}$
Modulo di Poisson	$\nu = 0,41$
Modulo di Young dinamico	$E_{din} = 97 \text{ MPa}$
Modulo di Taglio dinamico	$G_d = 11 \text{ MPa}$

**Carico limite**

Stratigrafia	N <sub>q</sub>	N <sub>c</sub>	Fi/C strato punta Palo (°)/[kg/cm <sup>2</sup> ]	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

	R <sub>c</sub> , Min [kg]	R <sub>c</sub> , Media [kg]	R <sub>c</sub> , Max [kg]
Base	--	--	--
Laterale	92708,34	92708,34	92708,34
Totale	73073,39	73073,39	73073,39

Coefficiente parziale resistenza caratteristica	R3
Laterale	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 <sup>3</sup> ]	Sforzo normale [kg]	Momento [kgm]	Taglio [kg]	Reazione terreno [kg]	Rotazione (°)	Spostamento [m]	Pressione terreno [kg/cm <sup>2</sup> ]
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	26179,94	37366,94	3736,94	Verificata	7,50E-04	-1,96E-03	22,29	--	--	--	Verificata



		,94			6	,39	,50	65	cata	-04	1,96E -03					cata
10	15	29452 ,43	--	--	1201 6	29451 ,47	38416 ,62	3841, 66	Verifi cata	7,70E -04	- 1,96E -03	21,77	--		--	Verifi cata