

*Dott. Dino C. BALDUCCI – Geologo -
70033 Corato (Bari) –
Via della Divina Misericordia, 10
Tel. (080) 3588627*

COMUNE DI FERRARA (FE) - PROGETTO PER LA
REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO PER LA
PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTI RINNOVABILI
A SORGERE IN LOCALITÀ "SANTUARIO DEL POGGETTO" TRA
VIA PANDOLFINA, VIA SGARBATA E VIA DELL'IDROVORO.

04/10/2025

RELAZIONE GEOLOGICA E RISULTANZE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE

**CONSULENTE PER LE
INDAGINI GEOGNOSTICHE E
REDATTORE:**

Dott. Geol. Dino C. BALDUCCI




COMMITTENTE: SAVESYSTEMS S.R.L. Piazza di Pietra 26,
00186 Roma (RM) - P.IVA 04981400650

COMUNE DI FERRARA (FE) - PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTI RINNOVABILI A SORGERE IN LOCALITÀ “SANTUARIO DEL POGGETTO” TRA VIA PANDOLFINA, VIA SGARBATA E VIA DELL’IDROVORO.

COMMITTENTE: SAVESYSTEMS S.R.L. Piazza di Pietra 26, 00186 Roma (RM)

CONSULENTE PER LE INDAGINI GEOGNOSTICHE E REDATTORE:

Dott. Geol. Dino C. BALDUCCI.

- RELAZIONE GEOLOGICA E RISULTANZE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE -

1) PREMESSA

La presente relazione riferisce sulle osservazioni geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e geognostiche svolte in un’area che si inquadra nella porzione meridionale del comprensorio comunale di Ferrara (FE), geograficamente ben rappresentata attraverso il versante adriatico della catena appenninica centrosetentrionale, collocandosi geologicamente in corrispondenza del bordo interno (sudoccidentale) dell’Avanfossa padano-veneta.

Le indagini sono rivolte ad un - ***progetto per la realizzazione di un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili a sorgere in località “Santuario del Poggetto”*** -, a sorgere nell’area individuabile tra via Pandolfina, via Sgarbata, via dell’Idrovoro ed altre strade minori extraurbane di accesso.

Detta area dista circa 5,8 km verso sud-sudest rispetto all’abitato di Ferrara, alle pendici della zona collinare su cui si erge lo stesso centro abitato (7 m s.l.m.), posizionandosi a ridosso di un terrazzo fluviale posto orograficamente in sinistra del “Fiume Reno”, corso d’acqua che sfocia in mare Adriatico circa 55 km a sudest in località “Valli di Comacchio” (46 km a sud della foce del Fiume Po).

Il sito di intervento interseca una altitudine media di circa 6 m s.l.m., mentre le coordinate geografiche delle indagini svolte, meglio descritte secondo lo stralcio aerofotogrammetrico satellitare in allegato, vengono a stabilirsi secondo il Datum WGS 84, Fuso 33 N, negli intorni del punto 44,755852 N – 11,620050 E.

Ai fini normativi, lo studio è stato svolto in ordine agli attuali criteri di classificazione e prospezione del territorio; in particolare in ottemperanza al Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti “Norme Tecniche per le Costruzioni” del 17/01/2018:

- a) lo studio si prefigge di fornire una rappresentazione della situazione naturale dell’area (condizioni morfologiche, litostratigrafiche ed idrogeologiche);*
- b) sono state condotte una serie di prospezioni geofisiche con metodologia “sismica a rifrazione”, eseguite attraverso il sito di intervento permettendo di ottenere una precipua classificazione sismica del terreno di fondazione, corredata dei parametri legati all’azione sismica e necessari alla progettazione edilizia in tale prospettiva;*

c) viene proposta una preventiva caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni in sede, finalizzata ad accertare la fattibilità dell'intervento, basata sulla analisi ed interpretazione di dati da prospezione indiretta (non invasiva) del sottosuolo.

Dal punto di vista della classificazione sismica delle diverse aree del territorio nazionale, sulla scorta dell'ultima zonazione proposta con la "Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274" del 20/03/2003, il Comune di Santa Maria Nuova viene ad inserirsi in zona sismica di 2^a categoria (rischio sismico $S = 9$), per le quali aree rendono indispensabili di volta in volta gli accertamenti di carattere geologico, nonché geotecnici e geomorfologici, già alla luce del D.M. LL.PP. N.47 del 11/03/1988.

Secondo le disposizioni normative attualmente vigenti in materia di edificazione in zone a rischio sismico (D.M. 17/01/2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni" – Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), gli accertamenti preliminari per la fattibilità geologica delle opere e, conseguentemente, la preventiva conoscenza dello stato di compatibilità delle opere ad erigersi con le condizioni geomorfologiche locali, attiene principalmente ad una precipua caratterizzazione litostratigrafica del sito di intervento ed alla classificazione del terreno di fondazione secondo diverse categorie di profilo stratigrafico (riferite al piano di posa delle fondazioni) unitamente ad una puntuale classificazione sismica del territorio, eseguita secondo convenzionali criteri e metodologie sismiche, che permette di suddividere il territorio nazionale secondo una scala a differenti gradi di idoneità edificativa basata sui parametri di accelerazione o amplificazione sismica locali.

Il presente studio geologico si propone di definire per l'area di interesse:

a) in generale:

- il contesto geologico;
- le caratteristiche geomorfologiche;
- la serie stratigrafica;
- gli aspetti idrogeologici;
- i caratteri fisico-meccanici dei litotipi individuati;

b) nel dettaglio:

- l'esistenza di eventuali anomalie fisiche del sottosuolo o situazioni geologico-strutturali specifiche che possano condizionare la realizzazione dei manufatti in progetto secondo normali tecniche operative.

Dette osservazioni sono state sviluppate in successive fasi: preliminarmente attraverso un'analisi generale della letteratura esistente in materia (Foglio 76 "Ferrara" della Carta Geologica Nazionale in scala 1:100.000 e "Note Illustrative") e mediante l'osservazione diretta dell'area, a cui sono poi seguite correlazioni stratigrafiche ed ulteriori accertamenti geognostici in sito.

Per ciò che concerne, in particolare, la definizione dei caratteri fisico-meccanici delle diverse unità litostratigrafiche costituenti la successione del terreno di fondazione, secondo una stima dei valori più adatti a descrivere i principali parametri geotecnici, nonché la definizione dei modelli geologico e geotecnico più appropriati, vengono qui proposti i dati conseguiti attraverso una campagna di prospezioni

geofisiche con metodologia sismica “a rifrazione” eseguita attraverso il sito di intervento in fase prodromica alla progettazione ed al calcolo delle sovrastrutture previste.

2) DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO DELL'AREA IN ESAME

2.1) INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E STRATIGRAFICO

Il contesto geologico in cui ricade il territorio di Ferrara è compreso in un vasto settore centro-settentrionale dell'Appennino tosco-emiliano, caratterizzato verso l'interno dalla presenza di rilievi montuosi piuttosto pronunciati orientati secondo l'asse principale della dorsale, ovvero secondo la direttrice NO-SE, in contrapposizione con le aree più estesamente pianeggianti, o al più attraversate da rilievi docilmente collinari, che digradano lentamente verso la fascia costiera adriatica.

Verso la fine dell'era terziaria, nel Pliocene, l'insorgere della catena alpina da un lato e di quella appenninica dall'altro ha determinato il formarsi di un'ampia fossa subsidente più volte invasa e abbandonata dal mare nel corso della sua storia geologica.

Si è avuto quindi alternanza di emersioni e invasioni marine, totali o parziali dell'area, con erosione più accentuata nelle zone di alto strutturale e con deposizioni nelle zone di basso strutturale dei materiali detritici derivanti dallo smantellamento delle insorgenti catene montuose. Il fondo di questa fossa strutturale non è regolare ma articolato da dorsali longitudinali, che in determinati periodi del ciclo evolutivo emergevano dal mare, formando isole e arcipelaghi. Queste dorsali traggono le loro origini da un complesso meccanismo di spinte tangenziali unitamente a fenomeni di subsidenza differenziale, cioè di sprofondamento irregolare.

In conseguenza dell'assetto strutturale varia la natura e lo spessore dei sedimenti che si accumulano nei diversi settori del bacino sedimentario. Si attua così un riempimento delle depressioni con materiali sabbiosi di rilevanti potenze, mentre sulle dorsali sedimentano le granulometrie più fini con progressive diminuzioni delle potenze.

Uno degli elementi strutturali più importanti del sottosuolo padano è la così detta dorsale ferrarese, che si localizza tra Ferrara e le Valli di Comacchio con direzione NW-SE, ai lati delle quali si sono impostate due zone a forte subsidenza, a nord nella regione del Delta e nel Ravennate a sud.

La storia delle alterne vicende geologiche in questo settore della Pianura Padana può essere schematizzata come segue: Il Pliocene inf. è caratterizzato da una forte subsidenza, particolarmente attiva nelle strutture negative del bacino, che viene in parte compensata dalla deposizione di sedimenti grossolani.

Con la fine del Pliocene inf. inizia una nuova fase di sollevamento, si accentuano le vecchie pieghe e se ne creano di nuove, conseguentemente l'erosione intacca le strutture più elevate.

Nel Pliocene medio-superiore si avvia un nuovo ciclo di subsidenza e sedimentazione che prosegue fino al Quaternario, con la stessa modalità del precedente, cioè sedimenti con termini grossolani nelle strutture negative ed argillose su quelle positive.

Anche all'inizio del Quaternario la subsidenza continua e si accentua ed il dominio del mare raggiunge la sua massima espansione. Tuttavia, con il passare del tempo la subsidenza generale del bacino prende il sopravvento su quella differenziata tra gli alti e bassi strutturali. Ne consegue che i sedimenti di questo periodo sono caratterizzati da frequenti variazioni litologiche; i depositi a granulometria maggiore

perdono in continuità e si formano corpi sabbiosi isolati. Parallelamente si instaurano radicali mutamenti nei rapporti relativi intercorrenti fra le varie strutture, infatti le pieghe al margine appenninico in origine più basse di quelle a nord, risultano ora più elevate in conseguenza dello sprofondamento della parte centrale del bacino e dell'innalzamento dell'Appennino; così come si ha un abbassamento della zona di foce del Po rispetto alle pieghe ferraresi. Con il Quaternario continentale invece, predominano le sedimentazioni sulla subsidenza, si ha un progressivo ritiro del mare dalla Pianura Padana con deposito di alluvioni sui sedimenti marini. Al margine orientale della pianura lo stabilizzarsi della linea di costa è complicato da variazioni eustatiche del livello marino in corrispondenza di glaciazioni, la più importante delle quali fu quella wurmiana, che abbassò il livello di un centinaio di metri.

Poi 17.000 anni fa inizia la grande trasgressione postglaciale, quella Flandriana in cui l'ingressione marina ha probabilmente raggiunto i 40 Km per il Delta Padano e i 20 Km per il ravennate.

A partire dal I - II secolo d.C. ha avuto inizio un lento ma graduale ritiro del mare con migrazione verso est della linea di costa sino all'interno della sua posizione attuale.

I diversi litotipi, depositati in ambiente subacqueo, malgrado il costipamento derivante dall'incremento della pressione geostatica tenderanno a trattenere nei pori residui l'originaria acqua del bacino di sedimentazione; ne deriva per quanto sopra esposto, che si avrà in zona coesistenza di livelli con acqua di strato salata o salmastra o dolce in relazione all'ambiente deposizionale originario.

Le formazioni plioceniche costituiscono una larga fascia che borda ininterrottamente, verso oriente, il complesso appenninico, costituendo largamente il versante costiero adriatico. In netta discordanza su queste ultime, poggiano termini deposizionali pleistocenici di origine prevalentemente continentale e litorale ascrivibili rispettivamente ai diversi ordini di depositi alluvionali terrazzati ed alle piane di sedimentazione costiera.

In particolare, per quanto attiene al sito di interesse, circoscrivendo l'analisi stratigrafica alla zona di Santuario del Poggetto, la serie trasgressiva plio-pleistocenica affiorante viene essenzialmente rappresentata dai seguenti termini formazionali, in ordine cronostratigrafico, partendo dal più antico:

- **P** Argille grigie con microfaune neritico-batiali nella parte media, raggiungono spessori superiori a 500 m (età suprapliocenica);
- **Q¹⁻²** Argille e sabbie prevalentemente marine con spessori da 50 a 600 metri (Pleistocene medio-inf.), Sabbie e argille prevalentemente continentali con spessori da 100 a 300 metri (Pleistocene superiore, Olocene).

Dette formazioni sono in rapporto di discontinuità stratigrafica, atteso che il loro contatto reciproco, al passaggio tra termini susseguenti, è spesso caratterizzato dalla presenza di una superficie erosionale o da un contatto piuttosto brusco e netto.

Su queste formazioni poggiano sequenze di depositi alluvionali terrazzati rappresentate, dal basso, dai seguenti termini:

- **a** terreni argillosi;
- **a^s** terreni argillo-sabbiosi;
- **s^a** terreni sabbioso-argillosi;

- s terreni sabbiosi.

Nell'ambito del sito di intervento ed **in tutta la fascia a contorno del futuro impianto fotovoltaico**, affiorano o subaffiorano termini della Formazione delle Alluvioni terrazzate sopradescritte.

2.2) GEOMORFOLOGIA

Il territorio della città di Ferrara è caratterizzato da un microrilievo dovuto alla regimazione delle acque superficiali, formato nella sua parte più superficiale dall'azione del fiume Po e dei suoi rami secondari i cui caratteri sono ancora evidenti.

Il territorio a nord e a sud della città di Ferrara è costituito da sedimenti alluvionali recenti legati all'azione di deposito dei fiumi alpini e appenninici, come il Po, il Reno, il Panaro e i loro rami secondari.

In superficie le sedimentazioni sono databili all'olocene e costituite da materiali fini, quali sabbia, limo e argilla, con frequenti episodi torbosi.

Nel sottosuolo, al di sotto di queste alluvioni recenti, è presente una coltre di sedimenti di età pliocenico-pleistocenica caratterizzata da sedimenti marini, deltizi, lagunari e fluvio-palustri, con spessori variabili dai 50 metri di Casaglia ai 200 metri nella zona sud-est di Ferrara.

Il substrato roccioso si rileva fra i 200 e i 2000 metri di profondità, costituente il margine settentrionale dell'Appennino e caratterizzato da una fitta serie di anticlinali, faglie inverse e ricoprimenti con assi a direzione generale W NW – E SE.

Le fasi orogenetiche interessanti il substrato sono databili al Miocene; successivamente prevalsero movimenti di tipo verticale.

Nel Pliocene e nel Quaternario si ebbe dapprima l'emersione con l'erosione delle culminazioni e sedimentazione nelle depressioni.

Seguirono fenomeni collegati alla subsidenza con sedimentazione fino a verificarsi il completo ricoprimento delle strutture e la deposizione in ambiente continentale dei terreni più recenti, funzione delle variazioni climatiche e delle conseguenti migrazioni dei vari ambienti.

La lettura della storia geologica più recente è possibile ancora tramite l'osservazione dell'assetto geomorfologico, quando non sia stato troppo invasivo l'intervento antropico.

La condizione dei corsi d'acqua nella bassa pianura padana è sempre stata di sedimentazione: il fiume, libero di espandere le sue acque di piena nelle aree circostanti, tende a distribuire i sedimenti più grossolani come le sabbie nelle barre e si costruisce argini naturali a granulometria limosa. Man mano che si allontanano dall'alveo le acque depositano materiali sempre più fini come limi e argille. Questi sedimenti si costipano maggiormente rispetto alle sabbie per cui per effetto naturale si creano dislivelli tra i corsi d'acqua e le aree laterali. Nelle aree più depresse intercluse e con terreni più fini e meno permeabili si creano ristagni con paludi e acquitrini che permettono la deposizione di materiale organico che porterà alla formazione di argille organiche e torbe.

Questa situazione in continua evoluzione cambia naturalmente quando i fiumi più rilevati rispetto alle zone laterali, tendono a mutare il loro corso riversando con maggiore facilità le acque nelle zone di basso morfologico.

Su questo processo naturale è intervenuta l'azione dell'uomo che, per difendersi dalle inondazioni, ha alzato argini sempre più elevati costringendo i fiumi nei letti originari e, di fatto, irrigidendo il reticolo idrografico portando all'esaltazione dei

dislivelli fra le zone più basse comprese all'interno della rete e le strutture fluviali argini – alveo.

L'area a nord di Ferrara è dominata dal corso attuale del Reno, con l'argine sinistro intorno a quota (+ 12,00), e caratterizzata dalla presenza degli antichi alvei del Po fra cui il paleoalveo del Po di Ferrara e del Po di Volano.

Fra le strutture minori è riconoscibile il dosso sabbioso di antico alveo che si stacca dal Po di Ferrara nei pressi di Mizzana e si dirige verso Pontelagoscuro.

Di natura antropica è il dosso conosciuto come Argine Traversagno costruito da Mizzana a Pontelagoscuro a protezione della città dalle inondazioni provenienti da ovest.

2.3) IDROGEOLOGIA

a) idrografia superficiale

Le condizioni di drenaggio dei terreni che costituiscono l'ossatura della pianura di Ferrara sono condizionate dall'assetto morfologico ed in particolare dal microrilievo. Le linee di drenaggio preferenziali hanno direzione ovest-est.

Il territorio comunale è solcato da numerosi corsi d'acqua di vario grado di importanza.

In particolare, i principali sono rappresentati dai fiumi Po e Reno che non svolgono nessuna funzione scolante data la quota dei rispettivi alvei, anzi costituiscono delle linee di spartiacque al normale deflusso. A questi si possono aggiungere il Po di Ferrara - Volano e di Primaro, il Boicelli e il Riazzo del Gallo che svolgono la funzione di collettori nel raccogliere la maggior parte delle acque superficiali e meteoriche ricadenti sul territorio e convogliate per semplice gravità o attraverso impianti di idrovora da collettori minori, quali fossi e canali di bonifica che costituiscono la rete scolante ferrarese.

b) idrologia sotterranea

Generalmente il territorio del comune di Ferrara è interessato da una falda superficiale strettamente connessa con le antiche direttrici dei drenaggi ora estinti e con i canali e scoli della rete della Bonifica.

Questa falda è comunemente denominata falda freatica, anche se localmente presenta un certo grado di salienza.

Dalla bibliografia specializzata e da indagini dirette condotte, risulta che nel sottosuolo sono presenti diversi acquiferi confinati di cui solo i più superficiali, fino a 50 – 60 metri di profondità, sfruttabili per scopi civili e industriali per la natura delle acque dolci.

In profondità si riconoscono ulteriori acquiferi caratterizzati da acque salmastre e chiaramente salate.

La serie idrogeologica locale può essere così sintetizzata:

I numerosi scoli e fossati sono collegati a direttrici di drenaggio principali che nella zona in esame sono identificati in:

- Canal Bianco a ovest e a nord del Polo Industriale;
- Canale Cittadino – Gramicia a sud;
- Canale Boicelli a ovest.

Il canal Bianco e il canale Cittadino nascono entrambi nella zona nord ovest della Provincia di Ferrara, a est dell'abitato di Bondeno, e drenano tutto il territorio posto fra il Po e il Canale di Burana.

Al limite est del Polo Industriale entrambi sottopassano in Canale Boicelli per drenare verso est.

Il Canale Cittadino, sottopassato il Canale Boicelli, prende il nome di Canale Gramicia e riversa le acque, presso Baura, nel Canale Naviglio. Questo confluisce poi nel Canal Bianco presso l'abitato di Coccanile.

Il Canale Boicelli è utilizzato sia per la Navigazione interna, attraverso la conca di navigazione di Pontelagoscuro, che per l'irrigazione, attraverso una presa del Consorzio generale di Bonifica che alimenta il Po di Volano.

La quota media dell'acqua nel canale è legata alla quota dell'acqua nel Po di Volano che, regolata attraverso la chiusa di Valpagliaro, è ad una quota prossima a (+4,60).

2.4) CONDIZIONI STRATIGRAFICHE

La successione litologica e stratigrafica dell'area è ricostruita in base alle numerose indagini eseguite nell'intorno dell'area di studio.

- In superficie il primo livello ha caratteristiche variabili secondo gli interventi e le attività presenti; vi sono terreni naturali di natura argilloso limosa e terreni di riporto di natura diversa e manufatti.

- Seguono sedimenti limosi con intercalati livelli sabbiosi di spessore variabile collegabili al livello sabbioso caratterizzante la fascia interessata dal paleoalveo che interessa la zona più a ovest e passa attraverso lo stabilimento industriale. La profondità del letto è variabile da 3 a 7 metri.

- Continuano in profondità fino a c.a 13 metri sedimenti limoso argillosi con intercalazioni torbose e con lenti a sabbie fini o sabbie limose verso il letto nella parte ovest mentre verso est i depositi sono più argillosi e sempre con intercalazioni torbose.

- Segue uno strato sabbioso di età wurmiana sede del primo acquifero confinato che raggiunge la profondità di 40-45 metri dal piano campagna.

2.5) SISMICITÀ

Le strutture appenniniche sepolte sono ancora soggette a movimenti, che spesso si traducono in sismi capaci di superare la soglia del danno. Si ha infatti notizia di 15 terremoti verificatisi a

Ferrara e nelle aree circostanti nel periodo compreso fra il 1234 e 1787, di cui 9 superiori al sesto grado della scala Percalli; solo il terremoto del 1570 ha raggiunto l'ottavo grado (CNR 1980; Ardizzoni et al. 1991; Boschi et al. 1995, 1997; Camassi e Stucchi 1998; Bondesan 2002).

Sulla base di questi eventi, il Servizio Sismico Nazionale, nella nuova mappa della pericolosità sismica messa a punto nel 1998, ha incluso il Comune di Ferrara nella Categoria 3 (territori suscettibili di terremoto fino al 7° grado della scala Mercalli).

2.6) GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E IDROGEOLOGIA DEL SITO DI INTERVENTO

Dal punto di vista geomorfologico, l'area in esame, come in generale tutto il territorio della Provincia di Ferrara è soggetta a subsidenza.

La componente naturale del fenomeno è prevalentemente ascrivibile al costipamento dei sedimenti più recenti ancora non litificati. Il condizionamento del substrato è rappresentato dal suo stesso carattere di orogene recente, capace di dar luogo a movimenti verticali residui, nonché alla sua forma corrugata che determina variazioni locali dei tassi di costipamento dei terreni sovrapposti, producendo una loro attenuazione nelle zone corrispondenti agli alti strutturali sepolti.

I fenomeni di subsidenza registrati con metodi strumentali sono però principalmente di carattere artificiale, denotano variabilità sia nello spazio che nel tempo e sono attribuibili alla sottrazione di acqua dagli acquiferi (superficiali e profondi). Sono causa di subsidenza anche forti escursioni del livello della falda freatica dovuto a variazioni climatiche (periodi siccitosi prolungati) e a sistemazioni idrauliche del territorio (il territorio ferrarese è stato in passato interessato da importati bonifiche – bonifica Sammartina).

Anche variazioni del chimismo delle acque sono considerate capaci di determinare abbassamenti del suolo, sia pur limitati, quando sono in grado di indurre per fenomeni elettrochimici riduzione di volume dei minerali argillosi (terreni argillosi sono molto abbondanti nel territorio ferrarese).

Lo studio dell'inquadramento idrogeologico della zona in esame evidenzia, l'esistenza di un acquifero libero freatico, costituito prevalentemente da limi argillosi, argille limosa e argille organiche poco permeabili, riconducibili a sedimenti di ambiente palustre (area di recente bonifica – Bonifica San Martina). Le isofreatiche sono disposte a formare un bacino con direzione NE-SW. Dalla carta del drenaggio superficiale (al.3) si evidenzia un'area a difficoltoso drenaggio per condizioni altimetriche, terreni impermeabili e falda superficiale.

La falda freatica viene alimentata esclusivamente da apporto meteorico e quindi fortemente influenzata da condizioni climatiche che ne favoriscono forti escursioni, prossima al piano campagna in periodi molto piovosi e forte riduzione in periodi siccitosi.

L'elaborazione delle indagini geognostiche (passate e presenti) eseguite nei terreni interessati dall'intervento in oggetto hanno permesso la ricostruzione di un modello litostratigrafico di massima discretamente omogeneo costituito da 3 livelli che può essere così riassunto.

- 1° livello, da p.c. fino a mt. 14 di profondità costituito da alternanza argille limose e limi argillosi poco consistenti con frequenti episodi di argille organiche e torba. Si tratta di terreni molto compressibili a modesti valori di capacità portante.

- 2° livello, da metri 14 fino a mt. 28 di profondità, costituito prevalentemente da terreni coesivi molto compatti a caratteristiche geomeccaniche nettamente migliori rispetto a quelle dei terreni sovrastanti.

- 3° livello, dalla profondità di mt. 28 fino alla profondità indagata di mt. 32 e oltre, presenza di un banco sabbioso molto addensato a ottime caratteristiche geomeccaniche.

3) INDAGINI GEOGNOSTICHE

Le indagini geognostiche in sito, a parte le osservazioni dirette sui fronti rocciosi presenti in affioramento lungo i tagli stradali o le scarpate naturali, sono consistite essenzialmente nella esecuzione di una indagine geofisica con metodologia sismica a rifrazione, svolta attraverso l'allestimento di n.2 basi sismiche a rifrazione localizzata in modo da verificare le qualità elasto-meccaniche del terreno di fondazione, assumendo che i carichi d'opera possano indurre effetti nel sottosuolo sino ad una profondità significativa di circa 15 - 20 metri.

Descrizione della campagna sismica a rifrazione

La campagna geofisica a rifrazione è stata espletata mediante acquisizione di onde elastiche lungo singole basi sismiche di estensione lineare pari a m 36.

Dette basi sono consistite in catene geofoniche di n.12 ricevitori verticali da 14 Hz posti a distanza reciproca di m 3, energizzata attraverso n.2 punti di battuta posizionati agli estremi della stesa geofonica.

La strumentazione impiegata nell'indagine è consistita in un sismografo "Dolang-DBS 270", con possibilità di incremento e sovrapposizione strumentale del segnale, frequenza di campionamento di 3000 Hz e registrazione magnetica degli eventi.

Le energizzazioni sono state prodotte impiegando sorgente a massa battente, non ritenendo opportuno l'impiego di qualsiasi esplosivo.

I dati di responso corrispondono alle registrazioni dei treni d'onda acquisiti a partire dall'istante di energizzazione (+/- 1 m/sec), per intervalli di tempo di 100 millisec (ai fini della ricostruzione del modello sismostratigrafico) e 500 millisec (ai fini della analisi MASW), registrati su supporto magnetico.

L'interpretazione dei sismogrammi è stata effettuata discretizzando i diversi treni d'onda, per via grafica, ed isolando gli istanti di primo arrivo dei fronti d'onda rifratti delle onde di compressione P (o longitudinali) e delle onde di taglio S (o trasversali).

I tempi di percorrenza dell'onda rifratta (sorgente sismica-geofoni) sono stati interpretati su diagrammi distanza-tempo detti dromocrone.

Ad una preliminare analisi estetica delle dromocrone, di tipo qualitativo, è seguita una analisi quantitativa mediante l'impiego di programmi di calcolo (Dolang-d.i. e Geopsy), che hanno consentito di ricostruire i principali rifrattori intercettati nel sottosuolo, di determinarne la relativa profondità e di calcolare le velocità sismiche degli orizzonti interposti.

L'analisi estetica dei treni d'onda, della morfologia dei rifrattori e delle dromocrone corrispondenti, ha successivamente consentito di apporre, sulle sezioni sismiche già ricostruite, la posizione delle soluzioni di continuità già intercettate, la cui presenza resta confermata anche da una analisi dei treni d'onda riflessi ed interferenti con quelli rifratti.

Profili sismici

I profili sismici, riportati negli allegati al seguito, evidenziano la presenza di numerosi rifrattori; alcuni di questi si interpongono tra porzioni di suolo a caratteristiche elastiche nettamente differenziabili, mentre altri consistono in passaggi sfumati da una porzione ad un'altra e non possono considerarsi superfici nette di differenziazione.

La correlazione dei rifrattori principali nelle sezioni sismiche eseguite, in attenzione ai valori di velocità sismica misurati ed ai loro trend, ha permesso di distinguere porzioni del sottosuolo di indagine a caratteristiche elastiche "omogenee", qui di seguito denominate Unità sismiche (o "Strati Sismici").

Dette Unità sono caratterizzate da trend caratteristici dei valori di velocità, e comprendono uno o più orizzonti sismici il cui comportamento può ritenersi relazionabile per risposta elasto-meccanica.

Gli orizzonti in cui si distinguono le unità sismiche presentano una buona rispondenza sulle basi in intersezione, sia per caratteristiche elastiche che geometriche; è stato possibile, inoltre, suddividere un medesimo orizzonte in più porzioni che, localmente ed in particolari direzioni, presentava variazioni di velocità, seppure contenute.

La definizione di Unità sismiche è stata, pertanto, necessaria per fornire un quadro d'insieme, e di facile lettura, di quanto individuato ed interpretato attraverso la campagna geofisica oggetto della presente relazione.

Le Unità in cui sono stati distinti gli orizzonti sismici individuati risultano contraddistinte dalle seguenti classi di velocità:

I Strato sismico $250 < [V_p] < 300$ (strato 1);

II Strato sismico $440 < [V_p] < 660$ (strato 2);

III Strato sismico $1400 < [V_p] < 2500$ (strato 3).

Risulta evidente che, in relazione alla anisotropia delle qualità elastiche degli orizzonti individuati, si ritiene necessario considerare la suddivisione del terreno in strati sismici solo una schematizzazione esemplificativa di quanto rilevato nel sottosuolo dell'area in esame.

Zonazione sismica

Nella determinazione degli incrementi dell'intensità sismica e dei parametri geofisici, il metodo seguito è quello proposto per la predisposizione nei procedimenti di zonazione sismica adottati dalla Regione Friuli-Venezia Giulia (1977) [D.I.C. Atti del XVIII Convegno Nazionale, Trieste 23-25 settembre 1982, Assessorato dei Lavori Pubblici: Criteri e metodologie di studio per indagini geologico - tecniche in prospettiva sismica nelle zone terremotate del Friuli (Università di Trieste)].

Tale metodologia privilegia il dato geotecnico - geoidrologico al fine del computo del decremento locale in risposta meccanica ed idrogeologica del terreno per definire in questo modo zone omogenee via via a caratteristiche più scadenti, per le quali, nell'utilizzo tecnico, possono essere ulteriormente previsti particolari coefficienti di risposta (C1-C2) da utilizzare come aggravio nel computo della sollecitazione locale, dell'intensità macrosismica relativamente a differenti litofacies e a differenti condizioni idrogeologiche locali.

Tenendo conto di ciò, per la definizione delle ZONE Z1-Z6 si è fatto riferimento alla formula di Medvev [1965 Energizing Seismology, Israel Program for Scientific Translations].

Nella fattispecie, rilevata una litofacies di riferimento che risulta essere il terreno meccanicamente migliore disponibile nella regione (classe C1), l'incremento di intensità sismica locale peculiare di ciascuna delle successive dieci classi di terreno (vedi grafici allegati), viene computato sia per condizioni asciutte ($W > 10$), sia in presenza di idrica, situata a varie quote ($W = -5$, $W = -2$ e con $W = 0$ cioè con falda in corrispondenza del piano di fondazione).

- I STRATO SISMICO -

Lo strato sismico più superficiale corrisponde litologicamente ai termini affioranti o sub-affioranti in sede, rappresentati essenzialmente da materiali di riporto e strati

aerati ghiaioso-sabbiosi stratificati, comprendenti frazioni di terre residuali come riempimento di cavità o depressioni generate dal dilavamento meteorico.

La velocità di propagazione delle onde P varia intorno ai 250 m/sec, mentre, lo spessore associato al I strato sismico sismica varia da 0.60 m a 0.90 m.

Nel complesso i terreni identificati con il I strato sismico si inquadrano nella classe di litologie C5 della zona sismica Z2, essendo caratterizzati da un forte degrado in risposta geotecnica rispetto alle condizioni ottimali e, in prospettiva di sollecitazione dinamica, da stati di incipiente instabilità che possono tradursi in una marcata perdita di resistenza meccanica con cedimenti delle sovrastrutture.

Tali "litofacies" si collocano nelle posizioni più scadenti in relazione alla fattibilità di soluzioni progettuali e di utilizzo tecnico.

Particolare attenzione dovrà essere rivolta alla programmazione ed alla esecuzione degli interventi di scavo, curando la rimozione dell'aerato sino al completo livellamento del piano di sedime sul terreno "in posto".

- II STRATO SISMICO -

Le facies associate a tale strato indicano un graduale miglioramento, con la profondità, della integrità fisica dell'ammasso litologico, malgrado la presenza di corpi argilloso-sabbiosi a stratificazione media piano parallela o incrociata. L'incremento nella risposta elastica può essere correlato anche alla presenza di porzioni argillose e sabbiose, come "matrice" di riempimento degli interstrati ghiaiosi che di cavità, le quali conferiscono maggiore compattezza e continuità all'ammasso.

Se da un lato, però, si riscontrano qualità elasto-meccaniche leggermente superiori rispetto allo strato sovrastante, dall'altro questi termini sono sempre da ascrivere a terreni con qualità geotecniche intermedie, come si evince dalla diretta correlazione con i valori dell'indice di qualità.

La profondità di rinvenimento varia da - 0.6 m a - 0.9 m ed il limite superiore di questo corpo geolitologico non sempre presenta un andamento geometrico strettamente planare o regolare.

La velocità delle onde P varia intorno ai 500 m/sec, mentre, lo spessore varia da 3 m a 4 m.

I terreni costituenti questa unità rientrano nella classe litologica C4 della zona sismica Z1 dove, sotto il profilo geomeccanico, vengono classificate facies con risposta elasto-meccanica intermedia tra litotipi rocciosi teneri [marne argillose, argille molto consolidate e consolidate ($N_{spt} > 30$; I_c 0.75 - 1.0; C_u 1-2 kg/cmq) e litotipi rocciosi più compatti ed integri (argille sabbiose).

Per quanto riguarda l'utilizzo geomeccanico di questi terreni, la fattibilità ed il dimensionamento delle soluzioni di fondazione sono legate alla verifica della portanza secondo le superfici di appoggio, soprattutto in relazione ai termini meccanicamente più vicini alla superficie ed in relazione ai tassi di lavoro previsti dal progetto.

- III STRATO SISMICO -

Le facies litologiche associate a tale strato corrispondono alle porzioni più integre dell'orizzonte geotecnico profondo, ovverosia, ad argille sabbiose massive o in strati spessi.

Il limite superiore dello strato è dato da una superficie inclinata che, nell'arco di 36 metri di distanza lineare, assume profondità variabile da - 4 m a - 5 m rispetto al piano di campo.

Il contatto tra il secondo ed il terzo strato sismico avviene in maniera netta, come si evince dal netto contrasto nella risposta elastica tra i due, ovvero, dal salto nella

velocità delle onde sismiche di compressione da 500 m/sec a oltre 1800 m/sec, a conforto della presenza di un "substrato" di qualità geomeccaniche medio-buone e valori dell'indice di qualità variabili tra il 50% ed il 60%.

I terreni costituenti il III strato sismico si inquadrano nella classe litologica C3 della zona sismica Z1. Per tale classe si configura uno stato fisico-strutturale del terreno che determina, in termini geotecnici, valide caratteristiche di elasticità e portanza.

Con riferimento alle condizioni di sollecitazioni statiche e dinamiche (in prospettiva sismica), la risposta relativa di questi terreni può essere considerata valida, comunque, solo a seguito di un'accurata scelta della tipologia e delle dimensioni delle fondazioni.

Annotazioni geofisiche

In riferimento ai valori di velocità più ricorrenti per le Unità sismiche contraddistinte nel sottosuolo, è stata proposta una serie di parametri elasto-meccanici e geologico-tecnici, la cui validità risulta verificata in riferimento alla natura litologica interpretata.

Nei limiti delle potenzialità del sistema di prospezione adottato e della corretta interpretazione geofisica delle diverse "facies litologiche" nel sottosuolo, i valori proposti risultano verificati per un volume di terreno significativo dell'indagine, e puntualmente non sempre confermati. Particolari scelte di intervento dovranno, pertanto, essere effettuate verificando la corrispondenza tra i dati forniti in questa fase e i dati relativi ad eventuali ulteriori approfondimenti della campagna geognostica-geotecnica.

Per quanto riguarda i parametri elasto-meccanici e geologico-tecnici proposti nella presente relazione, e riportati nelle tabelle allegate, viene fatto un primo riferimento alle formulazioni della teoria dell'elasticità, quindi, a relazioni sperimentali tratte da diversi autori e più volte verificate in siti geologicamente corrispondenti (consultare tabelle):

- modulo di Poisson (v)

$$v = (1/2 \times (V_p / V_s)^2 - 2) / ((V_p / V_s)^2 - 1)$$

dove V_p è la velocità delle onde prime

V_s è la velocità delle onde seconde;

- modulo di Young dinamico (Edin)

$$Edin = \gamma \times V_s^2 \times ((3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2))$$

dove γ è la densità in sito del terreno

V_p è la velocità delle onde prime

V_s è la velocità delle onde seconde;

- modulo di Bulk (K), che esprime la comprimibilità volumetrica

$$K = E / 3(1 - 2v)$$

dove E è il modulo di Young

v è il modulo di Poisson;

- modulo di rigidità (M), che esprime la relazione tra sforzo e deformazione in condizioni di taglio

$$M = E / 2(1 + v)$$

dove E è il modulo di Young

v è il modulo di Poisson;

- rigidità sismica (R)

$$R = \gamma \times V_p$$

dove γ è la densità in sito del terreno

V_p è la velocità sismica delle onde longitudinali;

- incremento sismico (n), parametro utilizzato nei criteri di zonazione sismica (Medvev, 1965 - Emerging Seismology, Israel Program for Scientific Translations) delle aree che esprime l'incremento locale dell'intensità sismica in funzione del decremento progressivo in risposta meccanica e idrogeologica dei terreni con caratteristiche via via più scadenti, in maniera inversamente proporzionale alla rigidità sismica

$$n = X_n \times \log((Y_o \times V_{lo}) / (Y_n \times V_{ln})) + \exp^{0.04 \times W}$$

dove $X_n = 1.56 - 1.83$

Y_o = gamma litotipo di riferimento

Y_n = gamma litotipo considerato

V_{lo} = velocità sismica litotipo di riferimento

V_{ln} = velocità sismica litotipo considerato
W = profondità della falda rispetto alla superficie;

- **coefficiente di sottofondazione (epsilon)**, esprime la risposta meccanica e idrogeologica, in analogia al coefficiente C che tiene conto dei fattori di risposta morfotettonici, e viene adottato nel computo delle sollecitazioni orizzontali considerando che aumenta con l'incremento dell'intensità sismica *relazione di archivio*;

- **densità naturale del terreno (gamma) - Grant e West - 1965**

$\gamma = f(V_p)$

dove V_p è la velocità sismica delle onde longitudinali.

4) MODELLO DI CARATTERIZZAZIONE GEOGNOSTICA DEL TERRENO DI FONDAZIONE

Alla luce delle osservazioni dirette ed indirette effettuate nell'ambito del sito di interesse, così come descritte nei precedenti paragrafi, emerge la possibilità di effettuare una perfetta correlazione fisica tra i corpi geolitologici effettivamente presenti nel sottosuolo e gli strati geofisici o sismici proposti come risultato della prova sismica "a rifrazione", nei limiti del cosiddetto volume significativo delle indagini e nelle ipotesi che le opere in progetto possano indurre incrementi del carico statico del terreno o sollecitazioni di carattere dinamico sino ad una profondità di c.a. 15 m dalla superficie.

In prima analisi, sia le risultanze delle osservazioni dirette sulle formazioni affioranti, sia le risultanze geofisiche evidenziano un terreno di fondazione litologicamente e strutturalmente eterogeneo in senso verticale e, in particolare da - 0.00 metri sino a - 30.00 metri di profondità rispetto al piano di campo.

Infatti, a partire dall'attuale livello topografico (circa 6 m s.l.m.), al di sotto del manto superficiale contraddistinto da scadenti qualità fisico-meccaniche e per il quale si esclude qualsiasi utilizzo geotecnico, il corpo geologico che realmente assume significato in termini di resistenza meccanica e, pertanto, costituisce il substrato di fondazione, può essere suddiviso in due ulteriori strati geotecnici (rispettivamente superficiale e profondo) caratterizzati da comportamenti geo-meccanici differenziabili come di seguito a descrivere. Quindi:

a) **lo strato geotecnico superficiale**, costituito da un corpo ghiaioso, sabbioso-argilloso stratificato, a grado medio alto di addensamento e compattezza, con presenza di matrice sabbiosa ed argillosa come riempimento dei vuoti tra i ciottoli, i giunti, ed eventuali fessure e sacche.

La resistenza meccanica dello strato è comunque discreta, media, in virtù di uno spessore di almeno 15 metri: questo si correla con il II strato sismico, presente sino a profondità da c.a - 15 m a - 16 m dal piano di campo, e vi si associano i seguenti parametri:

- **Gamma t** = 1.80 g / cm³;
- **Coesione** = 0.00 Kg / cm²;
- **Angolo di attrito** = 30°;
- **Falda** = presente;
- **Mod. Young dinamico** = 1.998,64 Kg / cm²;
- **Mod. Poisson** = 0.33;
- **Mod. Bulk** = 1.998,64 Kg / cm²;
- **Mod. Rigidità** = 748,47 Kg / cm²;
- **Rigidità** = 5.08;
- **Incremento sismico**, per W > 10m (profondità falda) = 0.29;
- **Coefficiente di sottofondazione** = 1,

b) **lo strato geotecnico profondo**, costituito da argille con intercalazioni sabbiose e siltose, compatte e plastiche, in strati e banchi, comunque di elevata resistenza

meccanica rispetto agli strati superiori: questo lo si identifica a profondità da - 4 m a - 5 m dal p.c., e corrisponde al III strato sismico di cui è indefinito il limite inferiore ma, ai fini della presente trattazione, lo si può ritenere esteso almeno sino a - 30 m di profondità dalla superficie. È caratterizzabile come segue:

- **Gamma t** = 2.00 g / cm³;
- **Coesione** = 0.15 Kg / cm²;
- **Angolo di attrito** = 25°;
- **Falda** = presente;
- **Mod. Young dinamico** = 14.684 Kg / cm²;
- **Mod. Poisson** = 0.45;
- **Mod. Bulk** = 49.762 Kg / cm²;
- **Mod. Rigidità** = 5.057 Kg / cm²;
- **Rigidità** = 6.9;
- **Incremento sismico**, per $W > 10m$ (profondità falda) = 0.06;
- **Coefficiente di sottofondazione** = 1,

mentre, per contro:

c) **il manto agrario**, costituito da terreno di lavorazione agraria e terreno di riporto disuniforme, presenta caratteristiche geotecniche scadenti trattandosi di materiali scarsamente addensati. Lo spessore complessivo è variabile da circa 0.5 metro a circa 0.9 metri e si correla perfettamente con il I strato sismico al quale si associano i seguenti parametri elastici e geotecnici:

- **Gamma t** = 1.50 g / cm³;
- **Coesione** = 0.00 Kg / cm²;
- **Angolo di attrito** = < 15°;
- **Falda** = presente occasionalmente;
- **Mod. Young dinamico** = 794 Kg / cm²;
- **Mod. Poisson** = 0.25;
- **Mod. Bulk** = 533 Kg / cm²;
- **Mod. Rigidità** = 317 Kg / cm²;
- **Rigidità** = 2.58;
- **Incremento sismico**, per $W > 10m$ (profondità falda) = 0.8;
- **Coefficiente di sottofondazione** = 1,

non presenta caratteristiche idonee all'utilizzo geotecnico.

Le condizioni di giacitura dei tre strati sono quelle sub-orizzontali ed il contatto tra l'orizzonte geotecnico superficiale e l'orizzonte geotecnico profondo si esplica secondo un limite non sempre netto per la presenza di una fascia di origine erosionale, disomogenea e discontinua lateralmente, rappresentata litologicamente da accumuli argillosi e sabbiosi rimaneggiati dalle correnti di trasporto.

In seconda analisi, per quanto attiene alle condizioni idrogeologiche sotterranee, emerge come nell'ambito del terreno di fondazione si possa riscontrare attività freatica sub-superficiale, dato il sensibile spessore acquifero disponibile e per la presenza più in basso di uno strato di terreno impermeabile "di tenuta" alla base delle unità superficiali, e della discreta continuità laterale dei depositi alluvionali terrazzati, condizioni che impediscono l'instaurarsi di una vera e propria falda sub-superficiale.

Pertanto, non si può escludere che le unità superficiali possano risentire, anche solo periodicamente, di particolari condizioni di saturazione legate ad improvvise variazioni delle condizioni di umidità del terreno in concomitanza con precipitazioni meteoriche piuttosto rilevanti, nonché, di un drenaggio rallentato per la presenza di termini meno permeabili al contatto con le unità argillose sottostanti.

Modello di interazione struttura – terreno di fondazione

Se si assume, nella trattazione delle problematiche dovute all'interazione struttura-terreno, che un terreno argilloso-sabbioso stratificato, così come descritto, possa assimilarsi entro certi limiti ad un continuo elastico, l'analisi strutturale dei componenti della fondazione può essere impostata, in prima fase, sulla valutazione del "coefficiente di reazione verticale del terreno" (costante elastica di sottofondo o costante di "Winkler"):

$$K_s = \Delta q / \Delta h \quad [Kg / cm^3]$$

dove Δq = incremento di carico sul terreno [Kg / cm^2];
 Δh = cedimento corrispondente [cm].

Tale coefficiente, che lega concettualmente la pressione sul terreno ai cedimenti, viene largamente impiegato per fondazioni continue, per platee e palificate, e si calcola sulla base del modulo elastico statico E_s secondo la formula (Vesic', 1961a, 1961b):

$$K_s = E_s / B \times (1 - \nu^2),$$

dove E_s = Modulo di Young statico ($E_{din.} / 10$) [Kg / cm^2];
 B = larghezza della fondazione continua [cm];
 ν = Modulo di Poisson statico = Modulo di Poisson dinamico.

Nei calcoli pratici, adottando un modello di fondazione di tipo nastriforme o quadrato che trasmetta i sovraccarichi strutturali ad un ammasso terrigeno assimilabile dal punto di vista fisico-meccanico alla classe di omogeneità configurata con la II Unità Sismica, si ottiene:

dati $E_s = 199 \text{ Kg} / \text{cm}^2$; $\nu = 0.33$;

per $B = 1 \text{ m}$ $\Rightarrow K_s = 2,23 \text{ Kg} / \text{cm}^3$.

Considerazioni sulle indagini geognostiche svolte

Alla luce delle indagini dirette ed indirette effettuate in attraversamento al piano di fondazione del futuro impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, emerge la possibilità di effettuare una perfetta correlazione fisica tra le unità litostratigrafiche distinte e riconosciute nel sottosuolo e gli strati sismici proposti come risultato della prova sismica "a rifrazione", nei limiti del cosiddetto volume significativo delle indagini e nelle ipotesi che le opere in progetto possano indurre incrementi del carico statico del terreno o sollecitazioni di carattere dinamico sino ad una profondità di circa 15 m dalla superficie.

Le risultanze geomeccaniche e le risultanze geofisiche mostrano un carattere litologico e strutturale eterogeneo del terreno di fondazione, sia in senso verticale (da 0.00 metri sino a 30.00 metri di profondità rispetto al piano di indagine) sia in senso laterale da nord a sud.

Gli strati sismici identificati con l'elaborazione dei dati sismici di campo ai quali è possibile attribuite, a seguito della presente indagine, significato in termini di resistenza meccanica, offrendo elevate potenzialità portanti nei confronti delle condizioni di carico che verranno introdotte dall'impianto a realizzarsi (condizioni che comportano sostanziali e ripetute oscillazioni di carico, con sollecitazioni statiche e dinamiche concentrate), sono il secondo ed il terzo strato, i quali comprendono essenzialmente termini classificati con l'orizzonte "profondo" (attinente a valutazioni comportamentali di tipo geomeccanico).

Questi ultimi sono presenti in sub-affioramento per tutta la superficie di imposta, consistendo in una successione eterogenea data da depositi alluvionali argilloso-sabbiosi in discordanza su depositi argillosi compatti ben addensati e di media plasticità, comunque di elevata resistenza meccanica rispetto ai terreni rimaneggiati relativi al manto di lavorazione agraria del primo strato; si identificano a partire da – 0.6 m a – 0.93 m di profondità dalla superficie.

È opportuno tener presente che il contatto tra il primo strato sismico ed i sottostanti si esplica secondo una superficie limite non netta, per la certa presenza di una fascia di alterazione carsica, disomogenea e discontinua lateralmente, ricolmata sia da accumuli argillosi residuali sia da riporti antropici antecedenti rispetto alla realizzazione del presente progetto.

Infine, per quanto attiene alle condizioni idrogeologiche, emerge come nell'ambito del terreno di fondazione si intercalino strati acquiferi.

Questa condizione è legata alla elevata permeabilità per fessurazione ed incarsimento degli strati delle unità sabbiose, sia in superficie che più in profondità, responsabile del deflusso verso profondità maggiori della quasi totalità della aliquota di infiltrazione efficace delle acque meteoriche.

5) CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Gli studi inerenti la fattibilità geologica e la compatibilità delle opere con le condizioni geomorfologiche dell'area di intervento di cui al - ***progetto per la realizzazione di un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili a sorgere in località "Santuario del Poggetto", in agro del territorio comunale di Ferrara (FE)*** -, in ottemperanza alle disposizioni normative vigenti (D.M. 17/01/2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni" – Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), consentono di mettere in luce condizioni di valida compatibilità delle previsioni progettuali riguardo alle condizioni naturali dei luoghi esaminati ed in particolare nel rispetto degli assetti geologico, geomorfologico e idrogeologico.

In sintesi:

1) La **fattibilità geologica** degli interventi risulta compatibile con le caratteristiche geolitologiche e strutturali del sito di interesse, in relazione alle seguenti risultanze:

a) le formazioni geologiche affioranti e sub-affioranti nell'area sono dotate di continuità in superficie ed in profondità. Infatti, il substrato argilloso-sabbioso affiora secondo termini dotati di accertato spessore e continuità latero-verticale; in particolare l'orizzonte geotecnico superficiale, il quale verrà direttamente interessato dall'ammorsamento degli elementi fondali del nuovo impianto ad erigersi, si configura con il secondo strato sismico e raggiunge spessori da 3 m a 4 m; più in profondità, questo orizzonte passa all'orizzonte geotecnico profondo, il quale si configura con il terzo strato sismico e mostra un netto miglioramento delle qualità fisico-meccaniche del sottosuolo con l'aumentare della profondità, mentre la formazione argillosa supera complessivamente la potenza verticale di 50 metri;

b) dall'esame visivo e geofisico, dette formazioni presentano caratteri di omogeneità sia litologica che dello stato fisico tessiturale e strutturale della compagine geolitologica argilloso-sabbiosa;

c) benché presenti nell'area elementi riconducibili ad attività tettonica antica, quali, dislocazioni per faglia o piega e fratture pertinenti a sistemi di fratturazione del basamento, questi non mostrano, allo stato attuale, indizi di riattivazione che possono interferire in alcun modo sulla stabilità delle opere in programma, perché da tempo stabilizzati e inattivi;

d) non emergono in superficie cavità naturali od antropiche che possano compromettere l'integrità dei futuri piani di appoggio delle strutture fondali.

2) La **fattibilità geomorfologica** risulta compatibile riguardo ai lineamenti salienti del paesaggio morfologico dei luoghi, in virtù delle seguenti considerazioni:

a) il sito insiste su di un settore della superficie topografica attuale contraddistinto da morfologia pianeggiante ed assetto sub-orizzontale o debolmente inclinato verso sud e non rivela problemi di stabilità a grande scala;

b) il sito non presenta forme depresse dovute ad erosione di superficie, tantomeno comunicanti con sistemi profondi.

c) non sono presenti salti o rigetti morfologici riconducibili ad attività tettonica;

d) l'area non risulta direttamente attraversata da canalizzazioni fluviali o impluvi di natura torrentizia. I tratti morfologici esaminati garantiscono condizioni di stabilità dei terreni nei confronti dei processi erosionali e gravitativi, dato che i processi di corrivazione e dilavamento agiscono in maniera del tutto areale diffusa e non lineare.

3) La **fattibilità idrogeologica** è compatibile con i principali tratti idrografici di superficie e di profondità esaminati, poiché:

a) il sito esaminato ricade in un'area geografica del territorio ferrarese ed in particolare della fascia appenninica centrosettentrionale, caratterizzata da rami idrografici di ordine gerarchico minore prevalentemente inattivi, pertanto, attraversato da corsi d'acqua propriamente detti;

b) riguardo alla circolazione idrica di superficie che si origina in occasione delle precipitazioni meteoriche (ruscellamento, corrivazione), il sito di intervento insiste sulla sommità di una antica superficie di terrazzamento alluvionale che non necessita della realizzazione di ulteriori opere idrauliche di regimazione, in quanto costituente, di per sé, una naturale condizione di allontanamento delle acque meteoriche secondo gravità;

c) riguardo alla circolazione idrica sotterranea, oltre agli acquiferi più profondi, nell'area si riscontra la presenza di falde superficiali o sospese entro i terreni costituenti il manto agrario o l'orizzonte geotecnico superficiale (falda freatica). Dette falde presentano un regime occasionale o saltuario, legato al carattere stagionale delle precipitazioni meteoriche nella zona. In ogni caso, si può affermare che la gran parte della aliquota di infiltrazione efficace delle acque di precipitazione meteorica viene convogliata, attraverso percorsi preferenziali, nel substrato argilloso-sabbioso a formare limitati corpi acquiferi per differenza di permeabilità tra strati litologicamente differenti.

Il sito di intervento sottende una altitudine di circa + 6 metri s.l.m., dove non si può escludere che il livellamento del piano delle fondamenta dell'impianto a realizzarsi possa essere lambito alla base dalle acque della falda freatica, a causa delle escursioni della propria superficie piezometrica, pertanto, occorrerà tenere conto nella progettazione degli eventuali fattori dovuti alle interferenze tra le strutture fondali e le acque sotterranee che possono anche scorrere a pelo libero nei periodi di maggior approvvigionamento meteorico.

4) Infine, la **fattibilità geotecnica** è compatibile per il progetto, in considerazione del fatto che il terreno di fondazione si presenta essenzialmente costituito dalla sovrapposizione di due corpi geolitologici, ovvero da un primo corpo alluvionale argilloso-sabbioso, superficiale, a stratificazione media, poggiante su di un substrato terrigeno argilloso a stratificazione media e grande, tendenzialmente più massivo e

integro rispetto all'orizzonte sovrastante, dotati di omogeneità litologica, continuità fisica e spessori consistenti ai fini della trasmissione delle sollecitazioni indotte e dei carichi statici e dinamici attraverso le strutture fondali.

In particolare, previsto un livellamento del piano di fondazione a partire da - 1,5 metri dal piano di campo, previo superamento (per infissione) della coltre costituita da materiali di rimaneggiamento antropico costituenti il piano di livellamento del futuro campo fotovoltaico, il corpo geologico che verrà direttamente interessato dall'appoggio delle sovrastrutture è rappresentato da un corpo deposizionale terrigeno argilloso-sabbioso e argilloso, sì caratterizzato da un eterogeneo grado di stratificazione, ma nel complesso dotato di sia di buona continuità latero-orizzontale sia di medio-elevato grado di resistenza fisico-meccanica, in virtù dei dati stabiliti attraverso l'elaborazione e l'interpretazione dei parametri di caratterizzazione geofisica e geotecnica evidenziati per la II Unità Sismica.

Per quanto concerne la definizione della azione sismica di progetto, così come stabilito dalle "Norme Tecniche per le Costruzioni – Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17/01/2018", il terreno di fondazione esaminato viene ad inquadrarsi nell'ambito della Categoria "B" di profilo stratigrafico per affinità nella risposta geotecnica esistente tra i terreni esaminati e le "rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,eq}$ compresi tra 360 e 800 m/sec", una volta determinato un corrispondente parametro $V_{s,eq} = 389$ m/sec.

In definitiva, a seguito dello studio condotto, non emergono condizioni contrastanti per la fattibilità delle opere in progetto rispetto alle condizioni geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e fisico-meccaniche osservate attraverso l'areale di interesse e, in particolare, con l'assetto fisico-meccanico del suolo e del sottosuolo esplorato nell'ambito del sito di intervento.

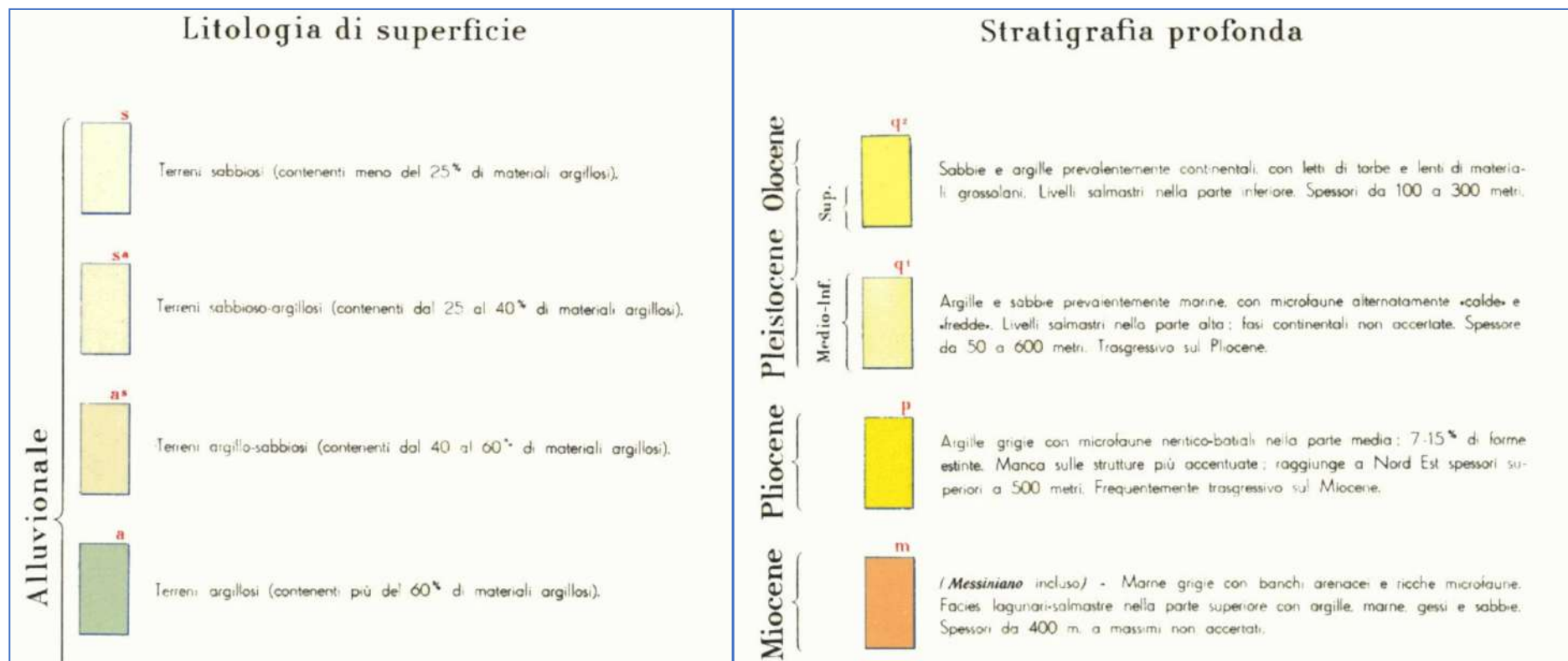
Corato, 10/07/2025

(Dott. Geol. Dino C. BALDUCCI)



TABELLA DATI DI CORRELAZIONE TRA PARAMETRI ELASTICI E GEOTECNICI

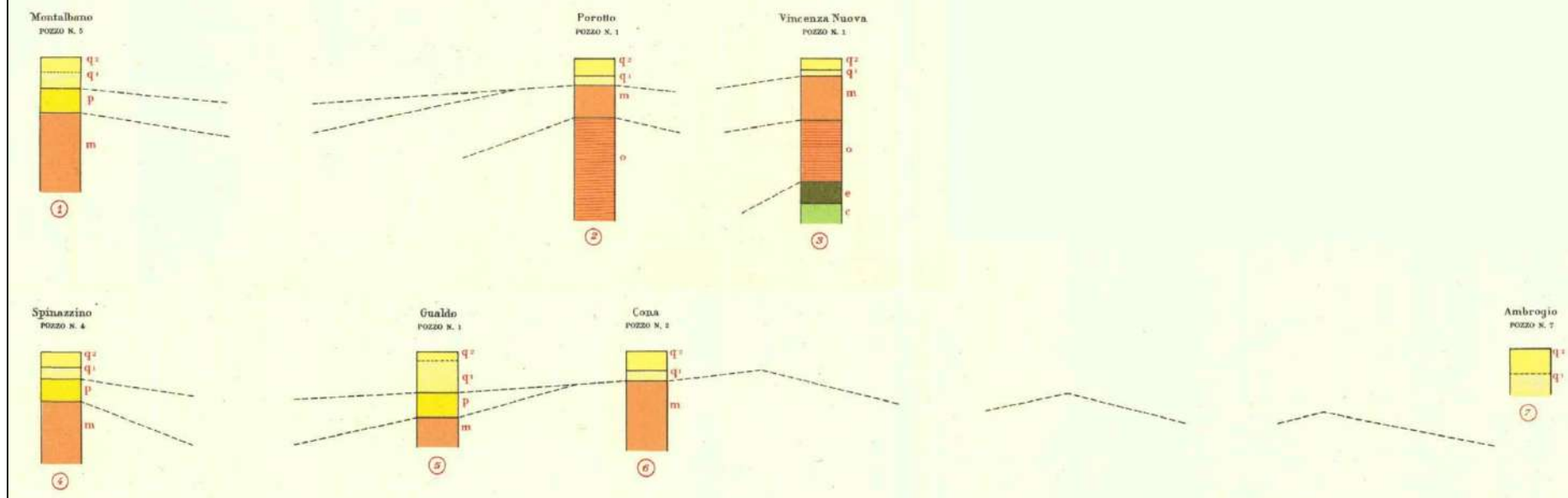
UNITÀ SISMICA N°	1	2	3
<i>SPESSORE MEDIO (M)</i>	0,6 / 0,9	3,2 / 3,5 2	>27
<i>VP (M/SEC)</i>	250	404	1665
<i>VS (M/SEC)</i>	144	202	498
<i>VL (M/SEC)</i>	1000	1000	3000
<i>MODULO DI YOUNG DINAMICO (kg/cm²)</i>	794,35	1998,64	14684,00
<i>Gamma t (g/cm³)</i>	1,5	1,80	2,0
<i>MOD. POISSON</i>	0,25	0,33	0,45
<i>MOD. BULK (kg/cm²)</i>	533,311	1998,64	49762,00
<i>MOD. RIGIDITÀ (kg/cm²)</i>	317,131	748,47	5057,79
<i>COSTANTE DI LAMÉ (kg/cm²)</i>	321,21	1498,98	46397,08
<i>INDICE DISOMOGENEITÀ</i>	0,57	0,50	0,29
<i>INDICE QUALITÀ</i>	0,25	0,40	0,55
<i>ANGOLO DI ATTRITO INTERNO</i>	<15°	35°	45°
<i>LITOLOGIA</i>	TERRENO VEGETALE	ALLUVIONI SABBIOSO- ARGILLOSE	ARGILLE SABBIOSE GRIGIE
<i>RQD (INDICE DI QUALITÀ IN SITO)</i>			



LEGENDA DELLE FORMAZIONI AFFIORANTI ATTRAVERSO L'AREA DI INDAGINE

Profili schematici in base ai pozzi più significativi perforati nella zona

(Per le altezze 1 cm = 400 m)



SEZIONI GEOLOGICHE DI INTERESSE



UBICAZIONE INTERVENTO SU STRALCIO AEROFOTOGRAMMETRICO SATELLITARE



VISTA PROSPETTICA SATELLITARE E OROGRAFIA DELL'AREA DI INDAGINE

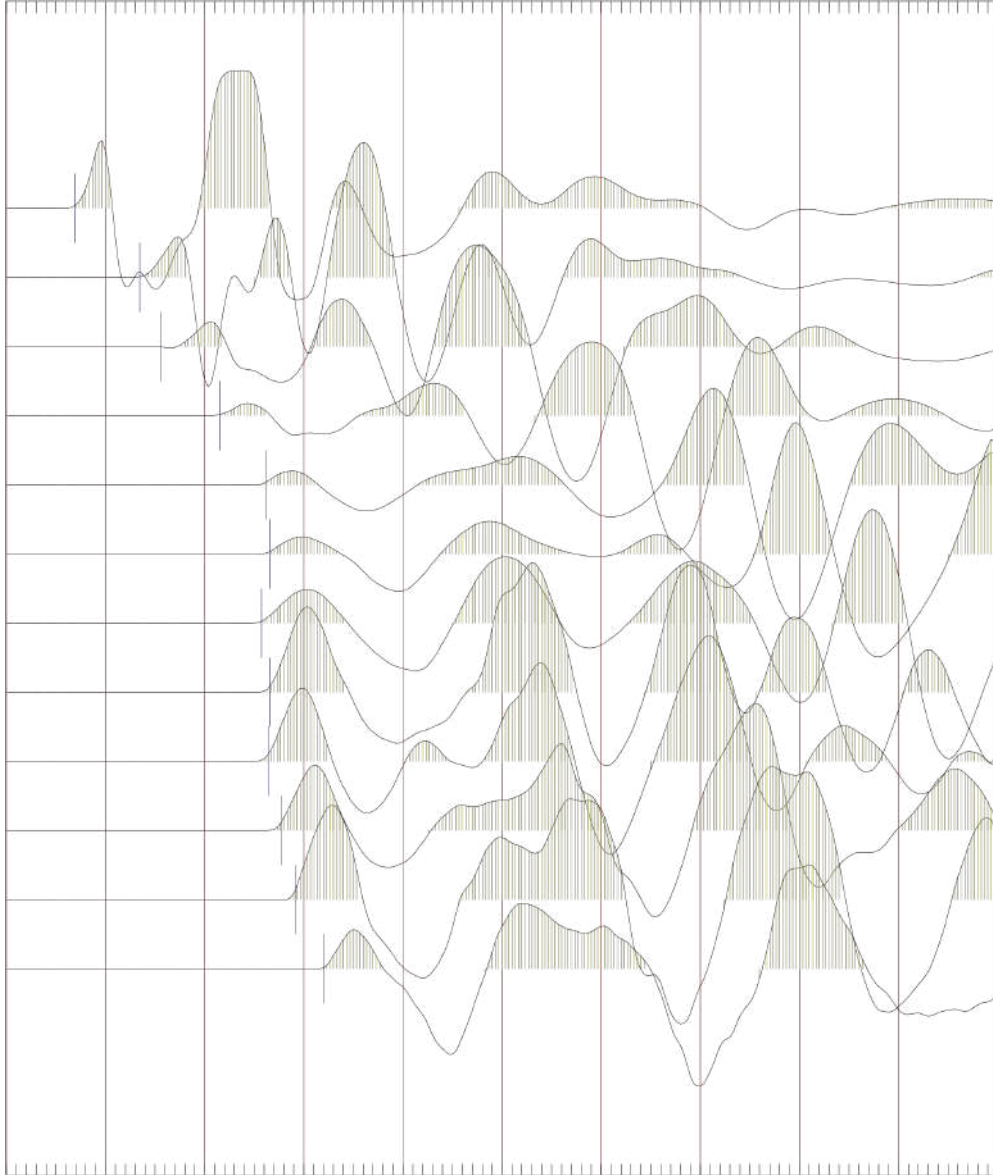


LOCALIZZAZIONE SU STRALCIO ORTOFOTO SATELLITARE DELLE TRACCE DEI PROFILI SISMICI ESEGUITI

Studio Geologico

Dino Balducci

Via Della Divina Misericordia, 10 Corato Bari 70033



Sondaggio: PS1 - battuta andata

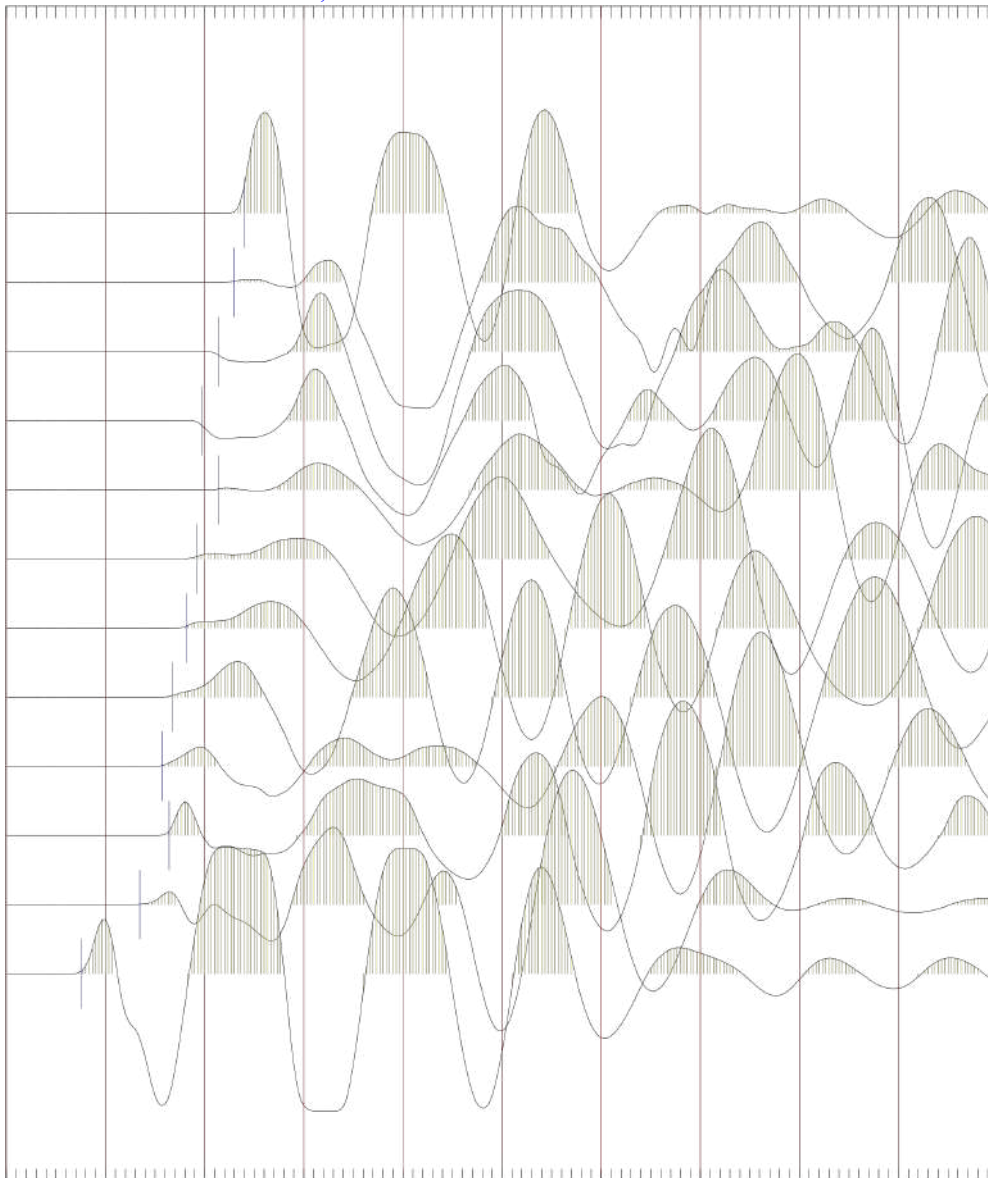
Comune : FERRARA - località : POGGETTO

Strumentazione utilizzata : Sismografo Dolang 12 canali - Genova - Tel: 010/3622901- Badalucco (IM) 0184/408759

Studio Geologico

Dino Balducci

Via Della Divina Misericordia, 10 Corato Bari 70033



Sondaggio: PS1 - battuta ritorno

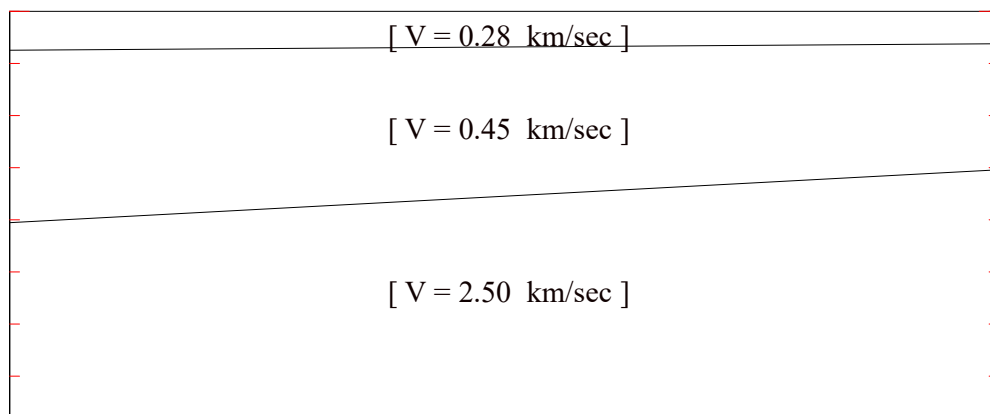
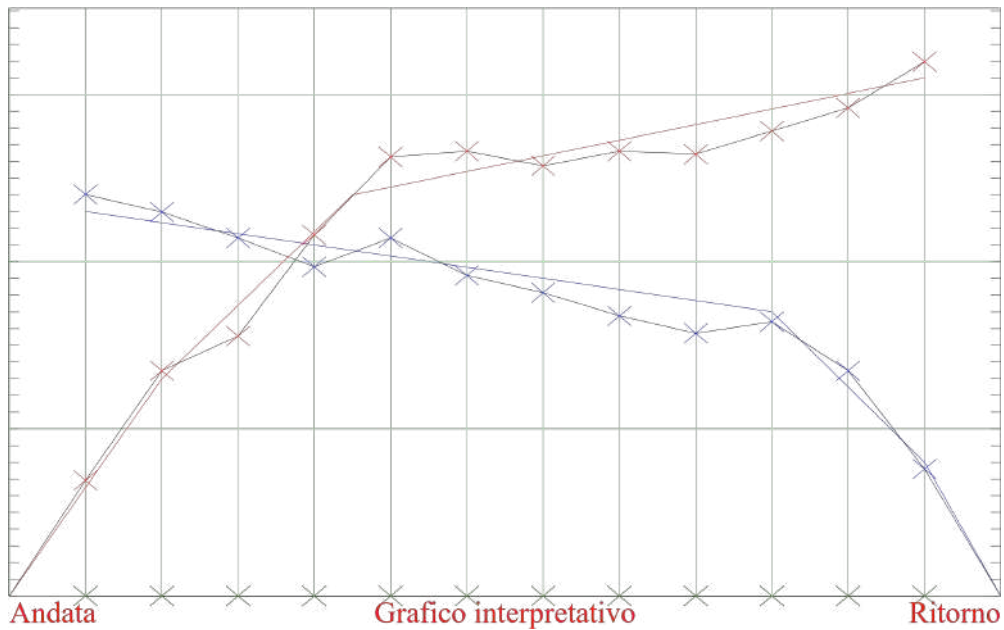
Comune : FERRARA - località : POGGETTO

Strumentazione utilizzata : Sismografo Dolang 12 canali - Genova - Tel: 010/3622901- Badalucco (IM) 0184/408759

Studio Geologico

Dino Balducci

Via Della Divina Misericordia, 10 Corato Bari 70033



Sezione

Sondaggio: PS1

Comune : FERRARA - località : POGGETTO

Strumentazione utilizzata : Sismografo Dolang 12 canali - Genova - Tel: 010/3622901- Badalucco (IM) 0184/408759

Studio Geologico

Dino Balducci

Via Della Divina Misericordia, 10 Corato Bari 70033

Sondaggio: PS1

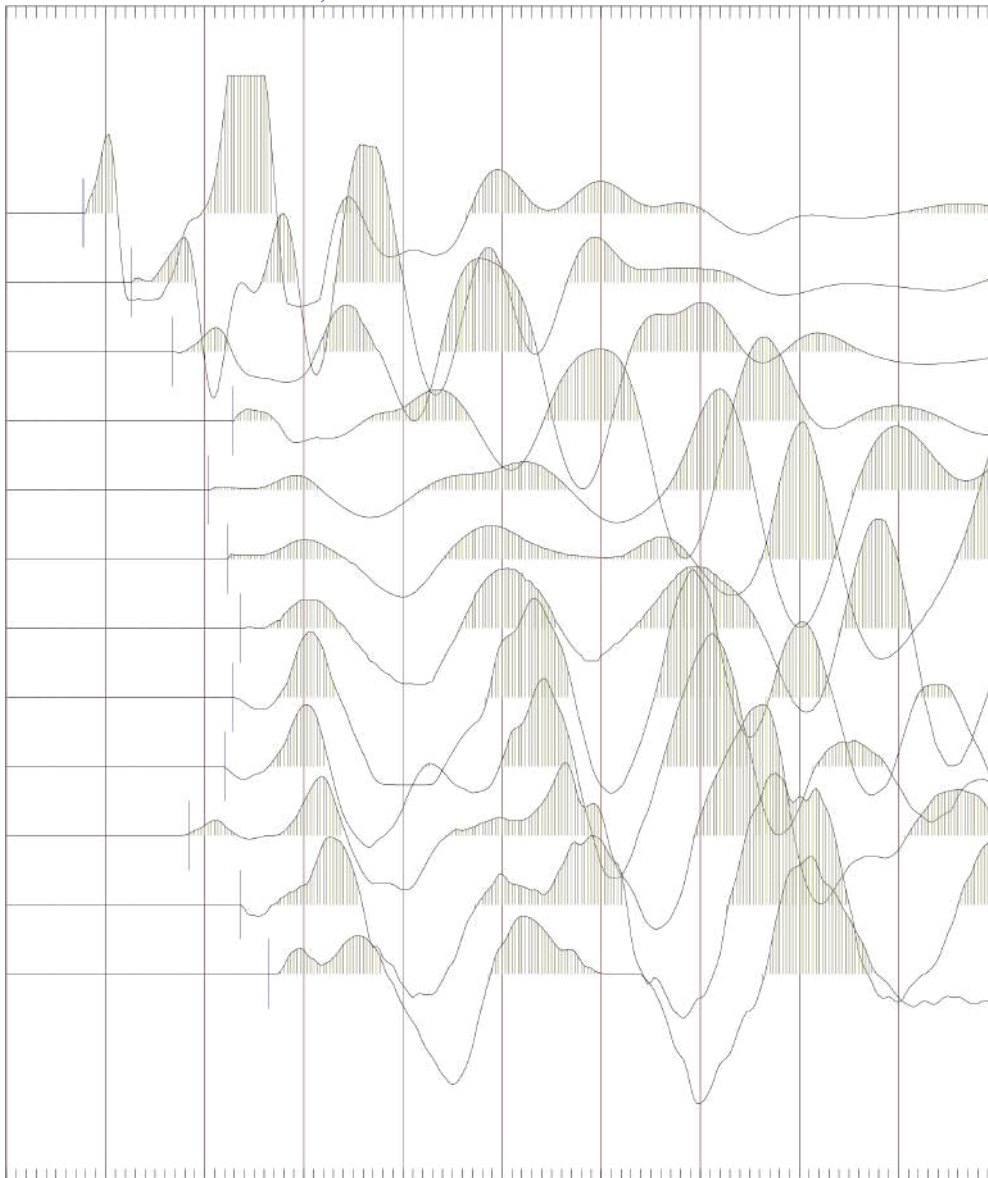
Comune : FERRARA - località : POGGETTO

RITARDI	Est.sx	Andata	Centrale	Ritorno	Est.dx	
1	--.--	6.91	--.--	24.01	--.--	
2	--.--	13.47	--.--	22.97	--.--	
3	--.--	15.54	--.--	21.42	--.--	
4	--.--	21.59	--.--	19.69	--.--	
5	--.--	26.25	--.--	21.42	--.--	
6	--.--	26.60	--.--	19.17	--.--	
7	--.--	25.74	--.--	18.13	--.--	
8	--.--	26.60	--.--	16.75	--.--	
9	--.--	26.43	--.--	15.72	--.--	
10	--.--	27.81	--.--	16.41	--.--	
11	--.--	29.19	--.--	13.47	--.--	
12	--.--	31.95	--.--	7.60	--.--	
DATI	Ritardi A	Ritardi R	Interc. A	Interc. R	V.appar.A	V.appar.R
1	--.--	--.--	84.50	104.00	0.30	0.25
2	4.19	3.50	61.40	62.00	0.45	0.44
3	19.79	15.00	31.93	23.66	2.14	3.00
4	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--
5	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--
RISULTATI		Spess.A	Spess.R	Profond.A	Profond.R	Velocità
1		0.74	0.62	0.74	0.62	0.27
2		3.30	2.41	4.05	3.03	0.44
3		--.--	--.--	--.--	--.--	2.49
4		--.--	--.--	--.--	--.--	--.--
5		--.--	--.--	--.--	--.--	--.--

Studio Geologico

Dino Balducci

Via Della Divina Misericordia, 10 Corato Bari 70033



Sondaggio: PS2 - battuta andata

Comune : FERRARA - località : POGGETTO

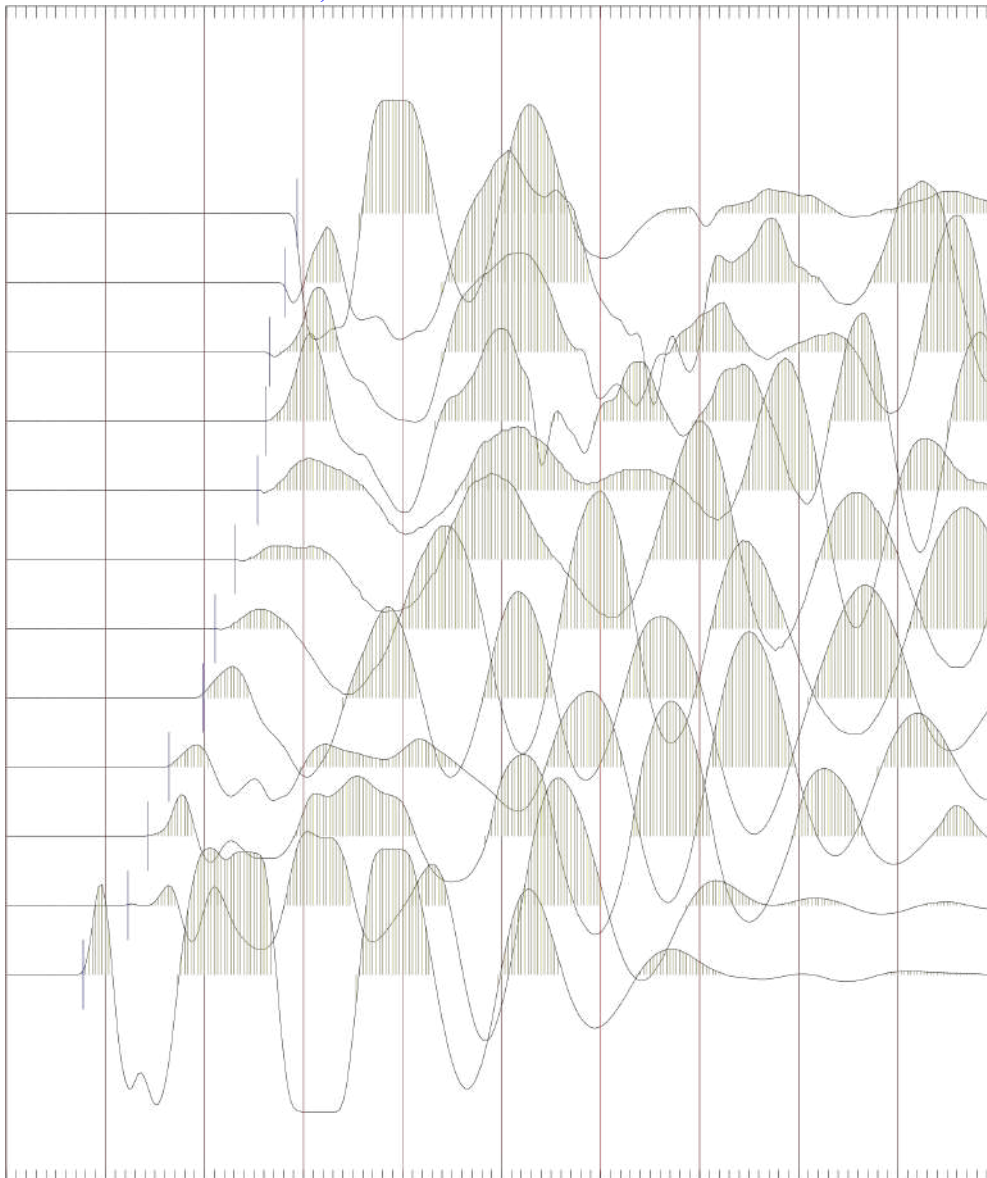
Sismografo Dolang

Strumentazione utilizzata : Sismografo Dolang 12 canali - Genova - Tel: 010/3622901- Badalucco (IM) 0184/408759

Studio Geologico

Dino Balducci

Via Della Divina Misericordia, 10 Corato Bari 70033



Sondaggio: PS2 - battuta ritorno

Comune : FERRARA - località : POGGETTO

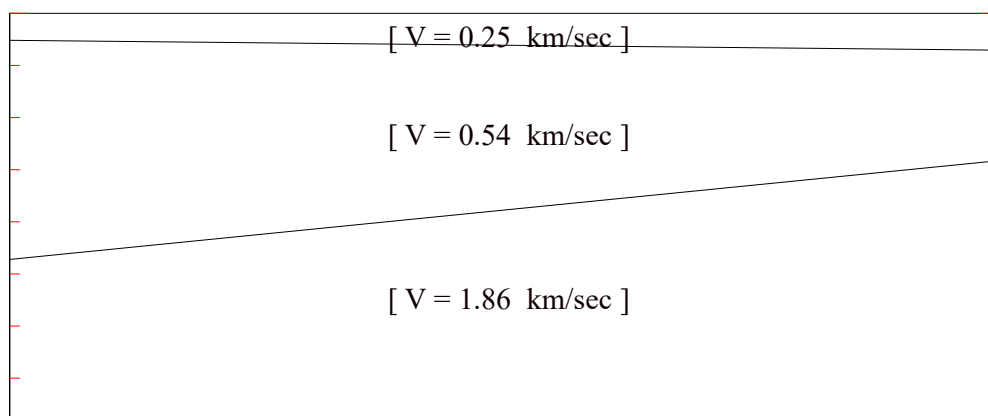
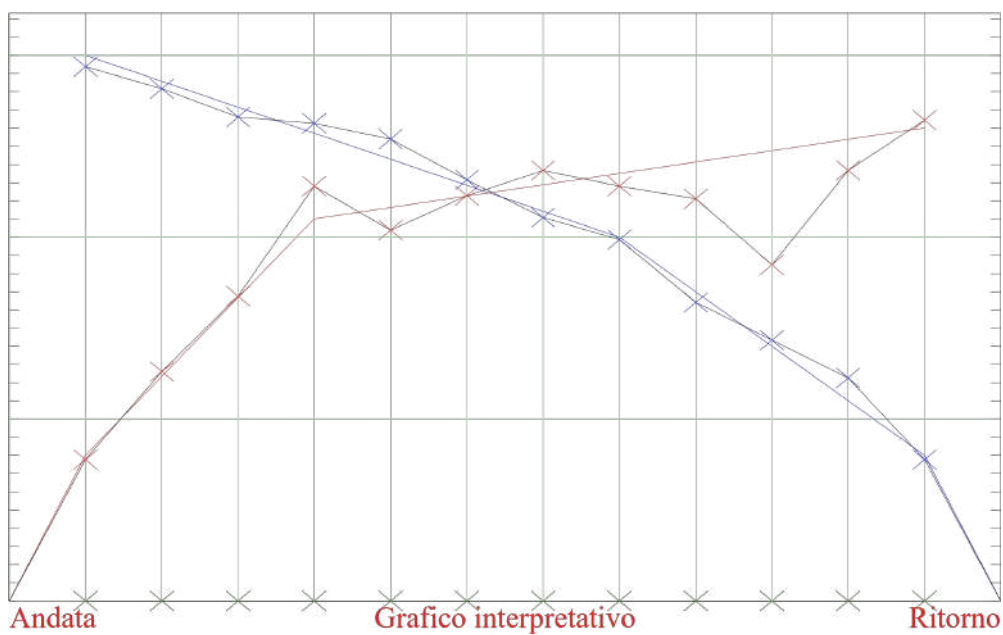
Sismografo Dolang

Strumentazione utilizzata : Sismografo Dolang 12 canali - Genova - Tel: 010/3622901- Badalucco (IM) 0184/408759

Studio Geologico

Dino Balducci

Via Della Divina Misericordia, 10 Corato Bari 70033



Sezione

Sondaggio: PS2

Comune : FERRARA - località : POGGETTO Sismografo Dolang

Strumentazione utilizzata : Sismografo Dolang 12 canali - Genova - Tel: 010/3622901- Badalucco (IM) 0184/408759

Studio Geologico

Dino Balducci

Via Della Divina Misericordia, 10 Corato Bari 70033

Sondaggio: PS2

Comune : FERRARA - località : POGGETTO

RITARDI	Est.sx	Andata	Centrale	Ritorno	Est.dx
1	--.--	7.77	--.--	29.36	--.--
2	--.--	12.61	--.--	28.15	--.--
3	--.--	16.75	--.--	26.60	--.--
4	--.--	22.80	--.--	26.25	--.--
5	--.--	20.38	--.--	25.39	--.--
6	--.--	22.28	--.--	23.14	--.--
7	--.--	23.66	--.--	21.07	--.--
8	--.--	22.80	--.--	19.86	--.--
9	--.--	22.11	--.--	16.41	--.--
10	--.--	18.48	--.--	14.33	--.--
11	--.--	23.66	--.--	12.26	--.--
12	--.--	26.43	--.--	7.77	--.--

DATI	Ritardi A	Ritardi R	Interc. A	Interc. R	V.appar.A	V.appar.R
1	--.--	--.--	104.00	104.00	0.25	0.25
2	3.66	5.00	60.00	44.00	0.46	0.66
3	18.50	12.85	26.62	31.42	3.20	1.40
4	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--
5	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--

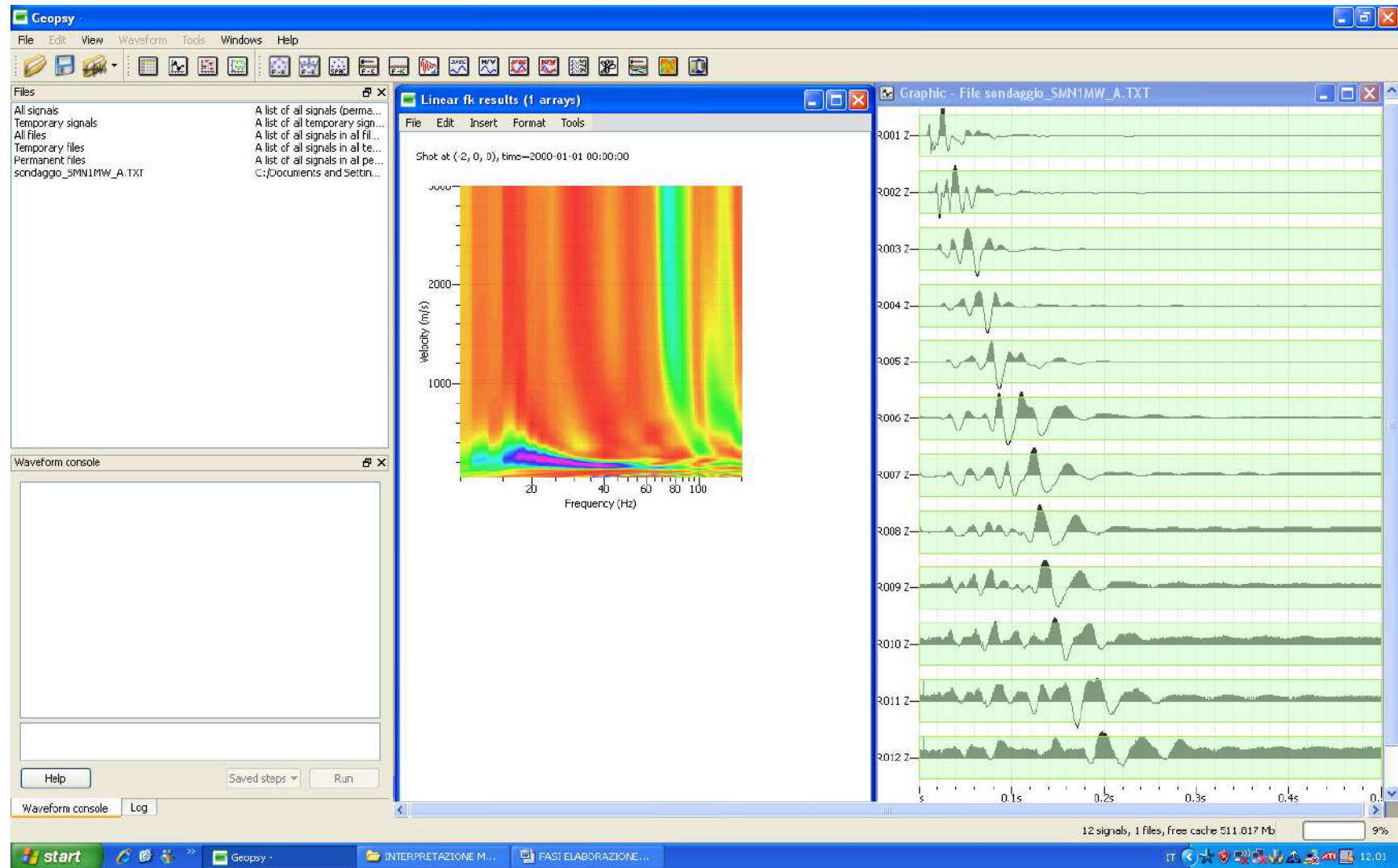
RISULTATI	Spess.A	Spess.R	Profond.A	Profond.R	Velocità
1	0.51	0.70	0.51	0.70	0.25
2	4.20	2.11	4.72	2.82	0.54
3	--.--	--.--	--.--	--.--	1.85
4	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--
5	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--



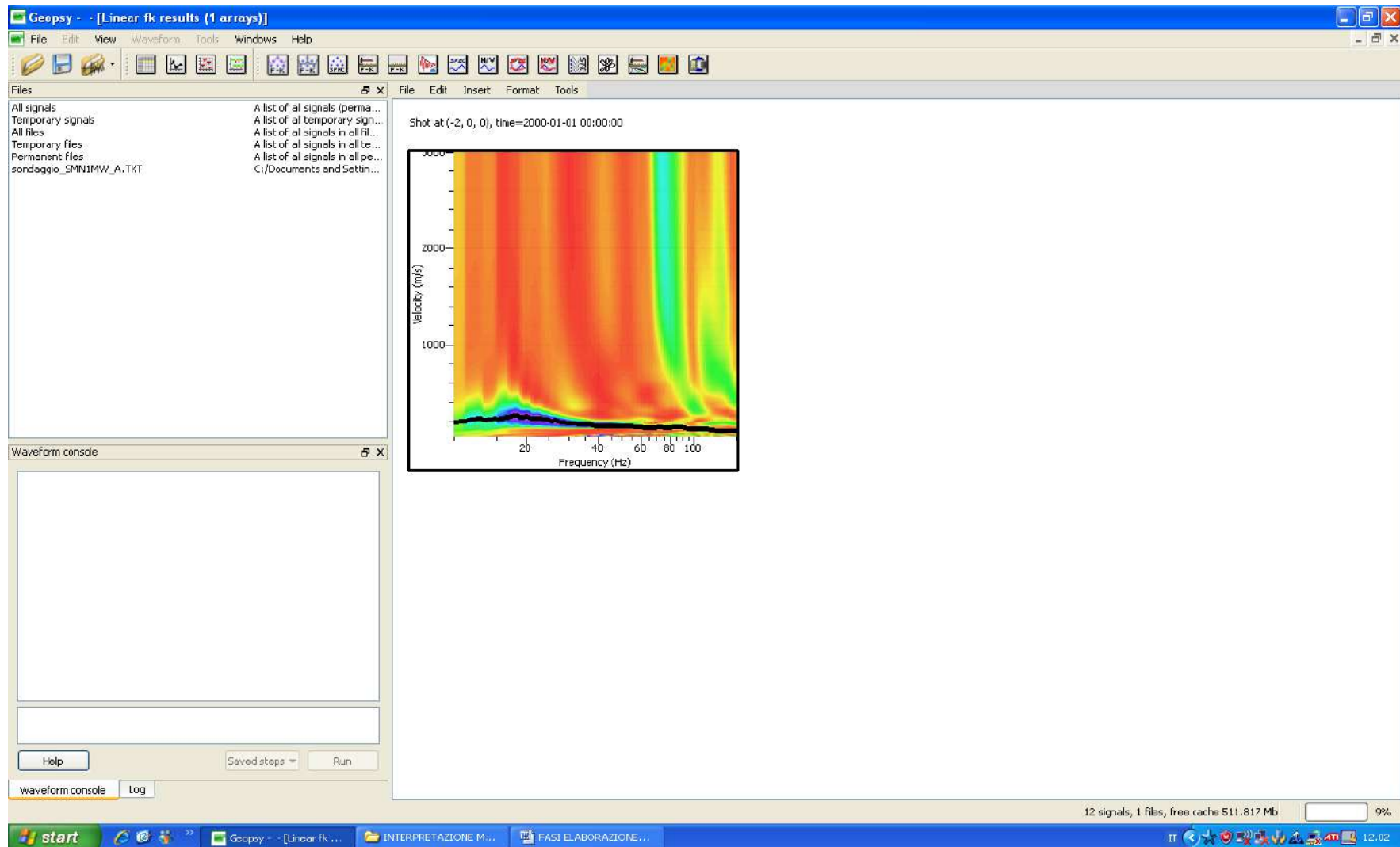
FASI DI ESECUZIONE DEL SONDAGGI SISMICI E STRUMENTAZIONE ADOPERATA

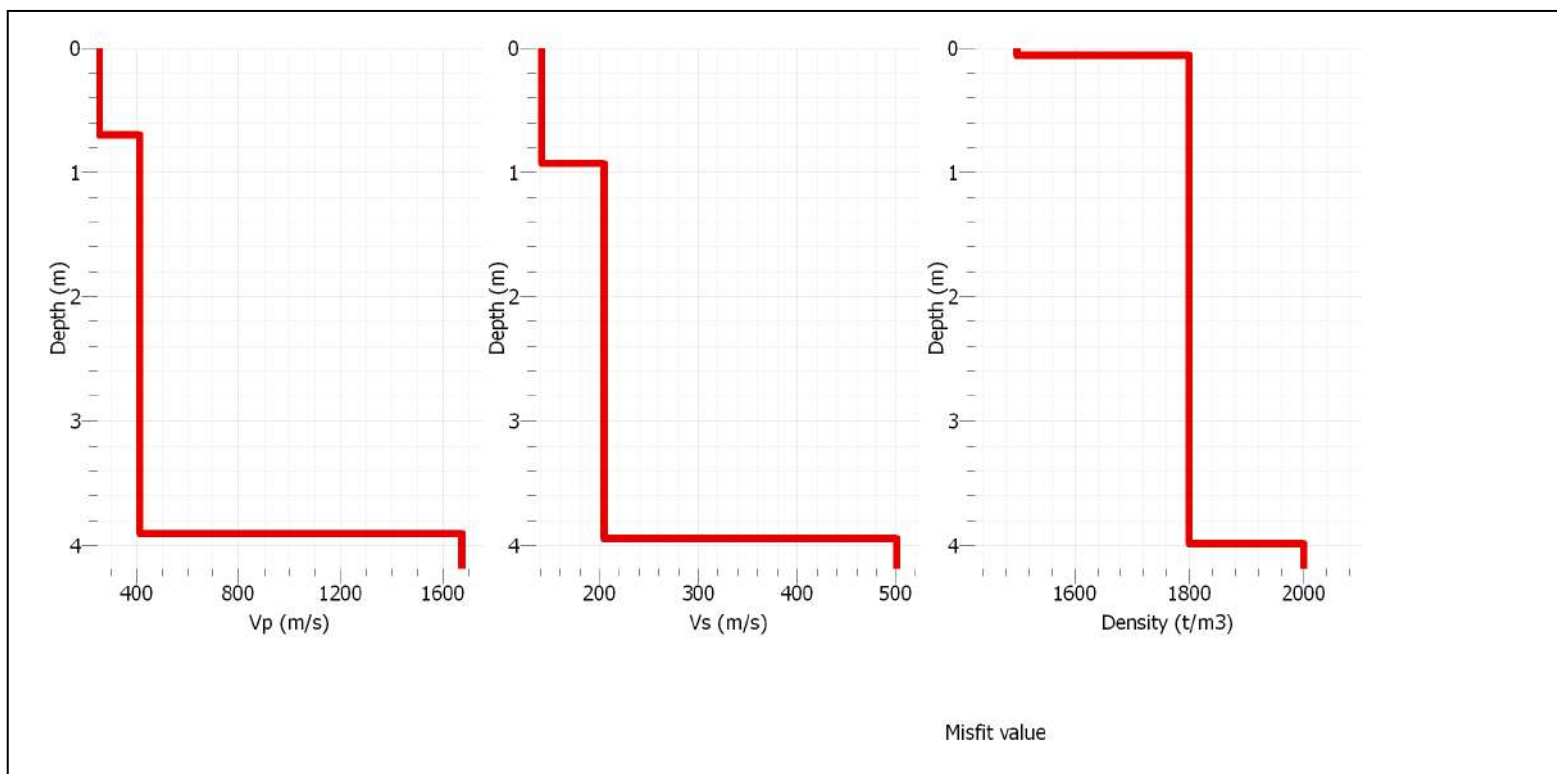


FASI DI ESECUZIONE DEI SONDAGGI SISMICI E STRUMENTAZIONE ADOPERATA



FASI ELABORAZIONE MASW





PROFILI OTTENUTI