

S.S 685 "DELLE TRE VALLI UMBRE"
TRATTO SPOLETO - ACQUASPARTA
1° stralcio: Madonna di Baiano-Firenzuola

PROGETTO ESECUTIVO

COD. **PG143**

PROGETTAZIONE: ATI SINTAGMA - GDG - ICARIA

IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Nando Granieri
 Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A351

IL PROGETTISTA:

Dott. Ing. Federico Durastanti
 Ordine degli Ingegneri della Prov. di Terni n° Terni n°A844

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giorgio Cerquiglini
 Ordine dei Geologi della Regione Umbria n°108

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Filippo Pambianco
 Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A1373

Il Responsabile di Progetto

Arch. Pianificatore Marco Colazza

Il Responsabile del Procedimento

Dott. Ing.
 Alessandro Micheli

PROTOCOLLO

DATA

IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

MANDANTI:



Dott.Ing. N.Granieri
 Dott.Arch. N.Kamenicky
 Dott.Ing. V.Truffini
 Dott.Arch. A.Bracchini
 Dott.Ing. F.Durastanti
 Dott.Ing. E.Bartolucci
 Dott.Geol. G.Cerquiglini
 Geom. S.Scopetta
 Dott.Ing. L.Sbrenna
 Dott.Ing. E.Sellari
 Dott.Ing. L.Dinelli
 Dott.Ing. L.Nani
 Dott.Ing. F.Pambianco
 Dott. Agr. F.Berti Nulli

Dott. Ing. D.Carlaccini
 Dott. Ing. S.Sacconi
 Dott. Ing. C.Consorti
 Dott. Ing. E.Loffredo
 Dott. Ing. C.Chierichini

Dott. Ing. V.Rotisciani
 Dott. Ing. F.Macchioni
 Geom. C.Vischini
 Dott. Ing. V.Piunno
 Dott. Ing. G.Pulli
 Geom. C.Sugaroni



03.STUDIO GEOLOGICO GEOTECNICO
03.01 GEOLOGIA

Relazione geologica

CODICE PROGETTO			NOME FILE	REVISIONE	SCALA:
PROGETTO	LIV. PROG.	ANNO	T00GE01GEORE01B		
DTPG143	E	23	CODICE ELAB. T00GE01GEORE01	B	-
B	Rev. A seguito istr. ANAS		Set 2023	G.Cerquiglini	G.Cerquiglini N.Granieri
A	Emissione		Ago 2023	G.Cerquiglini	G.Cerquiglini N.Granieri
REV.	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO APPROVATO

RELAZIONE GEOLOGICA

Sommarario

1	Premessa	3
2	Normativa di riferimento	6
3	Inquadramento geografico	7
3.1	Rilievi collinari di Spoleto;	7
3.2	Valle Umbra Spoleto-Foligno	7
4	Geologia	7
5	Geomorfologia	12
6	Pericolosità e rischio geomorfologico e idrogeologico (PAI).....	13
6.1	Definizione di pericolosità e di rischio	14
6.2	Valutazione della pericolosità e del rischio da frana	15
6.3	Valutazione della pericolosità e del rischio idraulico	17
7	Idrogeologia.....	20
8	Caratteri sismici.....	23
8.1	Normativa di riferimento.....	26
8.2	Inquadramento sismotettonico.....	27
8.3	Sismicità storica.....	31
8.4	Pericolosità sismica di base.....	39
8.5	Velocità sismica equivalente $V_{s,eq}$ - Categoria di sottosuolo (NTC 2018).....	47
8.6	Categorie sismica di sottosuolo	56
9	Considerazioni Geologico-Tecniche	59
9.1	Gallerie artificiali	60
9.2	Viadotti.....	67
10	Indagini geognostiche.....	80
10.1	Campagna Geognostica (2009).....	80
10.1.1	Sondaggi geomeccanici e prove in situ	80
10.1.2	Esecuzione di prove di permeabilità Lugeon	83
10.1.3	Prelievo di campioni di terreno.....	84
10.2	Campagna Geognostica (2021).....	89
10.3	Sondaggi geognostici, ambientali e pozzetti esplorativi.....	89
10.3.1	Prove in foro di sondaggio	99
10.3.2	Prove in foro di sondaggio (SPT).....	100
10.3.3	Installazione dei tubi piezometrici	102

RELAZIONE GEOLOGICA

11 Pozzetti Esplorativi.....	104
12 Prove Penetrometriche Dinamiche Continue (DPSH)	109
13 Indagini geofisiche	113
13.1 Prospezione sismica Multichannel Analysys of Surface Waves (MASW).....	114
13.2 Stendimento sismico a rifrazione	121
13.3 Prospezione Down-Hole	127
14 Indagini di Sismica Passiva (rapporto H/V)	135

1 PREMESSA

La presente relazione illustra il Progetto Esecutivo dell'intervento di completamento della strada delle "Tre Valli Umbre" tratto Acquasparta (E45) - Spoleto (SS3bis), sviluppato per un'estesa di circa 4km, ed ha la finalità di riportare le azioni di ottemperanza alle prescrizioni e osservazioni contenute nei pareri emessi dagli organismi di controllo nel corso dell'iter approvativo del progetto.

In particolare il presente documento risponde al quadro prescrittivo emanato sul Progetto Definitivo del 2021 a seguito dell'avvio della Conferenza dei Servizi.

Lo stesso andrà a completare l'opera di ampliamento della viabilità S.S. 685 esistente, già realizzato nel tratto confinante a Est lato Eggi.



Figura 1: Inquadramento dell'opera

L'itinerario della strada delle "Tre Valli Umbre" tratto Acquasparta (E45) - Spoleto (SS3bis), regionalizzata nel 2001 e poi ritrasferita ad ANAS nel 2006, è stato a suo tempo inserito nell'elenco degli itinerari di "Legge Obiettivo".

Nel 2003, periodo di competenza gestionale della Regione, è stato sviluppato il Progetto Preliminare dell'intero tratto Acquasparta – Spoleto di sviluppo circa 21 km (di cui circa 9 km

RELAZIONE GEOLOGICA

su opera d'arte) a 4 corsie, con categoria stradale tipo B ex DM 05.11.2001; questo venne approvato dal CIPE con delibera 146 del 02.12.2005. Tale approvazione contemplava il giudizio di compatibilità ambientale e il vincolo preordinato all'esproprio, approvando il progetto con prescrizioni e demandando alla successiva fase di PD la individuazione della copertura finanziaria.

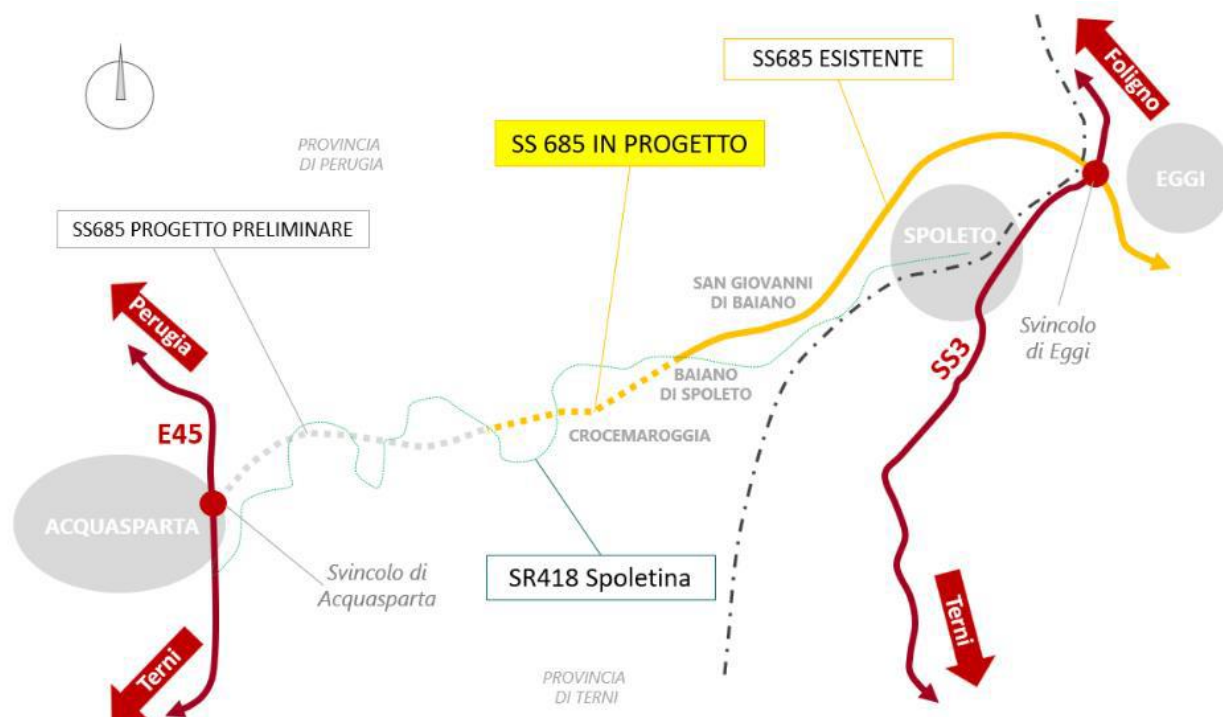


Figura 2: Il tracciato della strada delle tre Valli umbre (Progetto Preliminare)

Con successiva delibera del 6 marzo 2009 (di assegnazione fondi FAS 2007-2013), il CIPE inseriva nell'elenco delle opere da finanziare la realizzazione di un primo stralcio dell'itinerario, per un importo di 100,0 M€. In accordo con la Regione, come 1° stralcio è stata individuata la realizzazione a due corsie (Tipo C2 ex D.M. 05.11.2001) del tratto Firenzuola – Baiano, in prosecuzione del tratto di circa 10 km già realizzato, sempre a due corsie, da Spoleto (Eggi) a S. Giovanni Baiano.

Predisposto dai medesimi progettisti regionali il progetto dello stralcio, nel 2012 Anas ha su di esso avviato le procedure di Legge Obiettivo (ex artt. 166 e 167 del D.lgs. 163/2006) di approvazione del Progetto Definitivo, con la pubblicazione dello stesso e l'invio ai Ministeri ed agli Enti (ottenendo alcuni pareri endoprocedimentali tra cui la Verifica di Ottemperanza). Tali

RELAZIONE GEOLOGICA

procedure non hanno mai trovato compimento, stante l'intervenuta mancanza dei previsti finanziamenti.

L'intervento di 1° stralcio è stato inserito nel Contratto di Programma 2016-2020, con solo finanziamento per la progettazione.

Pertanto, il presente progetto definitivo è un aggiornamento del precedente alla normativa vigente (tra le quali si citano le NTC2018). Il tracciato sviluppa lo stralcio funzionale di 4+436 km a partire dalla progr. km 6+820 (con immissione diretta sulla S.R. 418 in corrispondenza dello svincolo Firenzuola), sino alla progr km 11+256 appena dopo lo svincolo di Baiano di Spoleto.

Lo stralcio è stato concepito come la naturale prosecuzione della tratta esistente a due corsie di marcia fra Baiano di Spoleto e Eggi in connessione alla SS3 Flaminia.

Pertanto, la realizzazione di questo ulteriore stralcio permetterà la chiusura di un unico tracciato ad una carreggiata che va da Firenzuola ad Eggi, completando il tracciato per circa 17 km dei 21 km previsti nel progetto preliminare.

Il lavoro svolto è consistito nelle seguenti attività:

- acquisizione dei dati sismici storici;
- esame della bibliografia esistente riguardante le aree in oggetto;
- analisi dei risultati degli studi compiuti nelle precedenti fasi di progettazione;
- rilevamento geologico, geomorfologico ed idrogeologico, in scala 1:2.000 di una fascia di ampiezza adeguata ai lati del tracciato stradale;
- analisi dei risultati delle indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche eseguite nel tratto in oggetto finalizzata alla classificazione dei terreni di fondazione.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

L'interpretazione dei risultati e la redazione della presente relazione sono stati effettuati nel rispetto della Normativa in vigore e di alcune Raccomandazioni.

I principali riferimenti normativi sono i seguenti:

- [1] **D. M. LL. PP. 11 marzo 1988:** *"Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione"*.
- [2] **Circ. LL. PP. 24 settembre 1988 n. 30483:** *"Istruzioni riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione"*.
- [3] **Associazione Geotecnica Italiana; 1977:** *"Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche"*.
- [4] **Ordinanza 3274** del Presidente del Consiglio; 20/03/2003.
- [5] **Ordinanza 3316:** "Modifiche ed integrazioni all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003", 10/10/2003.
- [6] **Ordinanza P.C.M. n. 3333** del 23.01.2004.
- [7] **Eurocodice 7.**
- [8] **Dm. 17 gennaio 2018** "Nuove norme sismiche per il calcolo strutturale".

3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il progetto del tracciato stradale dell'intero itinerario "Strada Tre Valli Umbre – tratto Eggi-Spoleto – Acquasparta" si colloca in un territorio dell'Umbria centrale compreso tra la valle del Tevere all'altezza della città di Acquasparta e la valle Umbra nella periferia nord della città di Spoleto attraversando ortogonalmente la struttura dei Monti Martani.

La relazione geologica presente si riferisce al progetto esecutivo relativo allo **Stralcio I° Baiano – Firenzuola**.

Lungo lo sviluppo del tracciato stradale di progetto si possono distinguere due domini geografici principali.

3.1 Rilievi collinari di Spoleto;

La fascia collinare attraversata dal tracciato stradale inizia a partire dalla località Firenzuola posta sul versante orientale dei Martani e a ovest rispetto alla città di Spoleto. Risulta costituita da rilievi collinare a morfologia arrotondata e quote topografiche piuttosto modeste che si mantengono in un intervallo compreso tra 290 – 500 m s.l.m.. La morfologia "dolce" del territorio collinare è legata principalmente alla natura dei terreni del substrato e alla situazione geologico strutturale.

3.2 Valle Umbra Spoleto-Foligno.

La Valle Umbra interessa il tratto che va dalla località Crocemaroggia fino alla località Baiano di Spoleto a partire dalle pendici dei monti Martani, all'interno della quale scorre il torrente Marroggia.

La pianura alluvionale si sviluppa da ovest a nord-est in riferimento alla città di Spoleto con una morfologia di tipo sub-pianeggiante e quote topografiche che si mantengono in un intervallo compreso tra 280 – 320 m s.l.m.; risulta solcata da due corsi d'acqua che rappresentano i collettori principali di deflusso superficiale (torrente Marroggia e torrente Tessino).

4 GEOLOGIA

Lo studio è stato effettuato all'interno di un corridoio significativo riferito al tracciato stradale di progetto. Un rilevamento geologico e geomorfologico di dettaglio ha permesso di ricostruire i rapporti strutturali esistenti tra le differenti formazioni geologiche finalizzato alla elaborazione di una cartografia geologica a scala 1: 10000.

La cartografia geologica di riferimento utilizzata per lo studio relativo al tracciato stradale della "**Strada Tre Valli Umbre – tratto Eggi-Spoleto – Acquasparta**" è la **Carta Geologica** in scala 1: 10000 realizzata della **Regione Umbria** dalla Direzione Regionale Governo del territorio, ambiente e protezione civile, Servizio Geologico e Sismico, Difesa del suolo e

RELAZIONE GEOLOGICA

completata nel 2012 utilizzando gli originali d'autore delle carte geologiche realizzate alla scala 1:10.000.

Le esigenze di coordinamento tra le carte geologiche anche di progetti diversi hanno talvolta richiesto modificazioni rispetto agli originali d'autore delle carte geologiche al fine di ottenere un'omogeneizzazione degli elementi geologici.

Le informazioni reperite sono state integrate da una serie di indagini dirette e indirette che hanno permesso di chiarire i rapporti strutturali e litologici delle diverse formazioni litoidi.

Nell'area affiorano termini litoidi appartenenti alla serie Umbro Marchigiana ricoperti frequentemente da depositi terrigeni di tipo continentale riconducibili a facies fluviali e fluvio-lacustri (alluvioni recenti e antiche, apparati conoidali, depositi eluvio-colluviali, depositi detritici di versante).

Lo studio geologico si è rivolto particolarmente alla conoscenza della natura dei terreni attraversati, alla situazione geostrutturale delle singole formazioni rocciose, ai fattori tettonici, alla consistenza geomeccanica dei terreni a livello qualitativo e alle condizioni geomorfologiche in riferimento alla stabilità dei versanti e al rischio di esondabilità delle aree vallive e/o alla presenza di acquiferi all'interno degli ammassi rocciosi permeabili per fratturazione.

La dorsale dei Monti Martani è parte integrante dell'Appennino Umbro – Marchigiano. L'intera anticlinale è costituita per la maggior parte dalla successione delle formazioni affioranti su tutta l'area appenninica della serie Umbro-Marchigiano, dal Trias al Miocene; un importante aspetto della sedimentazione giurassica è la presenza di serie complete sviluppate accanto a serie lacunose come nella zona di Castel del Monte e M. Rotondo, dove alti strutturali costituiti da rocce appartenenti alla formazione del Calcare Massiccio e delle serie ridotte sovrastanti. Le serie ridotte e lacunose sono separate dalle successioni complete tramite faglie dirette giurassiche.

La situazione geostrutturale evidenzia la formazione di pieghe asimmetriche parzialmente sovrapposte e vergenti verso Est, accompagnate da fenomeni di distensione e fagliazione che interessano i rilievi collinari posti sul versante orientale della struttura montuosa.

Il tratto del tracciato stradale in fase di progetto esecutivo si sviluppa a partire dalle pendici della struttura montuosa, all'interno di una ampia sinclinale ad andamento sigmoidale ricompresa tra le due brachianticlinali dei Monti Martani e dei Monti di Spoleto, costituite da litotipi carbonatici appartenenti alla Serie Umbro Marchigiana.

Il tracciato stradale prosegue poi fino a termine lotto all'interno della pianura alluvionale del torrente Marroggia che è responsabile del modellamento e riempimento della depressione tettonica formatasi precedentemente.

L'andamento morfologico rispecchia fedelmente quello strutturale che risulta caratterizzato dalla presenza di strutture anticlinaliche alle quali fanno seguito le aree golenali minori ad andamento conforme, con direzione conseguente ai pendii e interrotte trasversalmente da valli fluviali con direzione S-N solcate rispettivamente dal torrente Naia, dal torrente Marroggia e dal torrente Tessino.

La dorsale dei Monti Martani delimita la parte occidentale della Valle Umbra Sud coinvolgendo nella deformazione i terreni della successione sedimentaria meso-cenozoica Umbro-Marchigiana a partire dai calcari e marne triassiche, che affiorano al nucleo della

RELAZIONE GEOLOGICA

struttura nella zona di Massa Martana, fino a giungere ai termini oligo-miocenici delle formazioni terrigene del Bisciario e dello Schlier.

Sono evidenti strutture dislocative riconducibili a sovrascorrimenti immergenti verso OSO nella parte settentrionale e centrale della struttura e verso SSO nella parte meridionale che dislocano il fianco orientale dell'anticlinale e ne determinano l'accavallamento verso Est sull'antistante sinclinorio di Icciano.

L'anticlinale dei Monti Martani è interessata sul fianco occidentale da un sistema di faglie dirette (la principale risulta la cosiddetta faglia bordiera dei Monti Martani) che costituisce il graben della Valle del Tevere ed è riconducibile alla fase distensiva plio-pleistocenica.

L'area appare fortemente tettonizzata e interessata da numerose dislocazioni, fratturazioni e da sovrascorrimenti immergenti verso O-SO affioranti nella zona di Firenzuola che conferiscono alla struttura una elevata complessità per quanto riguarda i rapporti e la disposizione dei litotipi affioranti e la geometria dei contatti stratigrafici fra le diverse unità geologiche. La superficie di scorrimento è stata individuata oltre che dal rilevamento geologico di superficie anche dalle indagini geofisiche (tomografia sismica a riflessione) che hanno consentito l'esatta ricostruzione del loro andamento anche in profondità; l'anticlinale è caratterizzata da una vergenza orientale, mentre il lato occidentale appare dislocato da faglie dirette e transtensive immergenti verso ovest che formano il cosiddetto graben del Fiume Tevere.

Il fronte dei sovrascorrimenti è caratterizzato dalla presenza di litofacies di natura flischoide che deformandosi danno origine a una serie di sinclinali con il lato occidentale rovesciato, tali thrust si impostano a partire da ovest verso est attraversando la dorsale rispettivamente sulle Marne a Fucoidi e sulla Scaglia Cinerea, dislocando localmente i sedimenti miocenici. Parte del tracciato in oggetto attraversa rocce a componente prevalentemente marnosa, con caratteristiche geomeccaniche tipiche del bedrock e molto spesso interessata da frequenti e notevoli disturbi tettonici che hanno determinato una intensa fratturazione e cataclasizzazione del materiale.

La condizione di intensa fratturazione determina condizioni di elevata sensibilità in riferimento all'opera e alle caratteristiche geomeccaniche dei terreni interessati.

La stessa valutazione può essere effettuata relativamente alla stabilità geomorfologica nel campo degli ammassi rocciosi, quando ci si trovi nelle condizioni di strati intensamente cataclasizzati e/o disposti a franapoggio e interessati da numerose e diffuse diaclasi e/o tension crack.

Vengono di seguito descritte le facies rilevate con indicazione delle aree di affioramento all'interno del corridoio di interesse.

4.1 Detrito di Falda [dt].

Clasti calcarei imballati in matrice terrosa arrossata derivante dal disfacimento chimico-fisico dei litotipi subaffioranti. Si rinviene estesamente lungo i fianchi delle strutture montuose, dove ricoprono litotipi calcarei affioranti.

4.2 Depositi Eluvio-Colluviali [Col].

Coperture di materiale a granulometria fine (limi e sabbie), con rari frammenti litoidi grossolani; processi di alterazione e/o trasporto di entità limitata o non precisabile (pleistocenica- olocenica).

4.3 Alluvioni Recenti e Attuali [A].

Si tratta essenzialmente di depositi recenti o attuali riferibili all'azione diretta dei corsi d'acqua che depositano, nelle aree golenali, materiali di grado granulometrico eterogeneo (sabbie e ghiaie frammiste a limi sabbioso-argillosi) in dipendenza dei regimi idraulici e degli apporti di materiale terrigeno eroso dalle strutture limitrofe. Ricoprono diffusamente i termini litoidi e sono posizionati in massima parte all'interno delle aree golenali, in particolare si rinvencono in corrispondenza dell'alveo dei torrenti Naia, Marroggia e Tessino e del fosso di Cortaccione (Olocene).

4.4 Depositi Conoidali.

Si tratta essenzialmente di depositi a geometria conoidale derivanti dall'azione di collettori naturali che hanno di fatto depositato discrete quantità di materiale di diverso grado granulometrico alla base di pendii; nell'area di interesse tali depositi si rinvencono lungo la valle del torrente Marroggia e raccordano morfologicamente la pianura alluvionale con i versanti montuosi secondo superfici debolmente inclinate; gli apparati conoidali sono notevolmente colonizzati ed apparentemente stabili (Olocene).

4.5 Depositi Villafranchiani S.S. [FI-La].

Si tratta essenzialmente di depositi in facies fluvio-lacustre riferibili alla sedimentazione dei sedimenti trasportati dai corsi d'acqua che depositano nelle depressioni tettoniche materiali di grado granulometrico eterogeneo (sabbie e ciottoli intercalati da argille, limi-sabbiosi e limi argillosi e ligniti) in dipendenza dei regimi idraulici e degli apporti di materiale terrigeno, per erosione delle strutture limitrofe. Ricoprono diffusamente i termini litoidi e si rinvencono nelle aree collinari prospicienti la città di Spoleto (Plio-Pleistocene).

4.6 Schlier [SCH].

La formazione è costituita da alternanze di marne, marne calcaree, marne argillose grigie e, subordinatamente, di calcari marnosi biancastri, talora finemente detritici. Gli strati sono in genere medio sottili e spesso obliterati da un diffuso clivaggio. Il limite inferiore difficilmente riconoscibile, coincide con un cambiamento litologico da litotipi calcarei, grigi e grigio verdastri (Bisciario) a litotipi più marnosi, grigio-azzurri (Schlier) e con la riduzione delle litofacies vulcanoderivate. Nelle zone interne il limite superiore con la sovrastante Marnoso Arenacea è segnato dalla comparsa delle tipiche arenarie torbiditiche. Lo

Schlier umbro-marchigiano è caratterizzato da una forte variabilità per quel che riguarda gli spessori, le litofacies e l'età (Miocene inf.).

4.7 Bisciario [BIS].

Calcari marnosi di colore grigio scuro con frattura aciculare o prismatica, stratificati in banchi o strati sottili con presenza di livelli di selce nera, alternati a marne argillose grigio cenere prevalenti verso l'alto. Affiora nella zona compresa tra le località di Firenzuola e S. Giovanni di Baiano in continuità stratigrafica con la scaglia cinerea o in blocchi disarticolati dall'attività tettonica (Miocene inf.).

4.8 Scaglia Cinerea [SCC].

Calcari marnosi grigio verdi o rossastri con intercalazioni calcaree a fiammate rossastre nella parte bassa della serie. Affiora estesamente e si caratterizza per l'elevato grado di tettonizzazione testimoniato dalla presenza di grosse linee dislocative di carattere compressivo (Oligocene).

Geologicamente le formazioni che si rinvencono lungo il tracciato stradale relativo allo Stralcio 1° Firenzuola-Baiano sono:

Depositi Eluvio-colluviali;

La formazione delle **Alluvioni Recenti e Attuali** del torrente Marroggia e **depositi conoidali**;

La formazione dello **Schlier**;

La formazione del **Bisciario**.

La formazione della **Scaglia Cinerea**.

5 GEOMORFOLOGIA

Dal punto di vista morfologico si evince che il territorio appare nella maggior parte ad elevata stabilità geomorfologica dettata dalla presenza del substrato roccioso affiorante sui rilievi collinari prospicienti la pianura alluvionale del torrente Marroggia dove la morfologia ad andamento sub-pianeggiante conferisce all'area una generale stabilità. Si rilevano zone che sono classificabili a media propensione al dissesto e in genere si localizzano in corrispondenza delle conoidi alluvionali, detriti di falda, depositi flyschoidi alterati e aree in forte erosione come si evince dalla carta inventario dei movimenti franosi. Morfologicamente si individuano zone con versanti e scarpate piuttosto ripide a rischio di crollo piuttosto frequenti, dovuti a distacco e caduta di singoli blocchi o ammassi rocciosi consistenti, su scarpate morfologiche verticali e pareti rocciose aggettanti.

La morfologia dei bacini idrografici e l'andamento dei tracciati fluviali mostrano caratteri di forte erosione nell'area di testata dei corsi d'acqua con tracciato incassato all'interno delle strutture carbonatiche mentre la porzione medio-terminale è caratterizzata da pianure alluvionali a fondo piatto, dove il corso d'acqua divaga con tracciato a meandri liberi. Lo sviluppo della rete idrografica e l'andamento morfogenetico dei corsi d'acqua rispecchia la situazione geostrutturale e mostra chiaramente l'effetto legato al controllo strutturale in particolare per alcuni corsi d'acqua dove si registra una valle fortemente incassata nella struttura carbonatica.

La densità di drenaggio è bassa in accordo con la frequente presenza di fenomeni carsici all'interno della struttura montuosa e l'elevata fratturazione secondaria dove prevale una forte infiltrazione delle acque di precipitazione a scapito delle acque di scorrimento superficiale.

Il tracciato dei corsi d'acqua mostra caratteri nello sviluppo del bacino idrografico tipici di un forte controllo tettonico caratterizzato spesso da brusche deviazioni e tratti rettilinei (dislocazioni tettoniche), asimmetria del reticolo, fenomeni tutti da ricondurre a controllo strutturale per "sottoimposizione".

La zona del tracciato stradale di cui è in esecuzione il progetto esecutivo, dal punto di vista geomorfologico, si sviluppa sul versante orientale del rilievo collinare di Firenzuola che è parte integrante della struttura montuosa dei Monti Martani con direttrice appenninica NO-SE.

Le condizioni geologiche rilevate assicurano all'area una stabilità geomorfologica che allo stato attuale risulta buona; infatti, non si rinvenivano fenomeni di dissesto idrogeologico, ad eccezione di sporadici movimenti da ricondurre a soliflussi (di limitata estensione) che movimentano i terreni di copertura (eluvio-colluviali, alterazione bedrock, accumuli detritici sciolti) poggianti sul substrato marnoso – calcareo e/o episodi di crolli e rotte di materiale detritico sciolto ricadente alla base delle scarpate antropiche e naturali; i fenomeni interessano comunque solo i materiali di copertura e sono legati spesso alla presenza di emergenze idriche, di scarsa consistenza, ma che creano condizioni di saturazione dei terreni a componente argilloso-marnosa e ne determinano l'instabilità con conseguente mobilitazione; si tratta comunque di fenomeni di dissesto sub-superficiali.

RELAZIONE GEOLOGICA

La natura di tali eventi non risulta riconducibile a dissesti idrogeologici estesi, profondi, ma sono legati ad una scarsa o assente regimentazione delle acque di scorrimento superficiale e di dispersione delle polle sorgentizie locali e si è constatato che è da considerare come conseguenza diretta.

Nonostante la elevata fratturazione del basamento litoide e la disposizione degli strati marnosi a franapoggio non si rileva la presenza di segni e indizi di dissesto idrogeologico di dimensioni considerevoli sul versante interessato dalla realizzazione del tracciato stradale, come si può osservare sulla cartografia ufficiale relativa alla carta inventario dei movimenti franosi IFFI e dalla cartografia dei dissesti del PAI.

La situazione geomorfologica del tratto iniziale insiste all'interno della pianura alluvionale del torrente Marroggia e quindi in condizioni di totale stabilità dal punto di vista dei dissesti e lo studio ha evidenziato che la zona non ricade su aree a rischio di esondabilità.

La realizzazione del tratto in oggetto si è accertato che dal punto di vista idraulico non costituisce un ostacolo al deflusso naturale delle acque sviluppandosi per la maggior parte del tracciato a fianco e parallelamente al corso d'acqua; si può quindi concludere che la realizzazione della infrastruttura pertanto non determina un incremento della pericolosità idraulica delle aree poste a valle dell'opera da realizzare.

6 Pericolosità e Rischio Geomorfologico e Idrogeologico (PAI)

Il Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico-PAI, redatto dall'Autorità di Bacino del Fiume Tevere ai sensi e per gli effetti della legge n. 183/1989 e del decreto legge n. 180/1998, convertito nella legge n. 267/1998, è stato adottato dal Comitato Istituzionale il 1 agosto 2002, e si configura come lo strumento di pianificazione territoriale attraverso il quale l'Autorità di Bacino si propone di determinare un assetto territoriale che assicuri condizioni di equilibrio e compatibilità tra le dinamiche idrogeologiche e la crescente antropizzazione del territorio ed di ottenere la messa in sicurezza degli insediamenti ed infrastrutture esistenti e lo sviluppo compatibile delle attività future.

Il PAI persegue il miglioramento dell'assetto idrogeologico del bacino attraverso interventi strutturali (a carattere preventivo e per la riduzione del rischio) e disposizioni normative per la corretta gestione del territorio, la prevenzione di nuove situazioni di rischio, l'applicazione di misure di salvaguardia in casi di rischio accertato. In particolare il Piano:

- Individua la pericolosità da frana e la perimetra le situazioni di maggior rischio.
- Individua la pericolosità e il rischio idraulico con riferimento al reticolo principale, secondario e minore, attraverso la perimetrazione delle aree inondabili per diversi tempi di ritorno e la valutazione del rischio degli elementi esposti.

RELAZIONE GEOLOGICA

- Valuta l'efficienza idrogeologica dei versanti del bacino;
- Analizza i trend delle dinamiche idrogeologiche e dell'antropizzazione del territorio onde individuare le maggiori criticità e delineare le priorità di intervento.
- Definisce gli interventi a carattere strutturale e normativo.

6.1 Definizione di pericolosità e di rischio

La definizione del rischio, assunta in maniera più o meno esplicita dalle diverse Autorità di bacino in Italia, punto di partenza dell'attività perimetrazione delle aree soggette al rischio, è quella proposta dalle commissioni tecnico-scientifiche dell'UNESCO (relazione di Varnes):

$$R = P \times V \times K$$

che presenta i seguenti fattori funzionali:

- **Rischio (R):** rischio espresso in termini di danno atteso riferito al costo sociale, di recupero e ristrutturazione dei beni materiali danneggiati dall'agente calamitoso;
- **Pericolosità (P):** pericolosità ovvero probabilità di accadimento dell'evento di una certa intensità;
- **Elementi a rischio (K):** valore esposto, quale identificazione del valore sociale, economico, di persone, beni ed infrastrutture che ricadono nell'area soggetta al fenomeno;
- **Vulnerabilità (V):** vulnerabilità, quale percentuale del valore esposto che andrà perduto nel corso dell'evento.

Lo stesso DPCM 29 settembre 1998 (*Atto di indirizzo e coordinamento in attuazione del D.L. 180/98*) al punto 2.1 "Criteri generali", si riferisce alla formula di Varnes specificando che si dovrà far riferimento ad essa solo per la individuazione dei fattori che determinano il rischio senza porsi come obiettivo quello di giungere ad una valutazione di tipo strettamente quantitativo. Il DPCM definisce le seguenti quattro classi di rischio:

RELAZIONE GEOLOGICA

Sigla	Classe di rischio	Definizione
R4	Rischio molto elevato	Rischio per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche
R3	rischio elevato	Rischio per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socioeconomiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale
R2	rischio medio	Rischio per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche
R1	rischio moderato	Rischio per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali.

Tabella 1: Classi di rischio idrogeologico

6.2 Valutazione della pericolosità e del rischio da frana

Per la valutazione della pericolosità e del rischio da frana Il Pai ha elaborato delle mappe per mezzo di procedure standardizzate mirate alla stima dei parametri indicati nell'"*Atto di indirizzo e coordinamento...*" del DPCM 29 settembre 1998.

La valutazione del rischio e della pericolosità da frana utilizza come strumento di base, l'inventario dei fenomeni franosi esteso a tutto il territorio del bacino.

E' stato prodotto un Inventario dei fenomeni franosi in scala 1:10.000 a copertura dell'intero territorio del bacino e circa 60.000 aree in dissesto cartografate. L'inventario permette di avere una visione globale della franosità del bacino nei limiti delle incertezze intrinseche del metodo adottato. Esso costituisce pertanto un livello di attenzione di probabile dissesto da verificare sul terreno sulla base di indagini mirate.

La normativa del PAI richiede che i comuni recepiscano l'Inventario dei fenomeni franosi al fine di verificare, sulla base di studi geologici e geomorfologici di dettaglio, la compatibilità delle previsioni urbanistiche con la pericolosità da frana evidenziata, onde prevenire l'esposizione ai rischi derivanti da movimenti franosi. Sulla base dell'inventario dei fenomeni franosi e di sopralluoghi effettuati da tecnici dell'Autorità di Bacino,

Dalla mappa si evince che il tracciato di progetto lambisce una frana per scivolamento quiescente nei pressi dell'innesto con la SR 418.

6.3 Valutazione della pericolosità e del rischio idraulico

Per quanto riguarda il rischio idraulico, il PAI ha suddiviso il reticolo idrografico in reticolo principale, secondario e minore.

Sul reticolo principale sono state individuate le fasce di assetto idraulico, definite come segue:

- la fascia A, corrispondente ad un tempo di ritorno 50 anni,
- la fascia B corrispondente ad un tempo di ritorno di 200 anni
- la fascia C, corrispondente ad un tempo di ritorno 500 anni.

Alle varie fasce fluviali è stata inoltre attribuita la relativa classe di rischio, per le quali sono previsti disposizioni tecnico-normative che disciplinano l'uso delle aree a rischio, interventi strutturali di difesa idraulica e delocalizzazioni. Le classi di rischio sono così definite:

- R4: rischio molto elevato;
- R3- rischio elevato;
- R2- rischio medio.

L'individuazione delle aree di pericolosità idraulica e delle zone di rischio lungo il reticolo principale deriva dalla valutazione di diversi elementi che caratterizzano il reticolo stesso, quali: la morfologia delle aree fluviali, le caratteristiche idrologiche, l'uso del suolo e le previsioni urbanistiche che determinano la vulnerabilità degli elementi esposti ad un eventuale rischio.

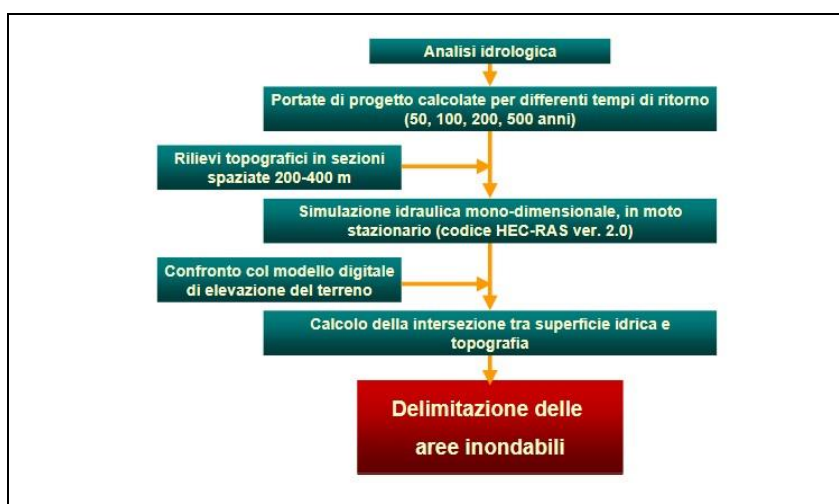


Figura 4: Procedura di individuazione della pericolosità idraulica

RELAZIONE GEOLOGICA

Nel giugno 2013 sono state predisposte e pubblicate nel sito dell'Autorità di bacino del Tevere le mappe di pericolosità e di rischio secondo l'articolo 6 del Decreto 49/10.

Nella redazione delle mappe di pericolosità sono state considerate:

- le alluvioni rare di estrema intensità, tempo di ritorno fino a 500 anni dall'evento (bassa probabilità);
- le alluvioni poco frequenti, tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (media probabilità);
- le alluvioni frequenti, tempo di ritorno tra 20 e 50 anni (elevata probabilità)

Per ognuno di tali scenari sono stati indicati l'estensione dell'inondazione, l'altezza idrica o livello e le caratteristiche del deflusso.

Nella redazione delle mappe di rischio sono stati considerati diversi elementi quali il numero indicativo di abitanti potenzialmente interessati, le infrastrutture e strutture strategiche, i beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse, la distribuzione e tipologia delle attività economiche insistenti nell'area potenzialmente interessata, gli impianti di cui all'all. 1 al D. Lgs.

59/2005 e le Aree protette individuate secondo l'allegato 9 parte III del D. Lgs. 152/2006.

Più in dettaglio, sempre per quanto concerne il bacino del fiume Tevere, il materiale di base, utilizzato per le mappe, è costituito dal PAI vigente, sul quale sono stati effettuati gli interventi di modificazione, integrazione, omogeneizzazione, secondo le specificità previste dal D. Lgs. 49/2010 e le linee di indirizzo rilasciate dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del Mare.

In particolare, si è provveduto a convertire e omogeneizzare le attuali fasce fluviali determinate dal PAI e dagli studi di aggiornamento che si sono resi disponibili, secondo il passaggio di ammissione e corrispondenza fra fasce A,B,C e pericolosità P1, P2, P3, in gradazione alta, media, bassa.

Fascia Fluviale	Tempo di ritorno	Pericolosità	Scenari associati
A	50 anni	P3=elevata	alluvioni frequenti
B	200 anni	P2=media	alluvioni poco frequenti
C	500 anni	P1=bassa	alluvioni rare di estrema intensità

Tabella 2: Classi di rischio idraulico

Così come individuata, la fascia A è caratterizzata dalla massima pericolosità ed è definita dal limite delle aree di esondazione diretta della piena di riferimento con Tr 50. Per la sua vicinanza al corso d'acqua, per le evidenti interconnessioni di tipo idraulico e per la presenza di habitat faunistici e vegetazionali tipici dell'ecosistema fluviale, la fascia A è considerata di pertinenza fluviale. Il Piano Stralcio prevede per la fascia A la possibilità di libere divagazioni del corso d'acqua ed il libero deflusso delle acque della piena di riferimento; in questo senso ulteriori insediamenti, rispetto a quelli già esistenti e perimetrati come aree a rischio, non sono considerati compatibili con gli obiettivi di

RELAZIONE GEOLOGICA

assetto della fascia. La fascia B è compresa tra il limite delle aree di esondazione diretta ed indiretta delle piene con Tr 50 e Tr 200. Detta delimitazione include le aree di esondazione indiretta e le aree marginali della piena con Tr 50.

Poiché uno degli obiettivi di assetto della fascia B è quello della conservazione delle capacità di invaso, le aree di esondazione indiretta della piena con Tr 200 vi sono incluse. Il piano stralcio riconosce a queste aree la necessità di conservazione della capacità di laminazione della piena e individua criteri ed indirizzi per la compatibilità delle attività antropiche. La fascia C comprende le porzioni di territorio inondabili comprese tra le piene con Tr 200 e Tr 500 e le aree marginali della piena con Tr 200. Per la fascia C il piano stralcio persegue il raggiungimento degli obiettivi di assetto attraverso indirizzi e linee guida, nell'ambito delle proprie competenze, per le Amministrazioni provinciali a cui, ai sensi della legge 225/1992 compete la predisposizione dei Piani di protezione civile

Per quanto riguarda il rischio si fa riferimento ai parametri R1, R2, R3, R4 tramite macro categorie relative ai beni, esposti (da D1 a D4) tramite la matrice di riferimento riportata di seguito.

CLASSI DI RISCHIO		CLASSI DI PERICOLOSITA'				
		P3		P2		P1
CLASSI DI DANNO	D4	R4		R3	R2	
	D3	R4	R3	R3		R2 R1
	D2	R3	R2	R2		R1
	D1	R1		R1		R1

Tabella 3: Classi di rischio idraulico

In conformità con le Norme Tecniche di attuazione del P.A.I. che individuano le prescrizioni dirette riferite alle "Limitazioni alle attività di trasformazione del territorio nelle situazioni di rischio, tutti gli interventi di progetto sono sottoposti alla preventiva autorizzazione dell'autorità competente.

RELAZIONE GEOLOGICA**7 IDROGEOLOGIA**

La situazione idrogeologica dell'area è stata ricostruita ed analizzata attraverso i risultati delle indagini e la misura del livello della falda nei punti d'acqua presenti nell'area di interesse.

Il rilievo di sorgenti e piezometriche ha permesso di verificare la presenza di diversi domini con sede rispettivamente nelle alluvioni antiche e recenti del fondovalle e nel basamento flyschoidi.

Il livello piezometrico rilevato nei sondaggi strumentati a piezometro (per lo più a tubo aperto) ha evidenziato delle anomalie rispetto ai dati di perforazione che non hanno rilevato la presenza di un acquifero importante per una profondità consistente in particolare nei terreni argilloso – marnosi. I livelli misurati forniscono valori di presenza d'acqua prossimi al piano campagna che non rappresentano fedelmente la quota del reperimento dell'acquifero nelle rocce flyschoidi. Il motivo di questa incongruenza sta nella condizione di filtrazione verticale per saturazione dei terreni di copertura (alterazione del basamento e depositi eluvio-colluviali) che riempiono il tubo fenestrato fino alla quota dei materiali sciolti, permeabili, di superficie.

Quindi i livelli misurati si riferiscono a riempimenti del foro da parte delle acque di precipitazione che filtrano all'interno del perforo strumentato anche per danneggiamento dei coperchi, degli stessi tubi piezometrici, di sprofondamento del terreno nell'intorno del perforo. Dai dati di perforazioni per ricerca di acqua su tali terreni in zone anche distanti si rileva che le acque sotterranee che costituiscono degli accumuli sfruttabili si rinvengono a profondità piuttosto consistenti (dai 30 ai 50 mt riferito al piano campagna) e presenti all'interno degli strati calcarenitici e arenitici; tali acquiferi sempre di tipo multifalda sono legati allo spessore di tali strati e la portata delle captazioni è in stretta dipendenza del grado di fratturazione della roccia. Si tratta comunque di acquiferi che hanno portate dell'ordine di 2 -4 l/s.

Il rilievo di sorgenti e delle quote piezometriche ha permesso di verificare la presenza di diversi domini con sede rispettivamente nelle alluvioni antiche e recenti della pianura alluvionale del Torrente Marroggia e nel basamento flyschoidi.

Di seguito si riportano i dati piezometrici risultanti dalle misurazioni effettuate nei piezometri installati (alcune misure si ritiene siano in parte falsate dalla cattiva conservazione della strumentazione installata).

Sigla Id	Rilievo freaticometrico
	03/10/2023
S1 - PZ	1,1
SA1 - PZ	6,0
S4 - PZ	6,0

RELAZIONE GEOLOGICA

S5 - PZ	4
S7 - PZ	8
S8 - PZ	8,1
S9 - PZ	7,4
S10 - PZ	7,2
S11 - PZ	8,5
S13 - PZ	12

Figura 5 – Tabella con i dati piezometrici delle ultime misurazioni effettuate.

7.1 Acquifero complesso alluvionale.

L'analisi dei dati ottenuti durante le indagini ha consentito di individuare la presenza di un acquifero alluvionale in falda freatica con sede nei depositi alluvionali di natura ghiaioso-sabbiosa, limitato inferiormente dai livelli limoso-argillosi. Tale acquifero risulta confinato lateralmente dal basamento litoide e dai depositi plio-pleistocenici e in profondità dalle argille limose in facies alluvionale.

La natura litologica e la geometria del deposito consentono di poter affermare che la circolazione idrica sotterranea risulta condizionata fortemente dalla permeabilità primaria e dalla geometria dei terreni acquiferi alluvionali, che risulta lenticolare e caratterizzata da numerose interdigitazioni, pregiudicando a volte la continuità laterale dei livelli produttivi; tale acquifero risulta di elevata produttività.

La quota della piezometrica è molto variabile e rispecchia l'andamento discontinuo dei livelli sabbioso-ghiaiosi; in generale si mantiene intorno ai 6.0 m fino a -11.60 m, anche se si rilevano delle zone dove la falda in determinati periodi dell'anno (stagione primaverile) può raggiungere quote maggiori per effetto della ricarica stagionale facilitata dalla vicinanza delle zone di alimentazione circostanti (rilievi collinari) e dalla estensione limitata della pianura alluvionale.

L'acquifero freatico è idrogeologicamente identificabile con un sistema monostrato ed è di rilevante importanza dal punto di vista della consistenza e produttività e risente delle escursioni stagionali con variazioni del livello freatico anche consistenti.

L'intervento non pregiudica le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero in riferimento alla geometria e alla dinamica considerato che le opere in sottoterraneo non ostacolano il naturale deflusso idrico e comunque dovrà essere eseguito nel rispetto della normativa vigente in riferimento alle norme di salvaguardia e di tutela delle acque sotterranee; quest'ultima raccomandazione riguarda anche durante la fase esecutiva l'accidentale sversamento di materiali inquinanti che potrebbero verificarsi nella fase di perforazione e/o di getto del calcestruzzo.

7.2 Acquifero complesso fluvio-lacustre.

Dall'indagine geologica e da perforazioni per ricerche idriche eseguite si è potuto ricostruire l'acquifero presente in terreni fluvio-lacustri plio-pleistocenici dove si intercettano livelli produttivi

a diverse profondità dal piano campagna; si evince che è presente un acquifero di tipo multifalda interconnesso con sede negli strati e intercalazioni sabbiose del deposito fluvio-lacustre e limitato inferiormente dai livelli argillosi; tale acquifero risulta di scarso interesse per la bassa produttività.

Il livello piezometrico varia seguendo l'andamento discontinuo dei livelli sabbioso-ghiaiosi; in generale si rinviene intorno ai 40 m.

7.3 Acquifero complesso Flyschoide.

Si rinviene sui rilievi collinari prospicienti la struttura montuosa sul versante orientale dei monti Martani ed è costituita da marne prevalenti con intercalazioni arenacee e calcarenitiche. La natura prevalentemente marnoso-argillosa impedisce la formazione di ingenti risorse idriche nel sottosuolo; la circolazione idrica appare modesta e circoscritta con sede nelle arenarie e calcareniti fratturate. La permeabilità è strettamente dipendente dal grado di fratturazione della roccia e comunque si mantiene su valori medio-bassi. L'acquifero non risulta di particolare interesse a livello produttivo.

Il progetto interessa un tratto del tracciato stradale che attraversa terreni che sono sede di due acquiferi sopra descritti e precisamente l'acquifero alluvionale e quello del complesso flyschoide.

Il primo acquifero è idrogeologicamente identificabile con un sistema monostrato ed è di rilevante importanza dal punto di vista della consistenza e produttività, si stabilizza ad una profondità variabile da 6.0 m fino a 11.60 m e risente delle escursioni stagionali con variazioni del livello freatico anche consistenti.

L'intervento non pregiudica le caratteristiche idrogeologiche relative alla geometria e alla dinamica e dovrà essere eseguito nel rispetto della normativa vigente in riferimento alle norme di salvaguardia e di tutela delle acque sotterranee e questo per quanto riguarda l'accidentale sversamento di materiali inquinanti durante la fase di perforazione e/o di getto del calcestruzzo. L'acquifero del complesso flyschoide presenta caratteristiche molto differenti e legate alla permeabilità di tipo secondario per fatturazione, che come rilevato dalle prove lugeon risulta molto bassa, e determina acquiferi anche multistrato, semiconfinati che possono determinare modesti gradienti idraulici.

Tale acquifero è discontinuo e di bassa potenzialità.

8 CARATTERI SISMICI

L'area della catena montuosa dell'Appennino Umbro Marchigiano e dei Monti Martani è caratterizzata da una sismicità diffusa con sequenze sismiche frequenti.

I recenti eventi sismici hanno evidenziato in maniera inequivocabile che la catena dei monti Martani e dell'Appennino Umbro-Marchigiano è in una fase di deformazione sismica di tipo distensivo, in grado di riattivare sistemi dislocativi tali da produrre un elevato numero di repliche.

Di seguito vengono riportati i dati relativi ai principali terremoti storici dell'area Umbro-Marchigiana:

Alla luce delle conoscenze acquisite in occasione delle numerose sequenze e di altre sequenze sismiche studiate (Norcia 79 – Gubbio 84 – Colfiorito 97) si delinea un meccanismo di attivazione che interessa strutture sismogenetiche poste all'interno della struttura dei monti Martani e dell'Appennino Umbro-Marchigiano il cui campo di sforzo regionale sia contraddistinto da una estensione in senso anti-appenninico.

Le profondità ipocentrali sono comprese entro i primi 15 Km della crosta e la sequenza sismica mostra una particolarità data dalla concentrazione in zone differenti attivate distintamente nel tempo.

La "Faglia Bordiera dei monti Martani" sembra essere uno dei principali lineamenti sismogenetici dell'area data la natura estensionale, la recente attività geologica nonché l'attività sismica registrata negli ultimi anni lungo questo settore.

Si riportano dati relativi ai principali terremoti storici dell'Appennino Umbro-Marchigiano. *Il **30 aprile 1279** l'Appennino umbro-marchigiano fu interessato da un terremoto che precedette di poche ore un secondo evento distruttivo verificatosi nell'Appennino tosco-emiliano. Alcuni cronisti medievali hanno descritto questi eventi come un unico fenomeno abbracciante gran parte dell'Italia centrale. L'area di danneggiamento del terremoto umbro-marchigiano fu comunque ampia. Fonti coeve e attendibili attestano che due terzi degli edifici di Camerino furono distrutti mentre Cagli, Fabriano, Matelica, San Severino Marche, Cingoli, Nocera, Foligno e Spello rimasero "diroccate". Tutti i castelli (ossia insediamenti minori cinti da mura) nelle montagne tra Nocera e Camerino "patirono molti danni".*

*Il terremoto del **dicembre 1328** a Norcia fu causa di crolli di gran parte degli edifici e delle mura. L'evento del **5 novembre 1599** fu preceduto da lievi scosse avvertite a Cascia dal principio di ottobre e da una scossa che lesionò parecchi edifici il 4 novembre. Nella notte 5-6 novembre la scossa maggiore causò a Cascia il crollo di case e danni gravi a tutti gli altri edifici.*

*I terremoti del **gennaio-febbraio 1703**, localizzati in Umbria e Abruzzo sono per l'Italia centrale una delle più significative sequenze sismiche dell'ultimo millennio. Gli eventi maggiori si ebbero il 14 e 16 gennaio e il 2 febbraio 1703. L'evento del 14 gennaio interessò con i massimi effetti una vasta area dell'Umbria e del Lazio all'incirca compresa tra Norcia e Amatrice.*

*La mattina del **27 giugno 1719** una scossa di terremoto interessò Norcia e Cascia dove si aprirono ampie fenditure negli edifici nuovi, costruiti dopo i terremoti del 1703.*

RELAZIONE GEOLOGICA

Quello del **17 aprile 1747** potrebbe essere il principale in una sequenza di eventi verificatisi tra il 26 gennaio e il 20 dicembre 1747 in un vasto territorio compreso tra Nocera Umbra e Senigallia. Esso causò crolli e danni abbastanza gravi nel territorio della diocesi di Nocera Umbra e nel Fabrianese (Nocera Umbra e località minori del Nocerino, Gualdo Tadino, Sigillo, Belvedere, Campodonico, Fabriano).

Gli eventi del **13 gennaio 1832** furono i maggiori in una sequenza di scosse che interessarono l'area di Foligno a partire dal 27 ottobre 1831. Il primo evento causò a Foligno danni di media entità e fu seguito da leggere repliche nei giorni seguenti. Tali danni furono aggravati il 6 novembre 1831 da una forte scossa seguita da repliche minori.

Il terremoto della mattina del **14 febbraio 1838** si verificò nell'area compresa tra Sellano, Acera e Cerreto di Spoleto, e in due località situate nell'area montuosa ad est di Foligno (Verchiano e Val Lupo) fino a Spoleto.

Il terremoto del **19 settembre 1979** colpì gravemente alcune piccole località montane della Valnerina (Civita, Chiavano, Castel Santa Maria e Trimezzo). L'area di danno medio grave si estese tra Leonessa, Accumoli, Visso, Sellano e Poggiodomo. A Norcia si ebbero alcuni crolli parziali e danni a moltissimi edifici; a Cascia molte case furono danneggiate anche gravemente, e si ebbero alcuni crolli parziali. L'evento fu avvertito in numerose località umbre, marchigiane, abruzzesi e laziali, e fu seguito da numerose repliche.

Il terremoto del **26 settembre 1997** colpì gravemente l'Umbria e le Marche e moltissime località montane dell'Appennino Umbro Marchigiano con scosse disastrose e migliaia di repliche che provocarono crolli di edifici e paesi interi rese inagibili (Assisi, Nocera Umbra, Colfiorito, Verchiano, Sellano, Gualdo Tadino e Foligno). L'area di danno grave si estese sull'intero appennino da Spoleto a Gualdo Tadino. L'evento ha causato danni in numerose località umbre e marchigiane.

Il tracciato di progetto ricade all'interno di un'area ad elevato rischio sismico dove nel passato si sono verificati terremoti con intensità epicentrale superiore a 9 (MCS); il D.M. 26 giugno 1981 "Aggiornamento delle zone sismiche della Regione Umbria" inserisce il territorio comunale di Acquasparta e Spoleto all'interno di una zona sismica S = 9 (coefficiente di accelerazione sismica $C_s = 0.07$).

Il catalogo storico dei terremoti riporta eventi sismici di entità rilevante al di sopra della soglia di danno (Magnitudo calcolata sulle onde superficiali = 5.2) a partire dall'anno 1246 d.C.

Si riporta uno stralcio della cartografia di pericolosità sismica vettoriale della Regione Umbria (ultimata nel 2013) utilizzando tutti gli originali d'autore delle carte di pericolosità sismica locale realizzate alla scala 1:10.000, riviste ed omogeneizzate.

I contenuti della banca dati di pericolosità sismica locale vettoriale

Il *Geodatabase* di pericolosità sismica locale, è un sistema G.I.S. costituito da diversi livelli informativi visualizzati sotto forma di punti, linee e poligoni che rappresentano:

- Zone non suscettibili di amplificazioni e deformazioni
- Zone suscettibili di amplificazioni sismiche per cause morfologiche o stratigrafiche
- Zone suscettibili di deformazioni co-sismiche (frane, liquefazioni, faglie attive, addensamenti)

RELAZIONE GEOLOGICA

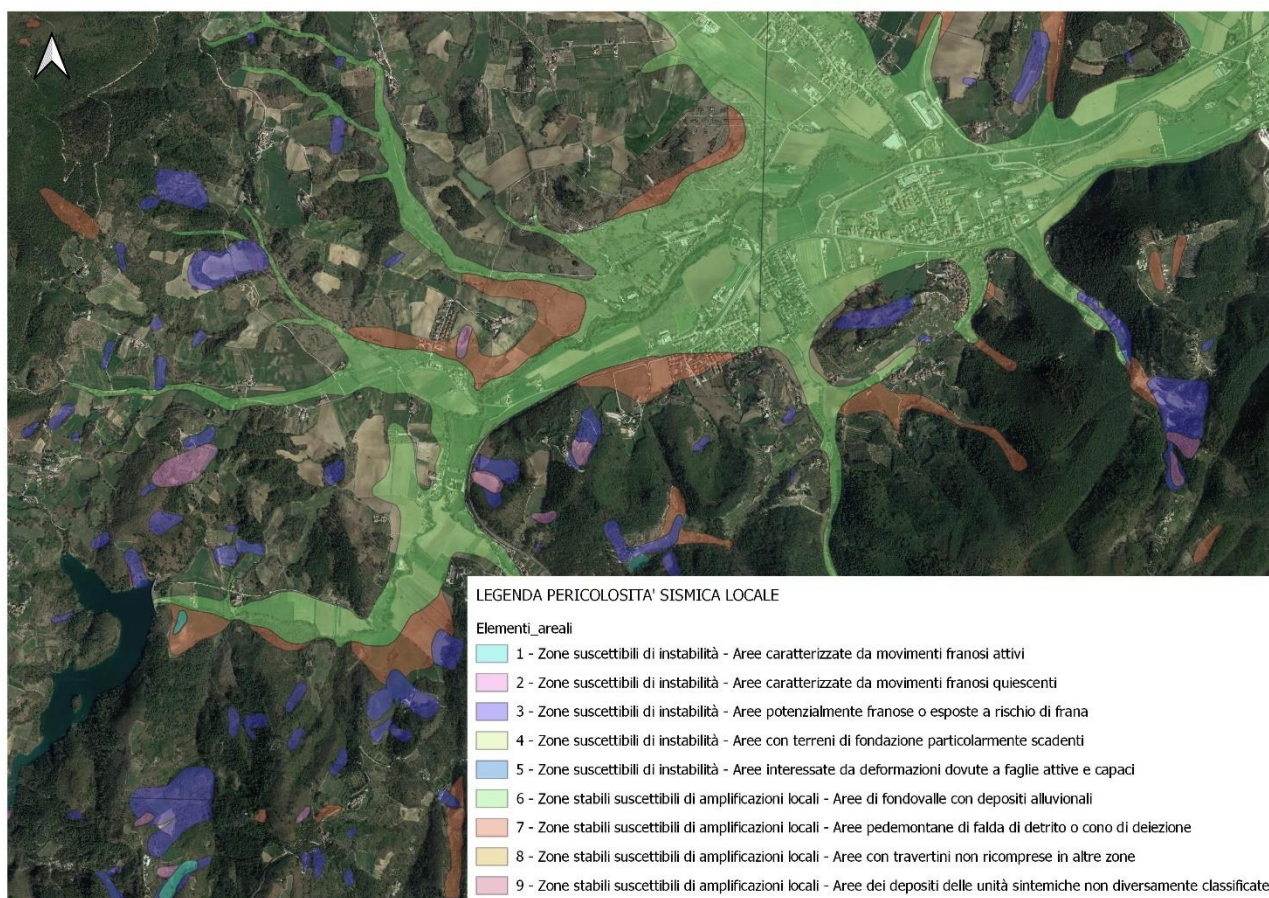


Figura 3 – Stralcio carta di pericolosità sismica

La carta della pericolosità sismica sono riportate le zone suscettibili di amplificazioni sismiche o instabilità dinamiche locali.

Nel presente capitolo si descrivono le caratteristiche sismiche del territorio intressato dalle opere di progetto, partendo dall'analisi delle sequenze sismiche storiche, si riporta la classificazione sismica dell'area aggiornata secondo la normativa regionale recente e le caratteristiche di pericolosità sismica di base.

Infine si definisce la categoria di sottosuolo ai sensi delle NTC 2018.

8.1 Normativa di riferimento

I riferimenti normativi Nazionali in materia di classificazione sismica a cui si è fatto riferimento, risultano:

- [L. 02/02/74, n. 64](#): Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.
- [D.M. 16/01/96](#): Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche.
- [Eurocodice 7.1 \(1997\)](#): Progettazione geotecnica – Parte I: Regole Generali. UNI;
- [Eurocodice 8 \(1998\)](#);
- [Ord.P.C.M. del 12/06/1998 n.2788](#) Individuazione delle zone ad elevato rischio sismico del territorio nazionale.
- [Eurocodice 7.2 \(2002\)](#): Progettazione geotecnica – Parte II: Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002). UNI;
- [Eurocodice 7.3 \(2002\)](#): Progettazione geotecnica – Parte II: Progettazione assistita con prove in sito (2002). UNI;
- [Ord.P.C.M. del 20 marzo 2003 n. 3274](#) Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. (Gazzetta n. 105 del 8-5-2003)
- [Ord.P.C.M. del 2 ottobre 2003 n. 3316](#) Modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003
- [Ord.P.C.M. del 3 maggio 2005 n. 3431](#) Ulteriori modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 [Allegati](#)
- [Ordinanze Ministeriali in materia di classificazione sismica](#)
- [Ord.P.C.M. del 28 aprile 2006 n. 3519](#) "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone" (G. U. 11 maggio 2006 n. 108) [Allegato](#)
- [D.P.C.M. del 12 ottobre 2007](#) "Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni" (G. U. 29 gennaio 2007 n. 24).
- [D.P.R. 5 ottobre 2010, n. 207](#) "Regolamento di esecuzione ed attuazione del decreto legislativo 12 aprile 2006, n. 163, recante «Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE»".

RELAZIONE GEOLOGICA

- [D.M. 17/01/2018 - “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”](#);
- [D.M. 14/01/2008 - “Nuove Norme tecniche per le costruzioni”](#);
- [Circolare Ministero dei LL.PP. 02/02/09 n. 617 - Istruzione per l’applicazione delle “Nuove Norme tecniche per le costruzioni”](#);

I riferimenti normativi della Regione Umbria in materia di classificazione sismica a cui si è fatto riferimento, risultano:

- [Atti Regione Umbria in materia di classificazione sismica](#)
- [D.G.R. 10.12.1987. N. 8396 \(B.U.R. n.111 del 28.01.1988\)](#). – Norme Tecniche relative alle costruzioni sismiche. D.M. 24.01/86. Paragrafo C.9. “Interventi su edifici esistenti”. Determinazione.
- [D.G.R. N. 5180/98](#). – Riparazione degli edifici danneggiati dal sisma del 1997 e seguenti (Ricostruzione pesante).
- [D.G.R. 18.06.2003 n. 852](#) - "Approvazione classificazione sismica del territorio regionale dell’Umbria.
- [D.G.R. 25.06.2004 n. 911](#) Programma annuale per la prevenzione sismica. Art. 3 leggeregionale 23 ottobre 2002, n. 18. Approvazione.
- [D.G.R. n. 1111 del 18 settembre 2012-](#) “Aggiornamento della classificazione sismica del territorio regionale dell’Umbria”

8.2 Inquadramento sismotettonico

Il territorio nazionale è caratterizzato da una sismicità che si distribuisce lungo fasce a caratteristiche sismiche omogenee, variamente orientate, denominate Zone Sismogenetiche. La zonazione ZS9 (INGV, 2004), già evoluzione di zonazioni precedenti (ZS4, 2000) mette in risalto la disposizione di tali zone; essa è stata elaborata in modo da soddisfare alcuni requisiti fondamentali, tra i quali è opportuno citare:

- la possibilità di fornire, per ogni ZS, una stima di profondità dei terremoti utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione determinate su base regionale;
- fornire, per ogni ZS, un meccanismo di fagliazione prevalente utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione modulate su tale meccanismo, mediante i coefficienti proposti tramite appositi algoritmi.

RELAZIONE GEOLOGICA


Figura 7: Zonazione sismogenetica del territorio nazionale (INGV, 2004). I limiti di colore blu separano zone con analogo significato cinematico, che differiscono principalmente per le caratteristiche di sismicità.

I dati di sismicità ottenuti dai database di riferimento sono stati gestiti in associazione con gli elementi descritti attraverso la zonazione ZS9, allo scopo di predisporre gli elementi di ingresso per il calcolo della pericolosità sismica sull'intero territorio nazionale.

La zonazione sismogenetica del territorio nazionale, assegna l'Umbria a più zone sismogenetiche della Catena Appenninica settentrionale e centrale; principalmente sono coinvolte le zone 918, 919 e 920 (Medio - Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Val di Chiana - Ciociaria) che, anche in virtù della loro maggiore estensione in senso NN/O-SS/E, coprono quasi tutto il territorio regionale in senso appenninico. In particolare la viabilità di progetto, come si evince dalla mappa sottostante ricade nella **Zona 920** (Val di Chiana-Ciociaria) che coincide con il settore in distensione tirrenica definito nel modello sismotettonico di Meletti et al. (2000). Questa zona è caratterizzata da una sismicità di bassa energia che sporadicamente raggiunge valori di magnitudo relativamente elevati. Le profondità degli eventi sismici in questa zona sismogenetica si concentrano tra i 5-8 km di profondità (profondità efficace=6 km) con una magnitudo massima Md pari a 4.6, il meccanismo di fagliazione prevalente è di tipo normale in accordo con il sistema distensivo peritirrenico del territorio.

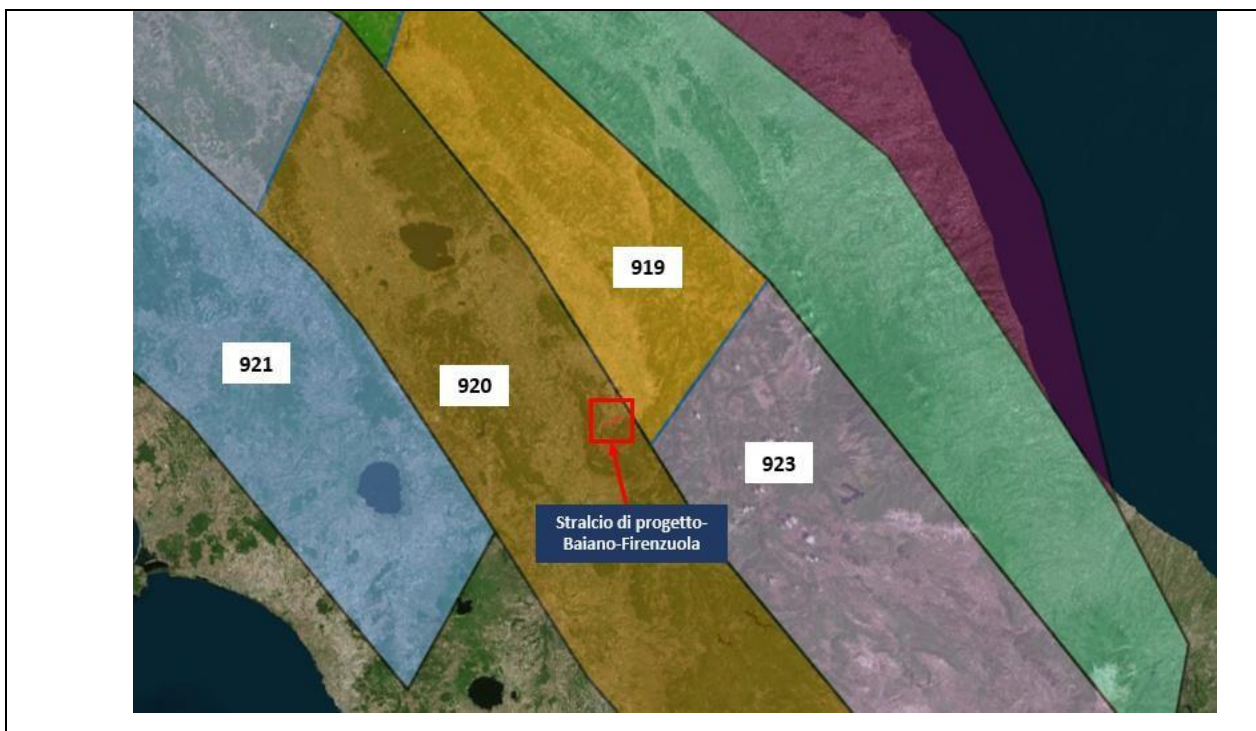
RELAZIONE GEOLOGICA


Figura 8: Zonazione sismogenetica del territorio nazionale (INGV, 2004) con ubicazione della viabilità di progetto.

La figura sottostante illustra l'ubicazione delle cosiddette "faglie capaci" nell'intorno dell'area di studio, la cui presenza è stata verificata consultando il catalogo delle faglie capaci ITHACA, disponibile on-line presso il Servizio Geologico Nazionale (ISPRA, 2011).

Il termine faglie capaci è utilizzato per descrivere le faglie 'sismiche' con indizi di attività negli ultimi 40.000 anni, potenzialmente capaci di produrre deformazioni in superficie. La riattivazione di faglie capaci in occasione di eventi sismici di intensità elevata è in grado di produrre fenomeni di rottura superficiale in prossimità delle aree epicentrali.

Dall'analisi del suddetto catalogo in prossimità dell'area d'interesse, ma non intercettate dalla viabilità di progetto, si rileva la presenza delle seguenti faglie capaci denominate: - "Spoleto Valley (antithetic)"; - "Spoleto"; - "Martani Mts Fault".

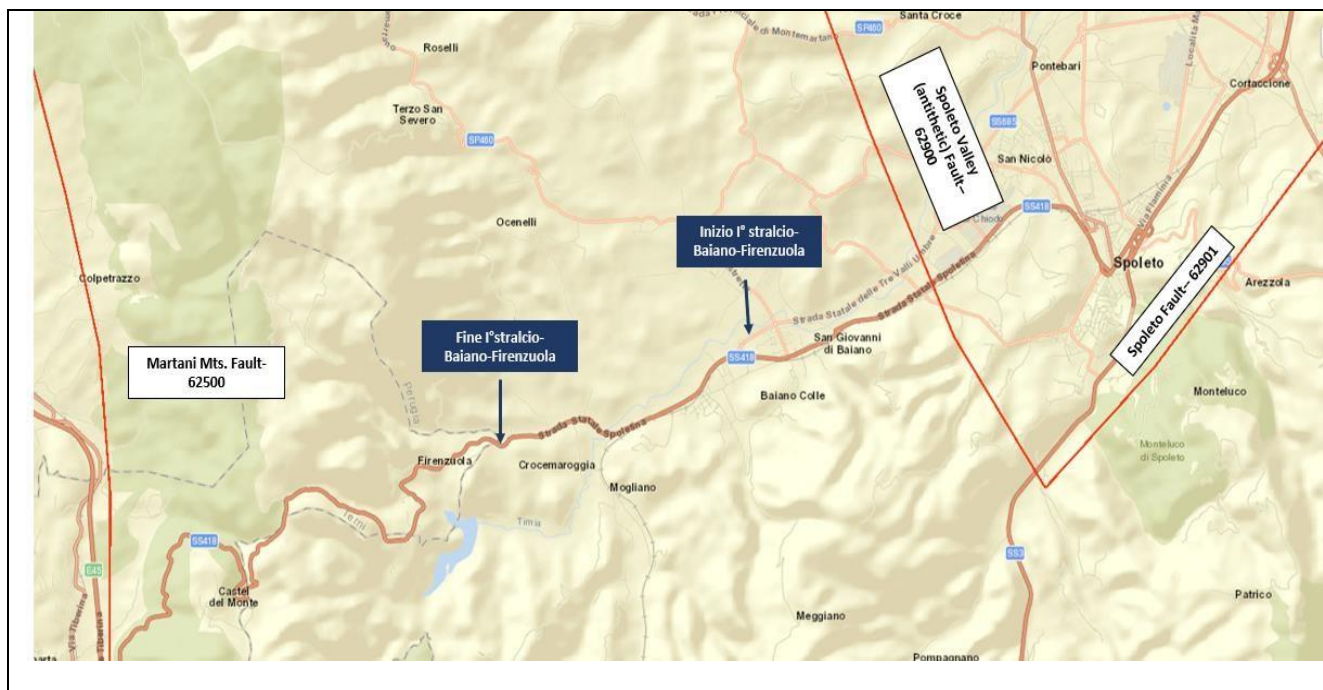
RELAZIONE GEOLOGICA


Figura 9- Mappa delle faglie capaci estratta dal "Catalogo delle Faglie Capaci (ITHACA-ISPRA)" con in evidenza la zona di inizio e fine stralcio di progetto.

Nella tabella seguente si riassumono le principali caratteristiche delle faglie capaci:

Denominazione Faglia	Codice faglia	Cinematica	Lunghezza (Km)	Direzione dell'Inclinazione	Direzione media (°)
"Spoleto valley (antithetic)"	62900	faglia diretta	14,3	NENE	330
"Spoleto "	62901	faglia diretta	8	NW	230
"Martani Mts."	62500	faglia diretta	37,9	WSW	160

Tabella 4: Faglie Capaci

8.3 Sismicità storica

L'analisi della sismicità storica per l'area oggetto di studio è stata condotta consultando il Database Macrosismico Italiano DBMI15, 2015 (disponibile nel portale dell'INGV), da fonti storiche e informazioni reperibili in letteratura. Il DBMI fornisce un set di dati d'intensità macrosismica relativo ai terremoti italiani dal 1000 al 2014. Per ogni evento nel database è riportata l'indicazione della data, la descrizione dei danni e la stima dell'Intensità macrosismica secondo la scala EMS98 (*European Macroseismic Scale; Grünthal, 1998*). Il DBMI15 presenta le intensità adottando lo standard proposto da AHEAD, cioè numeri arabi interi e, nel caso di attribuzioni incerte si indicano i due estremi separati da un trattino (es.: 5-6, 7-8).

Tale standard applica rigorosamente anche le indicazioni delle scale macrosismiche, secondo cui non è possibile assegnare un'intensità a edifici isolati o territori estesi, nei cui casi si altera l'intensità riportata dallo studio originale. Se le informazioni disponibili non sono considerate sufficienti per stimare un'intensità, è possibile adottare codici descrittivi come "D" per danno, o "F" per sentito ("Felt").

Il Database Macrosismico Italiano 2015 riporta per il comune di Spoleto n° 150 eventi, che sono riportati di seguito:

RELAZIONE GEOLOGICA

Effetti		In occasione del terremoto del					NMDP	Io Mw
Int.	Anno Me Gi Ho Mi Se	Area epicentrale						
7-8	1246	Spoleto				1	7-8 5.33	
8	1277	Spoleto				1	8 5.56	
8	1298 12 01	Monti Reatini				5	9-10 6.26	
5	1352 12 25	Alta Valtiberina				7	9 6.31	
6	1496 06	Valle Umbra				3	5 4.16	
6-7	1529 01 01	Spoleto				1	6-7 4.86	
F	1599 11 06 01 25	Valnerina				20	9 6.07	
NF	1639 10 07	Monti della Laga				39	9-10 6.21	
5	1646 04 28 07	Monti della Laga				10	9 5.90	
6-7	1648 01 01	Spoleto				1	6-7 4.86	
6-7	1655 02 03	Spoleto				2	6-7 4.86	
7	1667	Spoleto				1	7 5.10	
3-4	1672 04 14 15 45	Riminese				92	8 5.59	
F	1702 10 18	Valnerina				5	5 4.16	
7-8	1703 01 14 18	Valnerina				197	11 6.92	
8	1703 01 16 13 30	Appennino laziale-abruzzese				22		
8	1703 02 02 11 05	Aquilano				69	10 6.67	
5-6	1703 06 29 18	Valnerina				3	5-6 4.40	
5	1719 06 27 06 30	Valnerina				16	8 5.59	
5	1730 05 12 05	Valnerina				115	9 6.04	
8	1745 03	Valle Umbra				2	7 5.10	
5	1751 06 11	Ternano				8	7 5.12	
F	1751 07 27 01	Appennino umbro-marchigiano				66	10 6.38	
7-8	1767 06 05 01 30	Valle Umbra				10	7-8 5.45	
5-6	1767 09 02	Valle Umbra				2	5-6 4.40	
NF	1785 05 03 02 30	Appennino umbro-marchigiano				11	7 5.10	
F	1785 10 09 03 15	Monti Reatini				33	8-9 5.76	
4-5	1791 10 11 13 05	Appennino umbro-marchigiano				54	8 5.57	
6	1804 07 28 23	Valle Umbra				7	6-7 4.95	
F	1805 07 26 21	Molise				220	10 6.68	
7	1832 01 13 13	Valle Umbra				101	10 6.43	
5	1832 11 21 21	Appennino umbro-marchigiano				8	6 4.78	
6	1838 01 05 14	Valnerina				8	7 5.10	

RELAZIONE GEOLOGICA

Effetti		In occasione del terremoto del								
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
6	1838	02	14	07	30		Valnerina	24	8	5.48
6	1838	08	05	17	15		Valnerina	10	7	5.19
6	1853	09	22				Spoletto	1	6	4.63
F	1854	01	17	09			Narni	6	5-6	4.71
6	1854	02	12	05			Valle Umbra	21	8	5.57
5	1859	08	22				Valnerina	20	8-9	5.73
6-7	1873	03	12	20	04		Appennino marchigiano	196	8	5.85
4	1875	03	17	23	51		Costa romagnola	144	8	5.74
6-7	1876	05	22	00	30		Spoletto	14	5-6	4.57
6	1878	09	15	07	20		Valle Umbra	34	8	5.46
6	1879	02	23	18	30		Valnerina	15	8	5.59
5-6	1881	03	11	22	50		Valle Umbra	15	5	4.51
5	1882	05	26	04	15		Cascia	16	5	4.45
4	1885	04	10	01	44		Appennino laziale-abruzzese	44	5	4.57
4	1885	06	17	22	34		Monti Reatini	9	7	4.90
F	1891	07	14	05	58		Trevi	9	5	4.16
2	1892	01	22				Colli Albani	81	7	5.14
5	1893	08	02	00	59		Valnerina	84	5-6	4.55
6-7	1895	05	20	15	32	57	Valle Umbra	27	5-6	4.49
4	1895	08	09	17	38	20	Adriatico centrale	103	6	5.11
4-5	1895	08	25	00	17	10	Sellano	13	5	4.25
2	1895	11	01				Campagna romana	94	6-7	4.83
3	1896	01	06	15	59		Narni	13	5	4.08
4	1897	01	19	19	20		Poggiodomo	19	6	4.68
3	1897	12	18	07	24	20	Alta Valtiberina	132	7	5.09
5	1898	06	27	23	38		Reatino	186	8	5.50
3	1898	08	25	16	37	46	Valnerina	67	7	5.03
3-4	1899	04	21	00	57	55	Narni	45	4	3.96
3	1899	07	19	13	18	54	Colli Albani	122	7	5.10
3	1900	05	19	16	55		Arrone	13	6	4.22
2	1901	07	31	10	38	30	Sorano	76	7	5.16
6	1901	08	04	06	52		Valle Umbra	3	5	4.16
4	1902	06	14	14	30	45	Giano dell'Umbria	3	5	4.16
4	1902	10	23	08	51		Reatino	77	6	4.74
3-4	1903	11	02	21	52		Valnerina	33	6	4.81
2	1904	06	20	01	24		Assisi	24	5	4.10
4	1904	09	02	11	21		Maceratese	59	5-6	4.63
3-4	1905	12	09	21	41		Valle Umbra	42	5	4.24
5	1906	02	05	16	34		Valnerina	55	5	4.41
3	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
NF	1909	02	06	08	05		Ternano	12	5	4.16

RELAZIONE GEOLOGICA

Effetti		In occasione del terremoto del							
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io Mw
2-3	1909	08	25	00	22		Crete Senesi	259	7-8 5.34
5-6	1909	10	01	01	08		Spoletino	8	5-6 4.40
4	1910	06	29	13	52		Valnerina	58	7 4.93
6-7	1915	01	13	06	52	43	Marsica	1041	11 7.08
2	1915	03	26	23	37		Perugino	40	6 4.55
F	1916	04	22	04	33		Aquilano	9	6-7 5.09
3	1916	05	17	12	50		Riminese	132	8 5.82
3	1916	11	16	06	35		Alto Reatino	40	8 5.50
3	1917	05	12	15	34	36	Ternano	34	7-8 5.03
4	1918	04	14	01	56		Monti Martani	21	6 4.48
3	1919	06	29	15	06	13	Mugello	565	10 6.38
2-3	1919	09	10	16	57		Val di Paglia	67	7-8 5.36
F	1919	10	22	06	10		Anzio	142	6-7 5.22
4	1922	12	29	12	22	06	Val Roveto	119	6-7 5.24
3	1923	07	12	20	49		Marche meridionali	20	5 4.28
2	1924	01	02	08	55	13	Senigallia	76	7-8 5.48
4	1930	04	07	17	17	18	Monti Sibillini	28	5-6 4.50
4	1930	10	30	07	13		Senigallia	268	8 5.83
3	1938	08	12	02	28	33	Appennino laziale-abruzzese	55	5-6 4.56
4	1940	10	16	13	17		Val di Paglia	106	7-8 5.29
4	1948	12	31	03	32		Monti Reatini	95	8 5.42
5-6	1950	09	05	04	08		Gran Sasso	386	8 5.69
F	1951	08	08	19	56		Gran Sasso	94	7 5.25
NF	1954	03	23	17	55		Collestatte	20	5 4.16
NF	1957	03	12	16	20		Valnerina	62	5 4.16
6-7	1957	07	19	09	04	07	Valle Umbra	58	6-7 4.58
3	1960	02	06	12	00	30	Valle Umbra	11	5 4.18
2-3	1960	02	24	01	51		Appennino umbro-marchigiano	25	5 4.32
3	1960	04	23	11	44		Monti Martani	21	6 4.66
F	1960	07	12	14	08		Monti Martani	35	7-8 4.93
3	1962	08	30	12	10		Valnerina	35	7 5.02
5	1962	10	20	09	27		Valle Umbra	7	7-8 5.34
3	1969	09	26	23	40	39	Teramano	97	5 4.39
4	1970	09	07	14	02	21	Appennino umbro-marchigiano	56	5 4.35
5	1971	04	02	01	43	54	Valnerina	68	6 4.50
4	1972	11	26	16	03		Marche meridionali	73	8 5.48
5	1974	12	02	01	55	15	Valnerina	27	7-8 4.58
F	1976	05	06	20	00	1	Friuli	770	9-10 6.45
5	1978	07	30	05	19	23	Ternano	25	7 4.32
6-7	1979	09	19	21	35	37	Valnerina	694	8-9 5.83
4	1980	02	28	21	04	40	Valnerina	146	6 4.97

RELAZIONE GEOLOGICA

Effetti		In occasione del terremoto del								
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
4	1980	05	24	20	16	04	Monti Sibillini	58	5-6	4.48
NF	1980	11	23	18	34	52	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.81
4-5	1984	04	29	05	02	59	Umbria settentrionale	709	7	5.62
3	1984	05	07	17	50		Monti della Meta	911	8	5.86
NF	1984	05	11	10	41	4	Monti della Meta	342	7	5.47
3	1986	10	13	05	10	0	Monti Sibillini	322	5-6	4.46
NF	1987	07	03	10	21	5	Costa Marchigiana	359	7	5.06
4	1989	12	22	06	48	1	Valle Umbra	114	5	4.44
5-6	1990	09	12	02	59	4	Valle Umbra	62	5-6	4.12
3-4	1993	06	05	19	16	1	Valle del Topino	326	6	4.72
4-5	1996	10	20	19	06	5	Appennino laziale-abruzzese	100	5	4.36
5	1997	05	12	13	50	1	Monti Martani	57	6	4.72
NF	1997	09	07	23	28	0	Appennino umbro-marchigiano	57	5-6	4.19
6	1997	09	26	00	33	1	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66
6	1997	09	26	09	40	0	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
5-6	1997	10	03	08	55	2	Appennino umbro-marchigiano	490		5.22
4-5	1997	10	06	23	24	5	Appennino umbro-marchigiano	437		5.47
5	1997	10	14	15	23	1	Valnerina	786		5.62
3-4	1997	10	23	08	58	4	Appennino umbro-marchigiano	56		3.86
4-5	1997	11	09	19	07	3	Valnerina	180		4.87
3	1998	02	07	00	59	4	Appennino umbro-marchigiano	62		4.41
NF	1998	02	16	13	45	19	Valnerina	33		3.75
4	1998	03	21	16	45	0	Appennino umbro-marchigiano	141		5.00
4-5	1998	03	26	16	26	1	Appennino umbro-marchigiano	409		5.26
NF	1998	04	05	15	52	2	Appennino umbro-marchigiano	395		4.78
NF	1998	08	15	05	18	0	Reatino	233	5-6	4.42
2-3	1999	10	10	15	35	5	Alto Reatino	79	4-5	4.21
4	1999	11	29	03	20	3	Monti della Laga	62	5-6	4.15
NF	2000	09	02	05	17	0	Appennino umbro-marchigiano	115	5	4.40
NF	2000	12	16	07	31	0	Ternano	129	5-6	4.29
4-5	2005	12	15	13	28	3	Val Nerina	350	5	4.14
F	2009	12	15	13	11	5	Valle del Tevere	26	7	4.23
5	2016	08	24	01	36	32	Monti della Laga	221	10	6.18
5	2016	10	30	06	40	1	Valnerina	379		6.61
F	2017	01	18	10	14	9	Aquilano	280		5.70

RELAZIONE GEOLOGICA

Le intensità seguono la normalizzazione effettuata dal DBMI15 che seguono i codici riportati nelle tabelle A e B a seguire.

Codice	Val. ass.	Descrizione	MDP
RS	-	Registrazione strumentale. Osservazioni scartate	-
NR	-	Non riportato (<i>Not Reported</i>). Osservazioni scartate	-
W	-	Onde anomale, tsunami (<i>sea Waves</i>). Oss. scartate	-
E	-	Effetti ambientali (<i>Environmental effects</i>). Oss. scartate	-
G	0.2	Indicazione generica di danno a un sito	5
NF	1	Non percepito (<i>Not Felt</i>)	24012
NC	1.8	Non classificato (<i>Not Classified</i>)	111
SF	2.9	Percepito leggermente (<i>Slightly Felt</i>)	49
F	3.9	Percepito (<i>Felt</i>)	5146
HF	5.1	Percepito distintamente (<i>Highly Felt</i>)	118
SD	5.6	Danno leggero (<i>Slight Damage</i>)	22
D	6.4	Danno (<i>Damage</i>)	679
HD	8.6	Danno grave (<i>Heavy Damage</i>)	184

Tabella 5: Normalizzazione delle intensità originali per tipologia di località particolari.

Tra parentesi è indicato il valore numerico associato ad uso interno di DBMI.

Intensità originale	1	1-2	2	2-3	3	3-4	4	4-5	5	5-6	MDP
no SC											91116
AL											106
CQ											32
DL	NF	1-2	2	2-3	3	3-4	4	4-5	5	5-6	53
SS	(1)	(1.5)	(2)	(2.5)	(3)	(3.5)	(4)	(4.5)	(5)	(5.5)	241
MS											3603
UL											43
IB	NF			SF			F		HF	SD	87
TE	(1)			(2.9)			(3.9)		(5.1)	(5.6)	28

Intensità originale	6	6-7	7	7-8	8	8-9	9	9-10	10	10-11	MDP
no SC											20135
AL											42
CQ											12
DL	6	6-7	7	7-8	8	8-9	9	9-10	10	10-11	146
SS	(6)	(6.5)	(7)	(7.5)	(8)	(8.5)	(9)	(9.5)	(10)	(10.5)	207
MS											517
UL											33
IB			D							HD	77
TE			(6.4)							(8.6)	25

Tabella 6: Normalizzazione delle intensità originali per tipologia di località particolari.

Tra parentesi è indicato il valore numerico associato ad uso interno di DBMI.

Nel grafico sottostante si riportano gli andamenti delle intensità degli eventi sismici nel tempo, il grafico considera tutti i terremoti con intensità comprese tra 3 e 8 per un arco temporale dal 1000 al 2020.

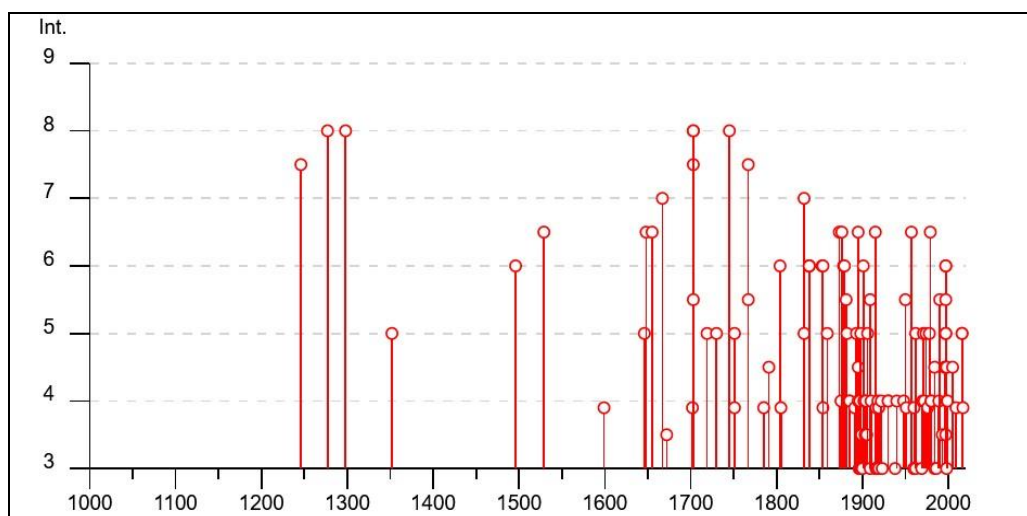
RELAZIONE GEOLOGICA


Figura 10- Grafico di distribuzione tempo-intensità degli eventi sismici rilevati per il comune di Spoleto (fonte INGV)

Dal Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15) dell'INGV-Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, emerge che le massime intensità sono state raggiunte dai seguenti eventi sismici:

- 1277- Spoleto: caratterizzato da $M_w = 5,57$ ed intensità epicentrale(I_0)=8
- Dicembre 1298- Monti Reatini : caratterizzato da $M_w = 6,60$ ed intensità epicentrale(I_0)=9
- Febbraio 1703- Aquilano: caratterizzato da $M_w = 6,70$ ed intensità epicentrale(I_0)=10
- Marzo 1745-Valle Umbra: caratterizzato da $M_w = 5,36$ ed intensità epicentrale(I_0)=7

Oltre ai suddetti eventi si riportano di seguito, i principali terremoti storici dell'Appennino Umbro-

Marchigiano, che hanno coinvolto indirettamente anche il territorio d'interesse:

- Il **30 aprile 1279** l'Appennino umbro-marchigiano fu interessato da un terremoto che precedette di poche ore un secondo evento distruttivo verificatosi nell'Appennino toscoemiliano. Alcuni cronisti medievali hanno descritto questi eventi come un unico fenomeno abbracciante gran parte dell'Italia centrale. L'area di danneggiamento del terremoto umbro-marchigiano fu comunque ampia. Fonti coeve e attendibili attestano che due terzi degli edifici di Camerino furono distrutti mentre Cagli, Fabriano, Matelica, San Severino Marche, Cingoli, Nocera, Foligno e Spello rimasero "diroccate". Tutti i castelli (ossia insediamenti minori cinti da mura) nelle montagne tra Nocera e Camerino "patirono molti danni".
- Il terremoto del **dicembre 1328** a Norcia fu causa di crolli di gran parte degli edifici e delle mura.
- L'evento del **5 novembre 1599** fu preceduto da lievi scosse avvertite a Cascia dal principio di ottobre e da una scossa che lesionò parecchi edifici il 4 novembre. Nella

RELAZIONE GEOLOGICA

notte 5-6 novembre la scossa maggiore causò a Cascia il crollo di case e danni gravi a tutti gli altri edifici.

- I terremoti del **gennaio-febbraio 1703**, localizzati in Umbria e Abruzzo sono per l'Italia centrale una delle più significative sequenze sismiche dell'ultimo millennio. Gli eventi maggiori si ebbero il 14 e 16 gennaio e il 2 febbraio 1703. L'evento del 14 gennaio interessò con i massimi effetti una vasta area dell'Umbria e del Lazio all'incirca compresa tra Norcia e Amatrice.
- La mattina del **27 giugno 1719** una scossa di terremoto interessò Norcia e Cascia dove si aprirono ampie fenditure negli edifici nuovi, costruiti dopo i terremoti del 1703.

Quello del **17 aprile 1747** potrebbe essere il principale in una sequenza di eventi verificatisi tra il 26 gennaio e il 20 dicembre 1747 in un vasto territorio compreso tra Nocera Umbra e Senigallia. Esso causò crolli e danni abbastanza gravi nel territorio della diocesi di Nocera Umbra e nel Fabrianese (Nocera Umbra e località minori del Nocerino, Gualdo Tadino, Sigillo, Belvedere, Campodonico, Fabriano).

- Gli eventi del **13 gennaio 1832** furono i maggiori in una sequenza di scosse che interessarono l'area di Foligno a partire dal 27 ottobre 1831. Il primo evento causò a Foligno danni di media entità e fu seguito da leggere repliche nei giorni seguenti. Tali danni furono aggravati il 6 novembre 1831 da una forte scossa seguita da repliche minori.

Il terremoto della mattina del **14 febbraio 1838** si verificò nell'area compresa tra Sellano, Acera e Cerreto di Spoleto, e in due località situate nell'area montuosa ad est di Foligno (Verchiano e Val Lupo) fino a Spoleto.

- Il terremoto del **19 settembre 1979** colpì gravemente alcune piccole località montane della Valnerina (Civita, Chiavano, Castel Santa Maria e Trimezzo). L'area di danno medio grave si estese tra Leonessa, Accumoli, Visso, Sellano e Poggiodomo. A Norcia si ebbero alcuni crolli parziali e danni a moltissimi edifici; a Cascia molte case furono danneggiate anche gravemente, e si ebbero alcuni crolli parziali. L'evento fu avvertito in numerose località umbre, marchigiane, abruzzesi e laziali, e fu seguito da numerose repliche.
- Il terremoto del **26 settembre 1997** colpì gravemente l'Umbria e le Marche e moltissime località montane dell'Appennino Umbro Marchigiano con scosse disastrose e migliaia di repliche che provocarono crolli di edifici e paesi interi rese inagibili (Assisi, Nocera Umbra, Colfiorito, Verchiano, Sellano, Gualdo Tadino e Foligno. L'area di danno grave si estese sull'intero appennino da Spoleto a Gualdo Tadino. L'evento ha causato danni in numerose località umbre e marchigiane.

Dallo studio delle sequenze sismiche storiche si evince che la sismicità in Umbria si è principalmente manifestata nei settori orientali e nord-orientali del territorio raggiungendo intensità MCS (Mercalli-Cancani- Sieberg) anche pari a 10 (Norcia 1703, Gualdo Tadino 1751) e Magnitudo (Ms [Magnitudo onde di superficie]) oltre 6,5, con una frequenza di terremoti al di sopra del 7° grado MCS maggiore od uguale a 20 eventi per secolo negli ultimi tre secoli e complessivamente, per tale periodo, con 15 sismi di intensità maggiore od uguale

all'8° grado MCS.

L'area della catena montuosa dell'Appennino Umbro Marchigiano e dei Monti Martani è caratterizzata da una sismicità diffusa con sequenze sismiche frequenti.

I recenti eventi sismici hanno evidenziato in maniera inequivocabile che la catena dei monti Martani e dell'Appennino Umbro-Marchigiano è in una fase di deformazione sismica di tipo distensivo, in grado di riattivare sistemi dislocativi tali da produrre un elevato numero di repliche. Alla luce delle conoscenze acquisite dallo studio delle diverse sequenze sismiche (Norcia 79 – Gubbio 84 – Colfiorito 97) si delinea un meccanismo di attivazione che interessa strutture sismogenetiche poste all'interno della struttura principale dei Monti Martani e dell'Appennino Umbro-Marchigiano, il cui campo di sforzo regionale è di tipo estensione in senso antiappenninico.

Le profondità ipocentrali sono comprese entro i primi 15 Km della crosta e le sequenze sismiche mostrano una concentrazione degli eventi in zone diverse che si sono attivate in modo distinto nel tempo.

La "Faglia dei Monti Martani" che è ubicata ad ovest del tracciato di progetto, è uno dei principali lineamenti sismogenetici dell'area a carattere estensionale, ed è responsabile della recente attività geologica nonché l'attività sismica registrata negli ultimi anni lungo questo settore.

8.4 Pericolosità sismica di base

La pericolosità sismica è da intendersi come "grado di probabilità che si verifichi, in una determinata area ed in un determinato periodo di tempo, un evento sismico dannoso con l'insieme degli effetti geologici e geofisici ad esso connessi, senza alcun riguardo per le attività umane". L'analisi del livello di pericolosità distingue quindi due fasi: la definizione della pericolosità sismica di base, in condizioni di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A), in assenza di discontinuità stratigrafiche e/o morfologiche; l'analisi della pericolosità locale, ossia della modificazione locale dello scuotimento sismico prodotta dalle reali caratteristiche del terreno, dalla successione litostratigrafia locale, dalle condizioni morfologiche, unitamente alla possibilità di sviluppo di effetti cosismici: fagliazione superficiale, fenomeni di densificazione, fenomeni di liquefazione, cedimenti differenziali, instabilità dei pendii e frane indotte dal sisma, movimenti gravitativi profondi, tsunami, ecc.

Negli ultimi anni si sono succeduti provvedimenti normativi e amministrativi per la definizione delle caratteristiche di pericolosità sismica locale.

Fino al 2003, la classificazione sismica del territorio nazionale era riconducibile alla mappa di classificazione sismica prodotta dal Gruppo di Lavoro (GdL, 1999), istituito dal Servizio Sismico Nazionale su indicazione della Commissione Grandi Rischi della Protezione Civile. L'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri OPCM 3274/2003 rappresenta una prima risposta alla necessità di aggiornare gli strumenti normativi per la riduzione del rischio sismico. Con tale strumento si stabiliscono i criteri per l'individuazione delle zone sismiche

RELAZIONE GEOLOGICA

e la nuova classificazione sismica dei Comuni italiani, successivamente integrati e aggiornati dall’OPCM 3519/2006.

L’intero territorio nazionale è stato suddiviso in 4 zone sulla base di un differente valore dell’accelerazione di picco a_g su terreno a comportamento rigido, derivante da studi predisposti dall’INGV – DPC. Gli intervalli di accelerazione (a_g) con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni sono stati rapportati alle 4 zone sismiche indicate dall’OPCM 3519/2006. Tale classificazione è basata su un’approssimazione dei valori e della distribuzione del parametro a_g secondo i limiti amministrativi (criterio “zona dipendente”).

A ciascuna zona è attribuito un valore di pericolosità di base espressa in termini di accelerazione massima su suolo rigido (a_g); tale valore di pericolosità di base non ha però influenza sulla progettazione.

Di seguito si riporta la carta di pericolosità sismica del territorio nazionale:

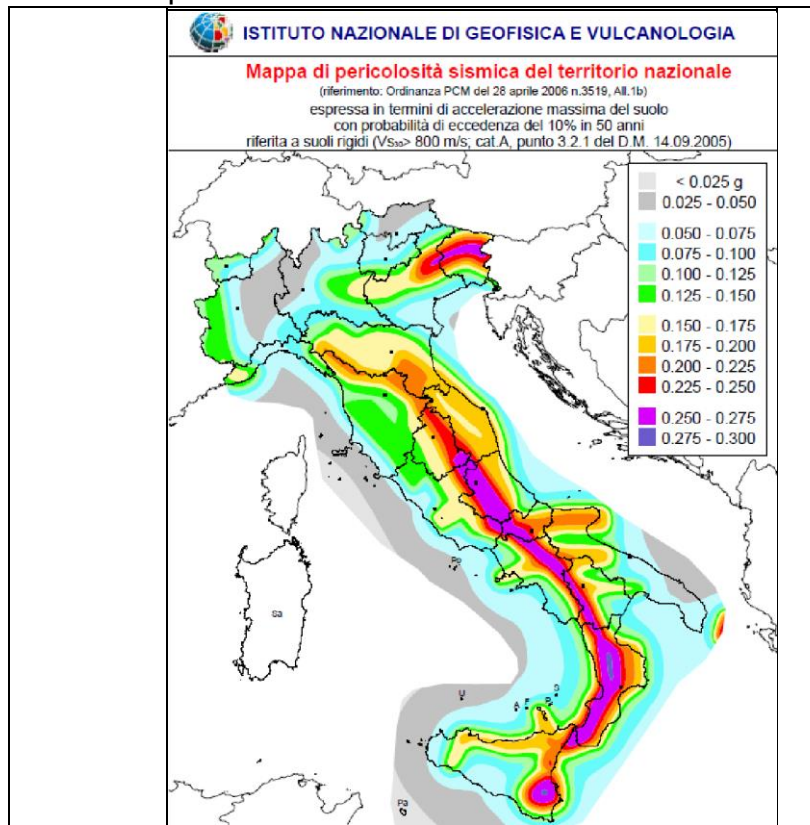


Figura 11 – Carta di pericolosità sismica del territorio nazionale (fonte INGV).

La mappa delle zone sismiche del 2003, suddivide il territorio italiano in quattro zone sismiche sulla base del valore dell’accelerazione orizzontale massima (a_g) su suolo rigido o pianeggiante, che ha una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni.

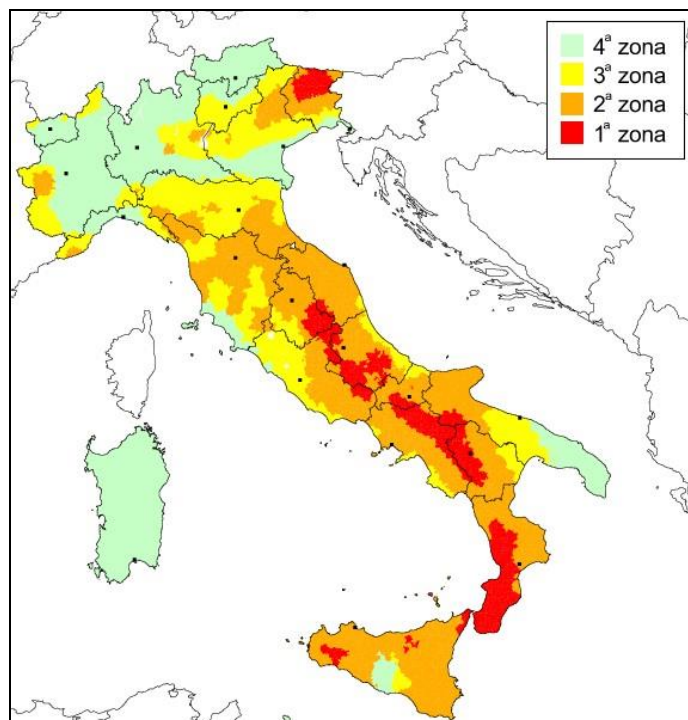
RELAZIONE GEOLOGICA


Figura 12 – Mappa delle zone sismiche del territorio nazionale del 2003 (fonte INGV).

Zona sismica	Descrizione
Zona 1	É la zona piú pericolosa, dove possono verificarsi forti terremoti.
Zona 2	Nei comuni inseriti in questa zona possono verificarsi terremoti abbastanza forti.
Zona 3	I Comuni interessati in questa zona possono essere soggetti a scuotimenti modesti.
Zona 4	É la meno pericolosa. Nei comuni inseriti in questa zona le possibilità di danni sismici sono basse.

Tabella 7: Pericolosità zone sismiche

I valori di accelerazione orizzontale massima (a_g) per le varie zone sismiche sono riportate nella tabella seguente:

Zona Sismica	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (a_g)
1	$a_g > 0.25$
2	$0.15 < a_g \leq 0.25$
3	$0.05 < a_g \leq 0.15$
4	$a_g \leq 0.05$

Tabella 8: Accelerazione zone sismiche

RELAZIONE GEOLOGICA

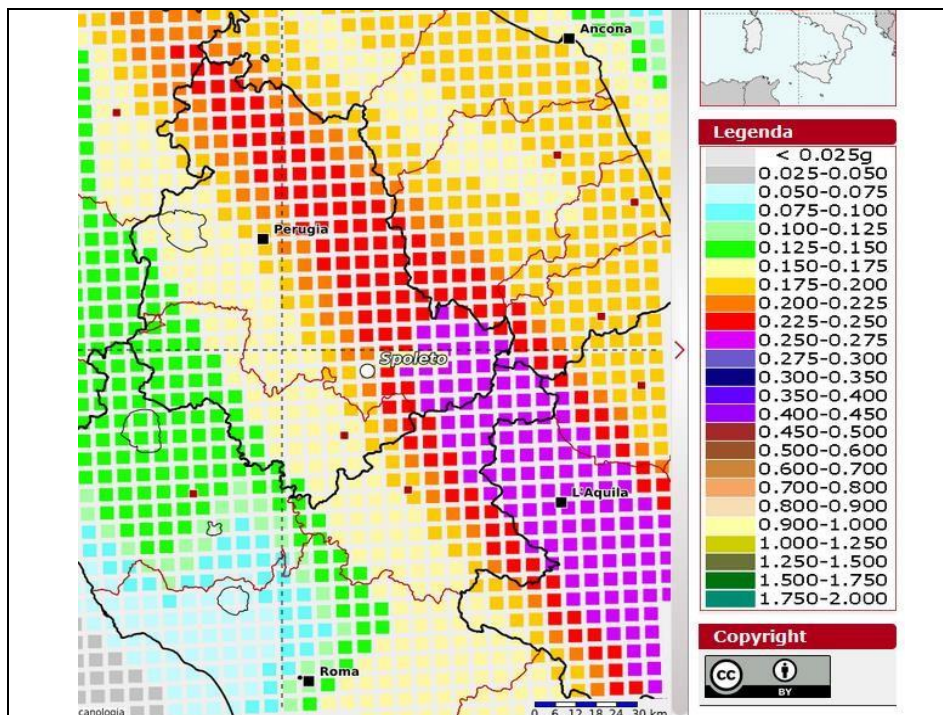
Per quanto riguarda la classificazione sismica, l'Ordinanza P.C.M. n° 3274 del 20.03.2003 e s.i e m. aveva definito i criteri per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle zone sismiche da parte delle Regioni, che la Giunta Regionale Umbra ha recepito emanando l'atto n° 852 del 18.06.2003

“Approvazione classificazione sismica del territorio regionale dell’Umbria” e la successiva D.G.R.n° 1111 del 18 Settembre 2012 “Aggiornamento della classificazione sismica del territorio regionale dell’Umbria”, inserendo il **Comune di Spoleto nella Zona Sismica 1.**

Il comune di Acquasparta, sempre secondo la D.G.R.n° 1111 del 18 Settembre 2012 è invece classificato in **Zona sismica 2.**

Ai fine della progettazione delle opere, applicando il criterio di maggiore cautelatività si prende come riferimento la zona sismica 1.

Come si evince anche dalla mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (di cui si riporta un estratto a seguire) estrapolata per l’area d’interesse, le accelerazioni nel territorio interessato dal tracciato di progetto variano tra 0,225 g e 0.175.



RELAZIONE GEOLOGICA

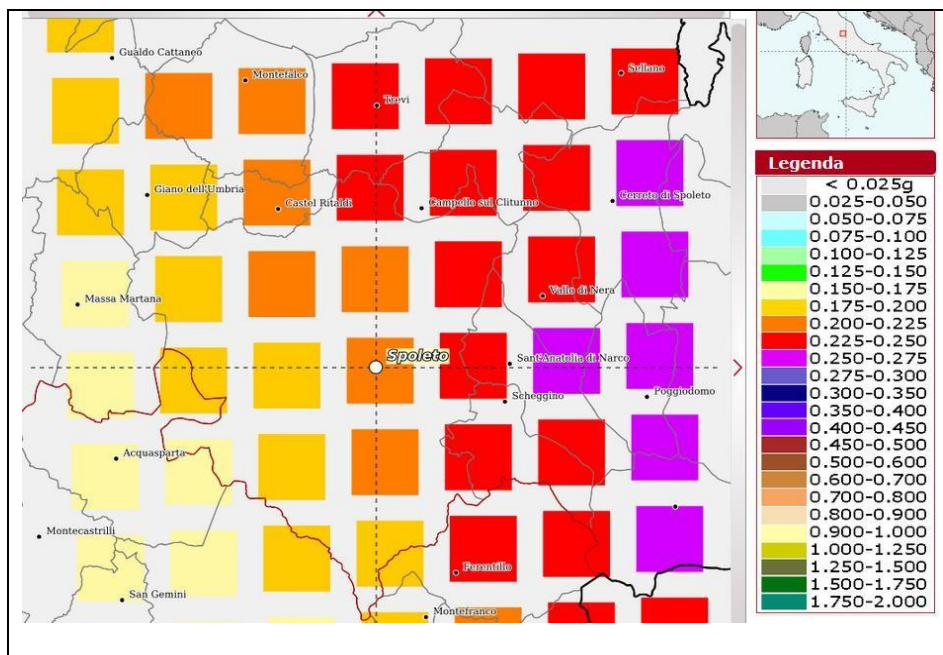
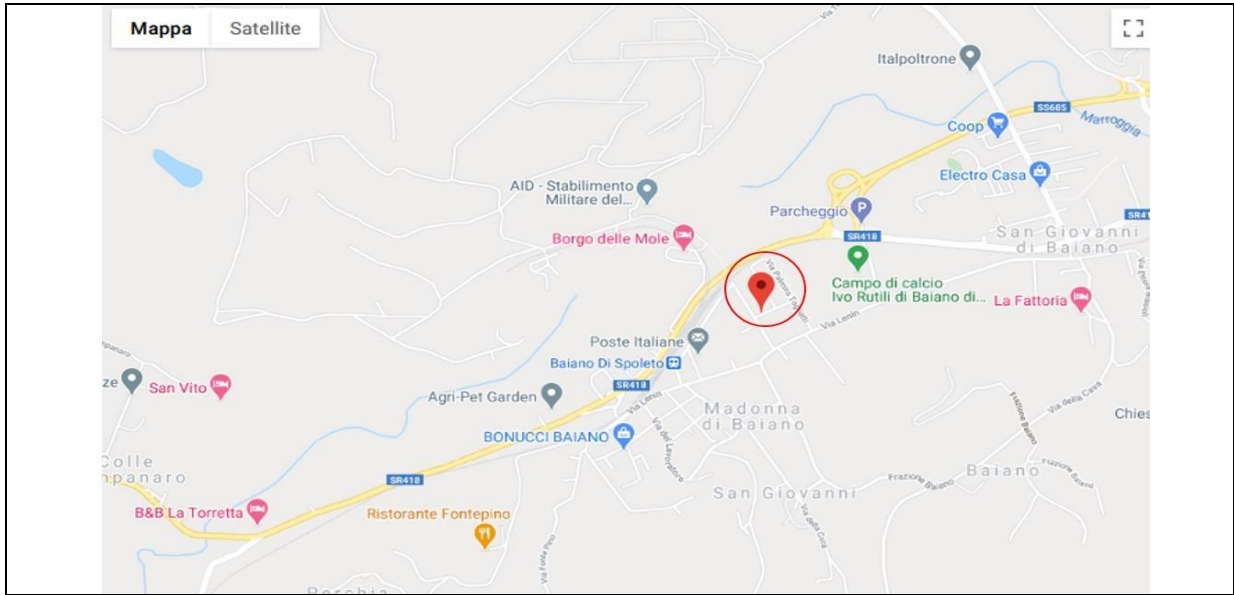


Figura 13 Mappa di pericolosità sismica per la zona d'interesse (fonte INGV)

Il valore dell' accelerazione orizzontale massima (a_g) su suolo rigido o pianeggiante, che ha una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni è stata ricavata attraverso il programma “GeoStru- gestione parametri sismici”.

Di seguito si riportano i dati per l'area d'interesse, in particolare il tracciato attraversa due territori comunali (Spoleto ed Acquasparta) pertanto per individuare l'accelerazione del sito sono stati presi in considerazione due punti significativi, il primo nei pressi di Madonna di Baiano e il secondo nell'area terminale della viabilità di progetto nei pressi dell'innesto con la S.R. n° 418.

RELAZIONE GEOLOGICA



Stati limite					Coefficienti sismici				
<p>Classe Edificio</p> <p>Il. Affollamento normale. Assenza di funz. pubbliche e sociali...</p> <p>Vita Normale 50</p> <p>Interpolazione Media ponderata</p> <p>CU = 1</p>					<p>Tipo Muri di sostegno NTC 2018</p> <p>Muri di sostegno che non sono in grado di subire spostamenti:</p> <p>H (m) 1 us (m) 0.1</p> <p>Cat. Sottosuolo C</p> <p>Cat. Topografica TI</p>				
Stato Limite	Tr [anni]	a_p [g]	F_0	T_c^* [s]					
Operatività (SLO)	30	0.064	2.467	0.269					
Danno (SLD)	50	0.079	2.466	0.280					
Salvaguardia vita (SLV)	475	0.190	2.427	0.319					
Prevenzione collasso (SLC)	975	0.238	2.466	0.331					
Periodo di riferimento per l'azione sismica	50								
					SLO	SLD	SLV	SLC	
					SS Amplificazione stratigrafica	1,50	1,50	1,42	1,35
					CC Coeff. funz categoria	1,62	1,60	1,53	1,51
					ST Amplificazione topografica	1,00	1,00	1,00	1,00

Figura 14 -Dati di accelerazione Madonna di Baiano (geostru)

RELAZIONE GEOLOGICA

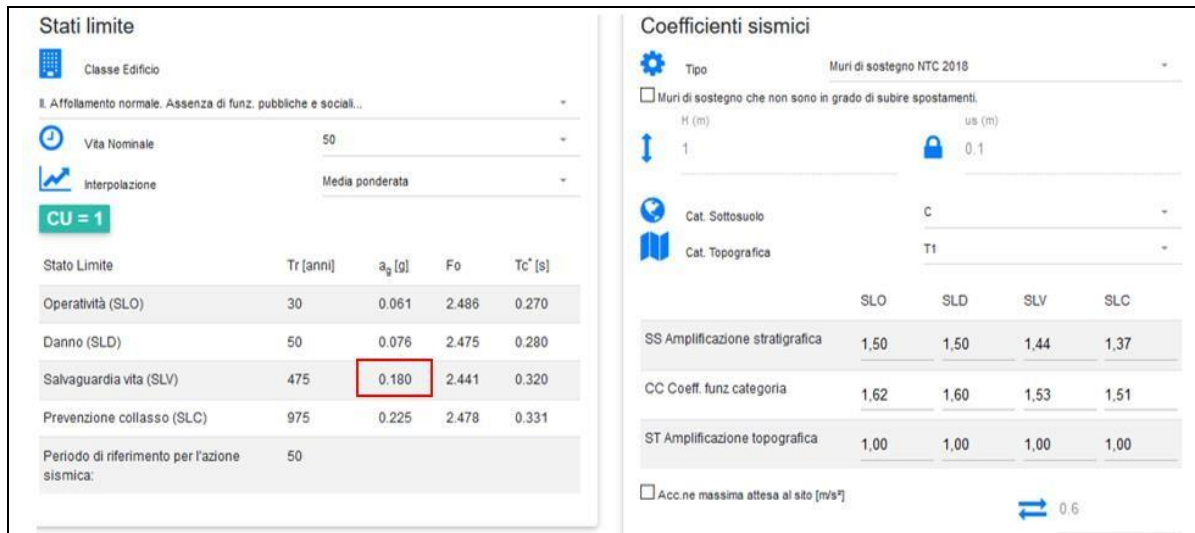
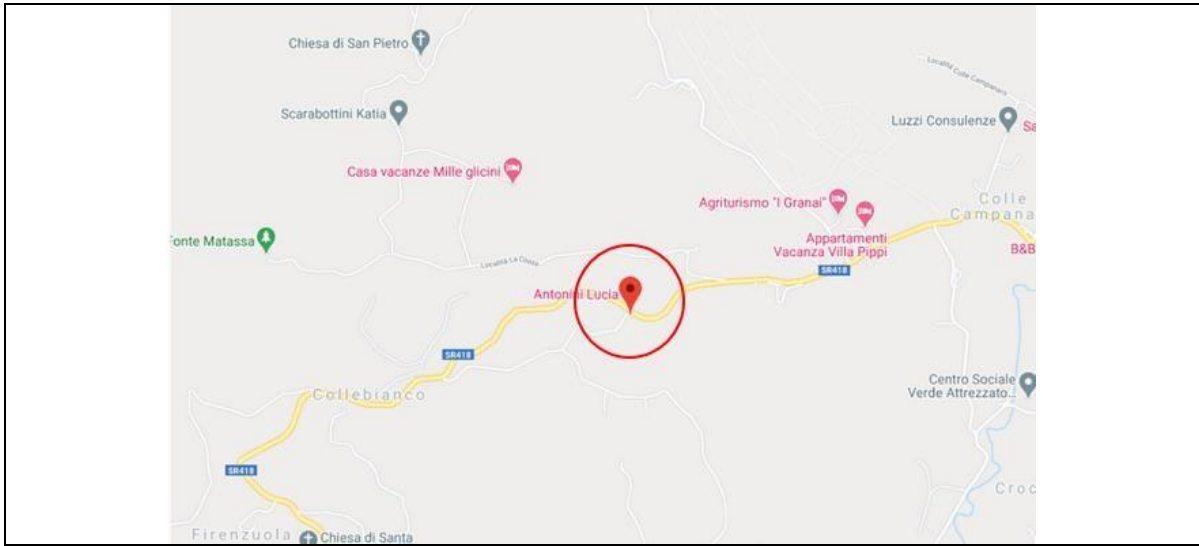


Figura 15 -Dati di accelerazione sismica innesto S.R. n°418 (GEOSTRU)

L'accelerazione massima attesa al sito a_{max} , con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), è data da:

$$a_{max} = a_g * S$$

dove $S = S_T * S_s$

dove $a_g = 0.190$ (loc. Madonna di Baiano) $a_g = 0,180$ (innesto S.R. n°418) $S_s = 1,42$ (loc. Madonna di Baiano)

$S_s = 1,44$ (innesto S.R. n°418)

e $S_T = 1,0$

$$a_{max} = 0,190 * 1,42 * 1,0 = 0,26 \text{ loc. Madonna di Baiano}$$

RELAZIONE GEOLOGICA

$$a_{max} = 0,180 * 1,44 * 1,0 = 0,25 \text{ (innesto S.R. n°418)}$$

Per maggiore cautelatività si assume come accelerazione di progetto **$a_{max}=0,26$**

Infine attraverso il processo di disaggregazione è possibile valutare i contributi di diverse sorgenti sismiche alla pericolosità sismica di un sito. La forma più comune di disaggregazione è quella bidimensionale in magnitudo e distanza (M-R) che permette di definire il contributo di sorgenti sismogenetiche a distanza R capaci di generare terremoti di magnitudo M. Espresso in altri termini il processo di disaggregazione in M-R fornisce il terremoto che domina lo scenario di pericolosità (terremoto di scenario) inteso come l'evento di magnitudo M a distanza R dal sito oggetto di studio che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica del sito stesso. Di seguito si riporta la mappa e il grafico di disaggregazione ricavati per l'area di progetto (Comune di Spoleto).

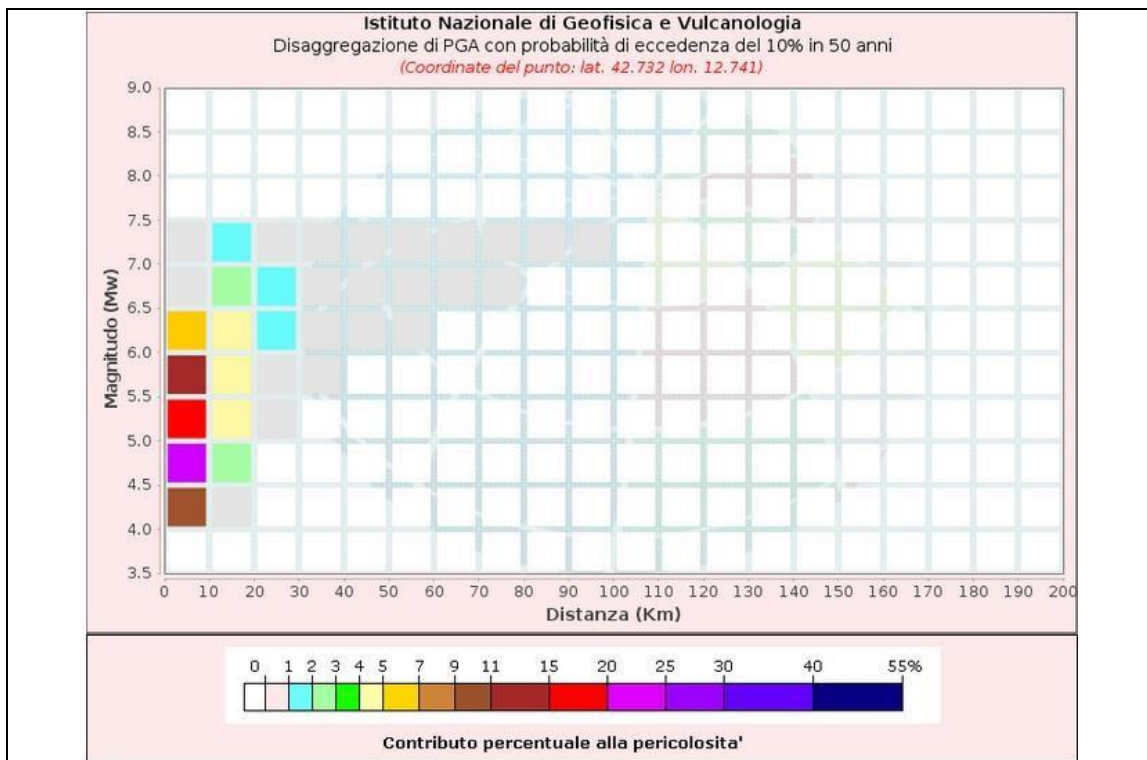


Tabella 9: Grafico di Disaggregazione

RELAZIONE GEOLOGICA

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto: lat. 42.732 lon. 12.741)											
Distanza (Km)	Magnitudo (Mw)										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.0000	10.9000	24.6000	18.8000	11.8000	6.1900	0.9180	0.3790	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	0.3080	2.0900	4.0100	4.7400	4.4900	2.4400	1.2800	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.0000	0.0000	0.1870	0.8800	1.4600	1.2900	0.8950	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0639	0.4100	0.5750	0.5040	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0649	0.2250	0.2510	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0029	0.0512	0.0846	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0088	0.0332	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0113	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Valori Medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.37	8.15	1.02

Figura 16 –Grafici di disaggregazione per l'area d'interesse (comune di Spoleto)- (fonte INGV).

Come si evince dai risultati del processo di disaggregazione ricavati per il comune di Spoleto il terremoto che domina lo scenario di pericolosità presenta magnitudo $M=5,37$ ad una distanza R dal sito di circa 8,15 km.

8.5 Velocità sismica equivalente $V_{s,eq}$ - Categoria di sottosuolo (NTC 2018)

Per la definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale, si valuta mediante specifiche analisi (cap. 7.11.3 delle **NTC 2018**), oppure si può fare riferimento all'approccio semplificato, che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s .

Nello specifico, ai fini della classificazione del sottosuolo, con le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, si fa riferimento alla $V_{s,eq}$, (NTC 2108) velocità equivalente delle onde di taglio, e non più alla $V_{s,30}$ (NTC 2008).

RELAZIONE GEOLOGICA

La velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dalla seguente espressione:

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

con

h_i = spessore dello strato i -esimo;

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

N = numero di strati;

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

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato viene riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali alla testa dei pali.

Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità viene riferita al piano di imposta della fondazione.

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

RELAZIONE GEOLOGICA

Le categorie di sottosuolo per le quali è possibile il ricorso all'approccio semplificato, secondo le NTC 2018; nella determinazione della risposta sismica locale sono le seguenti:

Categoria	Descrizione
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 fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 10: Categorie di sottosuolo (NTC 2018)

Per le opere di progetto, non essendo state eseguite prove atte a determinare le velocità medie delle onde S, si è proceduto, come previsto dal NTC alla determinazione della categoria del suolo a partire dalle prove SPT eseguite nei fori di sondaggio e da correlazioni fra le onde V_p desunte dalle sismiche a rifrazione e le velocità delle onde sismiche.

In particolare le valutazioni sono state effettuate considerando il substrato a 30 m di profondità ($H=30m$) e pertanto in accordo con le NTC 2018 risulta:

$$V_{s,eq}=V_{s,30}.$$

Per la zona delle galleria artificiali, avendo stimato che nelle stese sismiche a rifrazione si presenti e le Down Hole eseguite mediamente la situazione riportata in tabella si è considerato per le fondazioni terreni classificabili cautelativamente in categoria "B".

RELAZIONE GEOLOGICA

Spessori strati	Litotipo	Spessore strato in metri	Velocità onda P misurata in sito (m/s)	Velocità onda S misurata in sito (m/s)	Rapporto spessore velocità	Tempi parziali in secondi (onda S misurata)
h ₁	Suolo	1	200,00	167,00	h ₁ /V ₁	0,006
h ₂	Marne argillose alt.	5	800,00	650,00	h ₂ /V ₂	0,008
h ₃	Marne argillose	10	1200,00	780,00	h ₃ /V ₃	0,013
h ₄	siltiti marnose	14	2200,00	1200,00	h ₄ /V ₄	0,012
h _{totale}		30			S h _i /V _i	0,038

By geol.giorgioaprile@libero.it

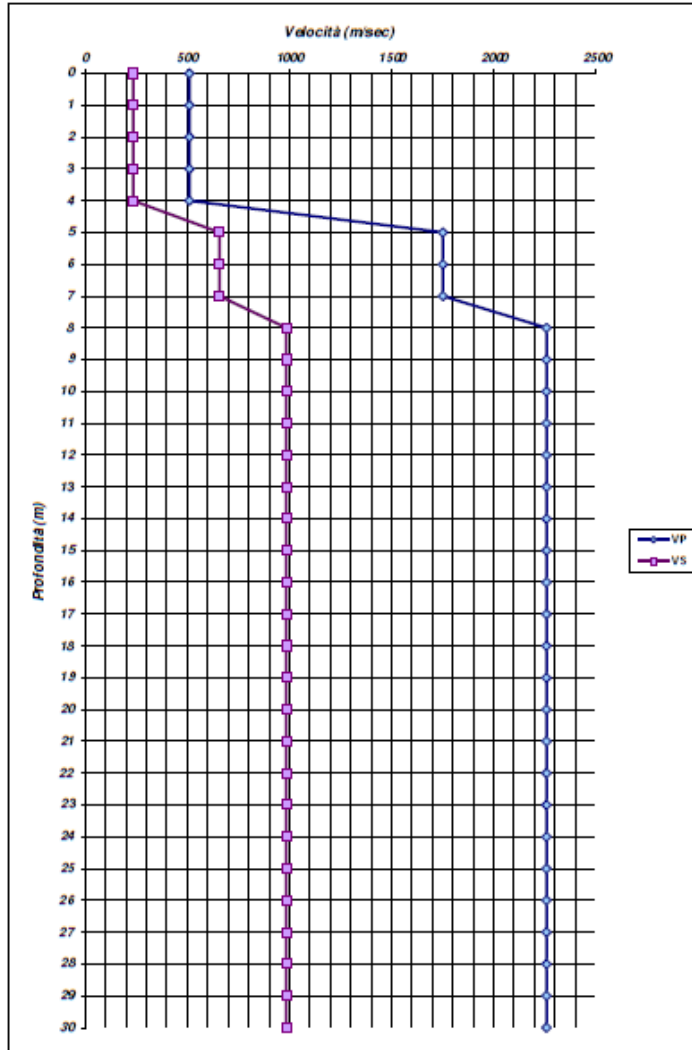
V_{S30} (misurata)	=	30 /	0,038	=	786,01	m/s
-----------------------------------	----------	-------------	--------------	----------	---------------	------------

Down Hole sondaggio S2DH

Sismostrato	Profondità (m)	Spessore (m)	V _p
1	3	3	509.74
2	7	4	1751.01
3	30	23	2258.36

Sismostrato	Profondità (m)	Spessore (m)	V _s
1	3	3	234.16
2	7	4	657.51
3	30	23	984.25

RELAZIONE GEOLOGICA



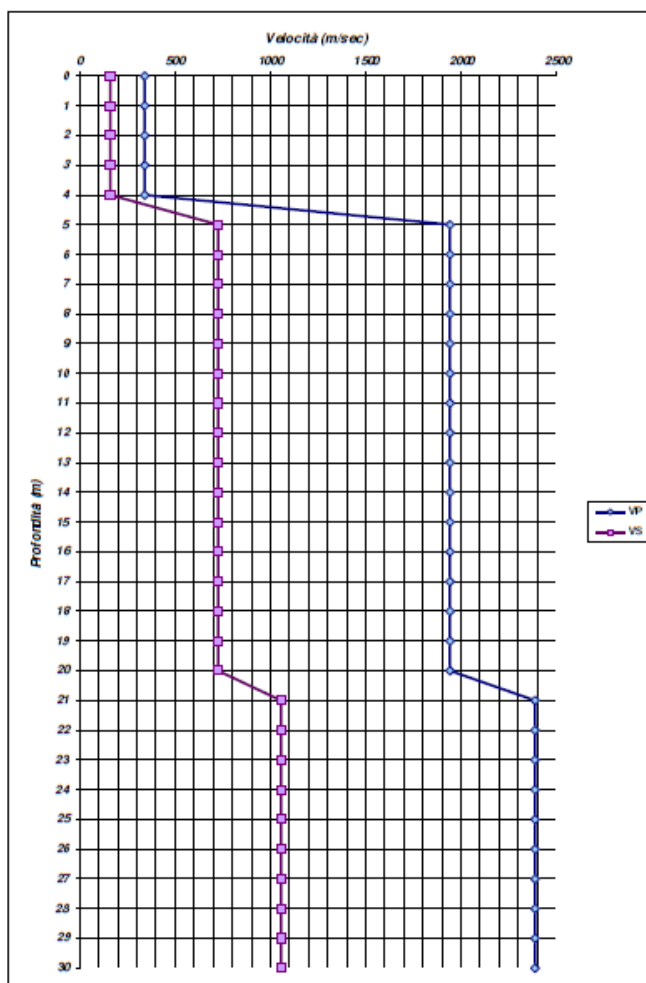
Calcolo Vs-eq (m/s)		
SPESSORI (h)	Vs	hi/Vs
3	234.16	0.0128118
4	657.51	0.0060836
23	984.25	0.023368
	Somma	0.0188954
	Vs-eq	370.46

RELAZIONE GEOLOGICA

Down Hole sondaggio S3DH

Sinistrato	Profondità (m)	Spessore (m)	Vp
1	3	3	340.44
2	20	17	1941.75
3	30	10	2387.77

Sinistrato	Profondità (m)	Spessore (m)	Vs
1	3	3	160.19
2	20	17	725.32
3	30	10	1055.19



RELAZIONE GEOLOGICA

Calcolo Vs-eq (m/s)		
Spessori (h)	Vs	h/Vs
3	160.19	0.0187278
17	725.32	0.0234379
10	1055.19	0.009477
	Somma	0.0421657
	Vs-eq	474.32

Il calcolo delle VS,eq (m/s) delle indagini sismiche Down-Hole eseguite in corrispondenza delle gallerie artificiali fa riferimento alla seguente equazione:

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

con:

h_i spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Si ottengono così le seguenti VS,eq (m/s):

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S2-DH"

V_{S,eq} = 370.46 m/s

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S3-DH"

V_{S,eq} = 474.32 m/s

RELAZIONE GEOLOGICA

Per la zona dei viadotti, avendo le prove SPT dato tutte valori compresi nell'intervallo $15 < N_{spt} < 50$ e si è considerato per le fondazioni terreni classificabili cautelativamente in categoria "C".

Al fine di caratterizzare in modo specifico i terreni interessati dalle opere di progetto e definire un modello sismostratigrafico di dettaglio valutando direttamente la velocità delle onde S (V_s) e delle onde P (V_p) sono state previste delle indagini geofisiche quali:

- N. Indagine sismica in foro del tipo Down Hole;
- N. prospezioni sismiche dl tipo Masw;
- N. 3 prove HVSR;
- N. 2 Stese sismiche del tipo Tomografia sismica a rifrazione.

RELAZIONE GEOLOGICA

	Z _{sup}	Z _{inf}	Prondità media	gamma	sigv	N1	N2	N3	NSPT	phi'	s1	s2	E	
	(m)	(m)	(m)	(kN/m3)	(kPa)	(-)	(-)	(-)	(-)	(deg)	(-)	(-)	(MPa)	
SPT S8/03	3.20	3.65	3.43	20.00	68.50	3	7	15	22	45.0	0.517	7.46	18.83	
SPT S8/03	5.50	5.95	5.73	20.00	114.50	9	13	22	35	46.0	0.517	7.46	25.56	
SPT S9/03	3.00	3.45	3.23	20.00	64.50	7	11	18	29	47.0	0.517	7.46	22.45	
SPT S9/03	6.20	6.65	6.43	20.00	128.50	19	22	27	49	47.0	0.517	7.46	32.79	
SPT S9/03	9.80	10.25	10.03	20.00	200.50	17	24	55	79	48.0	0.517	7.46	48.30	
SPT S3/09	1.70	2.15	1.93	20.00	38.50	4	6	8	14	44.0	0.517	7.46	14.70	
SPT S3/09	3.20	3.65	3.43	20.00	68.50	4	12	18	30	47.0	0.517	7.46	22.97	
SPT S3/09	4.70	5.15	4.93	20.00	98.50	16	19	24	43	47.0	0.517	7.46	29.69	
SPT S3/09	6.00	6.45	6.23	20.00	124.50	22	31	26	57	47.0	0.517	7.46	36.93	
SPT S3/09	7.50	7.95	7.73	20.00	154.50	19	35	30	65	48.0	0.517	7.46	41.07	
SPT S3/09	9.00	9.45	9.23	20.00	184.50	RIF	-	-	RIF					
SPT S4/09	5.00	5.45	5.23	20.00	104.50	21	13	13	26	44.0	0.517	7.46	20.90	
SPT S4/09	10.00	10.45	10.23	20.00	204.50	33	41	42	83	48	0.517	7.46	50.37	
SPT S4/09	15.00	15.45	15.23	20.00	304.50	RIF	-	-	RIF					
SPT S5/09	1.70	2.15	1.93	20.00	38.50	15	20	12	32	49.0	0.517	7.46	24.00	
SPT S5/09	4.50	4.95	4.73	20.00	94.50	21	26	24	50	49.0	0.517	7.46	33.31	
SPT S5/09	7.50	7.95	7.73	20.00	154.50	26	26	31	57	47.0	0.517	7.46	36.93	
SPT S5/09	10.55	11.00	10.78	20.00	215.50	24	27	25	52	46.0	0.517	7.46	34.34	
SPT S5/09	13.50	13.95	13.73	20.00	274.50	18	24	22	46	42.0	0.517	7.46	31.24	
SPT S5/09	16.50	16.95	16.73	20.00	334.50	RIF	-	-	RIF					
SPT S5/09	19.50	19.95	19.73	20.00	394.50	RIF	-	-	RIF media=					
										47	deg	media=	30	MPa

Tabella 11 - Caratteristiche meccaniche dell'unità U2 dedotte dalle prove SPT.

RELAZIONE GEOLOGICA

In funzione delle categorie topografiche sopradescritte e dell'ubicazione dell'opera sono stati definiti i valori del coefficiente di amplificazione topografica S_T .

Per quanto riguarda l'analisi della risposta sismica locale in relazione alle condizioni topografiche del sito, le NTC 2018 prevedono la seguente suddivisione in categorie topografiche.

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Tabella 12 – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T (Tab. 3.2.V D.M. 17/01/2018)

Dall'analisi morfologica emerge che il sito rientra nella categoria T1 "superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media inferiore a 15°" nel tratto medio terminale del tracciato mentre il tratto iniziale fino al cimitero si passa alla categoria topografica T2 = 1.2 dta da rilievi collinari con pendenza > 15°.

8.6 Categorie sismica di sottosuolo

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite dalla Tab. 3.2.II di seguito riportata:

- [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 fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.).
- [C]** -Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
- [D]** -Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
- [E]** -Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

RELAZIONE GEOLOGICA

I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità VS per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.

I valori di VS sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche per la definizione del sottosuolo tipo ai sensi del D.M. 17 gennaio 2018 "NTC18 Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni".

Il DECRETO 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». contempla cinque categorie principali di terreno di fondazione, individuate dai valori della velocità media (VS30) delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo o dalla resistenza penetrometrica NSPT o dalla coesione non drenata Cu.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche e ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, VS,eq (in m/s), definita dall'espressione:

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

Per le opere di progetto, non essendo state eseguite prove atte a determinare le velocità medie delle onde S, si è proceduto, come previsto dal NTC alla determinazione della categoria del suolo a partire dalle prove SPT eseguite nei fori di sondaggio e da correlazioni fra le onde Vp desunte dalle sismiche a rifrazione e le Vs,eq.

Per la **zona delle gallerie artificiali**, avendo stimato che nelle sismiche a rifrazione si presenti mediamente la situazione riportata in tabella si è considerato per le fondazioni terreni classificabili cautelativamente in categoria "**B**".

Per la **zona dei viadotti**, avendo le prove SPT dato tutte valori compresi nell'intervallo $15 < N_{spt} < 50$ e si è considerato per le fondazioni terreni classificabili cautelativamente in categoria "**C**".

RELAZIONE GEOLOGICA

	Z _{sup}	Z _{inf}	Prondità media	gamma	sigv	N1	N2	N3	NSPT	phi'	s1	s2	E
	(m)	(m)	(m)	(kN/m ³)	(kPa)	(-)	(-)	(-)	(-)	(deg)	(-)	(-)	(MPa)
SPT S8/03	3.20	3.65	3.43	20.00	68.50	3	7	15	22	45.0	0.517	7.46	18.83
SPT S8/03	5.50	5.95	5.73	20.00	114.50	9	13	22	35	46.0	0.517	7.46	25.56
SPT S9/03	3.00	3.45	3.23	20.00	64.50	7	11	18	29	47.0	0.517	7.46	22.45
SPT S9/03	6.20	6.65	6.43	20.00	128.50	19	22	27	49	47.0	0.517	7.46	32.79
SPT S9/03	9.80	10.25	10.03	20.00	200.50	17	24	55	79	48.0	0.517	7.46	48.30
SPT S3/09	1.70	2.15	1.93	20.00	38.50	4	6	8	14	44.0	0.517	7.46	14.70
SPT S3/09	3.20	3.65	3.43	20.00	68.50	4	12	18	30	47.0	0.517	7.46	22.97
SPT S3/09	4.70	5.15	4.93	20.00	98.50	16	19	24	43	47.0	0.517	7.46	29.69
SPT S3/09	6.00	6.45	6.23	20.00	124.50	22	31	26	57	47.0	0.517	7.46	36.93
SPT S3/09	7.50	7.95	7.73	20.00	154.50	19	35	30	65	48.0	0.517	7.46	41.07
SPT S3/09	9.00	9.45	9.23	20.00	184.50	RIF	-	-	RIF				
SPT S4/09	5.00	5.45	5.23	20.00	104.50	21	13	13	26	44.0	0.517	7.46	20.90
SPT S4/09	10.00	10.45	10.23	20.00	204.50	33	41	42	83	48	0.517	7.46	50.37
SPT S4/09	15.00	15.45	15.23	20.00	304.50	RIF	-	-	RIF				
SPT S5/09	1.70	2.15	1.93	20.00	38.50	15	20	12	32	49.0	0.517	7.46	24.00
SPT S5/09	4.50	4.95	4.73	20.00	94.50	21	26	24	50	49.0	0.517	7.46	33.31
SPT S5/09	7.50	7.95	7.73	20.00	154.50	26	26	31	57	47.0	0.517	7.46	36.93
SPT S5/09	10.55	11.00	10.78	20.00	215.50	24	27	25	52	46.0	0.517	7.46	34.34
SPT S5/09	13.50	13.95	13.73	20.00	274.50	18	24	22	46	42.0	0.517	7.46	31.24
SPT S5/09	16.50	16.95	16.73	20.00	334.50	RIF	-	-	RIF				
SPT S5/09	19.50	19.95	19.73	20.00	394.50	RIF	-	-	RIF				
									RIF media=	47	deg	media=	30 MPa

Tabella 13 - Caratteristiche meccaniche dell'unità U2 dedotte dalle prove SPT.

RELAZIONE GEOLOGICA

Al fine di caratterizzare in modo specifico i terreni interessati dalle opere di progetto e definire un modello sismostratigrafico di dettaglio valutando direttamente la velocità delle onde S (Vs) e delle onde P (Vp) sono state previste delle indagini geofisiche integrative quali:

- N. 2 stendimenti sismici M.A.S.W.;
- N. 4 prove sismiche in foro tipo Down-Hole;
- N. 2 stendimenti sismici a rifrazione in onde P, eseguiti con geofoni verticali a frequenza propria di 40 Hz;
- N. 2 stendimenti sismici a rifrazione in onde SH, eseguiti con geofoni orizzontali a frequenza propria di 10 Hz;
- N. 6 acquisizioni di sismica passiva HVSR.
 - Indagini sismiche in foro del tipo Down-Hole;
 - Tomografia sismica;
 - Indagini sismiche del tipo MASW;
 - Indagine di sismica passiva HVSR.

9 Considerazioni Geologico-Tecniche

Il progetto prevede la realizzazione di tratti del tracciato stradale in trincea e in rilevato oltre alla realizzazione di due gallerie artificiali e di viadotti nel tratto terminale.

Durante la realizzazione di rilevati e trincee le principali operazioni da eseguire risultano:

- asportazione di terreno vegetale per uno spessore di 20 cm (scotico superficiale);
- successiva asportazione di ulteriori 30 cm per bonifica del terreno;
- stesa del telo di geotessuto e dello strato di materiale anticapillare;
- stesa del materiale da rilevato per strati successivi e compattazione tramite rullatura;
- posa in opera dei manufatti di bordo;
- stesa dei vari strati della pavimentazione;
- rivestimento delle scarpate con terreno vegetale e idrosemina.

RELAZIONE GEOLOGICA

Lungo il tratto Firenzuola – Baiano i tratti di sede all'aperto sono:

- CS01 - Sede tratto progr. Km 6+820 – 6+883
- CS02 - Sede tratto progr. Km 7+066.65 – 7+426.66
- CS03 - Sede tratto progr. Km 7+676.93 – 8+011.98
- CS04 - Sede tratto progr. Km 9+002.65 – 9+671.76
- CS05 - Sede tratto progr. Km 10+420.39 – 11+256.00

Il primo tratto è l'approccio in trincea alla galleria artificiale Romanella dallo svincolo di Firenzuola, il secondo tratto inizia in trincea allo sbocco della galleria Romanella per poi passare dopo circa 220 m ad un tratto in rilevato che termina sostanzialmente all'imbocco della galleria Colle del Vento; il terzo tratto inizia allo sbocco della galleria Colle del Vento per proseguire in trincea per circa 300 m oltrepassando il cavalcavia Cimitero quindi andando in rilevato fino alla spalla del viadotto Marroggia 1.

I tratti sopra descritti ricadono su terreni appartenenti alla formazione della Scaglia Cinerea, Schlier e del Bisciario che sono ricoperti in parte da di terreno di copertura di spessore variabile (terreno vegetale, coltre eluvio-colluviale e alterazione del bedrock caratterizzati da spessori che raggiungono al massimo 5 – 6 m) ed è costituita come si può vedere dalle stratigrafie riportate da alternanze calcareo marnose di spessore decimetrico a strati molto spessi di siltiti e calcareniti. Le formazioni sopra descritte sono costituite a partire dal piano campagna da strati decimetrici di argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, da molto consistente a dura, di colore grigio. Si rinvencono frequentemente dei livelli di marna litoide fratturata.

Al di sotto si rinvencono alternanze di siltiti marnose in banchi metrici e subordinate marne siltose ed arenarie fini e sporadiche marne foliettate in livelli centimetrici, grigie e grigio scure; fratture moderatamente ravvicinate inclinate 25°-45° e 70-85° con superfici rugose, talvolta lisce e con riempimento calcitico.

Non si rilevano indizi morfologici e fenomeni tali da evidenziare l'esistenza di dissesti idrogeologici attivi generalizzati sul versante in oggetto.

Il quarto tratto è in rilevato piuttosto alto (7-8 m) fra le spalle dei viadotti Marroggia 1 e Molino Vecchio; l'ultimo tratto sempre in rilevato parte dalla spalla del viadotto Molino Vecchio e termina a fine progetto ospitando lo svincolo a piani sfalsati di Baiano di Spoleto.

9.1 Gallerie artificiali

Nel tracciato dello stralcio 1° verranno realizzate 2 gallerie artificiali.

9.1.1 Galleria artificiale Romanella

La galleria artificiale Romanella ha una lunghezza totale di 173 m e si snoda fra le progressive 0+115.00 a pk 0+288.00.

Lungo il tracciato di progetto sono stati eseguiti N° 3 sondaggi a carotaggio continuo (S1/09

RELAZIONE GEOLOGICA

– S2-DH – S3-DH) che hanno evidenziato la presenza di rocce di natura prevalentemente marnoso argillosa e calcareo marnosa, in genere molto fratturate; nelle verticali eseguite si osservano a partire dal piano campagna strati decimetrici inclinati di 20° - 30° e costituiti da argille marnose e/o marne argillose, scagliose, da molto consistenti a dure, di colore grigio. Si rinvenivano frequentemente dei livelli di marna litoide fratturata.

Al di sotto sono presenti alternanze di siltiti marnose in banchi di spessore elevato (fino al metro), marne siltose ed arenarie fini oltre a marne foliettate in livelli centimetrici, grigie e grigio scuro.

La presenza di rocce marnose e di siltiti in strati di spessore eterogeneo anche consistente, fratturate, disposte a franapoggio ma con inclinazione maggiore del pendio tale da conferire una elevata stabilità geomorfologica all'area, ci consente di procedere alla realizzazione dell'intervento utilizzando la metodologia di seguito descritta (vedi sezioni trasversali).

All'interno del sondaggio S2 è stata eseguita una prospezione sismica in foro attrezzato per tale prova (prova Down Hole). Tra le prospezioni geofisiche, le misure sismiche eseguite in foro risultano avere specifica efficacia in quanto capaci di definire al meglio le stratigrafie complesse. L'uso di un foro di sondaggio, debitamente attrezzato, permette anche la caratterizzazione degli spessori non interessati da SPT o prelievo di campioni indisturbati, ampliando la capacità di investigazione dei terreni interessati in primis mediante la visione diretta.

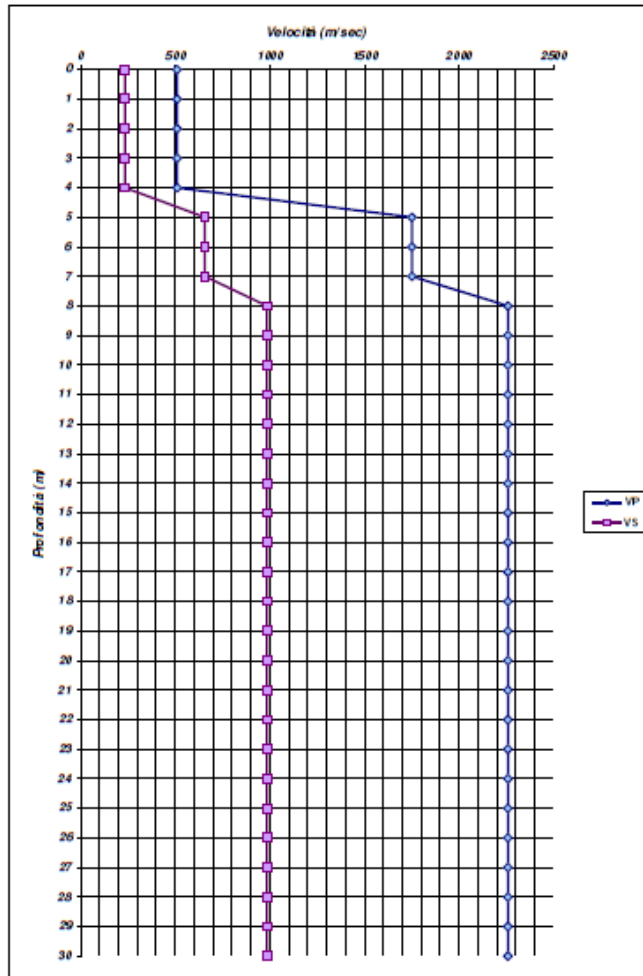
La prova consente di determinare direttamente la velocità di propagazione all'interno del litotipo in esame, mediante produzione di onde di compressione (onde P), di taglio (onde S) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità derivati (VP e VS), alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate.

L'indagine sismica in foro è utile per ricostruire una sismostratigrafia dettagliata del sottosuolo in corrispondenza dell'opera di progetto.

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

Riportiamo le tabelle dei risultati ottenuti.

RELAZIONE GEOLOGICA



Calcolo Vs-eq (m/s)		
Spessori (h)	Vs	h/Vs
3	234.16	0.0128118
4	657.51	0.0060836
23	984.25	0.023968
	Somma	0.0188954
	Vs-eq	370.46

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S2-DH"

$$V_{S,eq} = 370.46 \text{ m/s}$$

RELAZIONE GEOLOGICA

È stata eseguita un'indagine geofisica lungo l'asse della galleria e consistita nell'esecuzione di una tomografia sismica a rifrazione per la ricostruzione di una sezione sismostratigrafica sia in onde S che in onde P. Per il trattamento dei dati di sismica a rifrazione e per la ricostruzione tomografica del sottosuolo è stato utilizzato il software Rayfract 3.34 (Intelligent Resources Inc., Canada), il quale consente di ottenere immagini affidabili della struttura della velocità del sottosuolo, comprese le faglie, le forti variazioni di velocità laterali e altre anomalie di velocità. Il metodo tomografico "smooth inversion" si basa sulla modellazione fisicamente realistica della prima propagazione dei "first break" delle onde P e S.

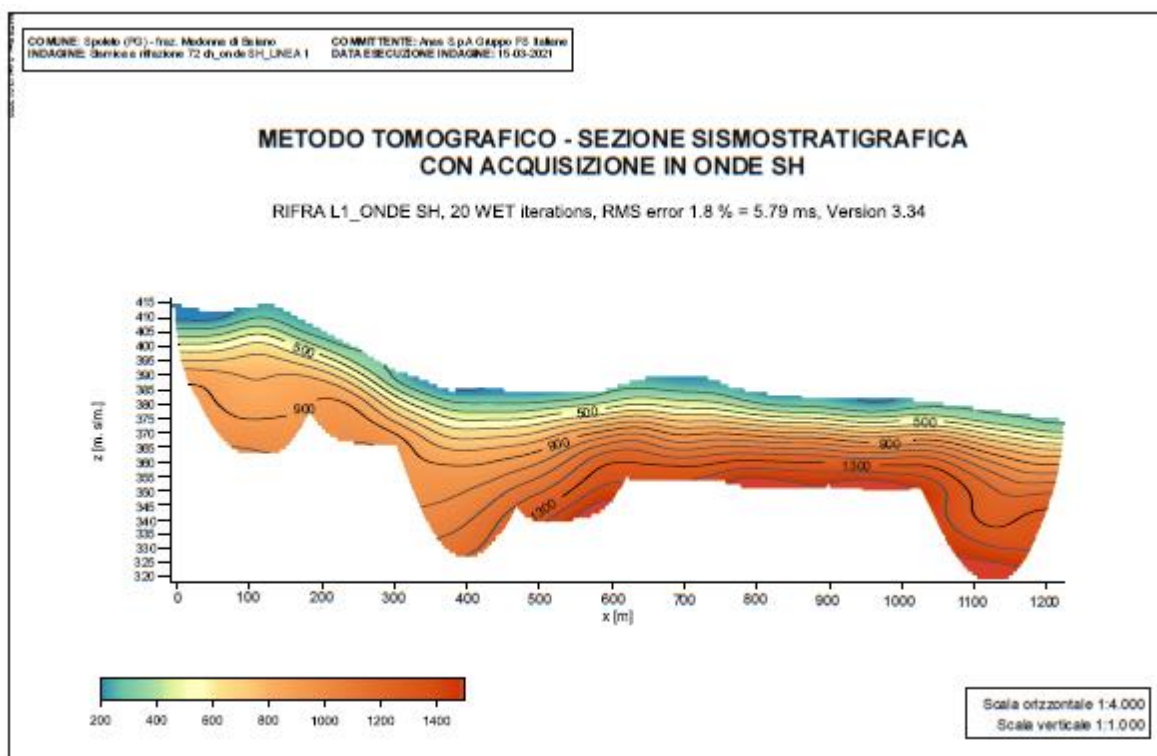


Figura 17 – Tomografia Sismica – Linea 1 - Sezione sismostratigrafica

Il modello tomografico risultante dall'elaborazione dei dati sismici a rifrazione raggiunge una profondità massima di investigazione di circa 60 metri dal p.c. e mostra un gradiente verticale della velocità delle onde SH (V_s) con quest'ultime comprese fra un minimo di 140 m/s ad un massimo di 1600 m/s. Come si può osservare dalla sezione tomografica, essendo questa eseguita sulla stessa linea della sismica a rifrazione in onde P, si ha correlabilità fra i risultati; infatti anche in questo caso il modello di sottosuolo investigato risulta essere estremamente complesso ed articolato, con importanti variazioni laterali di velocità. In particolare, tra le progressive 330 m e 500 m è possibile individuare una significativa flessione verso il basso delle isolinee di velocità, con la comparsa, a partire dalla progressiva dei 500 metri, di porzioni sottosuolo aventi velocità delle onde SH più elevate rispetto alla parte iniziale del modello tomografico.

RELAZIONE GEOLOGICA

infatti, anche in questo caso il modello di sottosuolo investigato risulta essere estremamente complesso ed articolato, con importanti variazioni laterali di velocità. In particolare, tra le progressive 330 m e 500 m è possibile individuare una significativa flessione verso il basso delle isolinee di velocità, con la comparsa, a partire dalla progressiva dei 500 metri, di porzioni sottosuolo aventi velocità delle onde SH più elevate rispetto alla parte iniziale del modello tomografico.

La tomografia sismica e la misura della velocità tramite la pendenza delle dromocrone permettono l'individuazione dei seguenti sismostrati:

- **Sismostrato 1** - $140 \text{ m/s} < V_s < 200 \text{ m/s}$ - suolo e orizzonte di copertura;
- **Sismostrato 2** - $500 \text{ m/s} < V_s < 600 \text{ m/s}$ - porzione più alterata e fratturata del substrato lapideo fino alla progressiva 250 m e materiale granulare sciolto nel restante tratto di sezione;
- **Sismostrato 3** - $750 \text{ m/s} < V_s < 900 \text{ m/s}$ - porzione integra del substrato lapideo fino alla progressiva 500 m e porzione più alterata e fratturata del sismostrato 4 nel restante tratto di sezione;
- **Sismostrato 4** - $V_s > 1100 \text{ m/s}$ - si riscontra a partire dalla progressiva 500 metri, porzione integra di un substrato lapideo verosimilmente di litologia differente rispetto al sismostrato 3 e con caratteristiche meccaniche migliori.

La metodologia di scavo è quella dello scavo aperto con pendenza delle scarpate 3:2 e 1:1, lo scavo avverrà a cielo aperto fino alla quota di imposta della struttura in c.a. policentrica. La galleria avendo lunghezza inferiore ai 500 metri, non deve rispondere alle raccomandazioni ed alle prescrizioni contenute nelle "Linee guida".

La galleria rispetta il D.M. 14/09/2005 "Norme di illuminazione delle gallerie stradali".

Agli imbocchi della galleria saranno installati semafori che consentono la chiusura della galleria, o di una singola corsia, in caso di emergenza.

Tutta la segnaletica verticale in galleria è di tipo luminoso ed è alimentata dall'impianto elettrico di sicurezza.

9.1.2 Galleria artificiale Colle del Vento

La galleria artificiale Colle del Vento ha una lunghezza totale di 252,20 m e si snoda fra le progressive 0+658.00 a pk 0+907.00.

Lungo il tracciato di progetto sono stati eseguiti N° 3 sondaggi a carotaggio continuo (S2/09 – S3DH - S4-PZ) che hanno evidenziato la presenza di rocce di natura prevalentemente marnoso argillosa e calcareo marnosa, in genere alterata e molto fratturata; nelle verticali eseguite si osservano a partire dal piano campagna strati decimetrici inclinati di 20° - 30° costituiti da argille marnose e/o marne argillose, scagliose, da molto consistente a dure, di colore grigio.

Al di sotto sono presenti alternanze di siltiti marnose in banchi di spessore elevato (fino al

RELAZIONE GEOLOGICA

metro) e strati di marne siltose ed arenarie fini, oltre a sporadiche marne foliettate in livelli centimetrici, grigie e grigio scuro.

La presenza di rocce marnose e di siltiti in strati di spessore eterogeneo anche consistente, fratturate, disposte a reggipoggio conferiscono all'area una elevata stabilità geomorfologica all'area, che ci consente di procedere alla realizzazione dell'intervento utilizzando la metodologia di seguito descritta (vedi sezioni trasversali).

All'interno del sondaggio S3 è stata eseguita una prospezione sismica in foro attrezzato per tale prova (prova Down Hole). Tra le prospezioni geofisiche, le misure sismiche eseguite in foro risultano avere specifica efficacia in quanto capaci di definire al meglio le stratigrafie complesse. L'uso di un foro di sondaggio, debitamente attrezzato, permette anche la caratterizzazione degli spessori non interessati da SPT o prelievo di campioni indisturbati, ampliando la capacità di investigazione dei terreni interessati in primis mediante la visione diretta.

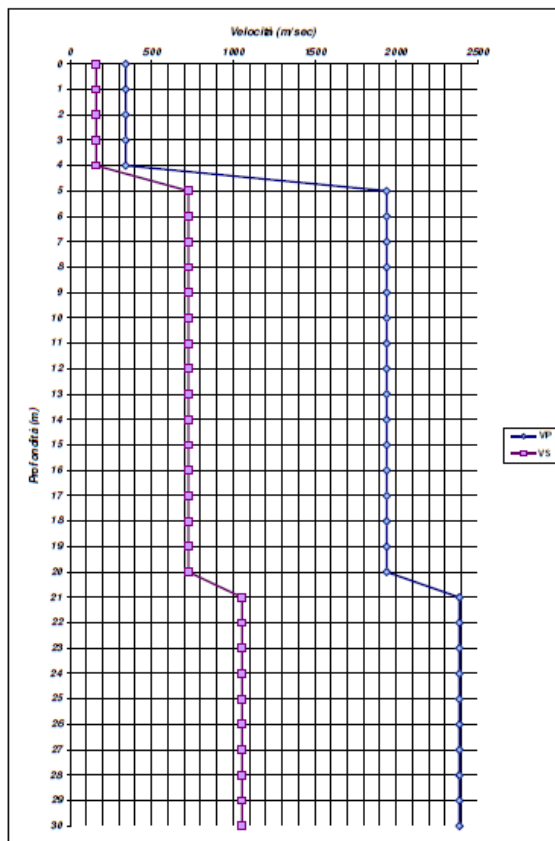
La prova consente di determinare direttamente la velocità di propagazione all'interno del litotipo in esame, mediante produzione di onde di compressione (onde P), di taglio (onde S) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità derivati (VP e VS), alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate.

L'indagine sismica in foro è utile per ricostruire una sismostratigrafia dettagliata del sottosuolo in corrispondenza dell'opera di progetto.

Il calcolo delle VS,eq (m/s) delle indagini sismiche Down-Hole eseguite fa riferimento alla seguente equazione:

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

RELAZIONE GEOLOGICA



Calcolo Vs-eg (m/s)		
Spessori (h)	Vs	h/Vs
3	160.19	0.0187278
17	725.32	0.0234379
10	1055.19	0.009477
Somma		0.0421657
Vs-eg		474.32

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S3-DH"

$$V_{s,eq} = 474.32 \text{ m/s}$$

La metodologia di scavo è quella dello scavo aperto con pendenza delle scarpate 3:2 e 1:1. La galleria avendo lunghezza inferiore ai 500 metri, non deve rispondere alle raccomandazioni ed alle prescrizioni contenute nelle "Linee guida". La galleria rispetta il D.M. 14/09/2005 "Norme di illuminazione delle gallerie stradali".

RELAZIONE GEOLOGICA

Agli imbocchi della galleria saranno installati semafori che consentono la chiusura della galleria, o di una singola corsia, in caso di emergenza. Tutta la segnaletica verticale in galleria è di tipo luminoso ed è alimentata dall'impianto elettrico di sicurezza.

9.2 Viadotti

Lungo il tracciato si contraddistinguono due opere in viadotto:

- **Viadotto Marroggia 1** con sviluppo di 933.50 m;
- **Viadotto Molino Vecchio** con sviluppo di 766.50 m.

RELAZIONE GEOLOGICA



Figura 4 - Planimetria con l'evidenza delle opere di mitigazione ambientale del Viadotto Marroggia.

La sezione trasversale dei viadotti principali presenta piattaforma stradale transitabile di larghezza $L=9.75\text{m}$.

Il viadotto "Marroggia" si estende fra le prog. Km 1+243.27 e 2+176.77 per complessivi 933.50m, e prende il nome dall'omonimo corso d'acqua che scavalca.

RELAZIONE GEOLOGICA

Il viadotto **“Molino Vecchio”** si estende fra le prog. Km 2+902.00 e 3+668.50 per complessivi 766.50m

Gli impalcati saranno di tipo a sezione Mista con travi in acciaio di altezza complessiva 250 cm.



Figura 5 - Planimetria con l'evidenza delle opere di mitigazione ambientale **Viadotto Molino Vecchio**.

La caratterizzazione geologica e geotecnica dei terreni di fondazione del viadotto **“Molino**

RELAZIONE GEOLOGICA

“Vecchio” è stata realizzata con una campagna geognostica dettagliata e consistita nella realizzazione di sondaggi geognostici a carotaggio continuo (S11PZ – S12DH – S13PZ – S9PZ), Prove penetrometriche dinamiche (DPSH), una Masw e tre indagini di sismica passiva (HVSR).

Le verticali effettuate hanno evidenziato la presenza di terreni sciolti appartenenti ai depositi fluviali del torrente Marroggia che poggiano in discordanza stratigrafica sul basamento litoide.

Nelle verticali eseguite si osservano a partire dal piano campagna si rinvencono sabbie e ghiaie con limo e argilla, moderatamente addensate, di colore marrone chiaro con lenti biancastre; i clasti appaiono da subarrotondati ad angolari con dimensione max 5 cm e dimensione media 8 mm, di chiara origine alluvionale;

al di sotto dei depositi sciolti di natura alluvionale si intercetta il bedrock caratterizzato dalla presenza di strati argilloso marnosi e marne argillose, molto consistente, di colore grigio che passano in profondità a strati decimetrici di calcari marnosi, marne e marne calcaree, litoidi, sempre di colore grigio.

I depositi alluvionali sono sede di un acquifero a falda freatica con livello statico che si posiziona a circa -9.0 – 10.0 m dal piano campagna.

La MASW eseguita per il calcolo delle $V_{s,eq}$ (m/s) per lo Shot n° 1 e per lo Shot n° 2 delle indagini MASW eseguite, fa riferimento alla seguente equazione:

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

con:

h_i spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Si ottengono le seguenti $V_{S,eq}$ (m/s) e per lo **Shot n° 2**.

STENDIMENTO SISMICO N. 2 - “MASW 100_L2”:

$$V_{S,eq} 1 = 459.70 \text{ m/s}$$

$$V_{S,eq} 2 = 464.08 \text{ m/s}$$

Lungo il tracciato del viadotto “*Mulino Vecchio*” sono state eseguite indagini di sismica passiva HVSR. Il metodo di sismica passiva HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio o “Metodo di Nakamura”) è basato sul calcolo dei rapporti spettrali tra la componente orizzontale e quella verticale del segnale acquisito (rapporto H/V) e consente di determinare la frequenza di risonanza o fondamentale. Tale frequenza è determinata utilizzando il rumore ambientale (microtremore), cioè del rumore a corto periodo. Dall’elaborazione dei dati

RELAZIONE GEOLOGICA

acquisiti direttamente sul terreno si ottiene che ciascun picco nel grafico H/V corrisponde ad un livello stratigrafico che presenta un contrasto di impedenza rispetto al livello sottostante. Maggiore è il contrasto di impedenza, maggiore è l'ampiezza attesa del picco H/V. Le indagini HVSR eseguite per il viadotto "Mulino Vecchio" (N.3 acquisizioni e successive elaborazioni), processate con il software GeoExplorer della Sara Electronic Instruments, mostrano diversi picchi spettrali, di cui quelli più significativi sono stati riscontrati alle frequenze di 1.262 Hz (HVSR4 e HVSR6) e 1.336 Hz (HVSR5) identificati sulla base dell'andamento dello spettro di ampiezza.

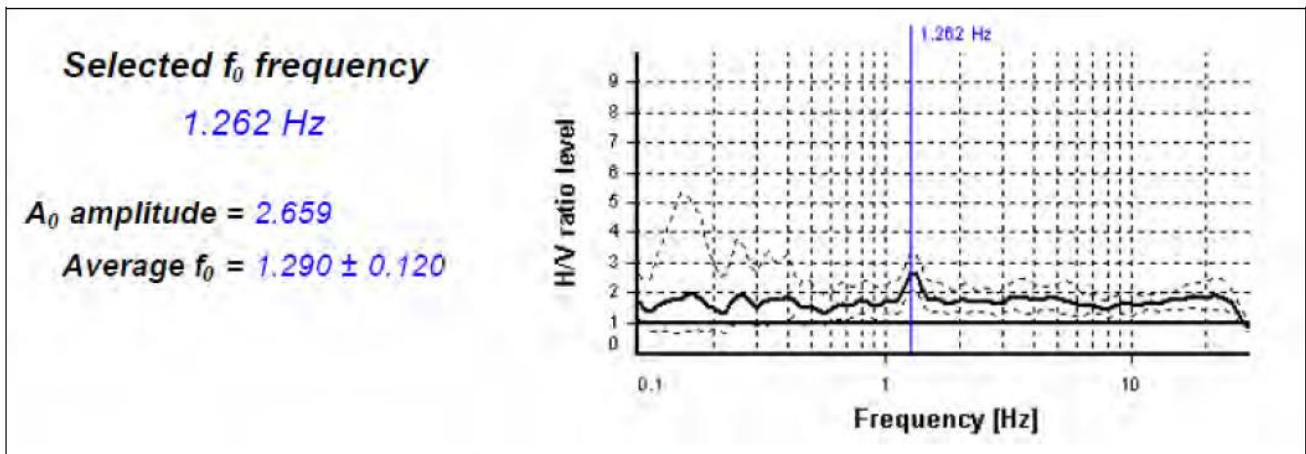


Figura6. Curva HVSR4 - CLASSE B.

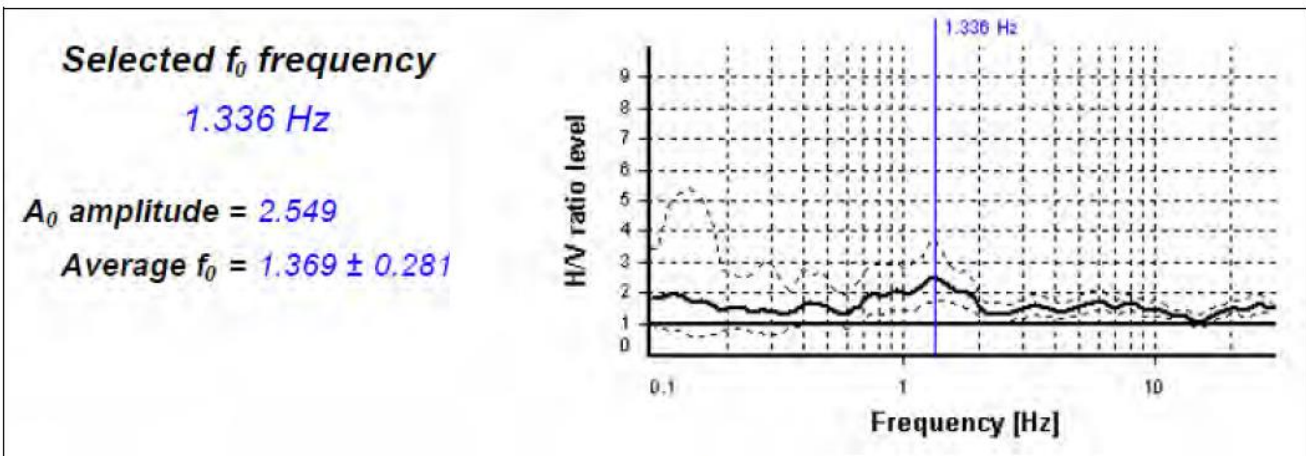


Figura7. Curva HVSR5 - CLASSE B.

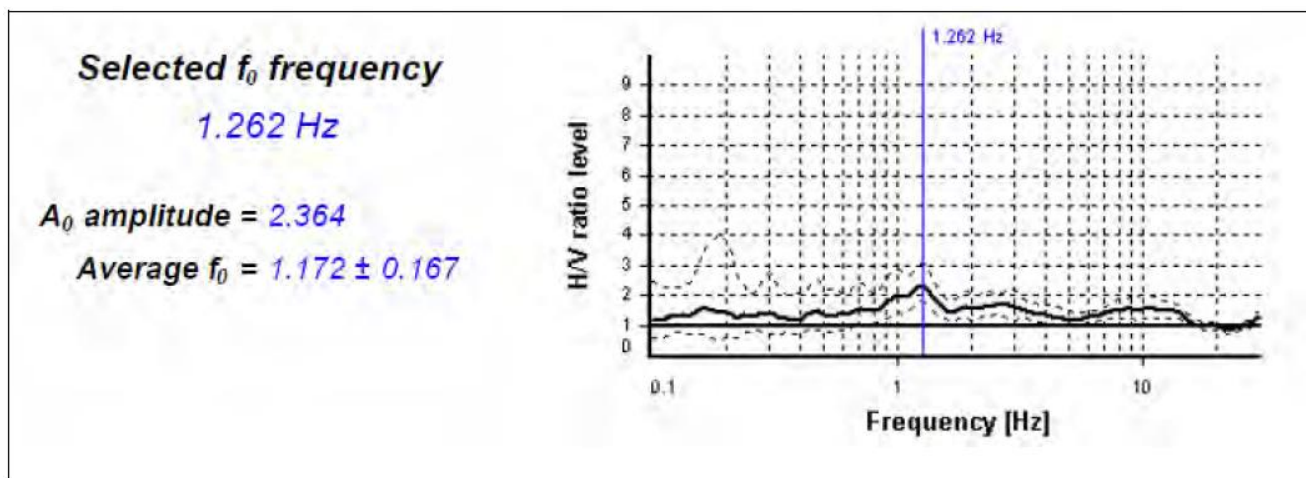
RELAZIONE GEOLOGICA


Figura8. Curva HVSR6 - CLASSE B.

Secondo la classificazione proposta da Albarello & Castellaro (2011) e Albarello et al. (2011), risulta che la prova eseguita rientra nella seguente classe:

CURVA HVSR4- Classe B - curva H/V sospetta (da "interpretare"), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

CURVA HVSR5- Classe B - curva H/V sospetta (da "interpretare"), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

CURVA HVSR6- Classe B - curva H/V sospetta (da "interpretare"), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

Le curve spettrali ottenute rispettano pienamente i criteri SESAME (2004) e, perciò, possono essere considerate attendibili, anche se di difficile interpretazione.

Le frequenze prevalenti sono centrate su 1.262 Hz (HVSR4 e HVSR6) e 1.336 Hz (HVSR5).

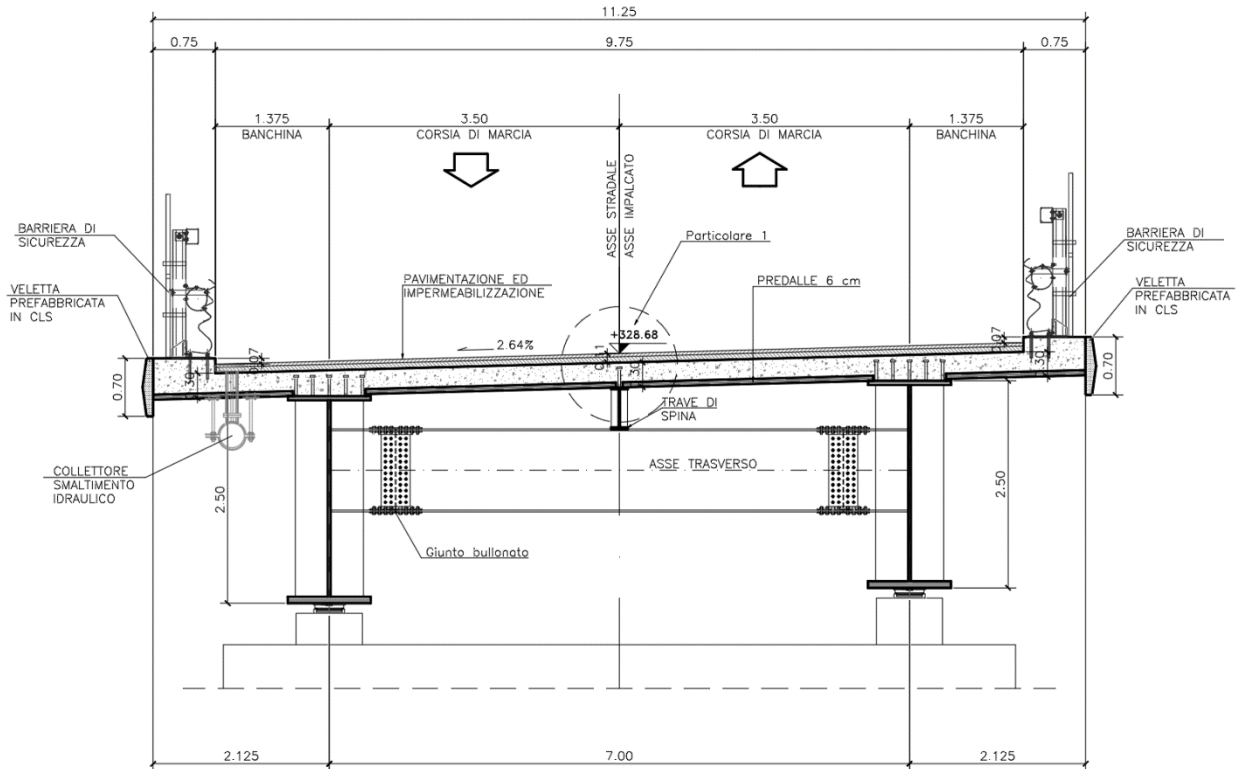
RELAZIONE GEOLOGICA


Figura 19 - Sezione Trasversale dell'impalcato del Viadotto Marroggia 1.

Il viadotto “*Marroggia*” sarà giuntato alle pile 7 e 14 ed avrà campate caratteristiche da 48.50 m mentre le campate estremali di ogni tratta saranno da 33,70 m; mentre il viadotto “*Molino Vecchio*” sarà giuntato alla pila 8.

Le pile hanno altezza complessiva (a partire dalla sezione di spiccato e comprensiva del pulvino) variabile tra 5.00m e 14.50m e si differenziano nelle tipologie “a pila singola” e “a pila doppia” dipendentemente dalla loro posizione relativa nel tratto di campate di Giunto.

Le pile sono cave, a pianta ovale di ingombro 3.0m×6.0m per le pile singole e 4.50m×6.0m per le pile doppie, con pulvino rastremato verso i bordi; le fondazioni sono costituite da plinti su pali di diametro $\varnothing=1200\text{mm}$.

La caratterizzazione geologica e geotecnica dei terreni di fondazione del viadotto “*Marroggia*” è stata realizzata con una campagna geognostica dettagliata e consistita nella realizzazione di sondaggi geognostici a carotaggio continuo (S6DH – S7PZ – S8PZ – S9PZ), uno Stendimento Sismico a Rifrazione, una Masw e un’indagine di sismica passiva (HVSr). Le verticali effettuate hanno evidenziato la presenza di terreni sciolti appartenenti ai depositi fluviali del torrente Marroggia che poggiano in discordanza stratigrafica sul basamento litoide.

Nelle verticali eseguite si osservano a partire dal piano campagna si rinvengono sabbie e ghiaie con limo e argilla, moderatamente addensate, di colore marrone chiaro con lenti biancastre; i clasti appaiono da subarrotondati ad angolari con dimensione max 5 cm e dimensione media 8 mm, di chiara origine alluvionale;

al di sotto dei depositi sciolti di natura alluvionale si intercetta il bedrock caratterizzato dalla

RELAZIONE GEOLOGICA

presenza di strati argilloso marnosi e marne argillose, molto consistente, di colore grigio che passano in profondità a strati decimetrici di calcari marnosi, marne e marne calcaree, litoidi, sempre di colore grigio.

I depositi alluvionali sono sede di un acquifero a falda freatica con livello statico che si posiziona a circa -8.0 m dal piano campagna.

È stata eseguita un'indagine geofisica lungo l'asse del viadotto "Marroggia" e consistita nell'esecuzione di una tomografia sismica a rifrazione per la ricostruzione di una sezione sismostratigrafica sia in onde S che in onde P. Per il trattamento dei dati di sismica a rifrazione e per la ricostruzione tomografica del sottosuolo è stato utilizzato il software Rayfract 3.34 (Intelligent Resources Inc., Canada), il quale consente di ottenere immagini affidabili della struttura della velocità del sottosuolo, comprese le faglie, le forti variazioni di velocità laterali e altre anomalie di velocità. Il metodo tomografico "smooth inversion" si basa sulla modellazione fisicamente realistica della prima propagazione dei "first break" delle onde P e S.

Il modello tomografico risultante dall'elaborazione dei dati sismici a rifrazione raggiunge una profondità massima di investigazione di circa 25 metri dal p.c. e mostra un gradiente verticale della velocità delle onde SH (V_s) senza importanti variazioni laterali. Le velocità sono comprese fra un minimo di con velocità comprese fra un minimo di 150 m/s ad un massimo di 900 m/s.

La tomografia sismica e la misura della velocità tramite la pendenza delle dromocrone permettono l'individuazione dei seguenti sismostrati:

- **Sismostrato 1** - $150 \text{ m/s} < V_s < 250 \text{ m/s}$ - suolo e orizzonte di copertura;
- **Sismostrato 2** - $600 \text{ m/s} < V_s < 750 \text{ m/s}$ - porzione più alterata e fratturata del substrato lapideo;
- **Sismostrato 3** - $V_s > 800 \text{ m/s}$ - porzione integra del substrato lapideo.

RELAZIONE GEOLOGICA

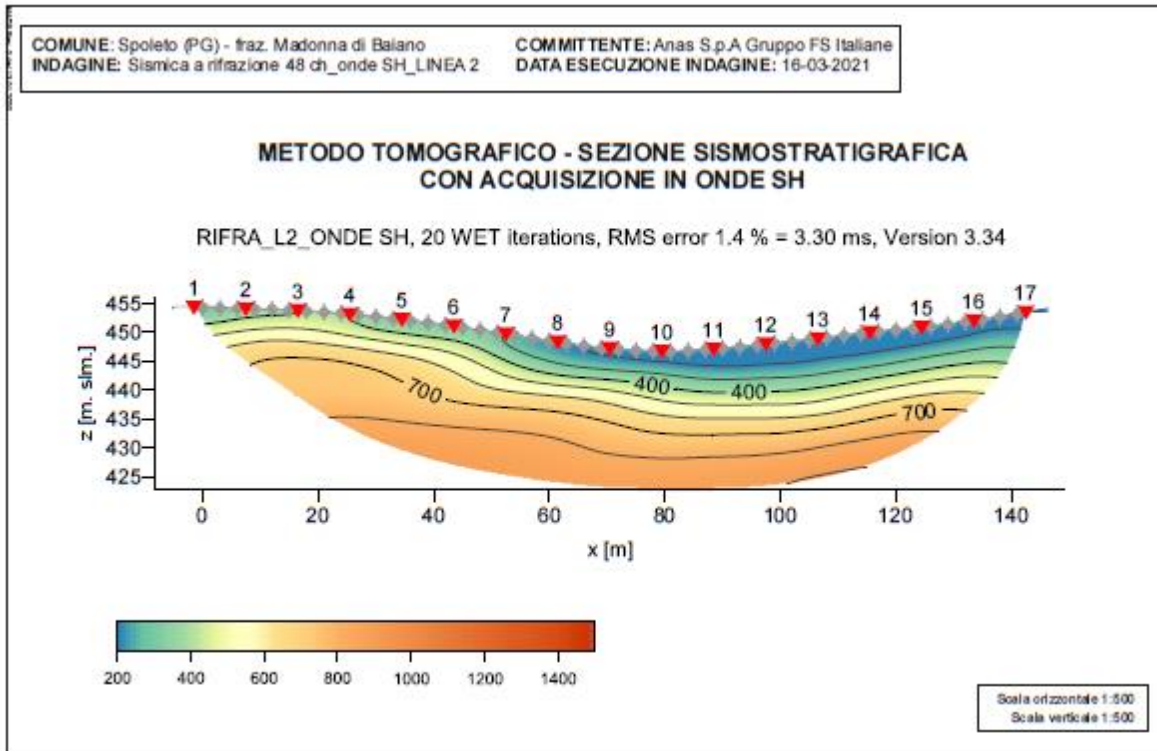


Figura 18 – Tomografia Sismica – Linea 2 - Sezione sismostratigrafica

Lungo il tracciato del viadotto “*Marroggia*” sono state eseguite indagini di sismica passiva HVSR. Il metodo di sismica passiva HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio o “Metodo di Nakamura”) è basato sul calcolo dei rapporti spettrali tra la componente orizzontale e quella verticale del segnale acquisito (rapporto H/V) e consente di determinare la frequenza di risonanza o fondamentale. Tale frequenza è determinata utilizzando il rumore ambientale (microtremore), cioè del rumore a corto periodo. Dall’elaborazione dei dati acquisiti direttamente sul terreno si ottiene che ciascun picco nel grafico H/V corrisponde ad un livello stratigrafico che presenta un contrasto di impedenza rispetto al livello sottostante. Maggiore è il contrasto di impedenza, maggiore è l’ampiezza attesa del picco H/V.

Le indagini HVSR eseguite per il viadotto “*Marroggia*” (N.3 acquisizioni e successive elaborazioni), processate con il software GeoExplorer della Sara Electronic Instruments, mostrano diversi picchi spettrali, di cui quelli più significativi sono stati riscontrati alle frequenze di 6.332 Hz (HVSR1), 9.477 Hz (HVSR2), 14.185 Hz (HVSR3), identificati sulla base dell’andamento dello spettro di ampiezza.

RELAZIONE GEOLOGICA

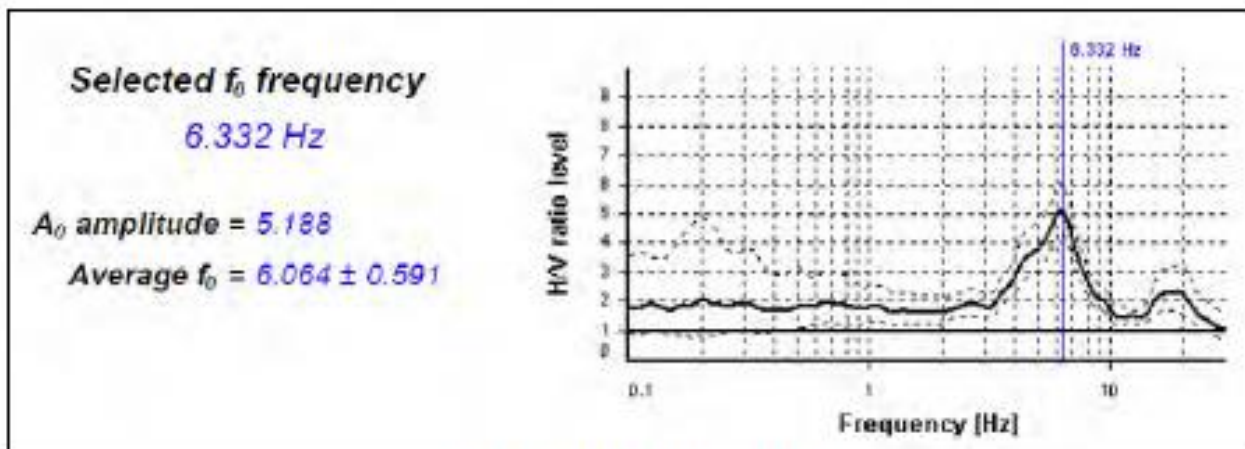


Figura3. Curva HVS1 - CLASSE B.

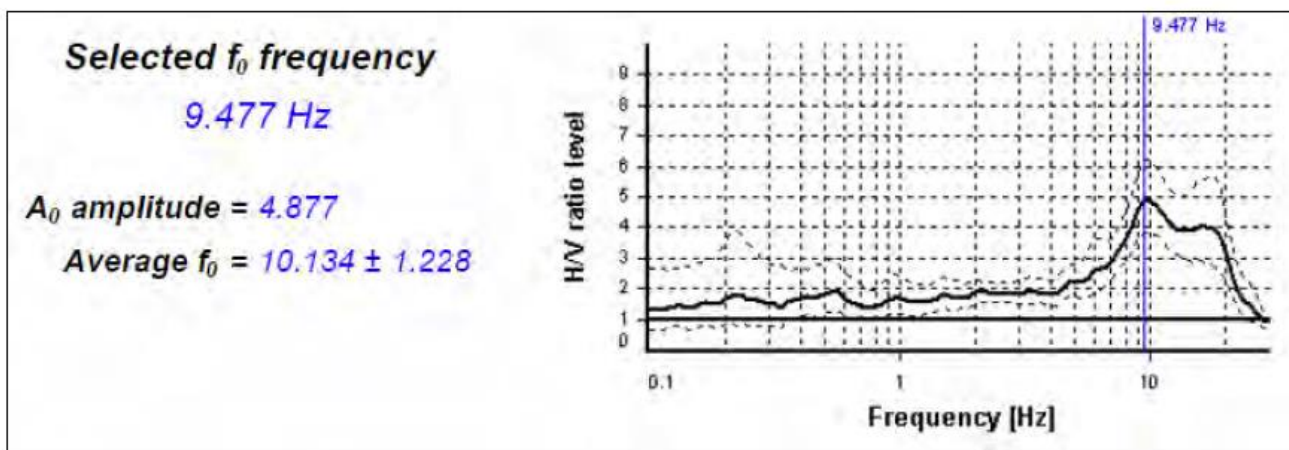


Figura4. Curva HVS2 - CLASSE B.

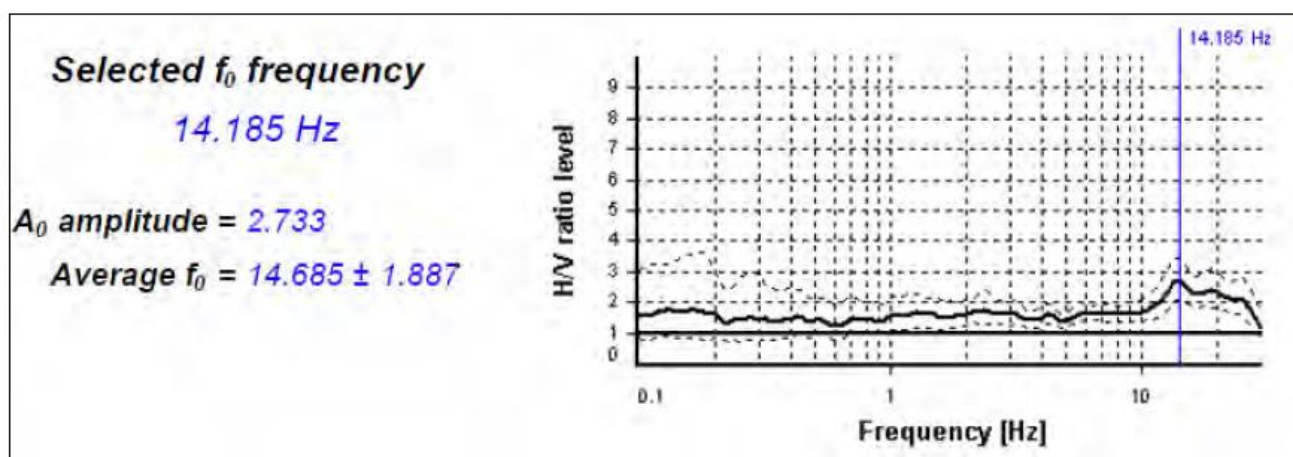


Figura5. Curva HVS3 - CLASSE B.

RELAZIONE GEOLOGICA

Secondo la classificazione proposta da Albarello & Castellaro (2011) e Albarello et al. (2011), risulta che la prova eseguita rientra nella seguente classe:

CURVA HVSR1- Classe B - curva H/V sospetta (da "interpretare"), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

CURVA HVSR2- Classe B - curva H/V sospetta (da "interpretare"), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

CURVA HVSR3- Classe B - curva H/V sospetta (da "interpretare"), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

Le curve spettrali ottenute rispettano pienamente i criteri SESAME (2004) e, perciò, possono essere considerate attendibili, anche se di difficile interpretazione.

Le frequenze prevalenti sono centrate su 6.332 Hz (HVSR1), 9.477 Hz (HVSR2), 14.185 Hz (HVSR3).

RELAZIONE GEOLOGICA

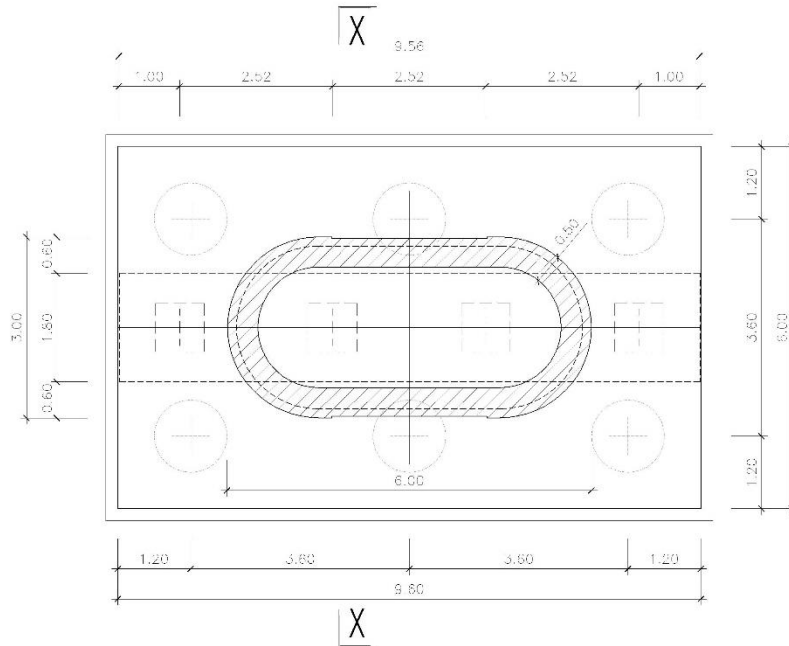


Figura 6: Sezione pila singola

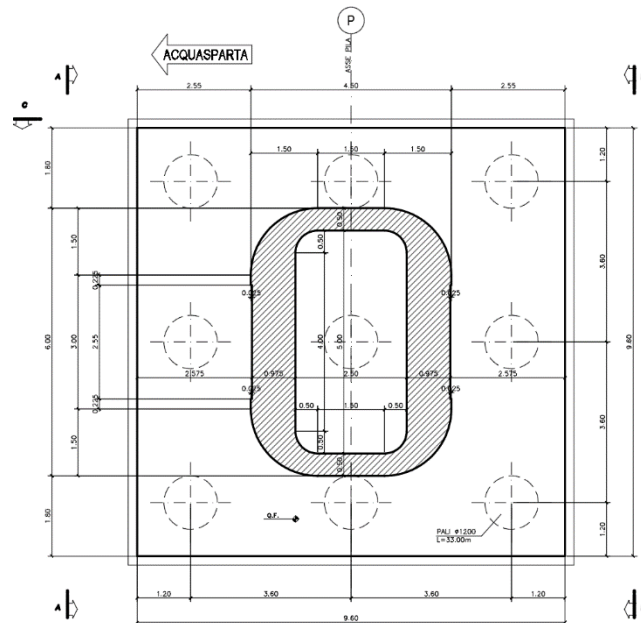


Figura 20: Sezione pila doppia

La spalla A di entrambi in c.a. su pali di diametro $\Phi 1200$ presenta dimensioni in pianta e numero dei pali di fondazione dipendenti dall'altezza del paramento e dalla tipologia di ritegni longitudinali disposti per l'impalcato così come la spalla B del Molino Vecchio.

La spalla B del Marroggia è costituita da un manufatto a "Farfalla" per permettere il passaggio al suo interno della attuale SR 418, in virtù di un passaggio piuttosto ristretto fra strada e la linea Ferroviaria RFI Orte-Ancona.

RELAZIONE GEOLOGICA

La realizzazione di questa spalla per mezzo di un manufatto scatolare, oltre a limitare la luce delle campate del Viadotto, è stata necessaria al fine di rispettare la normativa stradale e le geometrie della SR 418 in linea con i principi di sicurezza inerenti la vicina linea ferroviaria.

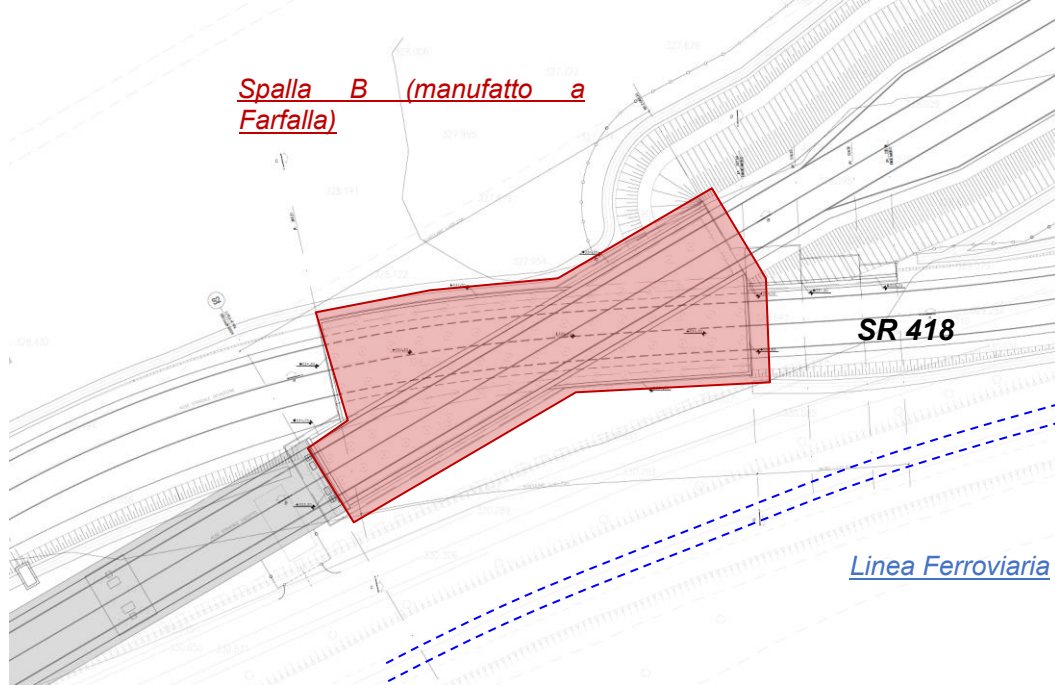
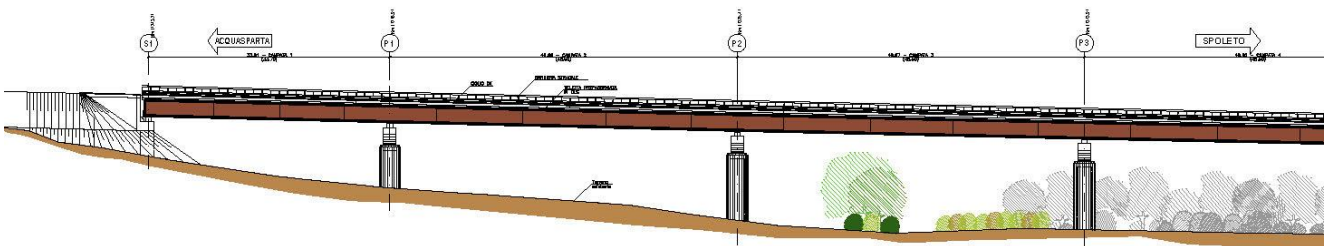


Figura 21 - Planimetria della Spalla B del Viadotto Marroggia.

Le carpenterie dell’impalcato e i controventi saranno realizzati in acciaio corten, mentre le pile e la veletta in calcestruzzo. I materiali scelti caratterizzano la struttura dal punto di vista architettonico ma allo stesso tempo ne attenuano la percezione visiva in quanto la colorazione tipica dell’acciaio corten richiama i toni caldi della terra, quindi l’effetto sul paesaggio non è di barriera. Il risultato complessivo sarà meno impattante e più contestualizzato rispetto all’ambiente circostante, considerando anche che il viadotto, nella sua quasi interezza si inserisce nell’ambito naturale del torrente Marroggia che di per sé è molto rilevante.



Prospetto del viadotto. Pile 1-2-3 con indicate le mitigazioni

10 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Le indagini geognostiche nell'area in esame sono costituite da due distinte campagne di indagini rispettivamente nel 2003 in fase di Progetto Preliminare e successivamente integrate da una successiva campagna geognostica nel 2009 in fase di Progetto Definitivo. Tali indagini dirette ed indirette, di laboratorio ed in situ, assieme al rilevamento della zona sugli affioramenti, sono state utili per conoscere con maggiore dettaglio le caratteristiche geologico-geotecniche dei terreni sciolti e lapidei posti a varie profondità; esse si sono concentrate sul tracciato prescelto, per l'acquisizione dei parametri geotecnici e idrogeologici del sito in oggetto.

10.1 Campagna Geognostica (2009).

Nell'ambito dell'affidamento del presente incarico di progettazione definitiva, nell'anno 2009, secondo un programma concordato con l'Anas – Direzione Centrale Programmazione, Progettazione, è stata eseguita una campagna di indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche.

Le indagini geognostiche effettuate per la redazione del progetto preliminare sono state eseguite dalla ditta Sicef S.a.s. *nel corso dell'anno 2003*.

Nella suddetta campagna furono eseguite indagini lungo tutto il tratto Spoleto - Acquasparta. Le indagini eseguite per la stesura del Progetto Definitivo sono state effettuate ad integrazione dei risultati provenienti dalla precedente campagna geognostica e sono consistite in:

Indagini geognostiche dirette eseguite dalla ditta Geotecnica Lavori s.r.l. (dettagliatamente descritte nella relazione "Risultati indagine geognostica" A9JSD010).

- a) Prove di laboratorio eseguite dal Laboratorio Geotecnico – Terra S.n.c. (dettagliatamente descritte nella relazione "Risultati indagine geognostica" A9JSD010).
- b) Indagini geosismiche con realizzazione di sezioni sismiche topografiche eseguite dalla Tecnogeo s.n.c. (dettagliatamente descritte nella relazione "Risultati indagine geognostica" A9JSD010).

10.1.1 Sondaggi geomeccanici e prove in situ

Dei sondaggi pregressi (Campagna 2003 inerente al tracciato completo Acquasparta Eggi) nella tratta di interesse possono essere considerate le verticali S7, S8 ed S9.

La campagna d'indagini del 2009 è consistita nell'esecuzione di sondaggi geotecnici, realizzati con sistema di perforazione a carotaggio continuo.

Nell'ambito di tale campagna, durante la realizzazione dei sondaggi geotecnici sono state

RELAZIONE GEOLOGICA

eseguite prove dilatometriche cilindriche DRT, prove di permeabilità Lugeon ed il prelievo di campioni relativi a spezzoni di carota del materiale lapideo indagato, nonché la valutazione dell'indice RQD sul cutting di perforazione; al termine della perforazione, i fori di sondaggio sono entrambi stati condizionati con tubazione piezometrica tipo tubo aperto o "Norton".

I campioni di materiale lapideo prelevati durante la realizzazione dei sondaggi, sono stati sottoposti a prove di laboratorio geotecnico (determinazione del peso di volume e Point Load Test), effettuati presso il laboratorio TERRA S.N.C. di Papiano (PG).

Le prove dilatometriche sono state eseguite dalla GEOANALISI S.R.L.. Le modalità esecutive dei sondaggi geognostici, delle prove geotecniche e di permeabilità condotte, nonché l'elenco delle prove di laboratorio eseguite, vengono di seguito descritte.

L'indagine svolta nel 2009 a corredo del progetto definitivo consta di n. 2(5) sondaggi a carotaggio continuo (le cui stratigrafie e relative fotografie delle carote sono riportate in Allegato 2), così posizionati:

- S1/09 (m 40.00) – Galleria Artificiale Romanella;
- S2/09 (m 40.00) – Galleria Artificiale Colle del Vento;
- S3/09 (m 30.00) – Cavalcavia Cimitero;
- S4/09 (m 30.00) – Viadotto Marroggia 1;
- S5/09 (m 30.00) – Viadotto molino Vecchio;

Per l'esecuzione dei sondaggi è stata utilizzata una sonda a rotazione con testa idraulica, SOIL MEC mod. SM400 coppia max 1000 kgm, peso 110 q.li, pompa a statore).

Il carotaggio integrale è stato realizzato con differenti metodologie in relazione ai terreni attraversati, con l'obiettivo di produrre un cutting che permettesse di definire il più fedelmente possibile le caratteristiche litologiche e strutturali dei terreni, cercando di raggiungere la maggior percentuale di carotaggio possibile mediante operazioni di carotaggio che hanno previsto manovre da 0.40 m a 3.00 m di lunghezza.

SONDAGGIO N.	OPERA PREVISTA	PROFONDITÀ FINALE (m da p.c.)	METODO DI PERFORAZIONE	PROVE PRESSIOMETRICHE DRT	PROVE DI PERMEABILITÀ LUGEON	SPEZZONI DI CAROTA	STRUMENTAZIONE GEOTECNICA INSTALLATA
S1	GALL. ARTIFICIALE "COLLE DEL VENTO"	40.0	CAROTAGGIO CONTINUO	1	1	7	PIEZOMETRO TUBO APERTO (40.0 m)
S2	GALL. ARTIFICIALE "ROMANELLA"	40.0	CAROTAGGIO CONTINUO	1	1	7	PIEZOMETRO TUBO APERTO (40.0 m)
S3	VIADOTTO MARROGGIA	30	CAROTAGGIO CONTINUO	0	0	0	PIEZOMETRO TUBO APERTO (30.0 m)

RELAZIONE GEOLOGICA

S4	VIADOTTO MARROGGIA	30	CAROTAGGI O CONTINUO	0	0	0	PIEZOMETRO TUBO APERTO (30.0 m)
S5	VIADOTTO MOLINO VECCHIO	30	CAROTAGGI O CONTINUO	0	0	0	PIEZOMETRO TUBO APERTO (30.0 m)

Tabella 14: Sondaggi campagna geognostica 2009

Nella seguente Tabella 4 sono riassunti i sondaggi eseguiti nelle due campagne di indagine.

Denominazione	Posizione	Quota (m slm)	Fondo foro da pc (m)
S7/03	Galleria Naturale Arezzo	570.00	62.00 m
S8/03	Viadotto Marroggia1	335.00	20.00 m
S9/03	Viadotto Molino vecchio	320.50	25.00 m
S1/09	Galleria Artificiale Romanella	414.76	40.00 m
S2/09	Galleria Artificiale Colle del Vento	386.00	40.00 m
S3/09	Cavalcavia Cimitero	366.90	25.00 m
S4/09	Viadotto marroggia1	328.20	30.00 m
S5/09	Viadotto Molino vecchio	321.60	30.00 m

Tabella 15 – Sondaggi realizzati.

Al fine di migliorare la scelta dei parametri geomeccanici di progetto sono stati presi in considerazione i sondaggi integrativi riportati in Tabella 6 (S2 S3 S4 ed S5). Le stratigrafie sono nella relazione sulle indagini geognostiche.

Sono state inoltre eseguite n. 1(3) prospezione sismiche a rifrazione con restituzione tomografica.

Le indagini e le prove effettuate sono state eseguite secondo le prescrizioni riportate nelle "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche – A.G.I., 1977 e 1994" e nelle "Norme Tecniche per l'esecuzione di indagini geotecniche e geofisiche – ANAS S.p.A, 2003".

Durante la realizzazione dei sondaggi geognostici sono state eseguite n. 2 prove dilatometriche cilindriche in foro, di tipo DRT, su roccia. Le caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata, le modalità esecutive delle prove e le risultanze delle stesse, sono riportate nell'Allegato 3, contenete la relazione metodologica, i dati e le elaborazioni delle prove, effettuata da Geoanalisi S.r.l.

RELAZIONE GEOLOGICA

PROVE PRESSIOMETRICHE DRT

Sondaggio N.	Prova dilatometrica DRT N.	Profondità da piano campagna (m)	Orientamento perforazione
S1	S1 D1	17.50	verticale
S2	S2 D1	14.50	verticale

10.1.2 Esecuzione di prove di permeabilità Lugeon

Durante l'esecuzione dei sondaggi geognostici, sono state condotte una serie di prove di permeabilità in situ, del tipo Prove Lugeon in avanzamento, eseguite mediante immissione di acqua sotto pressione nei fori di sondaggio, in tratti significativi degli stessi. L'attuazione della prova ha previsto, al termine del carotaggio delle porzioni di sondaggio individuate per l'esecuzione, l'apposizione nel foro di una tubazione per l'adduzione dell'acqua, in polietilene con Ø 16 mm interno, munita di otturatore ad espansione semplice (packer), per l'isolamento del tratto di foro di prova, gonfiato ad azoto con pressioni di 20 bar.

Collegata alla tubazione di immissione, nel tratto compreso tra boccaforo e la pompa "a portata costante" per l'immissione dell'acqua, è stata posizionata la strumentazione di misura, costituita da un manometro tarato per la misura della pressione di iniezione, un contatore volumetrico, con precisione di 0.05 l, utilizzabile fino a 16 bar di pressione, per la misura della portata immessa ed uno scarico con saracinesca, interposto nel circuito di alimentazione tra la pompa ed il contatore volumetrico.

Le prove sono state eseguite per almeno 5 valori della pressione di iniezione, rispettivamente 3 per pressioni crescenti e 2 in analoghe condizioni decrescenti, con tempi di durata di 15', con intervalli di misura di pochi primi, con inizio dopo il raggiungimento delle condizioni di equilibrio, controllando l'eventuale fuoriuscita di acqua a seguito di perdite attraverso l'otturatore, mediante segnalatore acustico (freatimetro) in foro.

All'inizio ed al termine delle prove, è stata effettuata una misurazione dell'altezza dell'acqua all'interno del foro di perforazione, successivamente comparata con il livello piezometrico misurato nei giorni successivi. Considerando che il rilevamento del livello di falda nei giorni immediatamente successivi, è risultato in genere posto a profondità molto ridotta dal piano campagna 1.55 m, e che si ritiene lo stesso attribuibile al fluido di perforazione utilizzato, si è effettuata l'elaborazione con un livello piezometrico di 10 m da p.c.

RELAZIONE GEOLOGICA

Tale livello è stato quindi utilizzato durante l'elaborazione delle prove per la misura o estrapolazione della portata d'acqua in litri al minuto, assorbita da un tratto di foro di lunghezza di 1.0 m, alla pressione "effettiva" di 10 kg/cm (U.L. = Unità Lugeon). Ogni altro dettaglio delle singole prove è riportato nei tabulati e grafici relativi, allegati alla presente. Nel dettaglio, le prove Lugeon sono state eseguite nei fori di sondaggio ed alle profondità di seguito riportate, mentre, nell'Allegato 4, sono riportati i tabulati e le elaborazioni delle stesse:

PROVE DI PERMEABILITA' LUGEON

Sondaggio N.	Prova N.	Tratto di profondità da piano campagna (m)
S1	LG1	16.50 21.70

Sondaggio N.	Prova N.	Tratto di profondità da piano campagna (m)
S2	LG1	12.00 – 17.70

10.1.3 Prelievo di campioni di terreno

Nel corso dell'esecuzione dei sondaggi meccanici sono stati prelevati campioni di terreno rimaneggiati, relativi a spezzoni di carota di materiale lapideo, da sottoporre ad analisi di laboratorio. I campioni rimaneggiati prelevati direttamente dalle cassette catalogatrici al termine delle osservazioni di cantiere, sono stati conservati in buste sigillate, contenute all'interno di involucri cilindrici in PVC, ed inviati al laboratorio di analisi.

RELAZIONE GEOLOGICA

Sondaggio N. Campione N.	Quota (m da p.c.)	Peso di volume	Point Load Test
S1CR1	10.6010.80	X	X
S1CR2	15.3015.50	X	X
S1CR3	19.7020.00	X	X
S1CR4	24.3024.50	X	X
S1CR5	29.6029.75	X	X
S1CR6	34.0034.20	X	X
S1CR7	39.4039.60	X	X
S2CR1	6.506.80	X	X
S2CR2	11.3011.60	X	X
S2CR3	16.4016.55	X	X
S2CR4	19.4019.55	X	X
S2CR5	26.1526.30	X	X
S2CR6	33.1033.30	X	X
S2CR7	36.3036.50	X	X

Tabella 16 – Campioni prelevati e prove di laboratorio.

Denominazione	Posizione	Quota (m slm)	Fondo foro da pc (m)
SI2	Baiano di Spoleto	310.70	15.00
SI3	Baiano di Spoleto	318.00	11.00
SI4	Baiano di Spoleto	319.00	16.00
SI5	Baiano di Spoleto	327.00	15.00

Tabella 17 – Sondaggi integrativi.

In corrispondenza dei sondaggi eseguiti sono stati prelevati 7+7 spezzoni di sui quali sono state eseguite prove di laboratorio (si veda Tabella 5) per la determinazione delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni presenti lungo il tracciato.

Nel seguito viene riportata la tabella con i valori del parametri $I_s(50)$ registrato nelle prove

RELAZIONE GEOLOGICA

eseguite negli spezzoni di carota prelevati nei sondaggi S1/09 e S2/09

	Prof. In	Prof. Fin	gamma	Is50 - 1	Is50 - 2	Is50 - 3	Is50 - 4
	m	m	KN/mc	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
S1CR1	10.6	10.8	23	0.51	0.14		
S1CR2	15.3	15.5	22	0.07			
S1CR3	19.7	20	24	0.36	0.36		
S1CR4	24.3	24.5	23	0.36	0.29	0.33	
S1CR5	29.6	29.75	23	0.36			
S1CR6	34	34.2	24	0.51	0.14		
S1CR7	39.4	39.6	23	0.14			
S2CR1	6.5	6.8	23	0.51	0.51	0.51	0.36
S2CR2	11.3	11.6	24	0.22	0.18	0.29	
S2CR3	16.4	16.55	26	0.07	0.14	0.07	
S2CR4	19.4	19.45	23	0.14	0.14	0.29	
S2CR5	26.15	26.3	22	0.04			
S2CR6	33.1	33.3	23	0.14	0.18	0.22	0.11
S2CR7	26.3	26.5	22	0.14	0.14	0.14	

Tabella 18 – Campion prelevati.

Di seguito vengono illustrate le stratigrafie relativi ai sondaggi geognostici.

Sondaggio S1/09

- Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; limo sabbioso, bruno marrone, moderatamente consistente;
- Da 0,30 a 3,90 m di profondità è presente formazione marnoso arenacea alterata; marne argillose estremamente alterate, marroni e marroni scure, con porzioni limoso sabbioso e limoso argilloso;
- Da 3,90 a 4,50 m di profondità è presente formazione marnoso arenacea alterata; marne argillose e marne siltose grigie e marroni, molto alterate;

RELAZIONE GEOLOGICA

- Da 4,50 a 19,30 m di profondità è presente formazione marnoso arenacea; alternanza di siltiti marnose e marne siltose e locali, marne e marne argillose frequentemente foliettate, grigio e grigio scure, tutte estremamente fratturate; presenza di fratture molto ravvicinate con inclinazione prevalente di 45-55°, con superfici prevalentemente lisce e localmente rugose, presenza di locale riempimento calcitico; stratificazione probabile 40-45°, a tratti caotica;
- Da 19,30 a 40,00 m di profondità è presente formazione marnoso arenacea; alternanze di prevalenti siltiti marnose in banchi metrici e subordinate marne siltose ed arenarie fini e sporadiche marne foliettate in livelli 20-40 cm, grigie e grigio scure; fratture moderatamente ravvicinate inclinate 30-45° e 70-85° con superfici rugose, talvolta lisce e con riempimento calcitico; stratificazione probabile 40-45°.

Sondaggio S2/09

- Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; limo sabbioso, bruno marrone, moderatamente consistente;
- Da 0,30 a 3,60 m di profondità è presente formazione marnoso arenacea alterata; marne argillose estremamente alterate, marroni e marroni scure, con porzioni limoso sabbioso e limoso argilloso;
- Da 3,60 a 11,20 m di profondità è presente formazione marnoso arenacea; alternanza di siltiti marnose e marne siltose e locali, marne e marne argillose frequentemente foliettate, grigio e grigio scure, tutte estremamente fratturate; presenza di fratture molto ravvicinate con inclinazione prevalente di 45°-60°, con superfici prevalentemente lisce e localmente rugose, presenza di locale riempimento calcitico; stratificazione probabile 35°-40°, a tratti caotica;
- Da 11,20 a 40,00 m di profondità è presente formazione marnoso arenacea; alternanze di prevalenti siltiti marnose in banchi metrici e subordinate marne siltose ed arenarie fini e sporadiche marne foliettate in livelli 20-40 cm, grigie e grigio scure; fratture moderatamente ravvicinate inclinate 25°-45° e 70-85° con superfici rugose, talvolta lisce e con riempimento calcitico; stratificazione probabile 20°-30°.

Sondaggio S3/10

- Da 0 a 1,40 m di profondità è presente terreno vegetale costituito da limo sabbioso debolmente argilloso con rari inclusi;
- Da 1,40 a 2,30 m di profondità si rinvencono argille limose con ciottoli sparsi;
- Da 2,30 a 3,70 m di profondità sono presenti sabbie limose e limi sabbiosi a tratti debolmente argillosi di colore bruno nerastro;
- Da 3,70 a 6,0 m di profondità sono state rinvenute ghiaie e brecce eterometriche di natura calcarea, rosate, in matrice limo sabbiosa;
- Da 6,0 a 30,0 m di profondità è presente il Bedrock (Bisciario) costituito da marne silico clastiche che si alternano a calcari marnosi e arenacei; alternanza di siltiti marnose e marne siltose frequentemente foliettate, grigio e grigio scure con tonalità sul verdastro.

Sondaggio S4/10

- *Da 0 a 0,70 m di profondità è presente terreno vegetale costituito da limo sabbioso debolmente argilloso con rari inclusi;*
- *Da 0,70 a 1,60 m di profondità si rinvencono argille limose con ciottoli sparsi;*
- *Da 1,60 a 6,6 m di profondità sono state rinvenute ghiaie e brecce eterometriche di natura calcarea, in matrice limo sabbiosa di colore ocra;*
- *Da 6,60 a 7,40 m di profondità sono presenti argille limose di colore grigio azzurre;*
- *Da 7,40 a 13,3 m di profondità sono state rinvenute ghiaie e brecce eterometriche di natura calcarea, in matrice limo sabbiosa di colore ocra;*
- *Da 13,3 a 30,0 m di profondità è presente il Bedrock (Bisciario) costituito da marne silico clastiche che si alternano a calcari marnosi e arenacei; alternanza di siltiti marnose e marne siltose frequentemente fogliettate, grigio e grigio scure con tonalità sul verdastro.*

Sondaggio S5/10

- *Da 0 a 2,0 m di profondità è presente terreno vegetale costituito da limo sabbioso debolmente argilloso con rari inclusi;*
- *Da 2,0 a 6,10 m di profondità si rinvencono limi sabbiosi di colore bruno rossastri con inclusi sparsi di natura calcarea;*
- *Da 6,10 a 14,1 m di profondità sono state rinvenute ghiaie e brecce eterometriche di natura calcarea, in matrice limo sabbiosa di colore ocra;*
- *Da 14,1 a 14,80 m di profondità sono presenti argille limose di colore grigio azzurre;*
- *Da 14,8 a 17,3 m di profondità sono state rinvenute ghiaie e brecce eterometriche di natura calcarea, in matrice limo sabbiosa di colore ocra;*
- *Da 17,3 a 30,0 m di profondità è presente il Bedrock (Bisciario) costituito da marne silico clastiche che si alternano a calcari marnosi e arenacei; alternanza di siltiti marnose e marne siltose frequentemente fogliettate, grigio e grigio scure con tonalità sul verdastro.*

10.2 Campagna Geognostica (2021).

Nell'ambito del progetto summenzionato è stata effettuata una campagna di indagini geognostiche finalizzata alla determinazione delle caratteristiche geotecniche e alla definizione stratigrafica in chiave geolitologica.

La campagna di indagine geognostica è stata così articolata:

- 1 n. 15 sondaggi geognostici/ambientali, spinti fino alla profondità di 35 m da p.c.; con prelievo di campioni;*
- 2 n. 35 prove penetrometriche S.P. T. (Standard Penetration Test);*
- 3 n. 4 prove pressiometriche;*
- 4 n. 6 prove dilatometriche;*
- 5 installazione di n. 11 piezometri a Tubo Aperto;*
- 6 installazione di n. 2 piezometri di Casagrande;*
- 7 installazione di n. 3 tubi per esecuzione prova Down-hole;*
- 8 n. 15 pozzetti esplorativi di cui n. 6 archeologici;*
- 9 n. 6 prove penetrometriche dinamiche superpesanti DPSH;*
- 10 n. 9 prove di carico su piastra.*

10.3 Sondaggi geognostici, ambientali e pozzetti esplorativi

Di seguito la tabella riepilogativa dei sondaggi effettuati con indicazione del metodo di perforazione, della profondità raggiunta, della tipologia di installazione in foro, delle prove in sito e del prelievo di campioni (CI= campioni Indisturbati, CA= Campioni Ambientali).

RELAZIONE GEOLOGICA

Sigla ID	profondità (m dal p.c.)	SPT	CI	CA	Metodo sondaggio	Installazione in foro
S01-PZ	20,00	2	2	-	Carotaggio continuo	Piezometro 3"
S02-DH	30,00	-	4	-	Carotaggio continuo	Down-Hole
S03-DH	30,00	2	3	-	Carotaggio continuo	Down-Hole
S04-PZ	25,00	2	3	-	Carotaggio continuo	Piezometro 3"
S05-PZ	30,00	2	2	-	Carotaggio continuo	Piezometro 3"
S06-DH	30,00	-	2	-	Carotaggio continuo	Down-Hole
S07-PZ (SA3)	30,00	4	1	3	Carotaggio continuo	Piezometro 3" -
S08-PZ	30,00	2	-	-	Carotaggio continuo	Piezometro 3"
S09-PZ (SA4)	30,00	4	2	2	Carotaggio continuo	Piezometro 3"
S10-PZ (SA5)	25,00	2	1	2	Carotaggio continuo	Down-Hole
S11-PZ (SA6)	30,00	5	3	3	Carotaggio continuo	Piezometro 3"
S12-DH	35,00	5	1	-	Carotaggio continuo	Down-Hole
S13-PZ	25,00	5	-	-	Carotaggio continuo	Piezometro 3"
SA1-PZ	25,00	-	-	3	Carotaggio continuo	Piezometro 3"
SA2-PZ	25,00	-	-	3	Carotaggio continuo	Piezometro 3"

Tabella 19 – Sondaggi strumentati.

Sono stati eseguiti n. 15 sondaggi a carotaggio continuo, con sistema a rotazione mediante le sonde NENZI, CMV 600 e CMV 480.

Sono stati scavati n. 15 pozzetti esplorativi mediante Escavatore a benna.

La sonda era fornita del seguente equipaggiamento:

- carotiere semplice e carotiere doppio di diametro nominale esterno 101 mm e lunghezza utile 150300 cm;
- carotiere ambientale mod. TIM con sistema di estrusione della carota "a pistone", costituito da un tubo metallico cilindrico con 101 mm e L= 1000 mm, munito all'estremità inferiore di una corona Widia e provvisto, nella parte sommitale, di un dispositivo (valvola di ritenzione) che impedisce la perdita dei campioni di terreno prelevati

RELAZIONE GEOLOGICA

- aste con filettatura tronco-conica di diametro esterno 76 mm;
- tubi di rivestimento provvisorio in acciaio con spessore di 8 mm, diametro 127 mm, in spezzoni da 150 cm.

Inoltre, erano a corredo della sonda uno scandaglio a filo graduato, una sonda piezometrica elettrica e il pocket penetrometro.

Il carotaggio è stato effettuato, ove necessario, con circolazione diretta d'acqua. Il recupero è risultato variabile in funzione della litologia riscontrata; le carote estratte sono state riposte in apposite cassette in plastica, catalogate e fotografate.

La descrizione stratigrafica dei termini rinvenuti durante le operazioni di perforazione è stata effettuata in maniera tale da mettere in evidenza i seguenti caratteri:

- composizione granulometrica; - grado di compattezza o di addensamento; - grado di arrotondamento e diametro dei clasti a granulometria grossolana; - composizione mineralogica, tessitura e struttura; - ove possibile, misure di consistenza nei terreni coesivi, mediante pocket penetrometro (P.P.).

Per ciascun tipo litologico è stato indicato il colore dominante e le eventuali screziature.

SONDAGGIO S01-PZ

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo spinto fino alla profondità di 20 m dal piano campagna; sono state effettuate n° 2 prove SPT e sono stati prelevati n° 2 campioni indisturbati; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 3,00 m di profondità è presente argilla e limo con sabbia debolmente ghiaiosa, da mediamente consistente a consistente, colore marrone chiaro con screziature grigie;*
- *Da 3,00 a 5,00 m di profondità è presente argille e limo debolmente sabbioso, da mediamente consistente a consistente, di colore grigio chiaro;*
- *Da 5,00 a 9,50 m di profondità è presente argilla e limo debolmente sabbioso, di colore marrone-grigiastro, da molto consistente a dura;*
- *Da 9,50 a 11,30 m di profondità è presente marna litoide, fratturata, di colore grigio.*
- *Da 11,30 a 18,50 di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, da molto consistente a dura, colore grigio. Presente un livello di marna litoide fratturata tra 17,50 e 17,75 m di profondità;*

RELAZIONE GEOLOGICA

- *Da 18,50 a 20,00 m di profondità è presente marna litoide fratturata, colore grigio.*

SONDAGGIO S02-DH

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 30 m, in cui sono stati prelevati n° 4 campioni indisturbati, sono state effettuate n° 1 prova pressiométrica e n° 2 prove dilatometriche; il sondaggio è stato strumentato con tubazione per prospezione sismica del tipo Down-Hole.

- *Da 0 a 4,00 m di profondità è presente argilla e limo con sabbia debolmente ghiaiosa, da molto consistente a dura, colore marrone grigiastro;*
- *Da 4,00 a 7,00 m di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, da molto consistente a dura, di colore grigio, presenti frammenti di marna litoide;*
- *Da 7,00 a 10,50 m di profondità è presente marna litoide fratturata, di colore grigio;*
- *Da 10,50 a 13,00 m di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, da molto consistente a dura, di colore grigio, presenti frammenti di marna litoide;*
- *Da 13,00 a 18,80 di profondità è presente marna litoide fratturata, di colore grigio;*
- *Da 18,80 a 19,50 m di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, da molto consistente a dura, di colore grigio, presenti frammenti di marna litoide;*
- *Da 19,50 a 30,00 m di profondità è presente marna litoide fratturata, colore grigio. Tra 24,00 e 24,50 m di profondità presente livello di marna argillosa, dura, colore grigio.*

SONDAGGIO S03-DH

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 30 m, in cui sono stati effettuati n° 2 prove SPT e sono stati prelevati n° 3 campioni indisturbati; tale sondaggio è stato strumentato con tubazione per prove strumentali di tipo di Down-Hole.

- *Da 0 a 0,40 m di profondità è presente terreno vegetale;*
- *Da 0,40 a 3,70 m di profondità è presente argilla e limo sabbioso debolmente ghiaioso, da consistente a molto consistente, di colore marrone chiaro; ghiaia calcarea, dimensioni max 4 mm;*

RELAZIONE GEOLOGICA

- *Da 3,70 a 20,10 m di profondità è presente alternanza di argilla marnosa e marna argillosa, da molto consistente a dura, generalmente scagliose, di colore grigio e grigio chiaro; i livelli di argilla marnosa presentano frammenti di marna; i livelli di marna argillosa si presentano scagliosi;*
- *Da 20,10 a 23,40 m di profondità è presente marna calcarea litoide, di colore grigio; presenti piccole intercalazioni di argilla marnosa con tipica fratturazione concoide;*
- *Da 23,40 a 25,00 di profondità è presente alternanza di argilla marnosa e marna argillosa, da molto consistente a dura, generalmente scagliosi, colore grigio e grigio chiaro; i livelli di argilla marnosa presentano frammenti di marna; i livelli marna argillosa si presentano scagliosi;*
- *Da 25,00 a 30,00 m di profondità è presente marna calcarea litoide di colore grigio, poco fratturata tra 25,00 e 29,00 m, molto fratturata tra 29,00 e 30,00.*

SONDAGGIO S04-PZ

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 25 m, in cui sono stati effettuati n° 2 prove SPT e sono stati prelevati n° 3 campioni indisturbati, sono state effettuate n.° 1 prova pressiométrica e n° 2 prove dilatometriche; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo debolmente sabbioso e ghiaiosi, colore marrone;*
- *Da 0,30 a 11,30 m di profondità è presente argilla e limo debolmente sabbiosa e ghiaiosa, molto consistente, di colore da marrone chiaro a scuro; clasti calcarei con dimensioni max 4 mm; tra 6,30 e 8,00 m di profondità e tra 9,20 e 9,70 m di profondità presenti livelli e lenti di argilla e limo con sabbia debolmente ghiaiosa, colore marrone chiaro;*
- *Da 11,30 a 16,30 m di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, da molto consistente a dura, colore grigio;*
- *Da 16,30 a 21,00 m di profondità è presente alternanza di livelli di marna e calcare marnoso, litoide, colore grigio;*
- *Da 21,00 a 25,00 di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, da molto consistente a dura, colore grigio.*

SONDAGGIO S05-PZ

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 30 m, in cui sono stati effettuati n° 2 prove SPT e sono stati prelevati n° 2 campioni indisturbati, sono state effettuate n° 1 prova pressiométrica e n° 1 prove dilatometriche; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; limo, argilla e ghiaia sabbiosa, colore marrone chiaro-avana;*
- *Da 0,30 a 2,10 m di profondità è presente limo, argilla e ghiaia sabbiosa, da consistente a molto consistente, colore marrone chiaro-avana; clasti dimensione max 2-4 mm, origine alluvionale;*
- *Da 2,10 a 5,00 m di profondità è presente limo e argilla debolmente sabbiosi e ghiaiosi, molto consistente, colore marrone chiaro, origine alluvionale;*
- *Da 5,00 a 19,00 m di profondità è presente alternanza di strati con spessore maggiore di 1 m, di calcare marnoso, marna e marna calcarea, litoidi, con argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, molto consistente, colore grigio;*
- *Da 19,00 a 30,00 di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, molto consistente, colore grigio; presenti frammenti litoidi di calcari marnosi e marne.*

SONDAGGIO S06-DH

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 30 m, in cui sono stati prelevati n° 2 campioni indisturbati, sono state effettuate n° 1 prova pressiométrica e n° 1 prove dilatometriche; il sondaggio è stato strumentato con tubazione per prospezione sismica del tipo Down-Hole.

- *Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; limo e argilla debolmente sabbioso e ghiaioso, colore marrone chiaro;*
- *Da 0,30 a 4,00 m di profondità è presente limo e argilla debolmente sabbioso e ghiaioso, molto consistente, colore marrone chiaro; clasti calcarei di dimensione max 4 mm;*

RELAZIONE GEOLOGICA

- *Da 4,00 a 6,70 m di profondità è presente alternanza di argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, molto consistente, di colore grigio;*
- *Da 6,70 a 11,00 m di profondità è presente alternanza di livelli di marna e calcare marnoso, con intercalazioni di argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, colore grigio;*
- *Da 11,00 a 30,00 di profondità è presente alternanza di marna e calcare marnoso litoide a frattura concoide, colore grigio.*

SONDAGGIO S07-PZ (SA3)

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 30 m, in cui sono stati effettuati n° 4 prove SPT prelevati n° 1 campioni indisturbati e n° 3 campioni ambientali; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; argille, limo e ghiaia debolmente sabbiosa, colore marrone;*
- *Da 0,30 a 14,30 m di profondità è presente limo, argilla e ghiaia sabbioso, molto consistente, colore marrone con lenti biancastre; clasti da subarrotondati ad angolari di dimensione max 5 cm con dimensione media 8 mm, origine alluvionale;*
- *Da 14,30 a 22,00 m di profondità è presente alternanza di strati con spessore maggiore di 1 m, di calcare marnoso, marna e marna calcarea litoide, con argilla marnosa e marna argillosa, molto consistenti, colore grigio;*
- *Da 22,00 a 30,00 m di profondità è presente calcare marnoso di colore grigio.*

SONDAGGIO S08-PZ

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 30 m, in cui sono stati effettuati n° 2 prove SPT; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; limo e argilla ghiaiosa debolmente sabbiosa, colore marrone chiaro;*
- *Da 0,30 a 2,00 m di profondità è presente limo e argilla ghiaiosa debolmente sabbiosa, molto consistente, colore marrone chiaro, origine alluvionale;*

RELAZIONE GEOLOGICA

- *Da 2,00 a 9,00 m di profondità è presente limo, argilla e ghiaia debolmente sabbiosa, da consistente a molto consistente, colore marrone con lenti biancastre; clasti da subarrotondati ad angolari di dimensione max 5 cm con dimensione media 8 mm, origine alluvionale;*
- *Da 9,00 a 24,70 m di profondità è presente alternanza di strati con spessore maggiore di 1 m, di calcare marnoso, marna e marna calcarea, litoidi, colore grigio;*
- *Da 24,70 m a 27,60 m di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, molto consistente, colore grigio;*
- *Da 27,60 a 30,00 m di profondità è presente calcare marnoso, marna e marna calcarea, litoidi, colore grigio.*

SONDAGGIO S09-PZ (SA4)

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 30 m, in cui sono stati effettuati n° 4 prove SPT prelevati n° 2 campioni indisturbati e n° 2 campioni ambientali; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; argille, limo e ghiaia, colore marrone;*
- *Da 0,30 a 1,80 m di profondità è presente argilla, limo e ghiaia, mediamente consistente, colore marrone; clasti calcarei di dimensione max 4 mm;*
- *Da 1,80 a 11,80 m di profondità è presente sabbia e ghiaia debolmente limosa e argillosa, molto addensata, colore da marrone a marrone chiaro con lenti biancastre; clasti calcarei, da subarrotondati a subangolari di dimensione max 3 cm, origine alluvionale;*
- *Da 11,80 a 29,00 m di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, da molto consistente a dura, colore grigio, presenti frammenti litoidi di calcare marnoso e marna;*
- *Da 29,00 a 30,00 m di profondità è presente calcare marnoso litoide, colore grigio.*

SONDAGGIO S10-PZ (SA5)

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 25 m, in cui sono stati effettuati n° 2 prove SPT prelevati n° 1 campioni indisturbati e n° 2 campioni ambientali; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; limo, argilla e ghiaia e ciottoli debolmente sabbiosi, colore marrone chiaro;*

RELAZIONE GEOLOGICA

- *Da 0,30 a 11,50 m di profondità è presente limo, argilla e ghiaia sabbioso, da consistente a molto consistente, colore marrone chiaro con lenti biancastre, clasti da subarrotondati ad angolari con dimensione max 5 cm e dimensione media 8 mm, origine alluvionale;*
- *Da 11,50 a 14,80 m di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, molto consistente, colore grigio;*
- *Da 14,80 a 25,00 m di profondità è presente calcare marnoso, marna e marna calcarea, litoidi, colore grigio.*

SONDAGGIO S11-PZ (SA6)

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 30 m, in cui sono stati effettuati n° 5 prove SPT e sono stati prelevati n° 3 campioni indisturbati e n° 3 campioni ambientali; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; limo, argilla e ghiaia e ciottoli sabbiosi, colore marrone chiaro;*
- *Da 0,30 a 14,70 m di profondità è presente sabbia, ghiaia con limo e argilla, moderatamente addensata, colore marrone chiaro con lenti biancastre, clasti da subarrotondati ad angolari con dimensione max 5 cm e dimensione media 8 mm, origine alluvionale;*
- *Da 14,70 a 24,00 m di profondità è presente argilla marnosa, scagliosa, molto consistente, colore grigio;*
- *Da 24,00 a 30,00 m di profondità è presente calcare marnoso, marna e marna calcarea, litoidi, colore grigio.*

SONDAGGIO S12-DH

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 35 m, in cui sono stati effettuati n° 5 prove SPT e sono stati prelevati n° 1 campioni indisturbati; il sondaggio è stato strumentato con tubazione per prospezione sismica del tipo Down-Hole.

- *Da 0 a 3,20 m di profondità è presente terreno di riporto;*
- *Da 3,20 a 17,10 m di profondità è presente limo, argilla e ghiaia, molto consistente, colore marrone chiaro con lenti biancastre, clasti da sub-arrotondati ad angolari, origine alluvionale;*

RELAZIONE GEOLOGICA

- *Da 17,10 a 35,00 m di profondità è presente argilla marnosa e scagliosa, marna argillosa molto consistente, colore grigio.*

SONDAGGIO S13-PZ

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 25 m, in cui sono state effettuate n° 5 prove SPT; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla sabbiosa, limo, ghiaia e ciottoli, colore marrone chiaro;*
- *Da 0,30 a 20,00 m di profondità è presente ghiaia e sabbia con limo, addensata, colore marrone chiaro con lenti biancastre, clasti da subarrotondati ad angolari, dimensione max 5 cm e dimensioni medie 8 mm; tra 15,00 e 16,00 m di profondità è presente un livello di limo, argilla con sabbia, colore marrone scuro;*
- *Da 20,00 a 25,00 m di profondità è presente argilla marnosa e scagliosa, marna argillosa da molto consistente a dura, colore grigio.*

SONDAGGIO SA1-PZ

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 25 m, in cui sono stati prelevati n° 3 campioni ambientali; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 1,00 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla, limo con sabbia, consistente, colore marrone chiaro;*
- *Da 1,00 a 4,20 m di profondità è presente argilla e limo con sabbia, colore marrone chiaro; presenti livelli di argilla e limo marnosi, colore grigio;*
- *Da 4,20 a 8,30 m di profondità è presente alternanza di argilla e limo marnosi, colore grigio, con argilla e limo con sabbia, colore marrone chiaro; presenti livelli di alterazione;*
- *Da 8,30 a 25,00 m di profondità è presente alternanza di argilla e limo marnosi, debolmente ghiaiosi con marna argillosa, da molto consistente a dura, colore grigio.*

SONDAGGIO SA2-PZ

È stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo con una profondità di 25 m, in cui sono stati prelevati n.° 3 campioni ambientali; il foro è stato strumentato con piezometro a tubo aperto.

- *Da 0 a 1,00 m di profondità è presente terreno vegetale; limo e argilla debolmente sabbioso, consistente, colore marrone chiaro;*
- *Da 1,00 a 7,50 m di profondità è presente marna scagliosa e fratturata, da semilitoide a litoide, colore grigio;*
- *Da 7,50 a 25,00 m di profondità è presente argilla marnosa e marna argillosa, scagliosa, da molto consistente a dura fino a semilitoide, colore grigio.*

10.3.1 Prove in foro di sondaggio

Nella tabella seguente sono indicati l'esecuzione delle prove in foro, quali pressiometriche e dilatometriche.

Sigla ID	Profondità esecuzione prove in foro (m dal p.c.)
S02-DH	Pressiometrica 2,50 Dilatometrica 9,50
S04-PZ	Pressiometrica 2,0 Dilatometrica 14,00; 19,00.
S05-PZ	Pressiometrica 3,0 Dilatometrica 10,00
S06-DH	Pressiometrica 2,50 Dilatometrica 9,00

10.3.2 Prove in foro di sondaggio (SPT)

Durante l'esecuzione del sondaggio sono state eseguite prove penetrometriche dinamiche di fondo foro del tipo S.P.T. (Standard Penetration Test) secondo quanto indicato nelle "Raccomandazioni AGI, 1977". L'attrezzatura impiegata, anch'essa conforme alla norma suddetta, è riassumibile come di seguito:

- *campionatore Raymond;*
- *punta conica di diametro esterno = 50,8 mm e angolo di punta = 60°;*
- *massa battente del peso di 63,5 Kg;*
- *batteria di aste collegabili al campionario aventi un peso di 6,5 Kg al metro lineare con un'oscillazione massima di 0,5 Kg/ml;*
- *dispositivo di guida e di sganciamento automatico del maglio all'altezza di 75 cm;*
- *centratore di guida disposto tra la testa di battuta ed il piano campagna;*
- *tubazione provvisoria di rivestimento con diametro interno superiore a quello esterno delle aste di un valore massimo di 6 cm.*

La prova, preceduta dalla pulizia del fondo foro, consiste nel far penetrare il campionario posato in fondo al foro, per tre tratti successivi di 15 cm registrando ogni volta il numero dei colpi (N_1, N_2, N_3). Con il primo tratto detto "di avviamento" si intende superare la zona di terreno rimaneggiato in fase di perforazione. Nel caso di un terreno molto compatto con $N_1 = 50$ ed avanzamento minore di 15 cm, l'infissione deve essere sospesa: la prova è dichiarata conclusa in base alle raccomandazioni AGI 1977, e si annota la relativa penetrazione.

Se il tratto di avviamento viene superato si conteggiano N_2 e N_3 (da 0,15 a 0,30 e da 0,30 a 0,45 m) fino ad un limite complessivo di 100 colpi ($N_2 + N_3$) raggiunto il quale si sospende la prova annotando l'avanzamento ottenuto. Pertanto, il parametro caratteristico della prova, prescindendo dai casi particolari di rifiuto, è:

$NSPT = N_2 + N_3$ esprime il numero di colpi per 30 cm utili di penetrazione.

RELAZIONE GEOLOGICA

Sono state eseguite complessivamente n° 34 prove; i risultati sono riportati nelle schede stratigrafiche allegate e nella tabella riepilogativa seguente:

N.	Sigla ID	da (m dal p.c.)	a (m dal p.c.)	Colpi	N spt
1	S01-PZ	3,55	4,00	3-3-3	6
2	S01-PZ	7,00	7,45	15-18-18	36
3	S03-DH	3,00	3,45	6-9-9	18
4	S03-DH	9,00	9,45	15-15-16	31
5	S04-PZ	5,00	5,45	4-6-6	12
6	S05-PZ	6,00	6,45	10-15-15	30
7	S05-PZ	22,00	22,45	14-16-18	34
8	S07-PZ (SA3)	6,00	6,45	7-11-14	25
9	S07-PZ (SA3)	10,00	10,45	10-13-13	26
10	S07-PZ (SA3)	13,55	14,00	20-15-15	30
11	S07-PZ (SA3)	20,00	20,45	31-50-RIF	RIF
12	S08-PZ	3,00	3,45	7-7-6	13
13	S08-PZ	7,00	7,45	6-8-13	21
14	S09-PZ	3,00	3,45	15-27-31	58
15	S09-PZ	7,00	7,45	27-20-32	52
16	S09-PZ	11,00	11,45	15-18-21	39
17	S09-PZ	18,55	19,00	19-19-21	40
18	S10-PZ (SA5)	5,00	5,45	10-12-15	27
19	S10-PZ (SA5)	10,00	10,45	9-14-16	30
20	S11-PZ (SA6)	4,00	4,45	11-13-14	27
21	S11-PZ (SA6)	7,00	7,45	10-15-15	30
22	S11-PZ (SA6)	12,50	12,95	7-9-16	25

RELAZIONE GEOLOGICA

N.	Sigla ID	da (m dal p.c.)	a (m dal p.c.)	Colpi	N spt
23	S11-PZ (SA6)	18,00	18,45	8-11-12	23
24	S11-PZ (SA6)	22,60	23,00	13-15-19	34
25	S12-DH	4,00	4,45	11-13-14	27
26	S12-DH	7,00	7,45	9-11-14	25
27	S12-DH	10,00	10,45	13-16-19	35
28	S12-DH	14,00	14,45	13-14-16	30
29	S12-DH	18,00	18,45	10-12-14	26
30	S13-PZ	4,00	4,45	10-17-16	33
31	S13-PZ	8,00	8,45	13-17-17	34
32	S13-PZ	13,00	13,45	13-18-19	37
33	S13-PZ	18,00	18,45	6-8-11	19
34	S13-PZ	22,55	23,00	14-21-27	48

Tabella 20 – Sondaggi - SPT.

10.3.3 Installazione dei tubi piezometrici

PIEZOMETRO TUBO APERTO

Questo tipo di piezometro è stato posizionato nel foro di perforazione dopo averlo accuratamente pulito eventuali detriti di perforazione.

Il piezometro è costituito da una batteria di tubi in PVC filettati alle estremità m/f, di diametro interno pari a 2" 0 3", finestrato nel tratto in falda.

Il tratto di tubo chiuso è stato installato superficialmente fino a profondità variabili da p.c., come richiesto dalla D.R.

L'intercapedine fra tubo e parete del foro è stata riempita con ghiaietto arrotondato siliceo lavato (é 14 mm) fino a risalire di 1.00 m dall'estremità superiore del tratto finestrato; il restante tratto è stato colmato con sabbia, bentonite e acqua.

RELAZIONE GEOLOGICA

La sommità del boccaforo è stata impermeabilizzata con malta cementizia per impedire l'infiltrazione d'acque superficiali. Più in particolare per l'installazione della suddetta strumentazione si è così proceduto:

- discesa a quota del tubo piezometrico, precedentemente assemblato secondo la sequenza di tratti ciechi e finestrati prevista dal progetto delle indagini o dalla Direzione Lavori; tra questi lo spezzone di piezometro più profondo è stato chiuso con apposito tappo di fondo;

- posa di sabbia grossa o ghiaietto pulito arrotondato ($Q = 1+4$ mm) attorno al tratto finestrato del tubo piezometrico, ritirando man mano il rivestimento, senza l'ausilio della rotazione, con l'avvertenza di controllare che il tubo piezometrico non risalga assieme al rivestimento;

- posa di un tampone impermeabile dello spessore complessivo di 0,50 m al di sopra del tratto finestrato, realizzato inserendo bentonite in palline ($Q = 1+2$ cm), ritirando sempre man mano il rivestimento;

- riempimento del foro al di sopra del tampone impermeabile con una miscela plastica acqua-cemento-bentonite (con proporzioni in peso rispettivamente di 100, 30 e 5), calata attraverso apposite aste discese sul fondo del foro, fino a piano campagna;

- spurgo del piezometro mediante utilizzo di compressore ad aria compressa.

Al termine delle lavorazioni, il terminale piezometrico è stato protetto a piano campagna da pozzetti metallici in elevazione muniti di lucchetto.

PIEZOMETRO TIPO CELLA DI CASAGRANDE

Questo tipo di piezometro è costituito da una cella porosa di materiale plastico con un diametro di 50 mm, collegata alla superficie da due tubicini rigidi in PVC del diametro di 15 mm ed uno spessore di 3 mm, giuntati tra loro da appositi manicotti.

La posa di questo piezometro è stata eseguita posizionando intorno alla cella uno strato di ghiaietto pulito ($D 1-4$ mm). La cella è stata isolata mediante il posizionamento, alla base ed al tetto della ghiaia, di uno strato di bentonite a palline.

RELAZIONE GEOLOGICA

Al di sopra dello strato isolante, il piezometro è stato riempito con miscela cementizia fino al piano campagna.

La sommità del boccaforo è stata impermeabilizzata con malta cementizia per impedire l'infiltrazione d'acque superficiali.

Per la corretta installazione della strumentazione, il foro è stato interamente intubato con rivestimento metallico 127 mm.

Il terminale piezometrico è stato inserito in un pozzetto metallico di protezione, completo di chiusino di copertura e lucchetto di chiusura.

11 Pozzetti Esplorativi

Nella tabella seguente sono indicati i pozzetti esplorativi realizzati

Sigla ID	profondità (m dal p.c.)
PZ1-PZ ARCH1	2,00
PZ2	0,80
PZ3-PA3	1,60
PZ4 ARCH3	2,00
PZ5 PA4	2,10
PZ6-PZ ARCH5	2,10
PZ7	1,70
PZ8-PZ ARCH6	1,80
PZ9-PA9	1,80
PA5	1,60
PA6	2,00
PA7-PZ ARCH7	2,00
PA10	1,10

RELAZIONE GEOLOGICA

PA2-PZ	2,00
ARCH2	
PZ ARCH4	1,00

Tabella 21 – Pozzetti esplorativi realizzati.

Di seguito vengono illustrate le stratigrafie dei pozzetti esplorativi

PZ1-PZ ARCH1

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico-archeologico con escavatore a benna con una profondità di 2 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo con sabbia, colore marrone;
- Da 0,50 a 2,00 m di profondità è presente argilla e limo con sabbia, colore marrone.

PZ2

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico con escavatore a benna con una profondità di 0,80 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo, colore marrone;
- Da 0,50 a 0,80 m di profondità è presente marna argillosa, semilitoide, scagliosa, colore grigio.

PZ3-PA3

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico-ambientale con escavatore a benna con una profondità di 1,60 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo, colore marrone;

RELAZIONE GEOLOGICA

- Da 0,50 a 1,60 m di profondità è presente marna argillosa, da molto consistente a dura, scagliosa, colore grigio.

PZ4-PZ ARCH3

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico-archeologico con escavatore a benna con una profondità di 2 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo con sabbia, colore marrone;
- Da 0,50 a 1,60 m di profondità è presente argilla e limo, colore marrone.
- Da 1,60 a 2,00 m di profondità è presente marna argillosa, da molto consistente a dura, colore grigio.

PZ5-PA4

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico-ambientale con escavatore a benna con una profondità di 2,20 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo, colore marrone;
- Da 0,50 a 2,10 m di profondità è presente argilla e limo, colore marrone;
- Da 2,10 a 2,20 m di profondità è presente marne, da molto consistenti a dure, colore grigio.

PZ6-PZ ARCH5

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico-archeologico con escavatore a benna con una profondità di 2,10 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo con sabbia debolmente ghiaioso, colore marrone scuro;
- Da 0,50 a 1,00 m di profondità è presente argilla e limo debolmente ghiaioso e sabbioso, colore marrone;

RELAZIONE GEOLOGICA

- Da 1,00 a 2,10 m di profondità è presente ghiaia e sabbia, clasti calcarei subarrotondati e subangolari; presenti reperti archeologici (laterizi).

PZ7

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico con escavatore a benna con una profondità di 1,70 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo con sabbia e ghiaia, colore marrone scuro; ghiaia calcarea, clasti da subarrotondati a subangolari;
- Da 0,50 a 1,60 m di profondità è presente argilla e limo, colore marrone;
- Da 1,60 a 1,70 m di profondità è presente sabbia e ghiaia, colore marrone chiaro; clasti calcarei subarrotondati e subangolari.

PZ8-PZ ARCH6

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico-archeologico con escavatore a benna con una profondità di 1,80 m.

- Da 0,00 a 0,60 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo con sabbia e ghiaia, colore marrone scuro; ghiaia calcarea, clasti da subarrotondati a subangolari;
- Da 0,60 a 1,80 m di profondità è presente argilla e limo con ghiaia, colore marrone chiaro, con lenti biancastre e rossicce; ghiaia calcarea, clasti subarrotondati e subangolari.

PZ9-PA9

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico-ambientale con escavatore a benna con una profondità di 1,80 m.

- Da 0,00 a 0,30 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla, limo sabbia e ghiaia, colore marrone con lenti bianche (probabilmente riporto);
- Da 0,30 a 1,80 m di profondità è presente riporto, ghiaia con sabbia e limo, colore marrone con lenti bianche.

PA5

È stato eseguito un pozzetto esplorativo ambientale con escavatore a benna con una profondità di 1,60 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo, colore marrone;
- Da 0,50 a 1,60 m di profondità è presente argilla marnosa, da molto consistente a dura, scagliosa, colore grigio.

PA6

È stato eseguito un pozzetto esplorativo ambientale con escavatore a benna con una profondità di 2,00 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo con sabbia debolmente ghiaioso, colore marrone scuro;
- Da 0,50 a 1,40 m di profondità è presente argilla e limo con ghiaia debolmente sabbioso, colore marrone chiaro;
- Da 1,40 a 2,00 m di profondità è presente ghiaia con sabbia, colore marrone chiaro, clasti calcarei subarrotondati e subangolari.

PA7-PZ ARCH7

È stato eseguito un pozzetto esplorativo ambientale-archeologico con escavatore a benna con una profondità di 2 m.

- Da 0,00 a 0,70 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo con sabbia e ghiaia, colore marrone scuro, ghiaia calcarea con clasti subarrotondati e subangolari;
- Da 0,70 a 2,00 m di profondità è presente ghiaia con sabbia, colore marrone chiaro, con clasti subarrotondati e subangolari.

PA10

È stato eseguito un pozzetto esplorativo ambientale con escavatore a benna con una profondità di 1,10 m.

RELAZIONE GEOLOGICA

- Da 0,00 a 0,20 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla, sabbia e ghiaia, colore marrone, con lenti bianche (probabilmente riporto);
- Da 0,20 a 1,10 m di profondità è presente riporto, ghiaia e sabbia con limo, colore marrone con lenti bianche; a 1,10 m di profondità dal p.c. venuta di acqua stagnante.

PA2-PZ ARCH2

È stato eseguito un pozzetto esplorativo ambientale-archeologico con escavatore a benna con una profondità di 2 m.

- Da 0,00 a 1,70 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo, colore marrone scuro;
- Da 1,70 a 2,00 m di profondità è presente marna argillosa, semilitoide, scagliosa, colore grigio.

PZ ARCH4

È stato eseguito un pozzetto esplorativo geognostico-archeologico con escavatore a benna con una profondità di 1,00 m.

- Da 0,00 a 0,50 m di profondità è presente terreno vegetale; argilla e limo con sabbia, colore marrone;
- Da 0,50 a 1,00 m di profondità è presente marna argillosa, semilitoide, scagliosa, colore grigio.

12 Prove Penetrometriche Dinamiche Continue (DPSH)

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infiggere nel terreno una punta conica (per tratti consecutivi) misurando il numero di colpi N necessari. Le Prove Penetrometriche

RELAZIONE GEOLOGICA

Dinamiche sono molto diffuse ed utilizzate nel territorio da geologi e geotecnici, data la loro semplicità esecutiva, economicità e rapidità di esecuzione, la loro elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica consente di "catalogare e parametrizzare" il suolo attraversato con un'immagine in continuo, che permette anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli attraversati e una correlazione diretta con sondaggi geognostici per la caratterizzazione stratigrafica.

La sonda penetrometrica permette inoltre di riconoscere abbastanza precisamente lo spessore delle coltri sul substrato, la quota di eventuali falde e superfici di rottura sui pendii, e la consistenza in generale del terreno. L'utilizzo dei dati, ricavati da correlazioni indirette e facendo riferimento a vari autori, dovrà comunque essere trattato con le opportune cautele e, possibilmente, dopo esperienze geologiche acquisite in zona.

Elementi caratteristici del penetrometro dinamico sono i seguenti:

- peso massa battente M;
- altezza libera caduta H;
- punta conica: diametro base cono D, area base A (angolo di apertura a);
- avanzamento (penetrazione) d;
- presenza o meno del rivestimento esterno (fanghi bentonitici).

Con riferimento alla classificazione ISSMFE (1988) dei diversi tipi di penetrometri dinamici (vedi tabella sotto riportata) si rileva una prima suddivisione in quattro classi (in base al peso M della massa battente):

- tipo LEGGERO (DPL);
- tipo MEDIO (DPM);
- tipo PESANTE (DPSH)
- tipo SUPERPESANTE (DPSH).

Classificazione ISSMFE dei penetrometri dinamici:

RELAZIONE GEOLOGICA

Tipo	Sigla di riferimento	Peso della massa M (kg)	Prof. max indagine battente (m)
Leggero	DPL (Light)	$M \leq 10$	8
Medio	DPM (Medium)	$10 < M < 40$	20-25
Pesante	DPH (Heavy)	$40 \leq M < 60$	25
Super pesante (Super Heavy)	DPSH	$M \geq 60$	25

Il penetrometro usato per le prove in sito ha le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda: DPSH TG 63-200 PAGANI

Rif. Norme	DIN 4094
Peso Massa battente	63,5 Kg
Altezza di caduta libera	0,75 m
Peso sistema di battuta	0,63 Kg
Diametro punta conica	51,00 mm
Area di base punta	20,43 cm ²
Lunghezza delle aste	1 m
Peso aste a metro	6,31 Kg/m
Profondità giunzione prima asta	0,40 m
Avanzamento punta	0,20 m
Numero colpi per punta	N(20)
Coeff. Correlazione	1,472
Rivestimento/fanghi	No
Angolo di apertura punta	90 °

Nella tabella seguente sono indicate le prove penetrometriche DPSH eseguite

RELAZIONE GEOLOGICA

Sigla ID	profondità (m dal p.c.)
DPSH 1	12,00
DPSH 2	12,00
DPSH 3	12,00
DPSH 4	12,00
DPSH 5	12,20

Tabella 21 – Prove Penetrometriche Dinamiche realizzate.

Si allegano i report con le misure eseguite, le elaborazioni dei dati e la documentazione fotografica:

- Allegato 1: planimetria ubicativa indagini geognostici;
- Allegato 2: report stratigrafia sondaggi geognostici ed ambientali, pozzetti esplorativi e documentazione fotografica;
- Allegato 3: report prove penetrometriche superpesanti DPSH;
- Allegato 4: report prove di carico su piastra.

13 Indagini geofisiche

Il presente rapporto tecnico riferisce una descrizione dettagliata sulla metodologia di acquisizione, sulla strumentazione utilizzata, sulle tecniche e modalità di inversione/interpretazione, con particolare attenzione sui risultati della campagna di indagine geofisica eseguita sui terreni dell'area progettuale, presso il territorio comunale di Spoleto (PG), nella frazione Madonna di Baiano. Le indagini e le prove sono state condotte in ottemperanza alle prescrizioni contenute nelle *Linee Guida sulla Modalità di indagine sulle strutture e sui terreni per i progetti di riparazione, miglioramento e ricostruzione di edifici inagibili* (Dipartimento della Protezione Civile, ReLUIS, A.G.I., A.L.G.I., A.L.I.G.) e nelle *Raccomandazioni A.G.I./1977*.

Il piano di indagine ha previsto:

- N. 2 stendimenti sismici M.A.S.W.;
- N. 4 prove sismiche in foro tipo Down-Hole;
- N. 2 stendimenti sismici a rifrazione in onde P, eseguiti con geofoni verticali a frequenza propria di 40 Hz;
- N. 2 stendimenti sismici a rifrazione in onde SH, eseguiti con geofoni orizzontali a frequenza propria di 10 Hz;
- N. 6 acquisizioni di sismica passiva HVSR.

Lo scopo delle indagini geofisiche è la caratterizzazione dinamica del sottosuolo nelle prime decine di metri di profondità, con l'individuazione delle principali unità sismostratigrafiche e delle relative proprietà meccaniche ed elastiche, quali la velocità delle onde longitudinali P (V_p), la velocità delle onde trasversali S (V_s) ed i relativi parametri elastici (E, G, K e ν). Sulla base dei valori delle onde di taglio (VS) e del modulo di taglio (G) è possibile valutare la rigidità del suolo ed eseguire le conseguenti valutazioni sul comportamento del sottosuolo ai fini sismici. L'ubicazione delle prospezioni geofisiche è riportata nella Tav. 01.

13.1 Prospezione sismica Multichannel Analysys of Surface Waves (MASW)

DESCRIZIONE GENERALE DEL METODO

La tecnica M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves) è un'efficiente ed accreditata metodologia sismica utilizzata nella valutazione del profilo verticale delle velocità delle onde di taglio (V_s) nei primi metri del terreno. Attualmente, grazie alla rapidità della procedura di analisi, è il metodo più largamente utilizzato nel calcolo delle V_{Seq} , secondo le indicazioni riportate nelle NTC2018 e successive modifiche ed integrazioni. Tale metodo utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie di geofoni lungo uno stendimento rettilineo e collegati ad un comune sismografo multicanale (Park et al., 1999). Le onde superficiali di Rayleigh, durante la loro propagazione, sono registrate lungo lo stendimento di geofoni e sono poi analizzate attraverso complesse tecniche computazionali, simili alla tecnica S.A.S.W., basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza (lunghezza d'onda corta) si propagano negli strati più superficiali e, quindi, forniscono informazioni più superficiali, mentre onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi. La metodologia, per la realizzazione di un'indagine sismica MASW, prevede quattro passi fondamentali:

1. Ripetute acquisizioni multicanale dei segnali sismici (Figura 1), generati da una sorgente energizzante artificiale (maglio battente su piastra in alluminio), lungo uno stendimento rettilineo di sorgente-geofoni che viene spostato lungo la linea dello stendimento stesso dopo ogni acquisizione;
2. Estrazione del modo fondamentale dalle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh (una curva per ogni acquisizione);

RELAZIONE GEOLOGICA

3. Inversione delle curve di dispersione per ottenere profili verticali 1D delle Vs (un profilo verticale per ogni curva di dispersione, posizionato nel punto medio di ogni stendimento geofonico);
4. Ricostruzione di una sezione (modello 1D) delle Vs dei terreni con approccio multicanale (con almeno due acquisizioni dei segnali, ovvero uno spostamento lungo la linea dello stendimento).

Quando sono generate onde sismiche usando una sorgente impattante come un martello su una piastra (circolare), vengono originate sia onde di volume (*P ed S*), che onde di superficie (Rayleigh e Love), le quali si propagano in tutte le direzioni. Alcune di queste onde vengono riflesse e disperse quando incontrano oggetti superficiali o poco profondi (ad esempio, fondazioni di edifici, canali sotterranei, trovanti lapidei, ecc.) e diventano rumore. Inoltre, sono spesso rilevate vibrazioni da rumore ambientale proveniente dal traffico veicolare, dall'attività industriale e, in generale, dall'attività antropica. Il vantaggio principale dell'approccio multicanale della tecnica MASW risiede nella sua intrinseca capacità di distinguere tutte queste onde dovute al rumore e di isolarle dalle onde superficiali di Rayleigh, evidenziando solo il modo fondamentale di oscillazione dei terreni.

L'isolamento del modo fondamentale di oscillazione si basa su molteplici caratteristiche sismiche dei segnali.

RELAZIONE GEOLOGICA

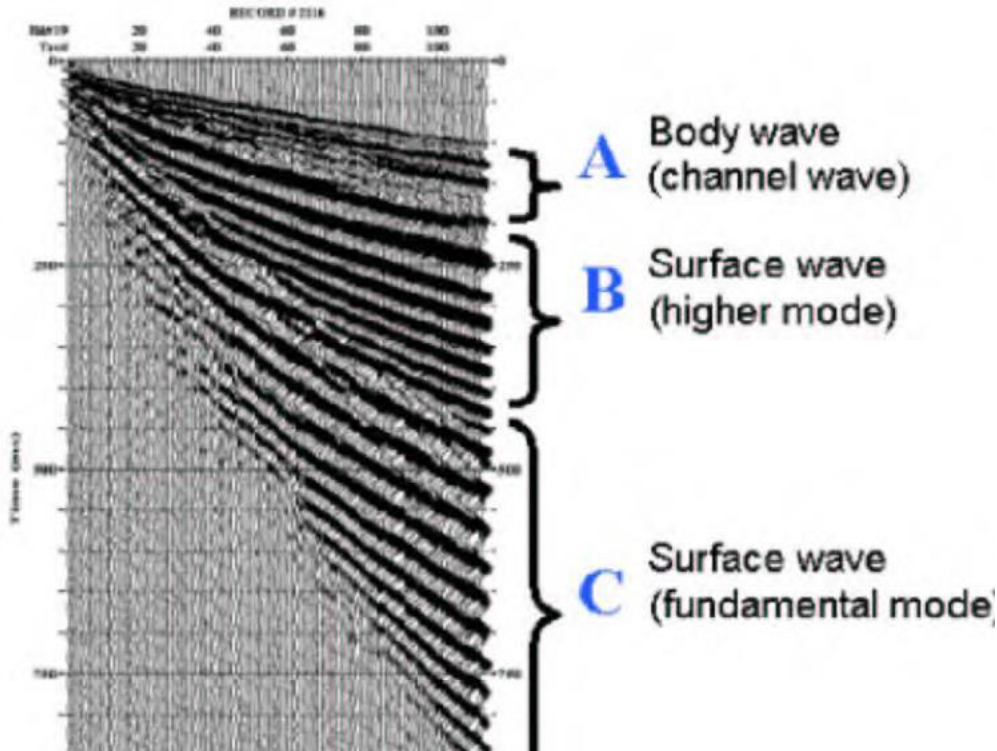


Figura 1. Segnali sismici con acquisizione multicanale e riconoscimento delle varie fasi sismiche (onde di volume, modo fondamentale e modi superiori delle onde superficiali).

Le proprietà della dispersione di tutti i tipi di onde (di volume e superficiali) sono visualizzate attraverso un metodo di trasformazione (basato sull'analisi spettrale dei segnali sismici) del campo d'onda che converte direttamente i segnali sismici acquisiti in un'immagine dove un modello di dispersione è riconosciuto nella distribuzione dell'energia trasformata in oscillazioni (Figura 2).

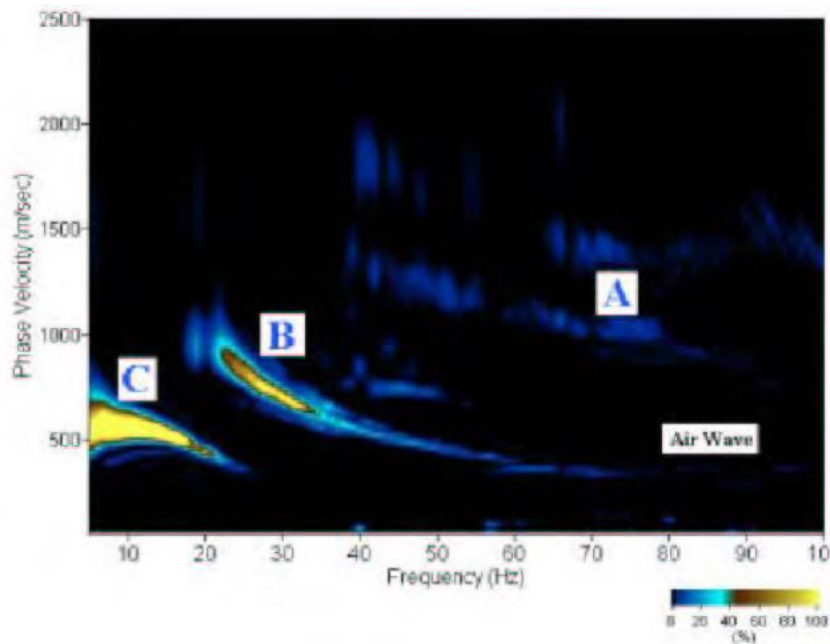


Figura 2. Curva di dispersione della velocità di fase in funzione della frequenza delle onde superficiali di Rayleigh relativa ai segnali sismici con acquisizione multicanale: C, il picco energetico rappresenta, nel modello della dispersione, il modo fondamentale da estrarre; B, il picco energetico rappresenta il primo modo; A, picco energetico poco evidente, rappresenterebbe il secondo modo.

Il modo fondamentale (proprietà della dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh) viene estratto da un modello specifico. Tutte le altre onde (riflesse, disperse, modi superiori delle onde superficiali, rumore ambientale) vengono rimosse durante il processo di elaborazione.

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata è costituita da:

- sistema di energizzazione: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 Kg battente verticalmente su piastra circolare in plexiglass del diametro di 25 cm adagiata opportunamente sul p.c.;

RELAZIONE GEOLOGICA

- sistema di ricezione: costituito da 48 geofoni verticali ad alto guadagno monocomponente di tipo elettromagnetico a bobina mobile e a massa sospesa (peso della massa 12.2gr) con frequenza propria di 4.5 Hz;
- sistema di acquisizione dati: nel nostro caso è stata utilizzata una strumentazione con memoria dinamica a 24 bit, 48 canali, cavo sismico di 120 m, notebook PC Windows 10 con software DoReMi;
- sistema di trigger: su geofono infisso in adiacenza alla piastra, sensibile alle alte frequenze per un preciso innesco della registrazione.

INDAGINI ESEGUITE: METODOLOGIA ED ACQUISIZIONE DATI

Per valutare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) sono state eseguite acquisizioni coniugate: le curve di dispersione sperimentale ottenute dalle diverse acquisizioni hanno mostrato una buona stabilità e, quindi, il modello 1D medio ottenuto risulta affidabile.

La lunghezza complessiva delle linee sismiche è stata sufficiente a determinare la sismostratigrafia dei terreni, risultando soddisfacente per una caratterizzazione geometrica e geotecnica del sottosuolo e per la valutazione del parametro V_{Seq} , come da normativa.

In seguito, si riporta una sintesi della geometria utilizzata per gli stendimenti sismici MASW.

GEOMETRIA STENDIMENTO SISMICO “MASW 100 - L1”

La prospezione sismica “MASW 100 - L1” presenta la seguente configurazione spazio-temporale:

LUNGHEZZA DELLO STENDIMENTO GEOFONICO (L): 100.00 m;

N. GEOFONI: 48 (Geospace) da 4.5 Hz;

DISTANZA INTERGEOFONICA (di): 2.00 m;

OFFSET SORGENTI (d): 4.00 m;

N. PUNTI DI ENERGIZZAZIONE PER ESTREMO: 1;

RELAZIONE GEOLOGICA

DURATA ACQUISIZIONE: 2000 ms;

INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO: 1 ms;

MASSIMA FREQUENZA CAMPIONABILE: 1000 Hz.

6 di 777

M4/29 Rev. 0 del 13.01.2020

GEOMETRIA STENDIMENTO SISMICO “MASW 100 - L2”

La prospezione sismica “MASW 100 - L2” presenta la seguente configurazione spazio-temporale:

LUNGHEZZA DELLO STENDIMENTO GEOFONICO (L): 100.00 m;

N. GEOFONI: 48 (Geospace) da 4.5 Hz;

DISTANZA INTERGEOFONICA (di): 2.00 m;

OFFSET SORGENTI (d): 4.00 m;

N. PUNTI DI ENERGIZZAZIONE PER ESTREMO: 1;

DURATA ACQUISIZIONE: 2000 ms;

INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO: 1 ms;

MASSIMA FREQUENZA CAMPIONABILE: 1000 Hz.

ELABORAZIONE DATI

L'elaborazione è stata eseguita tramite il software SeisImager/2DTM/SW (Surface Wave Analysis Wizard) della OYO/Geometrics.

Le onde sismiche superficiali non evidenziano elevati contrasti di velocità. Infatti, si verifica un aumento graduale delle velocità con la profondità (gradiente di velocità) delle onde S, le quali individuano un bedrock sismico di riferimento ($V_s > 800$ m/s) prima dei 30 m di profondità dal piano campagna per la Linea 1; viceversa, tale bedrock sismico non viene individuato per la Linea 2.

Per gli elaborati si rimanda Allegato MASW

ANALISI DEI DATI AI FINI SISMICI

Il calcolo delle $V_{S,eq}$ (m/s) per lo Shot n° 1 e per lo Shot n° 2 delle indagini MASW eseguite, fa riferimento alla seguente equazione:

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

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Si ottengono le seguenti $V_{S,eq}$ (m/s) per lo Shot n° 1 e per lo Shot n° 2.

STENDIMENTO SISMICO N. 1 - "MASW 100_L1":

$$V_{S,eq} 1 = 487.69 \text{ m/s}$$

$$V_{S,eq} 2 = 485.89 \text{ m/s}$$

STENDIMENTO SISMICO N. 2 - "MASW 100_L2":

$$V_{S,eq} 1 = 459.70 \text{ m/s}$$

$$V_{S,eq} 2 = 464.08 \text{ m/s}$$

L'incertezza sui valori calcolati di V_{seq} è dell'ordine del 20% (Mulargia & Castellaro, 2009), pertanto:

STENDIMENTO SISMICO N. 1 - "MASW 100_L1":

$$V_{seq} 1 = 487.69 \text{ m/s} \pm 94.54 \text{ da cui si ottiene per difetto } V_{seq} 1 = 390.15 \text{ m/s}$$

$$V_{seq} 2 = 485.89 \text{ m/s} \pm 97.18 \text{ da cui si ottiene per difetto } V_{seq} 2 = 388.71 \text{ m/s}$$

STENDIMENTO SISMICO N. 1 - "MASW 100_L2":

$$V_{seq} 1 = 459.70 \text{ m/s} \pm 91.94 \text{ da cui si ottiene per difetto } V_{seq} 1 = 367.74 \text{ m/s}$$

$$V_{seq} 2 = 464.08 \text{ m/s} \pm 92.82 \text{ da cui si ottiene per difetto } V_{seq} 2 = 371.26 \text{ m/s}$$

13.2 Stendimento sismico a rifrazione

DESCRIZIONE DEL METODO

Le prospezioni sismiche a rifrazione sono delle metodologie ottimali nella ricostruzione delle geometrie e degli spessori dei depositi di copertura, della profondità del substrato sismico, permettendo di individuare eventuali discontinuità laterali e di determinare le caratteristiche fisicomeccaniche dei materiali costituenti il sottosuolo. Le indagini a rifrazione si basano sulla misurazione del tempo necessario perché la perturbazione elastica causata nel terreno da una sorgente di energia pervenga a una serie di strumentazioni di ricezione (geofoni) dopo aver percorso uno strato superficiale di terreno (onde dirette) e superfici di separazione fra strati a velocità crescente verso il basso (mediante onde rifratte). Tali onde giungono sulla superficie di discontinuità individuata fra due corpi aventi proprietà elastiche diverse (rifratte) con un “*angolo di incidenza critico*” (in base alla Legge di Snell) e vengono quindi rifratte con un angolo di 90° , propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza. Le spezzate diagrammate in un sistema di riferimento “tempi/distanze”, relativamente ai tempi di primo arrivo, sono dette *dromocrone (travel-time curves)*. In ognuna di queste, si hanno punti che possono essere relativi alle onde dirette e alle onde rifratte. Conoscendo i tempi di primo arrivo e la distanza geofono-sorgente, tramite l'analisi delle dromocrone si può determinare la velocità dei vari strati. Di conseguenza, è possibile generare una stratigrafia sismica da correlare alle formazioni geologiche o discontinuità presenti nel sottosuolo. I contrasti di proprietà possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche; il modello interpretativo del mezzo investigato è di tipo elastico, omogeneo, continuo ed isotropo, mentre la profondità totale di indagine è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori (direttamente proporzionale).

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde P è articolata nelle seguenti fasi:

RELAZIONE GEOLOGICA

- Individuazione dei primi arrivi attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking (*First Break Picking*), previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro digitale;
 - Ricostruzione delle dromocrone in P e scelta del modello di sottosuolo da utilizzare nell'interpretazione;
 - Linearizzazione delle dromocrone e calcolo della velocità di propagazione delle onde elastiche analizzate e dei relativi tempi di intercetta;
 - Ricostruzione del modello di sottosuolo con calcolo della profondità di ciascun strato omogeneo, continuo ed isotropo tramite vari metodi più avanti descritti.

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per le indagini sismiche a rifrazione e per la tecnica tomografica sono le seguenti:

ONDE P

- un sistema di energizzazione: la sorgente è costituita, in parte da una mazza dal peso di 8 Kg ed in parte da una massa battente accelerata dal peso di 30 Kg, battenti verticalmente su piastra circolare in alluminio del diametro di 18 cm adagiata opportunamente;
- un sistema di ricezione: costituito da geofoni verticali monocomponente di tipo elettromagnetico a bobina mobile e a massa sospesa (peso della massa 12.2gr) con frequenza propria di 40 Hz;
- un sistema di acquisizione dati: nel nostro caso è stata utilizzata una strumentazione con memoria dinamica a 24 bit cavi sismici di 120 m, notebook PC Windows 10 con software DoReMi;
- un sistema di trigger: geofono infisso in adiacenza alla piastra, sensibile alle alte frequenze per un preciso innesco della registrazione.

ONDE SH

RELAZIONE GEOLOGICA

- un sistema di energizzazione: la sorgente è costituita, in parte da una mazza dal peso di 8 Kg battente su trave di legno ed in parte da una massa battente accelerata dal peso di 30 Kg battente con inclinazione di 45°; entrambe con battuta coniugata a destra e sinistra;
- un sistema di ricezione: costituito da geofoni orizzontali monocomponente di tipo elettromagnetico a bobina mobile e a massa sospesa (peso della massa 12.2gr) con frequenza propria di 4.5 Hz;
- un sistema di acquisizione dati: nel nostro caso è stata utilizzata una strumentazione con memoria dinamica a 24 bit, cavi sismici di 120 m, notebook PC Windows 10 con software DoReMi;
- un sistema di trigger: geofono infisso in adiacenza alla trave, sensibile alle alte frequenze per un preciso innesco della registrazione.

INDAGINI ESEGUITE: METODOLOGIA ED ACQUISIZIONE DATI

Di seguito si riportano le geometrie degli stendimenti sismici a rifrazione.

GEOMETRIA STENDIMENTO A RIFRAZIONE IN ONDE P - "LINEA 1

Lo stendimento sismico "L1 - onde P" è stato acquisito secondo la tecnica Roll-Along; tale tecnica prevede una sovrapposizione parziale di *spreads* successivi, così da poter ottenere sezioni sismiche con elevate lunghezze e buona risoluzione laterale e "zone d'ombra", in cui il dato è assente, minime.

In particolare, lo stendimento sismico presenta la seguente configurazione spazio-temporale:

LUNGHEZZA SINGOLI SPREADS (L): 213.00 m;

N. GEOFONI: 72 (Geospace) da 40 Hz;

N° GEOFONI SOVRAPPOSTI 24;

N° SOVRAPPOSIZIONI SPREADS SUCCESSIVI: 8;

LUNGHEZZA COMPLESSIVA STENDIMENTO SISMICO (L): 1221.00 m;

DISTANZA INTERGEOFONICA (di): 3.00 m;

N. PUNTI DI ENERGIZZAZIONE: 25;

DURATA ACQUISIZIONE: 500 ms;

INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO: 100 ms;

MASSIMA FREQUENZA CAMPIONABILE: 10000 Hz.

RELAZIONE GEOLOGICA

GEOMETRIA STENDIMENTO A RIFRAZIONE IN ONDE P- “LINEA 2”

Lo stendimento sismico a rifrazione in onde P - Linea 2 presenta la seguente configurazione spaziotemporale:

LUNGHEZZA DELLO STENDIMENTO GEOFONICO (L): 141.00 m;

N. GEOFONI: 48 (Geospace) da 40 Hz;

DISTANZA INTERGEOFONICA (di): 3.00 m;

OFFSET SORGENTI (d): 1.50 m;

N. PUNTI DI ENERGIZZAZIONE: 17+2;

MAXIMUM OFFSET ESTERNI 50 m;

N. PUNTI DI ENERGIZZAZIONE PER ESTREMO: 1;

DURATA ACQUISIZIONE: 500 ms;

INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO: 100 ms;

MASSIMA FREQUENZA CAMPIONABILE: 10000 Hz.

GEOMETRIA STENDIMENTO A RIFRAZIONE IN ONDE SH - “LINEA 1

Lo stendimento sismico “L1 - onde SH” è stato acquisito secondo la tecnica Roll-Along; tale tecnica prevede una sovrapposizione parziale di *spreads* successivi, così da poter ottenere sezioni sismiche con elevate lunghezze e buona risoluzione laterale e “zone d’ombra”, in cui il dato è assente, minime.

In particolare, lo stendimento sismico presenta la seguente configurazione spaziotemporale:

LUNGHEZZA SINGOLI SPREADS (L): 213.00 m;

N. GEOFONI: 72 (Geospace) da 10 Hz;

N° GEOFONI SOVRAPPOSTI 24;

N° SOVRAPPOSIZIONI SPREADS SUCCESSIVI: 8;

LUNGHEZZA COMPLESSIVA STENDIMENTO SISMICO (L): 1221.00 m;

DISTANZA INTERGEOFONICA (di): 3.00 m;

N. PUNTI DI ENERGIZZAZIONE: 25;

DURATA ACQUISIZIONE: 500 ms;

INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO: 100 ms;

MASSIMA FREQUENZA CAMPIONABILE: 10000 Hz.

RELAZIONE GEOLOGICA**GEOMETRIA STENDIMENTO A RIFRAZIONE IN ONDE SH- “LINEA 2”**

Lo stendimento sismico a rifrazione in onde SH - Linea 2 presenta la seguente configurazione spaziotemporale:

LUNGHEZZA DELLO STENDIMENTO GEOFONICO (L): 141.00 m;

N. GEOFONI: 48 (Geospace) da 40 Hz;

DISTANZA INTERGEOFONICA (di): 3.00 m;

OFFSET SORGENTI (d): 1.50 m;

N. PUNTI DI ENERGIZZAZIONE: 17+2;

MAXIMUM OFFSET ESTERNI 50 m;

N. PUNTI DI ENERGIZZAZIONE PER ESTREMO: 1;

DURATA ACQUISIZIONE: 500 ms;

INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO: 100 ms;

MASSIMA FREQUENZA CAMPIONABILE: 10000 Hz.

ELABORAZIONE DATI

I dati ottenuti dalla prospezione sismica a rifrazione sono stati elaborati secondo il:

METODO TOMOGRAFICO

Per il trattamento dei dati di sismica a rifrazione e per la ricostruzione tomografica del sottosuolo è stato utilizzato il software Rayfract 3.34 (Intelligent Resources Inc., Canada), il quale consente di ottenere immagini affidabili della struttura della velocità del sottosuolo, comprese le faglie, le forti variazioni di velocità laterali e altre anomalie di velocità. Il metodo tomografico “smooth inversion” si basa sulla modellazione fisicamente realistica della prima propagazione dei “first break” delle onde P e S. Il software utilizzando i dati di rifrazione, di trasmissione e diffrazione del modello (Lecomte, 2000) e dei residui del tempo di percorrenza lungo i percorsi delle onde, noti anche come volumi di Fresnel (Watanabe, 1999), va ad aumentare la robustezza numerica del modello di inversione.

Un modello di partenza 1D senza artefatti viene determinato automaticamente a partire dai dati dei tempi di percorrenza sismica con il metodo DeltatV (Wiechert-Herglotz) che calcola la media orizzontale dei profili di velocità-profondità 1D lungo la linea sismica. Il modello di

RELAZIONE GEOLOGICA

partenza viene poi perfezionato con l'inversione del tempo di percorrenza Eikonal Traveltime 2D WET (Schuster, 1993).

Questo tipo di inversione si basa sull'analisi del percorso d'onda espresso da Woodward e Rocca (1988), nella quale le velocità sismiche sono ricostruite a partire dalla retroproiezione dei tempi residuali lungo i tragitti che il fronte d'onda impiega per coprire la distanza sorgente-ricevitore, aggiornando di volta in volta il campo di velocità. Il metodo tomografico in questione va a rimodellare il percorso delle onde sismiche sfruttando le potenzialità offerte dall'equazione di Eikonal nella trattazione dei segnali associati ai primi arrivi.

L'inversione Wavepath Eikonal Traveltime (WET) va a calcolare l'andamento dei fronti d'onda servendosi del metodo alle differenze finite tramite l'equazione di Eikonal (Schuster, 1991), portando ad uno schema di inversione nel dominio spazio-tempo molto efficiente dal punto di vista computazionale. L'approccio appena descritto possiede la stessa validità del metodo di inversione WT (Wave-Equation Traveltime) rispetto al quale però risulta essere più veloce di almeno un ordine di grandezza. Inoltre, a differenza dei metodi WT o Woodward-Rocca, è considerato una tecnica ad alta frequenza in quanto utilizza le soluzioni dell'equazione di Eikonal.

Tuttavia, al contrario del metodo topografico basato sul tracciamento dei raggi sismici, l'inversione di tipo WET risente in parte dell'effetto ombra così come dei fenomeni legati alla diffrazione e alla banda limitata del segnale proprio dall'ondina sorgente.

L'immagine tomografica risultante permette l'individuazione di anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche con un alto potere risolutivo, in funzione delle modalità di acquisizione, permettendo di individuare discontinuità stratigrafiche anche complesse.

La presentazione delle elaborazioni eseguite dà come risultato una mappa della distribuzione delle velocità sismiche in una sezione piana contenente le sorgenti e i geofoni. Il risultato finale sarà la rappresentazione delle velocità (in m/s) per piani o sezioni indagate, poi ricostruite, secondo una scala cromatica prefissata.

Quanto più il mezzo attraversato dal suono è rigido e incomprimibile, tanto maggiore sarà la sua velocità caratteristica. Valori bassi della velocità rendono evidente la variazione negativa delle caratteristiche elastiche e meccaniche, indicando la presenza di un possibile deterioramento della struttura interna.

Nelle pagine a seguire si riportano gli elaborati interpretativi delle indagini ottenuti con il metodo sopra descritto.

Nello specifico sono riportati: i sismogrammi, per tutti gli shots eseguiti, con il relativo *picking* dei primi arrivi, le geometrie degli stendimenti sismici (*Station Coordinates* e *Shot Point Coordinates*), le dromocrone (*Travel Time*) ed i *First Break* (in formato tabulare) ottenuti con il *picking* e la sezione sismo-stratigrafica risultante a seguito dell'applicazione del metodo tomografico.

Per gli elaborati si rimanda agli Allegati rifrazione.

13.3 Prospezione Down-Hole

PROSPEZIONI SISMICHE IN FORO

Tra le prospezioni geofisiche, le misure sismiche eseguite in foro risultano avere specifica efficacia in quanto capaci di definire al meglio le stratigrafie complesse. L'uso di un foro di sondaggio, debitamente attrezzato, permette anche la caratterizzazione degli spessori non interessati da SPT o prelievo di campioni indisturbati, ampliando la capacità di investigazione dei terreni interessati in primis mediante la visione diretta.

Lo scopo di tali prove consiste nel determinare direttamente la velocità di propagazione all'interno del litotipo in esame, mediante produzione di onde di compressione (*onde P*), di taglio (*onde S*) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità derivati (*VP* e *VS*), alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate.

Le indagini sismiche che utilizzano i sondaggi sono utili per avere una sismostratigrafia dettagliata del sottosuolo.

Generalmente, in foro si applicano vari metodi di indagine:

- 1) Up-Hole;**
- 2) Down-Hole;**
- 3) Cross-Hole.**

Il metodo down-hole, il più utilizzato, prevede la sistemazione della sorgente in superficie e la misura del tempo di percorso delle onde d'arrivo in foro, sia delle onde P che delle onde S.

RELAZIONE GEOLOGICA

Per misurare le onde P ed S si provvede all'inserimento di una o più terne geofoniche, composta da un geofono P, disposto in senso longitudinale all'asse del foro di sondaggio, e due geofoni orizzontali S, posizionati perpendicolarmente tra loro e con piano di scuotimento perpendicolare all'asse del foro, ovvero orizzontale; tale terna viene resa solidale al tubo di rivestimento mediante sistemi pneumatici o elettrici.

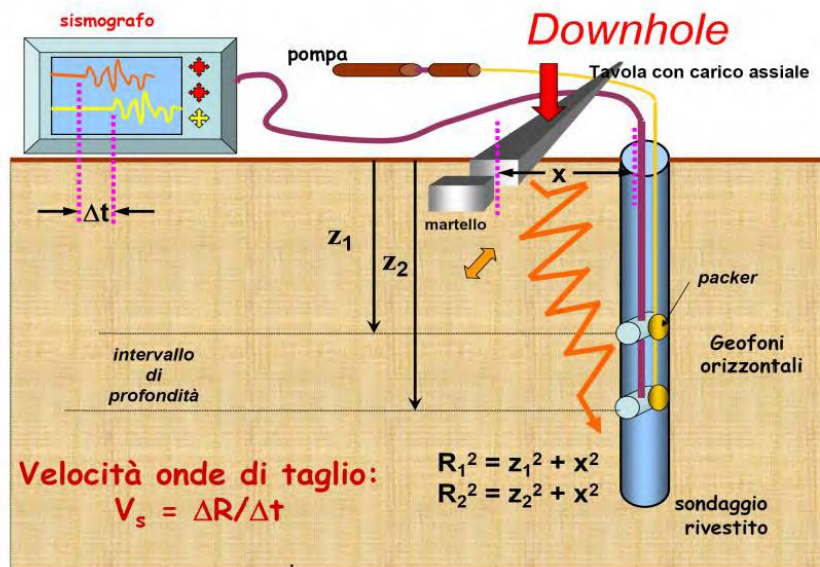


Figura 22. Schema e attrezzatura utilizzata nelle misure sismiche in foro (Down-Hole).

Il tubo di rivestimento può essere costituito da tubazione in PVC o da un tubo inclinometrico. La buona cementazione del tubo di rivestimento al foro di sondaggio garantisce la buona riuscita delle registrazioni. In alternativa, per particolari condizioni stratigrafiche, è ammissibile realizzare la misura in tubazione resa continua con le pareti del foro a mezzo di riempimento con acqua o boiaccia di bentonite. Al fine di impedire il sollevamento del tubo di rivestimento, in questi ultimi due casi si deve provvedere al contrappeso in testa. In alcune situazioni di particolare interesse e stratigrafie capaci di buona “tenuta” del foro di sondaggio, si può operare senza tubazione di rivestimento.

Ognuno dei metodi sopra esposti pone problemi nell’ottenere segnali completi e facilmente leggibili, propri del tipo e della qualità d’accoppiamento terna/terreno.

L’acquisizione dei dati si articola in due fasi: generazione ed acquisizione delle onde di compressione P e delle onde SH. Le onde P trovano produzione mediante massa battente

RELAZIONE GEOLOGICA

in direzione verticale su piattello solidale al terreno; le onde SH sono prodotte dall'impatto di massa battente su traverso sovraccaricato al fine di renderlo solidale col terreno. La sorgente sismica è costituita, per sondaggi spinti a non oltre 50 m, da una massa battente (mazza dal peso di 8 kg). Laddove necessario, si potrà considerare l'utilizzo di masse maggiori con necessità di sollevamento mediante sistemi a carrucola che devono, comunque, garantire una silenziosità e controllo di caduta in fase di rilascio.

Per terreni con difficoltosa definizione del primo arrivo delle onde S, oltre alla sommatoria di n battute, si può attuare la sovrapposizione dei segnali generati mediante impatto con direzione inversa sul traverso. Tale tecnica produce l'inversione di fase dell'onda e la sovrapposizione tra due acquisizioni alla medesima profondità permette la migliore definizione del primo arrivo onde S. L'analisi dei dati sismici provenienti da una prova Down-Hole, consiste nel diagrammare i tempi di tragitto, misurati lungo il percorso sorgente-ricevitore, in funzione della profondità, determinando

La velocità verticale dei litotipi incontrati nella perforazione ed i loro moduli elastici.

Il metodo più semplice per calcolare la velocità media negli intervalli tra due posizioni geofoniche contigue è quello di presupporre che le onde viaggino quasi verticalmente e che quindi la loro velocità apparente sia dz/dt , dove dz è l'incremento infinitesimo di profondità e dt il corrispondente incremento dei tempi di arrivo.

Infatti, il fronte d'onda ed il relativo raggio sismico non subiranno variazioni in presenza di eventuali discontinuità solo nel caso di incidenza normale, cioè quando la sorgente è molto prossima al pozzo, ed inoltre, le superfici di discontinuità sono perpendicolari all'asse della perforazione stessa.

CORREZIONE

Mediante una applicazione su foglio elettronico (vedi tabulati allegati), i tempi letti sono corretti in funzione dello scarto di trigger (in più o in meno rispetto al tempo di trigger medio) ed infine corretti in funzione della geometria del sistema (posizione della sorgente rispetto al foro ed alla profondità di acquisizione) attraverso la formula:

RELAZIONE GEOLOGICA

$$t^* = \frac{z}{d} \cdot t = \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \cdot t$$

dove,

z - profondità del ricevitore;

d - distanza effettiva tra sorgente e ricevitore;

R - distanza superficiale tra sorgente e foro;

t - tempo determinato dalle tracce di registrazione;

t* - tempo corretto.

In genere, però, la condizione di grande prossimità tra sorgente e bocca-pozzo non è mai verificata, non solo per motivi logistici ma anche per evitare che l'onda elastica si trasmetta lungo il materiale di condizionamento del pozzo, provocando fenomeni di disturbo ai segnali (*onde di tubo*).

Quindi, la sorgente si colloca sempre ad una certa distanza *d* (non trascurabile), per cui è necessario correggere i tempi di arrivo in modo tale da ottenere i valori che si riscontrerebbero se il percorso dei raggi fosse verticale.

La misura dei tempi dei primi arrivi delle onde sismiche deve essere realizzata con precisione e con un dettaglio non inferiore al decimo di millisecondo. Ogni ritardo fra il momento dell'energizzazione fornita al terreno e l'inizio della registrazione sul sismografo si traduce in un errore significativo nei valori di velocità misurati.

Per annullare ogni effetto di ritardo, viene posizionato un geofono esterno, detto *geofono spia*, a distanza costante lungo l'intero step di acquisizione; non è necessario che il geofono spia sia collocato in prossimità del foro di sondaggio, anzi, al fine di ovviare l'intralcio alle operazioni di corda, se ne ritiene opportuna una distanza di almeno 2 m dal foro e altrettanto dalla zona di energizzazione.

La forma d'onda restituita da questo geofono viene acquisita su un canale del sismografo e viene analizzata separatamente rispetto a quello che avanza in profondità, in modo da poter valutare ogni possibile anticipo o ritardo del treno d'onda.

RELAZIONE GEOLOGICA

Il valore del tempo del primo fronte di arrivo a questo geofono è sempre lo stesso per tutte le battute.

L'analisi dei dati prevede che le battute eseguite in diversi momenti, avanzando in profondità, vengano raccolte a ricostruire un unico sismogramma, identico a quello che sarebbe stato ricevuto da una catena di tanti geofoni quante sono le posizioni di misura nel foro. In particolare, vengono raggruppate in un sismogramma le forme d'onda relative al geofono verticale P (asse z) e in un altro sismogramma le forme d'onda relative ai geofoni orizzontali S (assi x e y).

Il passo tra una lettura e l'altra è generalmente fissata in funzione della stratigrafia, preferendo comunque, la permanenza del passo costante lungo l'intero foro di sondaggio. A meno di specifiche necessità geotecniche (ricerca del passaggio litologico di estremo dettaglio) il passo consigliato è definito in 1 m.

Il metodo geofisico down-hole consente la caratterizzazione meccanica dei terreni investigati mediante stima diretta della velocità di propagazione delle onde elastiche di compressione VP e di taglio VS. Inoltre, qualora si conosca anche la densità "ρ", tale metodo consente la caratterizzazione delle caratteristiche meccaniche dei terreni investigati:

• $\nu = \frac{(V_p / V_s)^2 - 2}{2(V_p / V_s)^2 - 2}$	rapporto di Poisson
• $G = \rho \cdot V_s^2$	modulo di taglio
• $E = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu)$	modulo di Young
• $M = \frac{(\gamma \cdot V_p^2)}{g}$	modulo di compressibilità

Figura 23. Caratteristiche meccaniche dei terreni determinabili dalla prospezione Down-Hole.

Anche per quanto riguarda i profili sismici verticali, occorre precisare che non sempre gli spessori coincidono con quelli dei litotipi, poiché possono esserci strati contigui litologicamente diversi, caratterizzati da valori simili delle velocità delle onde elastiche, e così pure strati litologicamente omogenei in cui la velocità varia per una variazione di uno dei parametri fisici, come ad esempio la porosità o il contenuto d'acqua che lo caratterizzano.

STRUMENTAZIONE, METODOLOGIA ED ACQUISIZIONE DATI

Le indagini sono state eseguite nei fori di sondaggio realizzati in corrispondenza del sito progettuale, spinte fino alla profondità di 30 m metri dal boccaforo ad intervalli di 1 m, a partire da 0 m a -30 m dal boccaforo, facendo scendere quindi l'apparato di misurazione nel foro.

L'acquisizione dei segnali è stata rilevata mediante il sensore SSBH, utilizzato come dispositivo specifico per misure di vibrazioni in foro. Tale sensore è stato prodotto da *Sara electronic instruments* ed è realizzato con una robusta struttura in acciaio, equipaggiato con 5 sensori da 10 Hz. Per la produzione di onde P ci si è avvalsi di piattello in alluminio e mazza battente di 8 kg, mentre per la generazione di onde SH è stato utilizzato un traverso in legno con sovraccarico mediante automezzo con massa battente di 8 kg e direzione d'impatto parallela al terreno.

Onde S

Dopo la lettura dei tempi di arrivo del segnale sismico, relativi ai percorsi scoppio-geofono, ed una elaborazione preliminare del segnale (filtraggi, aggiustamenti in ampiezza, ecc.) si procede al calcolo della velocità. I tempi di primo arrivo letti dai sismogrammi sono posti in funzione della profondità della sorgente su un diagramma spazio-tempo eseguendo così la dromocrona e calcolando le velocità in funzione delle pendenze ottenute tramite le rette di regressione interpolanti.

Onde P

Analogamente a quanto sopra, si procede al calcolo della velocità delle onde compressionali P. Anche in questo caso, i tempi di primo arrivo letti dai sismogrammi sono posti in funzione della profondità della sorgente su un diagramma spazio-tempo, eseguendo così la dromocrona e calcolando le velocità in funzione delle pendenze ottenute tramite le rette di regressione interpolanti.

Anche per le onde P sono calcolate le velocità intervallari, ma si ritengono poco significative in quanto, a causa del basso valore dei tempi registrati dovuti alle relative elevate velocità

RELAZIONE GEOLOGICA

delle onde stesse, l'andamento risulta fortemente variabile anche con piccole variazioni nelle letture dei tempi nella seconda e terza cifra decimale.

Generalmente, le acquisizioni in onde P risultano essere di peggior qualità rispetto alle acquisizioni in S. Tale condizione deriva da alcuni fattori:

- minimo ritardo tra i vari geofoni con conseguente difficoltà di lettura (problema generalmente risolvibile con l'incremento della frequenza di campionamento, che nell'occasione poniamo non inferiore a 10k Hz);
- possibile canalizzazione delle onde compressionali lungo la cementazione e la tubazione di rivestimento;
- possibile disturbo derivante da microfratturazione e/o disturbo nel terreno fianco foro;
- minor energia trasmessa nelle onde P rispetto alle onde S.

In caso di presenza di terreni compressibili in superficie, si può considerare, in accordo con il progettista, se la produzione di onde P sia strettamente necessaria. Infatti, l'impatto può infiggere il piattello di battuta e generare disomogeneità del ritardo derivante dalla differente profondità contatto con il terreno.

ELABORAZIONE DATI

L'elaborazione è stata eseguita tramite il software GEOEXPLORER DoReMi v. 2.1.0 di SARA Electronic Instruments, mentre il calcolo mediante una applicazione su foglio elettronico Excel del pacchetto Microsoft Office.

Gli elaborati che si riferiscono alle prove effettuate sono di seguito riportati.

ANALISI DEI DATI AI FINI SISMICI

Il calcolo delle $V_{S,eq}$ (m/s) delle indagini sismiche Down-Hole eseguite fa riferimento alla seguente equazione:

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

RELAZIONE GEOLOGICA

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Si ottengono così le seguenti $V_{S,eq}$ (m/s):

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S2-DH"

$$V_{S,eq} = 370.46 \text{ m/s}$$

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S3-DH"

$$V_{S,eq} = 474.32 \text{ m/s}$$

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S6-DH"

$$V_{S,eq} = 452.98 \text{ m/s}$$

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S12-DH"

$$V_{S,eq} = 615.69 \text{ m/s}$$

L'incertezza sui valori calcolati di V_{seq} è dell'ordine del 20% (Mulargia & Castellaro, 2009), pertanto:

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S2-DH"

$$V_{seq} = 370.46 \text{ m/s} \pm 74.09 \text{ da cui si ottiene per difetto } V_{seq} = 296.37 \text{ m/s}$$

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S3-DH"

$$V_{seq} = 474.32 \text{ m/s} \pm 94.86 \text{ da cui si ottiene per difetto } V_{seq} = 379.46 \text{ m/s}$$

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S6-DH"

$$V_{seq} = 452.98 \text{ m/s} \pm 90.60 \text{ da cui si ottiene per difetto } V_{seq} = 362.39 \text{ m/s}$$

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE - "S12-DH"

$$V_{seq} = 615.69 \text{ m/s} \pm 123.14 \text{ da cui si ottiene per difetto } V_{seq} = 492.55 \text{ m/s}$$

14 Indagini di Sismica Passiva (Rapporto H/V)

CARATTERISTICHE DEL METODO DI INDAGINE

Il metodo d'indagine di sismica passiva (Horizontal to Vertical Spectral Ratio o "Metodo di Nakamura") è basato sul calcolo dei rapporti spettrali tra la componente orizzontale e quella verticale del segnale acquisito (rapporto H/V) e consente di determinare la frequenza di risonanza o fondamentale, ovvero la frequenza con cui un terreno o un edificio vibra con maggiore ampiezza, se sottoposto ad una sollecitazione sismica. Tale frequenza è determinata utilizzando il rumore ambientale (il cosiddetto "microtremore", cioè del rumore a corto periodo). Mediante un sistema di acquisizione composto da un sensore a tre componenti (verticale, Est-Ovest e Nord-Sud), si registrano finestre di rumore ambientale dalle quali è possibile elaborare i rapporti spettrali H/V. Tale tecnica di acquisizione è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque (salvo dovuti accorgimenti) e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale.

Dall'elaborazione dei dati acquisiti direttamente sul terreno si ottiene che, ciascun picco non legato a rumori antropici, nel grafico H/V corrisponde ad un livello stratigrafico che presenta un contrasto di impedenza rispetto al livello sottostante. Maggiore è il contrasto di impedenza, maggiore è l'ampiezza attesa del picco H/V.

Il numero di picchi litologici visibili in un grafico "HVSR-frequenza" dipende dal contrasto, dalla distanza tra le due discontinuità e dalla funzione di lisciamento impiegata: ad esempio, un contrasto basso tra due discontinuità vicine, le renderà difficilmente individuabili singolarmente ed allo stesso tempo un lisciamento ampio, agendo da filtro passa basso, renderà coalescenti le discontinuità minori.

Per le stesse ragioni, l'aumento del lisciamento porta anche ad una diminuzione dell'ampiezza assoluta di ciascun picco e, per ovviare a questi problemi, è sufficiente adottare la stessa procedura di analisi dei dati durante tutta la campagna di misura in modo da rendere confrontabili i risultati ottenuti.

RELAZIONE GEOLOGICA

Possono esistere anche picchi HV di origine antropica, ma questi sono solitamente molto stretti e si presentano come picchi positivi, di diversa ampiezza, su tutte le componenti del moto. Al contrario, il picco HV di natura litologica è determinato da una depressione nello spettro di ampiezza della componente verticale.

I picchi antropici (come quelli legati alle attività industriali), possono scomparire di notte e riapparire nuovamente di giorno, esattamente con la stessa forma in tutte le registrazioni effettuate in una determinata area.

Per usare l'HVSR come strumento stratigrafico assoluto è necessaria una stima della velocità delle onde di taglio (V_s).

Se la V_s è nota da altre indagini, è sufficiente invertire l'equazione seguente, per ricavare lo spessore h :

$$f_r = V_s / (4 h)$$

dove:

f_r frequenza fondamentale (Hz)

V_s velocità delle onde di taglio S (m/s)

h spessore dello strato (m)

Diversamente, è sufficiente effettuare una misura HVSR in un punto in cui siano note le discontinuità stratigrafiche e usare le frequenze di risonanza trovate e le profondità degli orizzonti associati per trovare la V_s , sempre tramite la precedente Equazione 1.

Poiché la V_s varia generalmente con la profondità, quando si considerano orizzonti molto profondi e superficiali nella stessa analisi, per avere stime più precise può essere opportuno rettificare il

valore di V_s in funzione della profondità.

La durata delle acquisizioni è stata di 30 minuti. Si precisa che tutte le prove sono state eseguite in assenza di pioggia ed in presenza di vento a raffiche di debole intensità. Inoltre, gli edifici, anche se presenti nell'area di studio, erano ad una distanza tale da non esercitare nessuna influenza sul sensore.

RELAZIONE GEOLOGICA

CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Le acquisizioni HVSR sono state eseguite mediante l'utilizzo del sismografo SR04 GeoBox della Sara Electronic Instruments, in grado di registrare il segnale sismico in una memoria allo stato solido SD/MMC. Lo strumento opera con un numero di canali pari a 3, presenta una dinamica di 144 dB (24 bit effettivi) e campionamento simultaneo su tutti e tre i canali, con frequenza nominale propria di 4.5 Hz.

SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA E DATA PROCESSING

Il **data processing**, come fornito dalle linee guida del progetto SESAME (2004), potrà essere effettuato nel seguente modo:

1. Suddivisione della finestra di registrazione completa (la lunghezza della finestra dipende dal valore minimo di frequenza da campionare);
2. Eliminazioni delle sotto-finestre contenenti transienti mediante un'analisi basata sul rapporto **Sta/Lta**;
3. Utilizzo delle **FFT** (Fast Fourier Transform) per il computo degli spettri;
4. Lisciamento (**smoothing**) degli spettri, utilizzando diverse tecniche. Le più utilizzate sono la "*Konno-Ohmachi smoothing window*", valida soprattutto per analizzare frequenze inferiori a 1 Hz, e la "*Hanning smoothing window*" valida per frequenze superiori a 1Hz;
5. Calcolo (facoltativo) della componente orizzontale media ottenuta preferibilmente mediando (con media geometrica) le due componenti orizzontali E-O e N-S;
6. Calcolo del rapporto spettrale H/V (o dei rapporti NS/V, EO/V) per ciascuna sottofinestra;
7. Stima del valore medio della curva H/V e della deviazione standard.

RISULTATI DELLE MISURE DI RUMORE

Le indagini HVSR eseguite (N.6 acquisizioni e successive elaborazioni), processate con il software GeoExplorer di Sara Electronic Instruments, mostrano diversi picchi spettrali, di cui quelli più significativi sono stati riscontrati alle frequenze di 6.332 Hz (HVSR1), 9.477 Hz (HVSR2), 14.185 Hz (HVSR3), 1.262 Hz (HVSR4 e HVSR6) e 1.336 Hz (HVSR5) (Figura 3,

RELAZIONE GEOLOGICA

Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8), identificati sulla base dell'andamento dello spettro di ampiezza.

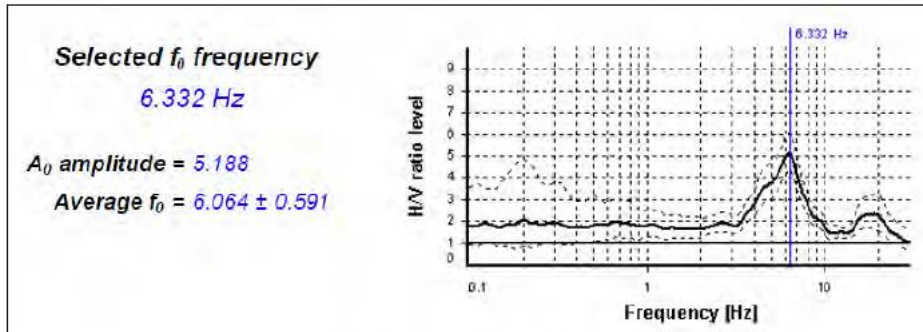


Figura3. Curva HVSr1 - CLASSE B.

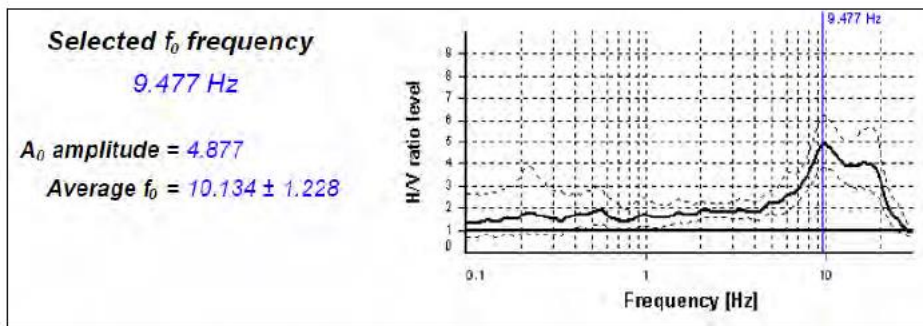


Figura4. Curva HVSr2 - CLASSE B.

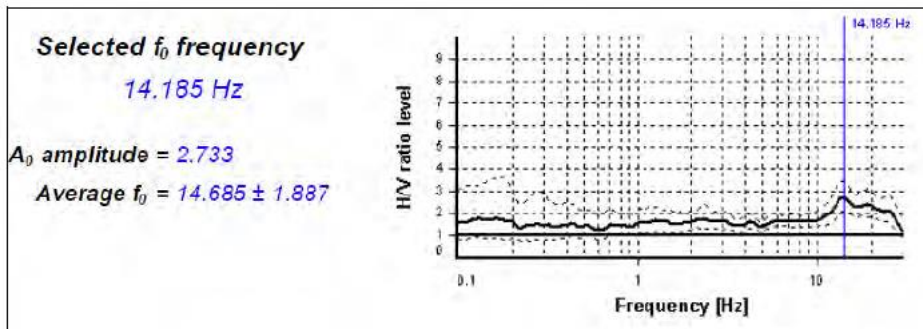


Figura 24, curva hvsr3 – classe b

RELAZIONE GEOLOGICA

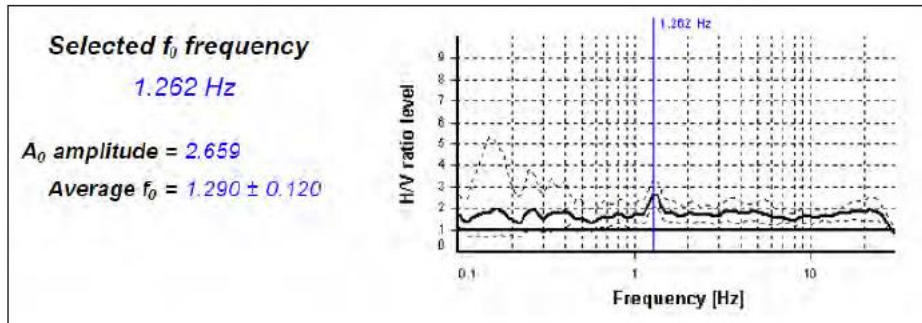


Figura6. Curva HVSr4 - CLASSE B.

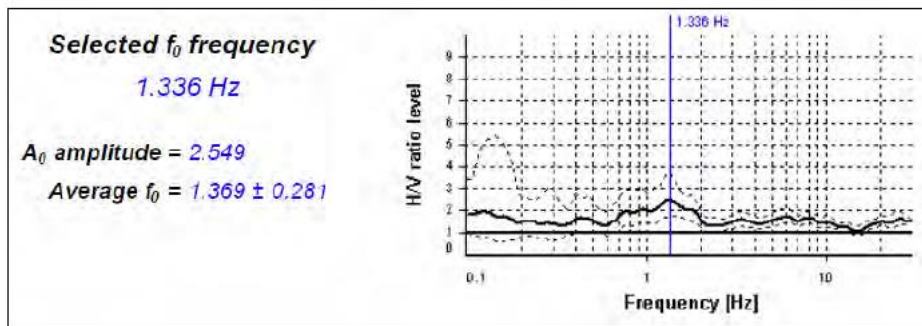


Figura7. Curva HVSr5 - CLASSE B.

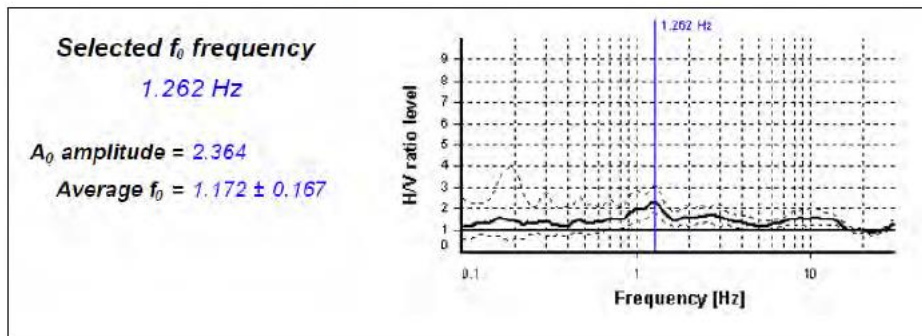


Figura 25 curva hvsr6 classe b

Secondo la classificazione proposta da Albarello & Castellaro (2011) e Albarello et al. (2011), risulta che la prova eseguita rientra nella seguente classe:

CURVA HVSr1- Classe B - curva H/V sospetta (da "interpretare"), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

CURVA HVSr2- Classe B - curva H/V sospetta (da "interpretare"), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

RELAZIONE GEOLOGICA

CURVA HVSR3- Classe B - curva H/V sospetta (da “interpretare”), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

CURVA HVSR4- Classe B - curva H/V sospetta (da “interpretare”), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

CURVA HVSR5- Classe B - curva H/V sospetta (da “interpretare”), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

CURVA HVSR6- Classe B - curva H/V sospetta (da “interpretare”), da utilizzare con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze.

Le curve spettrali ottenute rispettano pienamente i criteri SESAME (2004) e, perciò, possono essere considerate attendibili, anche se di difficile interpretazione.

CONCLUSIONI

Per il sito in esame sono state riscontrate distinte frequenze proprie di risonanza del modo prevalente, dovute alle eterogeneità stratigrafiche del sottosuolo.

Le frequenze prevalenti sono centrate su **6.332 Hz** (HVSR1), **9.477 Hz** (HVSR2), **14.185 Hz** (HVSR3), **1.262 Hz** (HVSR4 e HVSR6) e **1.336 Hz** (HVSR5).

Si allega:

- scheda di acquisizione.