



CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA
AREA SERVIZI TERRITORIALI METROPOLITANI
Servizio Progettazione Costruzioni e Manutenzione Strade

S.P. n° 65 "DELLA FUTA"
PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65
ALL'ABITATO DI RASTIGNANO:
II Stralcio da Ponte delle Oche a Rotatoria Rastignano

**Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della
DGR n.2193 del 2015 (Comune di San Lazzaro di
Savena)**



Codice ADD1603

Rev.	Data	Redatto	Controllato
0	Ottobre 2018	Andrea Mastrangelo	Daniele Mingozzi
1			
2			

Approvato
Giancarlo Guadagnini



Sede Principale:
Viale Baccarini, 29
48018 FAENZA (RA)
Tel. 0546 663423
Fax 0546 663428

Sede di Bologna:
Via Zacconi, 16
40127 BOLOGNA (BO)
Tel. 051 245663
Fax 0546 663428

Sede di Santarcangelo:
Via Andrea Costa, 115
47822 SANTARCANGELO DI
ROMAGNA (RN)
Tel. 0546 663423
Fax 0546 663428

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

INDICE

1.	PREMESSA.....	3
1.1	METODOLOGIA	6
2.	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	8
2.1	NORMATIVA.....	8
2.1.1	<i>Pianificazione territoriale e urbanistica.....</i>	8
2.1.2	<i>Geotecnica / Geotecnica sismica.....</i>	8
1.1.	BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO	8
3.	INDAGINI GEOGNOSTICHE E RILIEVI IN SITO E IN LABORATORIO	11
3.1	INDAGINI IN SITO	11
3.1.1	<i>Indagini 1996 – Thesis Engineering.....</i>	11
3.1.2	<i>Indagini 1998 – Consorzio Treesse.....</i>	12
3.1.3	<i>Indagini 2004 – RCT</i>	12
3.1.4	<i>Indagini 2007 – SPG</i>	12
3.1.5	<i>Indagini 2009 – Sogeo / SGT</i>	13
3.1.6	<i>Indagini 2016 – Geoprobe</i>	13
3.1.7	<i>Sommario delle indagini in sito.....</i>	14
3.2	RILEVAMENTO GEOMECCANICO	16
3.3	PROVE DI LABORATORIO	19
3.4	INDAGINI DI TIPO SISMICO	22
3.4.1	<i>Caratteristiche del rilievo sismico tipo HVSR.....</i>	22
4.	CARATTERIZZAZIONE SISMO-STRATIGRAFICA	25
4.1	DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE DEI TERRENI NEL PROGETTO DEFINITIVO....	25
1.2.	DENSITÀ, PROPRIETÀ DEFORMATIVE E DISSIPATIVE (CURVE G/G0 - γ E D/D0 - γ)...28	
2.	AZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO.....	29
5.	VALUTAZIONI SULLA RISPOSTA SISMICA LOCALE	32
5.1	PREMESSA.....	32
5.2	MODELLAZIONE NUMERICA.....	34
5.3	RISULTANZE ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE	37
5.3.1	<i>Spettri di risposta elastici.....</i>	38
5.3.2	<i>Fattore di amplificazione FA = PGA/PGA0.....</i>	39
5.3.3	<i>Rapporto delle Intensità di Housner</i>	40
6.	VALUTAZIONI SUL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	41
6.1	GENERALITÀ E CONDIZIONI PER LA LIQUEFAZIONE	41
6.2	APPROCCIO SEMPLIFICATO PER LA STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	43
6.2.1	<i>Valutazione del rapporto di tensione ciclica "CSR"</i>	44
6.2.2	<i>Valutazione del rapporto di resistenza ciclica "CRR".....</i>	45
6.2.3	<i>Criteri rappresentativi dei risultati della stima del potenziale di liquefazione ..</i>	46
7.	CONCLUSIONI	48
7.1	LIMITI DELL'ANALISI NUMERICA	48

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

1. PREMESSA

La lunga vicenda del nodo di Rastignano ha origine dall'accordo che le Ferrovie dello Stato e TAV stipularono nel 1991 per realizzare la linea Alta velocità Bologna – Firenze e negli accordi successivi (1994) con la Regione Emilia-Romagna che compresero tra gli impegni la risoluzione del cosiddetto nodo di Rastignano nell'ambito delle questioni relative alla viabilità di servizio.

Dopo varie vicissitudini, il 05/09/2008 si concluse la Conferenza di Servizi sul Progetto Definitivo dell'opera con la sottoscrizione del relativo Rapporto di VIA.

Un ulteriore accordo siglato il 02/03/2011 fra Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ANAS, Rete Ferroviaria Italiana Regione Emilia Romagna, Provincia di Bologna, Comune di Bologna, Comune di Pianoro, Comune di San Lazzaro di Savena, Parco regionale dei Gessi Bolognesi e Calanchi dell'Abbadessa individuava, nei limiti delle risorse allora disponibili, un primo lotto funzionale immediatamente realizzabile a cura di RFI S.p.a., che comprendeva anche il completamento della strada IN870 (o Lungosavena), ed un secondo lotto rimandato ad una fase successiva, in attesa di finanziamento.

La direttrice della variante SP65 veniva quindi divisa in due parti:

- ✓ I stralcio ovvero il tratto Nord composto dal completamento della strada Lungosavena e dal tratto settentrionale della variante di Rastignano (linea verde nella figura seguente) e attualmente appaltato da RFI;
- ✓ II stralcio ovvero il completamento verso Sud della variante di Rastignano (linea magenta nella figura seguente).

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

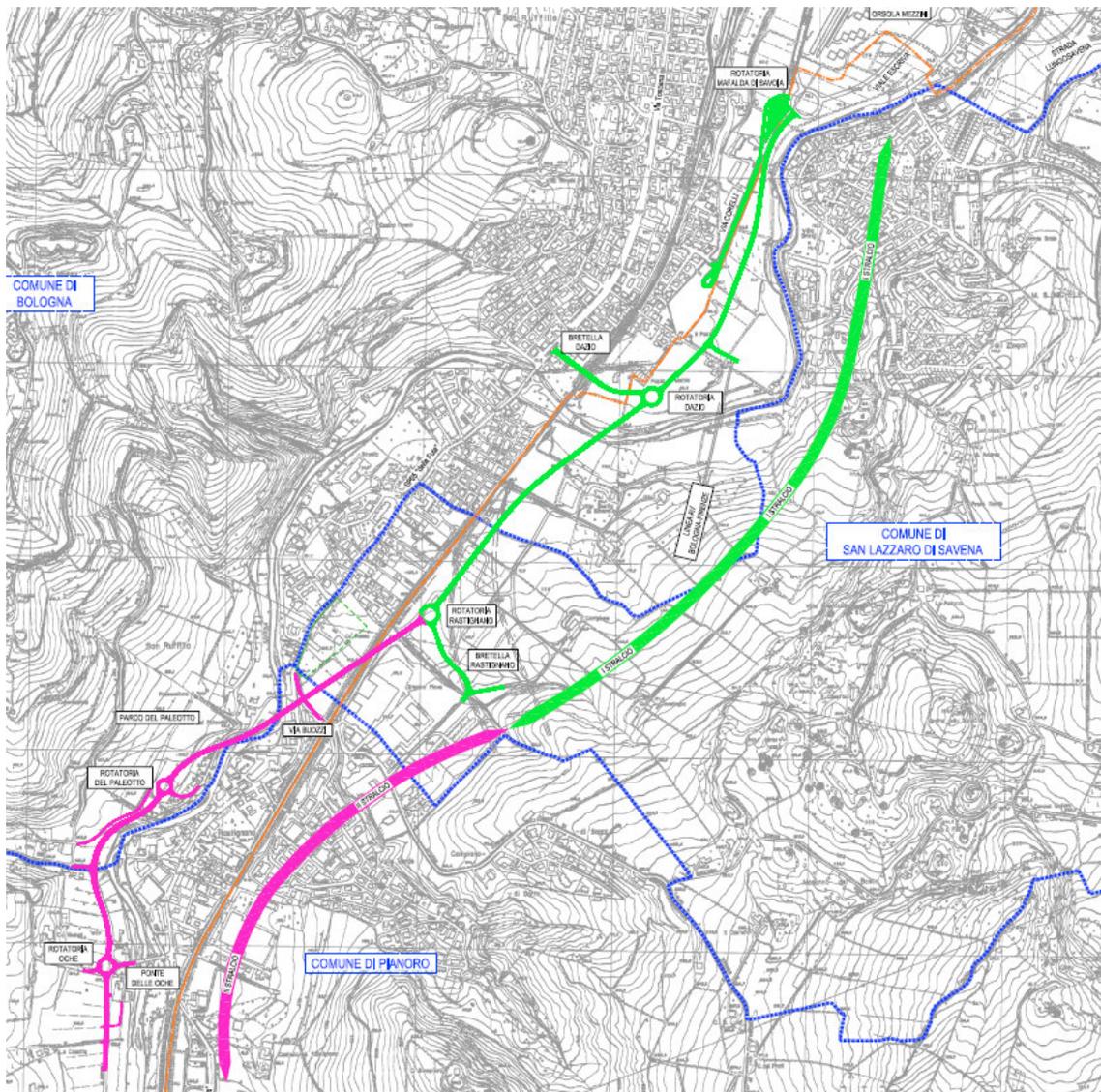


Figura 1.1: Direttrice della variante SP65: I stralcio in verde, II stralcio in magenta.

Il primo lotto funzionale è stato appaltato con la procedura di appalto integrato da RFI S.p.A. nell'anno 2014 ed è attualmente in fase di costruzione.

Nell'anno 2016 il II stralcio è stato inserito fra gli interventi di completamento della rete viaria di adduzione nell'ambito del progetto di "Potenziamento del sistema tangenziale di Bologna tra Borgo Panigale e San Lazzaro", la progettazione definitiva dell'opera è stata affidata da Autostrade per Italia SpA a Spea Engineering SpA. Nell'anno 2017, l'intervento è stato stralciato fra quelli compresi nel progetto di potenziamento della tangenziale ed è stato inserito fra quelli finanziati nell'ambito del "Patto per Bologna". Spea Engineering Spa ha quindi concluso il nuovo progetto definitivo del II stralcio che per molti aspetti ricalca quello approvato dal procedimento di VIA 2008 e che è stato oggetto di ulteriori integrazioni a cura della Città Metro-

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

litana di Bologna nel 2018, tanto che il progetto del II stralcio della variante di Rastignano è composto dagli elaborati prodotti da SPEA Engineering e da una serie di elaborati in addendum (si veda Allegato 4).

Il nuovo progetto mantiene l'impostazione generale di quello del 2008, dal quale differisce per scelte obbligate dalla suddivisione in stralci, da aggiornamenti normativi e da mutate esigenze di contorno. Inoltre, SPEA Engineering ha compiuto un'analisi degli impatti ambientali sulle componenti atmosfera e qualità dell'aria, suolo e sottosuolo, ambiente idrico, vegetazione, flora, fauna ed ecosistema, rumore, paesaggio, archeologia alla luce degli aggiornamenti progettuali e temporali.

Dal punto di vista tecnico, le modifiche riguardano la configurazione delle intersezioni nell'area del parco Paleotto e del ponte delle Oche così da renderle conformi ai dettami del DM 19/04/2006 – Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali e il conseguente adattamento del tracciato stradale in approccio alle nuove rotatorie. Rimandando ai paragrafi successivi per i dettagli, le variazioni, che consentono un miglior inserimento nelle caratteristiche orografiche dell'area, sono state studiate in modo da garantire un minor consumo di territorio e hanno comportato una serie di vantaggi a cascata fra i quali i principali sono:

1. Modifica delle intersezioni stradali al Ponte delle Oche e Parco Paleotto con l'inserimento di rotatorie in luogo di incroci a raso con l'eliminazione di una intersezione a livelli differenziati.
 - a. Il sistema combinato delle rotatorie del Ponte delle Oche e del Parco Paleotto permette di garantire tutti i collegamenti fra la nuova variante e la viabilità locale anche prevedendo un'intersezione a T con sole svolte a destra su via Torriane; in questo modo si evita il complesso sistema viario del progetto 2008 e si eliminano le opere di sotto attraversamento.
 - b. Le minori velocità di percorrenza, conseguenti alla presenza delle due rotatorie, permettono l'adozione di raggi di curvatura minori, in questo modo l'asse principale si adatta meglio alla conformazione del territorio.
2. Riduzione dell'impatto sul Parco del Paleotto e sul torrente Savena.
 - a. Non risulta più necessaria la rotazione del campo sportivo.
 - b. È stato possibile eliminare l'impattante muro di sostegno in fregio al torrente.
 - c. Gli importanti lavori di risezionamento dell'alveo fluviale dal Ponte delle Oche fin oltre il ponte storico, che comprendevano la costruzione di scogliere, l'adeguamento della briglia e la creazione di rampe non sono più necessari nella loro interezza e si limitano ad alcuni lavori di riprofilatura nel solo tratto compreso fra la rotatoria Paleotto e il viadotto Rastignano sul torrente Savena.

Il presente documento vuole descrivere il progetto nella sua configurazione attuale ed ha lo scopo di determinare gli indici di pericolosità sismica richiesti da uno studio di III Livello di Approfondimento Sismico (nel seguito detto "III Livello") per il Comune di San Lazzaro di Savena, secondo quanto indicato dalla DGR n.2193/2015.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

È importante sottolineare che lo sviluppo di uno studio di III Livello ha il solo scopo di identificare gli elementi di pericolosità sismica utili per l'aggiornamento degli strumenti urbanistici vigenti, in relazione all'inserimento della nuova opera nel contesto territoriale. Pertanto, il III Livello costituisce allo stato attuale uno studio sismico unicamente connesso agli aspetti pianificatori ed i relativi risultati non vengono adottati ai fini progettuali.

D'altra parte, i parametri di pericolosità sismica di base e locale necessari a supportare la progettazione delle opere civili sono quelli già individuati in seno alla Relazione Geotecnica di progetto.

1.1 Metodologia

La valutazione quantitativa delle possibili modifiche che un segnale sismico può subire in conseguenza dell'attraversamento di una successione sedimentaria prevede, in maniera molto schematica, l'articolazione nelle seguenti fasi, da intendersi non in senso cronologico, bensì logico (vi può essere mutua interazione):

- Raccolta e sintesi dei risultati di indagini sperimentali in sito ed in laboratorio;
- Definizione delle caratteristiche sismo-stratigrafiche dell'area, con particolare riferimento alle proprietà elastiche (curve di variazione delle rigidità con le deformazioni), alle proprietà dissipative (curve di variazione del rapporto di smorzamento con le deformazioni) ed alle densità (pesi di volume); valutazione delle caratteristiche geometriche delle principali impedenze sismiche individuate, valutazioni sulla topografia, posizionamento del bedrock;
- Selezione, del tipo di analisi da condurre:
 - o In funzione di condizioni morfologiche, topografiche o stratigrafiche
 - Analisi monodimensionali
 - Analisi 2D, 3D con l'ausilio di software FEM, FDM...
 - o in funzione dell'entità delle accelerazioni massime attese (e quindi delle deformazioni) e dei tipi di materiali:
 - analisi lineare, lineare equivalente o non lineare
 - modellazione elastica, visco-elastica ... del suolo
 - o in funzione del tipo di fenomeno in studio (es: approfondimenti sulla mobilità ciclica)
 - analisi alle tensioni totali
 - analisi alle tensioni efficaci
- Definizione dell'azione sismica di base (input sismico di riferimento);
- *Processing* dei dati;

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

- Interpretazione dei dati e affidabilità dei risultati.

In continuità con quanto enunciato in premessa, verranno adottati gli input sismici già selezionati e messi a disposizione dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli dell'Emilia-Romagna per ciascun comune, definiti rispetto a tempi di ritorno dell'azione sismica di 475 anni (o, in altri termini, riferiti ad un terremoto avente probabilità di occorrenza superiore al 10% in un intervallo temporale di 50 anni).

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

2. **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

2.1 **Normativa**

2.1.1 **Pianificazione territoriale e urbanistica**

- DAL 122/2007. Delibera dell'assemblea legislativa della regione Emilia-Romagna n.122 del 2/5/2007: Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art.16 comma 1, della L.R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". Boll. Uff. Reg. Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007.
- Deliberazione della Giunta Regionale 21 Dicembre 2015, N. 2193 "Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla deliberazione dell'Assemblea legislativa 2 maggio 2007, n. 112"

2.1.2 **Geotecnica / Geotecnica sismica**

D.M. 31 Luglio 2012: Approvazione della Appendici Nazionali recanti i parametri tecnici per l'applicazione degli Eurocodici

Circ. Min. No 617 - 2 Febbraio 2009: Istruzioni per l'applicazione delle 'Nuove norme tecniche per le costruzioni'

UNI EN 1997-1 : Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.

UNI EN 1998-5 : Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

D.M. 17 gennaio 2018 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni"

OPCM 3274/2003, Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.

1.1. **Bibliografia di riferimento**

- Associazione Geotecnica Italiana (2005) "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica", Patron Editore, Bologna.
- Cestari F. (Ed.) "Prove Geotecniche in sito" (1990) -- Edizioni Geo-Graph s.n.c. - Segrate (MI)
- Crespellani T., Facciorusso J. (2010) "Dinamica dei terreni per le applicazioni sismiche" Dario Flaccovio Editore.
- Dobry R., Vucetic M. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 117 (1), pp.89-107.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

- Eekelen H.A.M. Van, Potts D.M., (1978) "The behavior of Drammen clay under cyclic loading" Geotechnique, Volume: 28, 2 Thomas Telford Limited
- Gonzalez de Vallejo Luis I. (2005) "Geingegneria" Pearson Ed.
- Idriss, I.M. (1990) "Response of soft soil sites during earthquakes". Proceedings H.B. Seed Mem. Symp., Berkeley, CA.
- Ishihara K. (1996) "Soil behavior in earthquake geotechnics" Oxford University Press.
- Jefferies M., Been K. (2006) "Soil liquefaction: a critical state approach" Taylor & Francis
- Kanai K. (1957) "The requisite conditions for predominant vibration of round" Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 31, 457.
- Kottke A. R. & Rathje E. M. (2008) – Technical Manual for Strata – PEER 2008/10
- Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics series, 653 pages.
- Lancellotta R. (1993) "Geotecnica", Seconda edizione, ed. Zanichelli, Bologna.
- Lanzo G., Silvestri F. (1999). Risposta sismica locale – Teoria ed esperienze. Helvelius Edizioni.
- Lo Presti D.C.F. (1989) "Proprietà dinamiche dei terreni" Proc. XIV CGT, Dipartimento di Ingegneria strutturale del Politecnico di Torino
- Nakamura Y. (1989) "A method for dynamic characteristics estimates of sub-surface using microtremor on the round surface" QR of RTRI, 30, 25-33.
- Nogoshi M. e Igarashi T. (1970) "On the propagation characteristics of microtremors" J. Seism. Soc. Japan, 23, 264-280.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica" – Brammerini F., Di Pasquale G., Naso G., Severino M. Editors – Roma, Settembre 2008
- Robertson, P.K., et al., (1995). "Liquefaction of Sands and Its Evaluation," Special Keynote and Themes Lectures, Preprint Volume, 1st Intl. Conf. on Geotechnical Earthquake Engineering, pp. 91-128.
- Robertson, P.K., and Wride, C.E. (1997). "Cyclic liquefaction and its evaluation based on the SPT and CPT," Proc. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Youd, T.L., and Idriss, I.M., eds., Technical Report NCEER 97-0022, pp. 41-88.
- Robertson, P.K. & Wride, C.E. (1998) "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test". Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 35(3): 442-459.
- Rollins K.M., Evans M., Diehl N. and Daily W. 1998. Shear modulus and damping relationships for gravels. J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., 124 (5), 396-405.
- Seed, H.B., and De Alba, P. (1986). "Use of SPT and CPT test for evaluating the liquefaction resistance of soils," Proc. Insitu 1986, ASCE.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

- Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971). "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 107, No. SM9, pp. 1249-1274.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1982). Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 134 pp.
- Seed, R.B. (1996). "Recent advances in evaluation and mitigation of liquefaction hazards," Ground Stabilization and Seismic Mitigation, Theory and Practice, Portland, Oregon, Nov. 6 and 7, 1996.
- Sonmez, H. (2003) - "Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey)", Env. Geology, (44): 862-871.
- Tika T., Kallioglou P., Koninis G., Pitilakis K. (2010) "Dynamic properties of cemented soils from Cyprus". In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment 69(2):295-307 .
- Yokota K., Imai T., Konno M. (1981) "Dynamic deformation characteristics of soils determined by laboratory tests" OYO Tec. Rep. 3, pp. 13 - 37.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

3. INDAGINI GEOGNOSTICHE E RILIEVI IN SITO E IN LABORATORIO

I dati a supporto della caratterizzazione geotecnica dei terreni interessati dall'opera in progetto derivano da molteplici campagne indagini susseguite a partire dai primi anni '90, parte delle quali condotte in seno al progetto AV – linea Bologna-Firenze.

Più specificamente, si annoverano le seguenti campagne indagini:

- Anno 1996 – Committente: ANAS – Società appaltatrice: THESIS ENGINEERING
- Anno 1998 - Committente: Consorzio CAVET – Società appaltatrice: Consorzio Treesse
- Anno 2004 – Committente: ECO-TER Srl - Società appaltatrice: RCT
- Anno 2007 – Committente: Enser Srl – Società appaltatrice: SPG
- Anno 2009 – Committente: Enser Srl – Società appaltatrice: Sogeo Srl – SGT Sas
- Anno 2016 - Committente: Enser Srl – Società appaltatrice: Geoprobe Srl

Le campagne indagini si sono articolate in indagini e rilievi in sito (sondaggi penetrometrici statici e dinamici, a carotaggio continuo e sismici, rilievi geomeccanici) ed in prove di laboratorio; ciononostante, i certificati di prova inerenti alle prove di laboratorio sono disponibili solo per le campagne indagini del 2004 (RCT), 2007 (SPG), 2009 (Sogeo Srl – SGT Sas) e 2016 (Geoprobe); per quanto attiene alle indagini sismiche del 2004, sono disponibili unicamente le interpretazioni stratigrafiche delle prove sismiche, senza i dati tomografici acquisiti in campagna.

Nel seguito verranno descritte maggiormente in dettaglio quelle indagini attinenti alle succitate campagne effettivamente ricadenti nell'area di progetto e pertanto funzionali alla successiva caratterizzazione geotecnica.

3.1 Indagini in sito

3.1.1 Indagini 1996 – Thesis Engineering

Le indagini geognostiche utili consistono in:

- n. 3 sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo, spinti a profondità di 20m da piano campagna, con carotiere semplice in terreno e doppio in roccia.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono inoltre state effettuate le seguenti attività:

- rilievo stratigrafico;
- rilievo speditivo della consistenza mediante prove con pocket penetrometer e scissometro sul materiale carotato;
- registrazione delle percentuali di recupero e stima dei valori RQD negli intervalli lapidei;
- prelievo di campioni rimaneggiati;

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

- esecuzione di prove penetrometriche dinamiche in foro di tipo SPT (Standard Penetration Test);
- installazione di piezometri a tubo aperto da 1"1/4 in S1 ed S3.

3.1.2 Indagini 1998 – Consorzio Treesse

Le indagini geognostiche utili consistono in:

- n. 2 sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo, spinti a profondità di 20m da piano campagna con carotiere semplice in terreno e doppio in roccia.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono inoltre state effettuate le seguenti attività:

- rilievo stratigrafico;
- rilievo speditivo della consistenza mediante prove con pocket penetrometer e scissometro sul materiale carotato;
- registrazione delle percentuali di recupero e stima dei valori RQD negli intervalli lapidei;
- prelievo di campioni di roccia;
- esecuzione di prove penetrometriche dinamiche in foro di tipo SPT (Standard Penetration Test);
- installazione di piezometri a tubo aperto.
- n. 6 prove penetrometriche dinamiche super-pesanti, spinte a rifiuto a profondità comprese tra 2.1 m e 2.7m circa da piano campagna.

3.1.3 Indagini 2004 – RCT

Le indagini geognostiche utili consistono in:

- n. 3 sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo, spinti a profondità comprese fra 26.60m e 31.2m da piano campagna con carotiere semplice in terreno e doppio in roccia.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono inoltre state effettuate le seguenti attività:

- rilievo stratigrafico;
- registrazione delle percentuali di recupero e stima dei valori RQD negli intervalli lapidei;
- prelievo di campioni di roccia;
- esecuzione di prove penetrometriche dinamiche in foro di tipo SPT (Standard Penetration Test) con punta aperta;
- esecuzione di prove pressiometriche;
- installazione di piezometri di tipo Casagrande nei fori S2 ed S3.
- N. 3 tomografie sismiche a rifrazione con misura delle onde P della lunghezza compresa fra 88m e 115m.

3.1.4 Indagini 2007 – SPG

Le indagini geognostiche utili consistono in:

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

- n. 3 sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo, spinti a profondità comprese fra 12.00m e 14.5m da piano campagna con carotiere doppio tipo wire-line.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono inoltre state effettuate le seguenti attività:

- o rilievo stratigrafico;
- o rilievo del livello di falda a fine sondaggi;
- o stima dei valori RQD negli intervalli lapidei;
- o prelievo di campioni di roccia;
- o esecuzione di prove penetrometriche dinamiche in foro di tipo SPT (Standard Penetration Test) con punta aperta;
- o eseguite tre prove di permeabilità tipo Lugeon.

3.1.5 Indagini 2009 – Sogeo / SGT

Le indagini geognostiche utili consistono in:

- n. 5 sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo, spinti a profondità comprese fra 6.6m e 12m da piano campagna con carotiere semplice, di cui uno inclinato di 35° rispetto all'orizzontale.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono inoltre state effettuate le seguenti attività:

- o rilievo stratigrafico;
- o rilievo del livello di falda a fine sondaggi;
- o stima dei valori RQD negli intervalli lapidei;
- o prelievo di campioni rimaneggiati in terra;
- o esecuzione di prove penetrometriche dinamiche in foro di tipo SPT (Standard Penetration Test) con punta aperta o chiusa;
- o installazione di piezometri a tubo aperto.
- n. 3 sondaggi penetrometrici statici con punta elettrica e piezocono, spinti a rifiuto a profondità comprese fra 2.0m e 5.3m; è stata altresì eseguito uno stop in sabbia per l'accertamento del livello della falda.
- n. 7 prove di sismica passiva a stazione singola del tipo HVSR.

3.1.6 Indagini 2016 – Geoprobe

Le indagini geognostiche consistono in:

- n. 4 pozzetti esplorativi eseguiti con mezzo meccanico e spinti fino a -1.0m da piano campagna.

Durante l'esecuzione dei saggi sono inoltre state effettuate le seguenti attività:

- o rilievo stratigrafico;
- o esecuzione di prova di carico a doppio ciclo su piastra circolare (norma SN 670 317a) alla quota di 50cm da piano campagna;
- o prelievo di un campione medio di terreno fra 0.5m e 1.0m di profondità da sottoporre ad analisi di laboratorio geotecnico.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

3.1.7 Sommario delle indagini in sito

Un riepilogo delle indagini geognostiche precedentemente descritte è riportato da Tabella 3-1 a Tabella 3-3; per ogni prova si riportano le coordinate del punto di indagine nel sistema di coordinate rettilinee SPEA-2016 e la quota in metri rispetto al livello del mare.

Tabella 3-1: Quadro riassuntivo dei sondaggi stratigrafici e dei pozzetti

Codice	Tipo di indagine	Campa- gna geo- gnostica	Lun- ghezza (m)	Coordinate SPEA 2016		Quota del p.c. [m. slm]
				Est	Nord	
S1	Sondaggio stratigrafico	1996	20.0	9894673.093	3151014.933	97.88*
S2	Sondaggio stratigrafico	1996	20.0	9894719.820	3151021.134	93.01*
S3	Sondaggio stratigrafico	1996	20.0	9895061.577	3151252.729	106.51*
BH2	Sondaggio stratigrafico	1998	20.0	9895045.829	3151281.055	102.04*
BH3	Sondaggio stratigrafico	1998	20.0	9895106.123	3151243.144	111.18*
S1	Sondaggio stratigrafico	2004	26.6	9894460.266	3150909.307	103.01
S2	Sondaggio stratigrafico	2004	31.2	9894965.169	3151226.181	105.34*
S3	Sondaggio stratigrafico	2004	30.5	9895024.681	3151210.323	111.87*
ENS1	Sondaggio stratigrafico	2007	12.0	9894287.826	3150301.399	101.80*
ENS2	Sondaggio stratigrafico	2007	12.0	9894278.087	3150663.117	100.72*
ENS3	Sondaggio stratigrafico	2007	13.0	9894710.718	3151076.467	97.83*
ENS4	Sondaggio stratigrafico	2007	12.75	9894746.829	3151081.323	98.92*
ENS5	Sondaggio stratigrafico	2007	14.5	9894787.729	3151076.990	104.26*
BH1	Sondaggio stratigrafico	2009	6.6	9894322.637	3150726.826	100.87*
BH2	Sondaggio stratigrafico	2009	10.0	9894531.367	3150935.254	99.74*
BH3	Sondaggio stratigrafico	2009	10.0	9894970.984	3151228.998	105.34*
BH4	Sondaggio stratigrafico	2009	10.0	9895035.687	3151271.789	102.80*
BH5	Sondaggio stratigrafico	2009	12.0	9894607.556	3150933.479	97.38*
TP1	Pozzetto esplorativo	2016	1.0	9894276.901	3150578.181	101.00
TP2	Pozzetto esplorativo	2016	1.0	9894257.273	3150712.660	103.20
TP3	Pozzetto esplorativo	2016	1.0	9894460.081	3150880.895	100.50
TP4	Pozzetto esplorativo	2016	1.0	9894964.584	3151228.619	105.30

* quota presunta rilevata a posteriori da CTR / Rilievo topografico

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

Tabella 3-2: Quadro riassuntivo delle prove penetrometriche

Codice	Tipo di indagine	Campa- gna geo- gnostica	Lun- ghezza (m)	Coordinate SPEA 2016		Quota del p.c. [m. slm]
				Est	Nord	
DPSH1	Prova penetrometrica dinamica	1998	2.4	9895023.693	3151263.839	102.62*
DPSH2	Prova penetrometrica dinamica	1998	2.4	9895043.959	3151249.450	102.80*
DPSH3	Prova penetrometrica dinamica	1998	2.1	9895074.578	3151235.893	108.50*
DPSH4	Prova penetrometrica dinamica	1998	1.8	9895110.049	3151329.253	106.95*
DPSH5	Prova penetrometrica dinamica	1998	1.8	9895141.296	3151266.444	103.00*
DPSH6	Prova penetrometrica dinamica	1998	8.4	9895138.663	3151217.769	110.00*
CPTU1	Prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono	2009	5.5	9894544.689	3150946.555	99.27*
CPTU2	Prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono	2009	2.0	9894528.045	3150968.163	108.70*
CPTU3	Prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono	2009	5.3	9894489.543	3150911.268	103.25*

* quota presunta rilevata a posteriori da CTR / Rilievo topografico

Tabella 3-3: Quadro riassuntivo delle prove sismiche eseguite

Codice	Tipo di indagine	Campagna geogno- stica	Lun- ghezza (m)	Coordinate SPEA 2016		Quota del p.c. [m. slm]
				Est	Nord	
PIA1	Stendimento sismico a rifrazione in onde P	2004	115	9894961.838	3151211.767	105.00
				9894854.684	3151142.400	
PIA2	Stendimento sismico a rifrazione in onde P	2004	115	9894791.907	3151085.971	105.00
				9894864.457	3151151.711	
PIA6	Stendimento sismico a rifrazione in onde P	2004	88	9894296.108	3150719.943	101.00
				9894262.100	3150638.793	

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

Codice	Tipo di indagine	Campagna geognostica	Lunghezza (m)	Coordinate SPEA 2016		Quota del p.c. [m. slm]
				Est	Nord	
TR1	Prova HVSR	2009	-	9894314.066	3150721.168	100.51*
TR2	Prova HVSR	2009	-	9894262.222	3150643.152	100.69*
TR4	Prova HVSR	2009	-	9894391.467	3150815.710	101.00*
TR5	Prova HVSR	2009	-	9894547.605	3150956.154	99.90*
TR6	Prova HVSR	2009	-	9894797.950	3151084.735	106.43*
TR7	Prova HVSR	2009	-	9895048.927	3151285.121	102.04*
TR8	Prova HVSR	2009	-	9894961.873	3151215.637	105.37*

* quota presunta rilevata a posteriori da CTR / Rilievo topografico

I certificati delle indagini geognostiche in sito realizzate sono riportate negli elaborati del progetto.

3.2 Rilevamento geomeccanico

Al fine della caratterizzazione geotecnica del substrato, è stato eseguito nel febbraio 2007 un rilievo geomeccanico di dettaglio su affioramenti significativi artificiali nell'area di progetto.

L'affioramento, sede delle stazioni geomeccaniche siglate SG1-SG2-SG3, era di tipo artificiale; si trattava di uno scavo eseguito attraverso l'uso di mezzi meccanici per la messa in posto di uno scatolare in c.a.. Essendo costituito da 3 pareti, di cui quella centrale ortogonale alle altre due, esso costituiva un'importante fonte di informazioni poiché rimanevano rintracciabili tutte le superfici nelle 3 dimensioni (angolo diedro fra gli affioramenti $\approx 90^\circ$). Sono state identificate e censite le discontinuità nell'ammasso con tre stendimenti lineari a lunghezza variabile eseguiti su ciascuna parete di scavo (rilievo tipo *scan-line*).

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

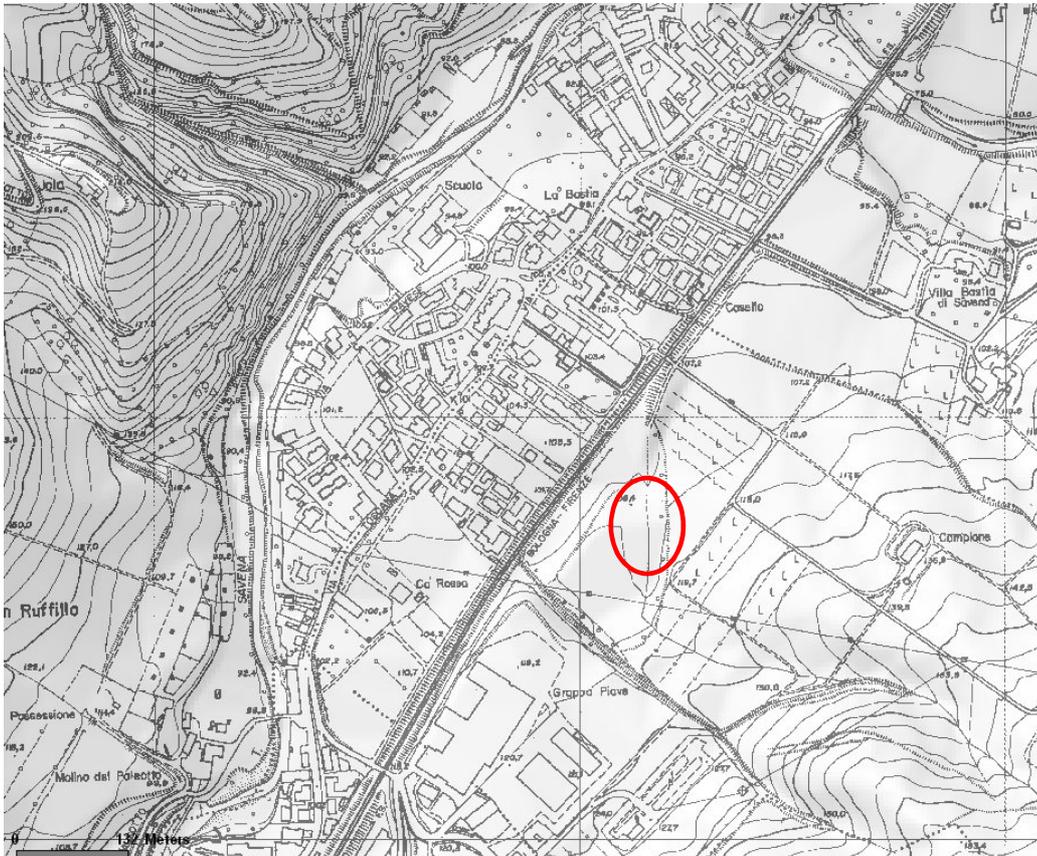


Figura 3-1. Ubicazione planimetrica dell'area di rilevamento (stralcio della CTR al 5000).

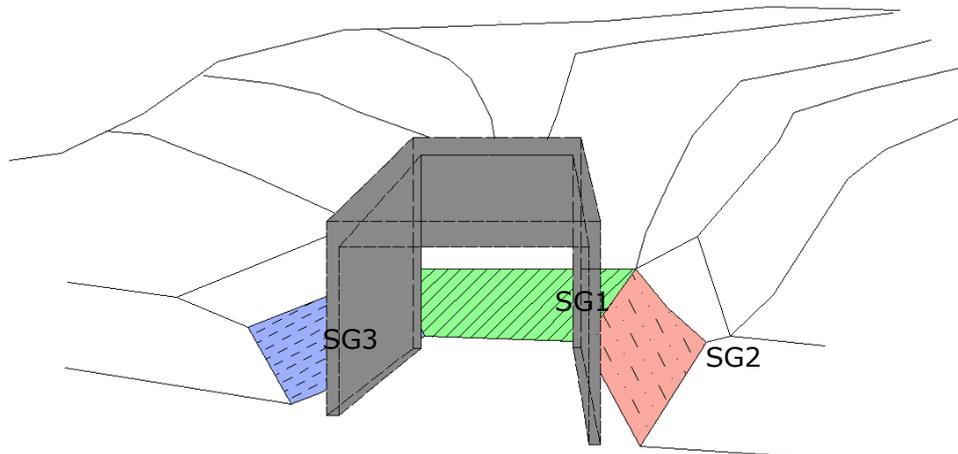


Figura 3-2. Schema semplificato dell'affioramento artificiale.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018



Foto 3-1. Stazione SG1 fotografata dall'interno dello scatolare in c.a.



Foto 3-2. Superfici di discontinuità individuate.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

3.3 Prove di laboratorio

Al fine di caratterizzare dal punto di vista geotecnico i terreni, alcuni campioni raccolti durante le campagne indagini, prevalentemente di tipo rimaneggiato o derivanti da parti di carote o blocchi prelevati in affioramento, sono stati sottoposti a prove di laboratorio; così come già premesso, si dispone unicamente dei risultati delle prove relative alle campagne 2004, 2007, 2009 e 2016.

I campioni di terre raccolti nella campagna 2009 sono di genesi alluvionale e sono stati prelevati con ausilio di mezzo meccanico in corrispondenza della golena del Savena sottesa dal viadotto in progetto, al fine di caratterizzare i materiali destinati ad essere scavati e reimpiegati come materiali da costruzione, secondo la classificazione dei terreni HRB-AASHTO (CNR-UNI 10006); i campioni relativi alle prove del 2007 sono parti di carote lapidee di carotaggio e blocchi prelevati dalle pareti artificiali prodotte dalle attività cantieristiche per l'AV nell'area della Rotatoria di Rastignano. Poiché l'infrastruttura corre in prossimità della vena del Gesso (ambiente selenitoso), sono stati prelevati con un bayler in PVC alcuni campioni di acqua dai piezometri a tubo aperto per la determinazione di alcuni analiti che incidono sulla scelta del tipo di calcestruzzo (UNI EN 206-1:2006). I tipi di prova sono elencati nel seguito.

- Materiali terrosi
 - Descrizione geotecnica dei campioni
 - analisi granulometrica (per vagliatura o combinata);
 - limiti di Atterberg sulle frazioni fini;
 - classificazione secondo la norma UNI 10006;
 - determinazione del contenuto in nitrati, solfati, sostanza organica;
 - consumo iniziale di calce;
 - valori di blu di metilene.

- Materiali lapidei
 - Descrizione dei campioni;
 - Contenuto naturale d'acqua;
 - Massa volumica apparente;
 - Prove di compressione monoassiale non confinate con misura delle deformazioni;
 - Prove di compressione triassiali.

- Acque di falda
 - Azoto ammoniacale;
 - pH;

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

- Solfati;
- Anidride carbonica libera;
- Magnesio.

Le prove di laboratorio sono state effettuate dai laboratori Sinerga Srl di Granarolo (BO, 2009 e 2016), dal Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Bologna (2007) e dal Laboratorio Servizi Geotecnici Srl (2004) per i materiali solidi, dal laboratorio Agriparadigma di Ravenna (2009) per le analisi sui campioni di acqua di falda.

Tabella 3-4: Quadro riassuntivo dei risultati delle prove di laboratorio – Campioni di Terre

ANNO	CAMP.		PROF.		GRANULOMETRIA				LIMITI DI ATTERBERG			UNI 10006	So-	Sol-	Nitrati	MBI	CIC	
	No.	TIPO	da m	a m	G %	S %	L+A %	A %	%	%	%			stan-	fati			
												zia		SO ₃	mg/kg	ml/g	%	
													Organica	peso				
													%	SO ₃				
													peso	%				
2009	C1	-	-	-	22.29	42.24	35.47	n/d	33	17	16	A6	-	-	-	-	-	-
2009	C2	-	-	-	22.56	52.29	25.15	n/d	NP	NP	NP	A2-4	-	-	-	-	-	-
2009	C3	-	-	-	62.54	27.68	9.78	n/d	NP	NP	NP	A1-a	-	-	-	-	-	-
2016	TP01	-	0.50	1.00	0.08	29.02	70.09	n/d	30	20	10	A4	-	-	-	-	-	-
2016	TP02	-	0.50	1.00	2.66	33.03	64.31	20.5	42	23	19	A7-6	1.6	0.21	18.8	350	3.00	
2016	TP03	-	0.50	1.00	0.42	18.47	81.11	26.5	43	21	22	A7-6	0.3	0.25	17.6	400	3.00	
2016	TP04	-	0.50	1.00	0.43	15.09	84.48	31.5	45	22	23	A7-6	0.7	0.24	17.7	399	4.00	

Tabella 3-5: Quadro riassuntivo dei risultati delle prove di laboratorio – Campioni Lapidei

ANNO	SOND.	CAMP.		PROF.		CONT. H ₂ O	DENS. AP-PAR.	COMPRESSIONE SEMPLICE			TRIASSIALE SU ROCCIA		TRAZIONE			
		No.	TIPO	Da m	a m			%	γ [kN/m ³]	Sforzo	a	C.	Sforzo	Sforzi principali a rottura		a
										rottura		Poiss	rottura			rottura
										σ _t	v	σ _c	σ ₁	σ ₃	σ _t	
						MPa	/	GPa	MPa	MPa	MPa					
2007	ENS4	12E	I	12.15	12.50	8.8		27.60		0.420	3.600			-3.4		
2007	ENS4	8C	I	8.30	8.70	14.4		10.40						-0.8		
2007	ENS4	8E	I	8.30	8.70	8.5		21.60		0.290	3.600			-0.7		
2007	ENS4	9C	I	9.25	9.50	8.2		24.40						-2		
2007	ENS5	8	I	8.25	9.00	14.7	19.20	8.50						-2		
2007	ENS5	12	I	12.30	12.70	13.4		11.90						-1.72		
2007	ENS5	13E	I	13.00	13.70	13.8	21.60	13.80	0.820	2.050				-1.24		
2007	ENS5	13S	I	13.00	13.70	12.1	21.70	10.90								
2007	ENS5			7.13	7.37	12.8		8.60						-1.2		

ANNO	SOND.	CAMP.		PROF.		CONT. H ₂ O %	DENS. AP- PAR. γ [kN/ m ³]	COMPRESSIONE SEMPLICE			TRIASSIALE SU ROCCIA		TRAZIONE INDIRETTA	
		No.	TIPO	Da m	a m			Sforzo rottura σ _t MPa	a C. Poiss ν	Sforzo a rottura σ _c GPa	Sforzi princi- pali a rottura		Sforzo a rottura σ _t MPa	
											σ ₁ MPa	σ ₃ MPa		
2007	ENS5			7.40	7.80	14.1		7.70						-1
2007	ENS5			8.20	8.50	13.3		7.70						-1.2
2007	ENS5			8.50	8.85	13.1		9.80						-1.2
2007	ENS5			8.20	8.50									-1.4
2007	ENS5			7.13	7.37	13.7					8.60	0.05		
2007	ENS5	T8A	I	8.25	9.00	15.3					10.90	0.10		-0.31
2007	ENS5			7.40	7.80	13.9					7.70	0.10		-1.2
2007	ENS5	T8B	I	8.25	9.00	14.4					9.50	0.20		
2007	ENS5			8.50	8.85	11.6					10.80	0.20		-1.2
2007	ENS5	T8C	I	8.25	9.00	15.5					9.30	0.40		
2007	ENS5	T9A	I	9.00	9.50	4.9					20.40	0.50		
2007	ENS5	T9B	I	9.00	9.50	6.2					25.50	1.00		
2007	ENS5	T13A	I	13.00	13.70	10.8					25.00	2.00		
2007	ENS5	T9C	I	9.00	9.50	6.2					30.70	2.00		
2007	ENS5	T13B	I	13.00	13.70	12.9					35.30	4.00		
2007	ENS5	T13C	I	13.00	13.70	14.2					29.10	8.00		
2007	ENS4			12.15	12.50									-1.7
2007	ENS5			12.30	12.70									-2.11
2007	ENS5	A	I	9.00	9.50		21.10							-2.84
2007	ENS5	B	I	9.00	9.50		21.00							-2.33
2007	BLOCCO	1				3.3		13.40						
2007	BLOCCO	2				3		12.90						
2007	BLOCCO	3				13.7		6.100						
2007	BLOCCO	4				10.9		6.100						
2007	BLOCCO	5				0		27.60						
2007	BLOCCO	6				18.1		2.50						
2007	BLOCCO	7				17.9		3.00						
2007	BLOCCO	P				0		26.20						
2004	S2	NK3	I	9.20	9.70			2.17	0.350	0.440				
2004	S2	NK3	I	9.20	9.70		22.50	4.79	0.230	0.230				
2004	S3	CB	I	9.50	10.00		21.36				17.76	0.500		
2004	S2	NK3	I	17.90	18.50			12.77	0.360	2.030				
2004	S3	CB	I	9.50	10.00		22.04				21.73	1.000		

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

ANNO	SOND.	CAMP.		PROF.		CONT. H ₂ O	DENS. AP-PAR.	COMPRESSIONE SEMPLICE			TRIASSIALE SU ROCCIA		TRAZIONE INDIRETTA	
		No.	TIPO	Da m	a m			Sforzo rottura	a	C. Poiss	Sforzo a rottura	Sforzi principali a rottura		Sforzo a rottura
												σ ₁	σ ₃	
γ	σ	ν	σ _c	σ ₁	σ ₃	σ _c								
%	[kN/m ³]	MPa	/	GPa	MPa	MPa	MPa							
2004	S3	CB	I	9.50	10.00		22.57				27.39	1.500		
2004	S3	CC	I	15.60	16.20		23.38				18.24	1.000		
2004	S2	NK3	I	17.90	18.50		21.79	9.04	0.380	4.970				

Tabella 3-6: Quadro riassuntivo dei risultati delle prove di laboratorio – Campioni d'acqua

ANNO	SOND.	CAMP.		Azoto ammoniacale	pH	Solfati	Anidride carbonica libera	Magnesio
		No.	TIPO	mg/l		mg/l	mg/l CO ₂	mg/l
2009	BH3-Pz	-	Acqua	0.15	7	58	64	21
2009	BH3-Pz	-	Acqua	1.6	7.4	298	31	36
2004	S2-Pz	-	Acqua	0.735	7.15	55	28	36
2009	BH1-Pz	-	Acqua	1.69	7.85	94	40	6.8

3.4 Indagini di tipo sismico

Per la determinazione del comportamento in condizioni sismiche del terreno interessato dalle opere si è fatto riferimento al rilievo sismico delle prove HVSR realizzate nella campagna del 2009.

3.4.1 Caratteristiche del rilievo sismico tipo HVSR

Per la determinazione indiretta del profilo V_s si può fare riferimento a rilievi sismici HVSR; nell'ambito delle indagini per il progetto geotecnico dell'opera, sono stati eseguiti n.7 rilievi a stazione singola (registrazione dei microtremori) in corrispondenza di punti significativi del tracciato. Il tremore sismico, comunemente definito "rumore sismico", esiste ovunque sulla superficie della terra. Esso è principalmente costituito da onde superficiali, ovvero da onde elastiche prodotte dall'interferenza costruttiva di onde P ed S che si propagano negli strati superficiali. Il rumore sismico è prodotto essenzialmente dal vento o dalle onde marine. A questo rumore di fondo, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie ecc.) e naturali. I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume P o S. In essi giocano un ruolo fondamentale le onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S, il che spiega la dipendenza di tutta la formulazione della velocità di queste ultime. Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo da rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è

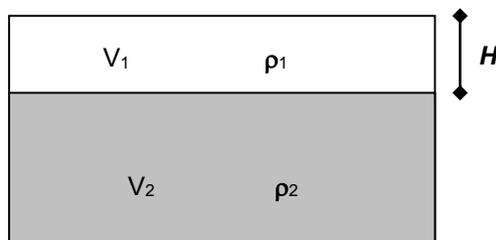
	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*, HVSr o H/V), proposta da Nogoschi e Igaraschi (1970). La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

Le basi teoriche dell'H/V sono relativamente facili da comprendere in un mezzo del tipo strato + *bedrock* (o strato assimilabile al *bedrock*), in cui i parametri sono costanti in ciascuno strato. Si consideri lo schema della figura sottostante, in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità (ρ_1 e ρ_2) e le diverse velocità delle onde sismiche (V_1 e V_2). Un'onda riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizioni di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente (λ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore H del primo strato. La frequenza fondamentale di risonanza (f_r) dello strato 1 relativa alle onde S è pari a

$$f_r = \frac{V_{s1}}{4 * H}$$

Questo effetto è sommabile, anche se non in modo lineare e senza corrispondenza 1:1. Ciò significa che la curva H/V relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi dello spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando la sopra riportata equazione.



L'inversione richiede l'analisi delle singole componenti e del rapporto H/V, che fornisce un'importante normalizzazione del segnale per

1. contenuto di frequenza
2. risposta strumentale
3. ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

Un aspetto assai importante è che il rumore sismico agisce come sorgente di eccitazione per la risonanza del sottosuolo e degli edifici.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

Questo risulta importante a livello ingegneristico, perché se una struttura ha frequenze proprie di vibrazione uguali a quelle del deposito su cui è fondato, durante un sisma, si assiste al fenomeno dell'accoppiamento delle vibrazioni. Questo effetto di amplificazione sismica produrrà un consistente aumento della sollecitazione sugli edifici. L'inversione delle misure dei microtremori è stata eseguita sulla base dei sondaggi posti in contiguità alle prove HVSR, che hanno fornito il modello stratigrafico di riferimento.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

4. CARATTERIZZAZIONE SISMO-STRATIGRAFICA

4.1 Definizione delle unità geotecniche dei terreni nel progetto definitivo

Nel presente paragrafo verrà brevemente richiamata la suddivisione in unità geotecniche operata nell'ambito dello studio specialistico redatto per il progetto definitivo (Relazione Geotecnica), che risulterà utile per lo sviluppo successivo del presente documento ed in particolar modo nel Capitolo dedicato alle valutazioni sul potenziale di liquefazione (Capitolo 6).

L'intera profondità indagata lungo tutta la tratta in progetto è caratterizzata dalla presenza di depositi di fondovalle (materasso alluvionale prevalentemente incoerente, costituito da sabbie e ghiaie frammiste in percentuali variabili e subordinatamente limi) sovrastanti un substrato tipicamente marnoso (Formazioni delle successioni Ligure ed Epiligure delle Argille Varicolori della Val Samoggia, di Cigarellino, di Pantano e del Termina), avente caratteristiche di *Intermediate GeoMaterial* (IGM), ossia carattere intermedio fra una roccia in s.s. ed un terreno. E' stato convenientemente distinto uno strato più superficiale del *bedrock*, riconosciuto come più alterato ed allentato, inquadrato sotto il profilo meccanico come unità a comportamento assimilabile ad una terra coesiva (pur presentando anch'esso caratteristiche di IGM); il terreno vegetale e/o suoli agrari non sono stati oggetto di distinzione. Le unità geotecniche così individuate sono descritte in seguito:

- Unità RIP - Depositi antropici (riporto) prevalentemente incoerenti

Materiali di riporto compattato, costituiti da miscele di ghiaie, sabbie e limi, contenenti possibilmente laterizi e frammenti cementizi. Si rinvengono in maniera discontinua e locale, soprattutto nelle aree a più intensa urbanizzazione, anche grazie all'interpretazione delle foto aeree passate dell'area in progetto.

- UNITÀ 1 DAG – Depositi alluvionali prevalentemente incoerenti a grana grossa

Ghiaie e sabbie in matrice generalmente limosa, con intercalazioni di sabbie limose e limi sabbiosi, di colore variabile da bruno nocciola a grigio piombo, da sciolte a mediamente addensate. I clasti sono di dimensioni pluricentriche, spesso > 10 cm, mediamente 1÷3 cm, da sub-arrotondati ad arrotondati. Caratterizzano la maggior parte del materasso alluvionale presente lungo il tracciato.

- UNITÀ 2 DAS – Depositi alluvionali prevalentemente incoerenti a grana fine

Limi sabbiosi e sabbie limose debolmente argillose con locali livelli ghiaiosi, argillosi e ciottoli, si rinvengono generalmente in lenti discontinue a geometria variabile e di modesto spessore.

- UNITÀ 3 DAF – Depositi alluvionali prevalentemente coesivi

Limi argillosi, rinvenuti in una lente discontinua di modesto spessore.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

- UNITÀ SUB alt – Substrato alterato
 Porzione alterata ed allentata del substrato, costituito da marne e argilliti, subordinatamente siltiti ed areniti talora argillificate.
- UNITÀ SUB – Substrato
 Marne, argilliti, intercalate a siltiti ed areniti fini, tendenzialmente poco cementate.

Non vi sono condizioni topografiche tali da richiedere un'analisi mirata a quantificare modifiche dei segnali sismici determinate da tali elementi corografici.

Per quanto attiene alle condizioni stratigrafiche, le indagini geognostiche in sito hanno evidenziato delle naturali variazioni nelle caratteristiche geotecniche e tessiture dei depositi; nondimeno, i gradienti di pendenza delle superfici che delimitano terre a comportamento geotecnico (e sismico) differente sono ridotti e mancano delle brusche variazioni laterali fra terre a differente comportamento geotecnico.

Questo consente di semplificare il problema della schematizzazione della sismo-stratigrafia ad una trattazione monodimensionale.

Il modello sismo-stratigrafico di riferimento può essere ricostruito sulla base del confronto delle curve H/V, selezionando la prova per la quale si evidenziano i picchi nel rapporto H/V di maggiore significatività fra le 7 prove HVSR disponibili (Figura 4-1).

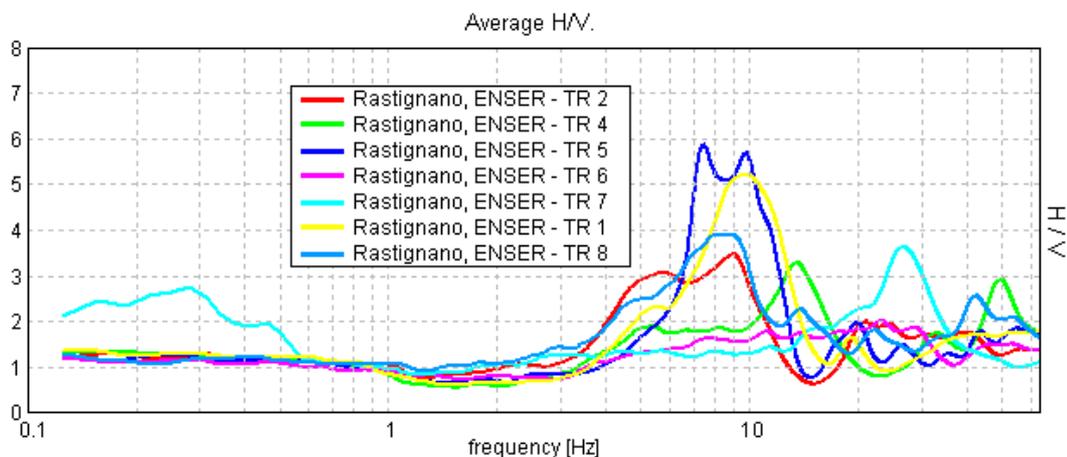


Figura 4-1: Diagrammi H/V relativi alle prove HVSR.

L'interpretazione delle prove HVSR tramite inversione ha consentito di tracciare i vari profili di velocità delle onde S riportati in Figura 4-2.

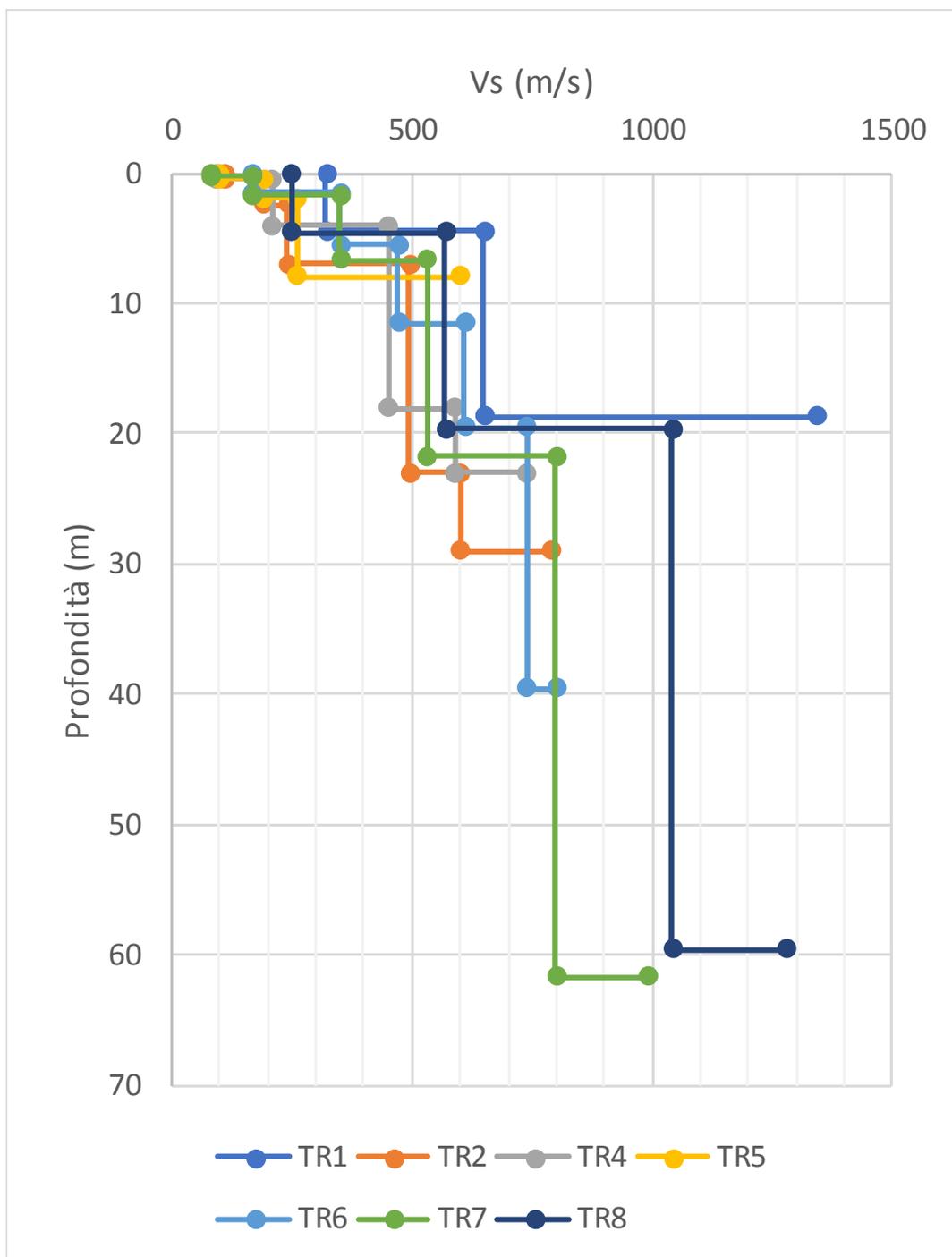


Figura 4-2: Profili interpretati di Vs da prove HVSR.

Tutti i profili Vs individuano un contrasto di impedenza netto al passaggio fra i materiali di coltre alluvionale (unità DAS/DAG) ed il sottostante substrato (unità SUB_alt / SUB) localizzato entro i primi dieci metri di profondità. Inoltre, nell'unità di substrato si riconosce almeno un altro contrasto di impedenza significativo. La disamina dei profili di velocità ha consentito di individuare in quello ottenuto dalla prova

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

TR1 il profilo che presenta i contrasti di impedenza più significativi e quindi quello che può considerarsi più gravoso e rappresentativo per il sito. Inoltre, questo profilo consente di avere le condizioni di bedrock sismico alla quota di -18.7m dal piano campagna, quindi di applicare a quella profondità gli accelerogrammi di input.

In Tabella 4-1 è sintetizzato il modello Vs adottato.

Prova TR1		Vs (m/s)	Descrizione
Profondità impedenza sismica [m da p.c.]	Spessore sismostrato [m]		
4.5	4.5	320	DAS/DAG
18.7	14.2	650	SUB_alt + SUB
		1340	Bedrock sismico

Tabella 4-1. Sismo-stratigrafie di riferimento.

1.2. Densità, proprietà deformative e dissipative (curve $G/G_0 - \gamma$ e $D/D_0 - \gamma$)

Per quanto riguarda le densità (pesi di volume), si è fatto riferimento alle determinazioni sperimentali in laboratorio. Gli effetti della non-linearità del terreno (comportamento isteretico stabile a livelli deformativi medio-bassi, indotti tipicamente dai terremoti) e della dissipazione energetica sono descritti rispettivamente per mezzo delle curve di decadimento del modulo di rigidità e di incremento dello smorzamento all'aumentare della deformazione di taglio. Si è fatto riferimento ai dati da letteratura tecnica derivati dalle esperienze di Idriss (1986) sulle sabbie (DAS), di Rollins et al. (1998) per terreni ghiaiosi (DAG), nonché di Tika et al. (2010) per il substrato, considerato come una marna di bassa plasticità.

Descrizione	Peso di volume (kN/m ³)	$\gamma - G/G_0$	$\gamma - D/D_0$
DAS	20.0	Idriss (1986)	
DAG	20.0	Rollins et al. (1998)	

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

Descrizione	Peso di volume (kN/m ³)	$\gamma - G/G_0$	$\gamma - D/D_0$
SUB alt + SUB	22.0	Tika et ali. (2010)	
Bedrock sismico	22.0	-	Cost=1%

Tabella 4-2. Sintesi delle caratteristiche di densità, rigidezza e smorzamento attribuite ai vari sismostrati.

2. AZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO

Le azioni sismiche in base alle quali valutare gli effetti locali ai fini della MZS sono definite, in termini di accelerogrammi di input, dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli dell'Emilia Romagna, selezionando i segnali dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motion database" attraverso il confronto fra la una forma spettrale di riferimento (spettro di risposta isoprobabile con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni) e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati.

Gli ID degli acceleogrammi (Figura 2-1, Figura 2-2, Figura 2-3) sono i seguenti

- 000046xa_037054SanLazzarodiSavena
- 000126xa_037054SanLazzarodiSavena
- 000354xa_037054SanLazzarodiSavena

Il moto sismico di ciascun accelerogramma è riferito ad un periodo di ritorno 475 anni e prevede, per il comune di San Lazzaro di Savena, una **PGA₀ = 0.172g** su suolo orizzontale e rigido.

In Figura 2-4 si riportano gli spettri di risposta degli accelerogrammi di input, riferiti ad uno smorzamento viscoso $\zeta=5\%$.

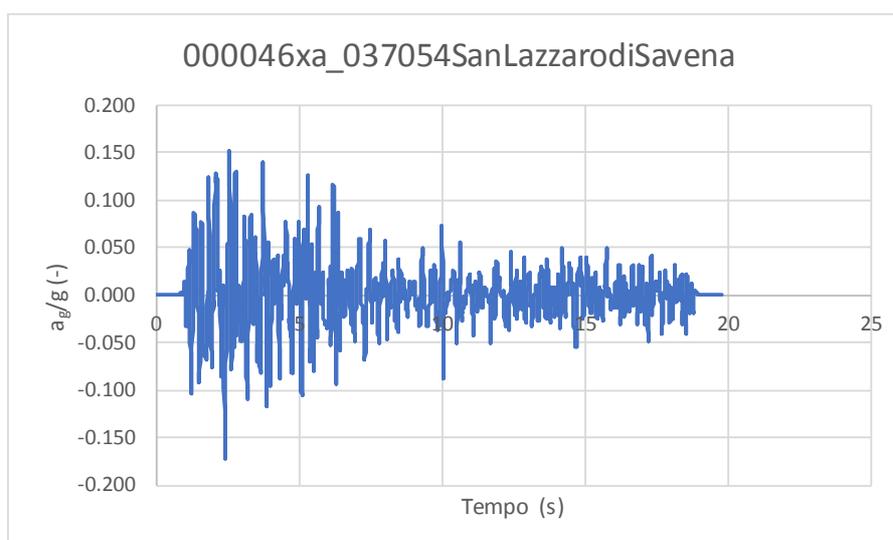


Figura 2-1: Time history delle accelerazioni associate all'evento 000046xa_037054 (San Lazzaro di Savena)

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

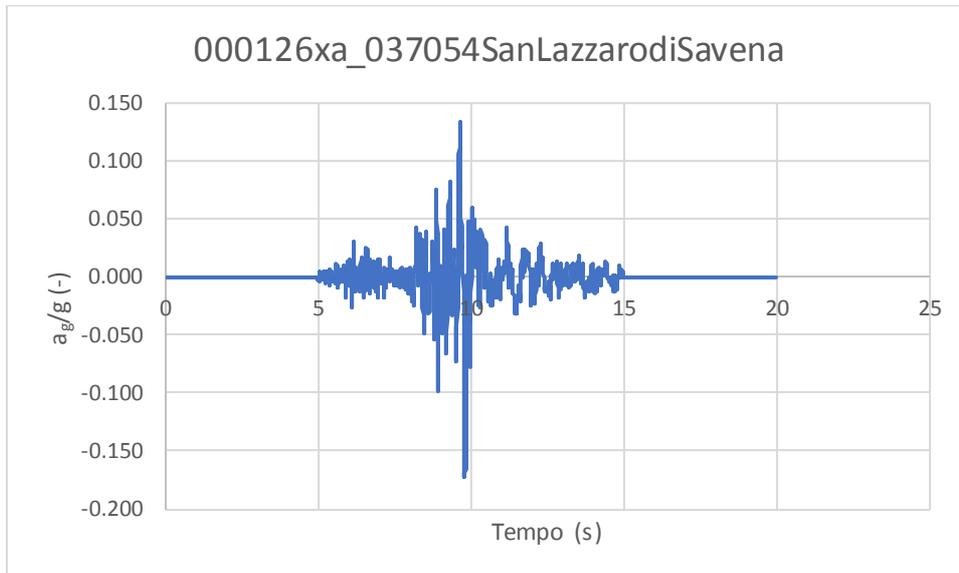


Figura 2-2: Time history delle accelerazioni associate all'evento 000126xa_037054 (San Lazzaro di Savena)

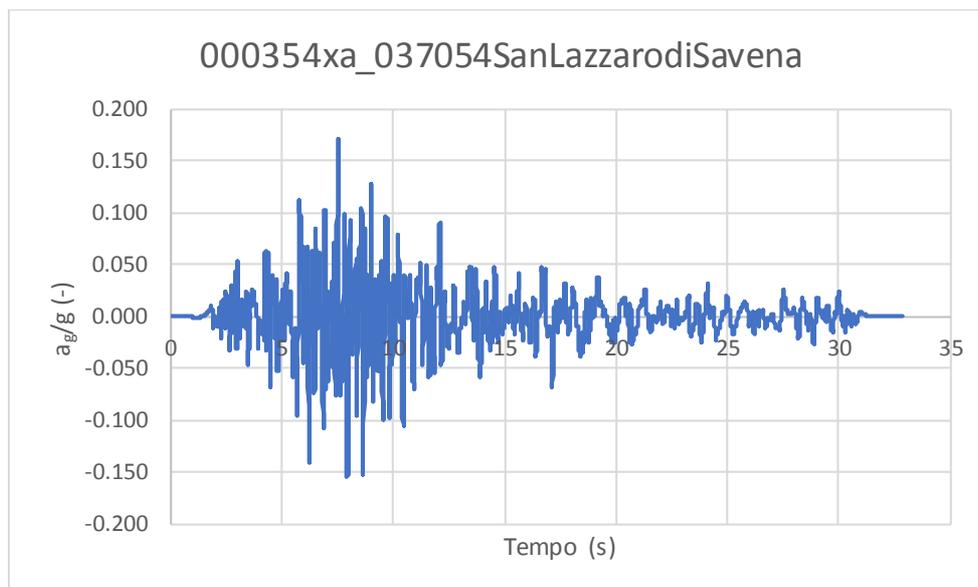


Figura 2-3: Time history delle accelerazioni associate all'evento 000354xa_037054 (San Lazzaro di Savena)

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

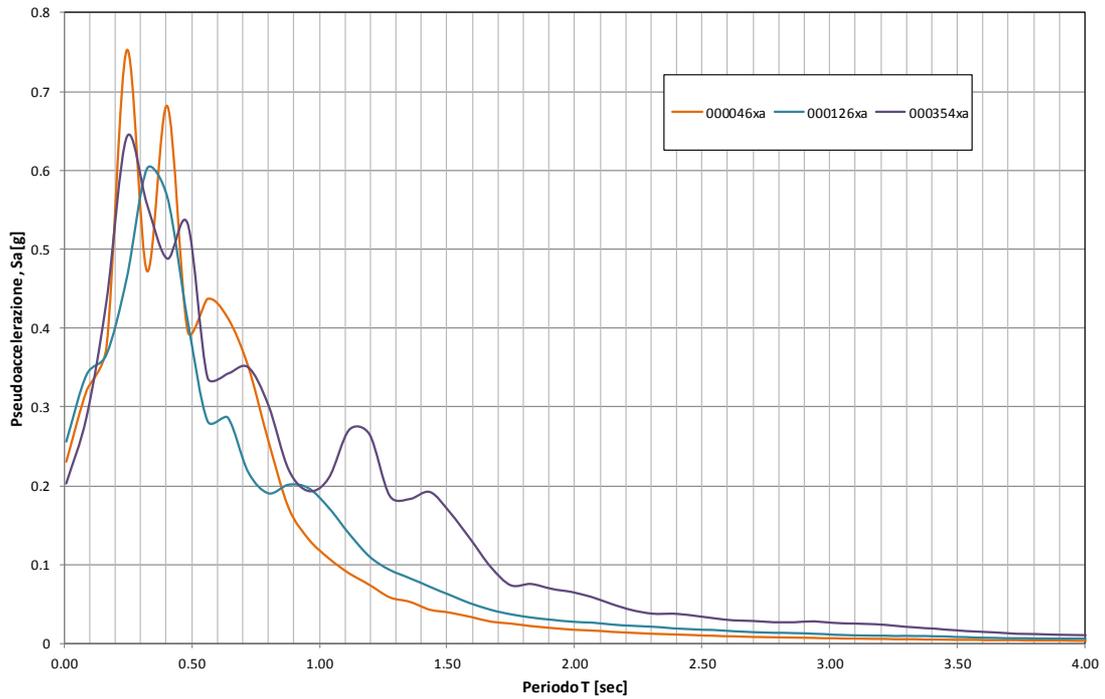


Figura 2-4. Spettri di risposta elastici in accelerazione (D=5%) relativi alle Time history di input.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

5. VALUTAZIONI SULLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

5.1 Premessa

Uno dei più importanti e ricorrenti problemi nella geotecnica sismica è la valutazione della risposta del terreno ad un input sismico. In particolare, per risposta sismica locale si intende il complesso di modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base (Bedrock Motion, BM), subisce attraversando gli strati di terreno soprastanti sino alla superficie (Surface Motion, SM).

Lo scopo di questo capitolo è di fatto la determinazione dell'accelerogramma in superficie (analisi 1D), che può consentire la valutazione delle forze indotte dal sisma che possono portare ad una instabilità del terreno e/o delle opere.

Una rappresentazione sintetica del fenomeno di risposta sismica locale è illustrata in Figura 5-1.

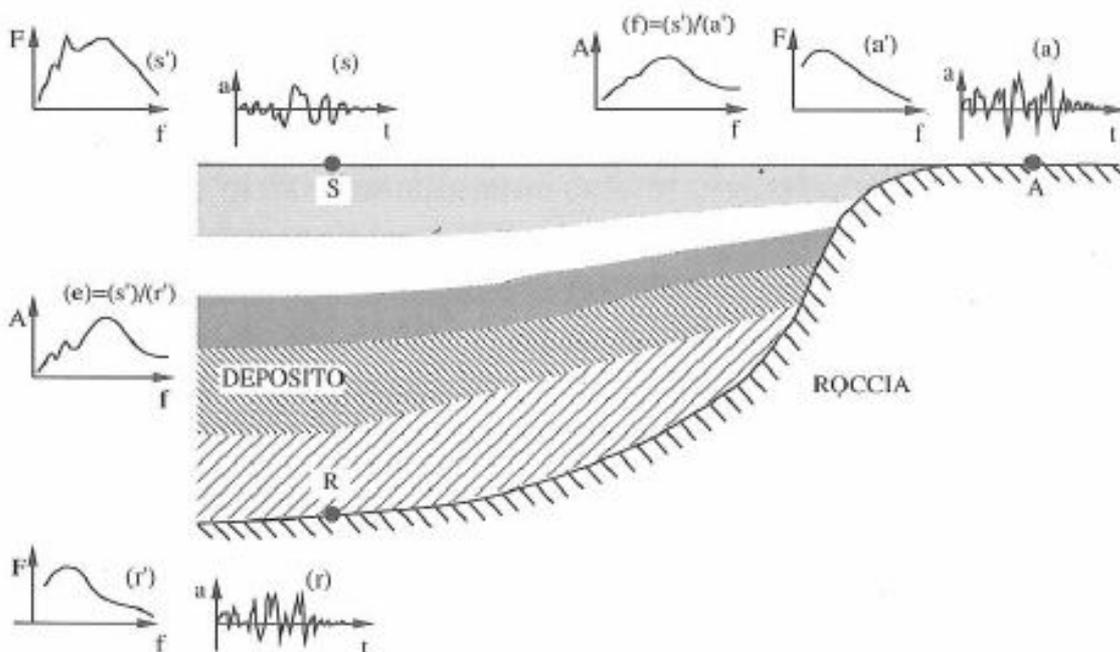


Figura 5-1. Schema di riferimento per l'analisi della risposta sismica locale

La valutazione quantitativa della risposta sismica locale deve essere effettuata confrontando i parametri che caratterizzano il moto sismico del substrato roccioso di riferimento con quelli alla superficie.

Il moto sismico può essere rappresentato sia nel dominio del tempo sia nel dominio delle frequenze.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

Il moto sismico nel dominio del tempo è definito da un accelerogramma (rappresentato dalle lettere "r", "s", "a" in Figura 5-1) ed è caratterizzato da grandezze immediatamente intelligibili, quali il valore di picco di accelerazione e la durata.

Il parametro più significativo, nel dominio del tempo, risulta pertanto essere il rapporto tra l'accelerazione massima alla superficie del terreno e quella in corrispondenza della formazione rocciosa, chiamato Fattore di Amplificazione. Ciononostante, il Fattore di Amplificazione fornisce solamente un'informazione in termini di variazione delle ampiezze massime, non tenendo in conto delle modifiche del contenuto in frequenza indotte dal terreno stesso. La valutazione di tali modifiche sul moto sismico di riferimento, certamente più completa, può essere effettuata osservando i risultati nel dominio delle frequenze.

L'evento sismico nel dominio delle frequenze può essere rappresentato mediante Spettri di Fourier dell'accelerazione (rappresentati dalle lettere "r", "s", "a" in Figura 5-1), ottenuti dai rispettivi accelerogrammi attraverso la funzione Trasformata di Fourier (FFT), utile a scomporre il segnale sismico nelle singole armoniche, ciascuna delle quali caratterizzata da una propria ampiezza e frequenza.

La maniera in cui un input sismico di riferimento, in termini di Spettro di Fourier, si trasferisce in superficie è descritta in modo efficace dalla Funzione di Trasferimento, $H(\omega)$.

La Funzione di Trasferimento è il rapporto tra lo spettro di Fourier del moto alla superficie del terreno e quello dell'analoga componente in corrispondenza del substrato roccioso di riferimento. Essendo il rapporto tra due funzioni complesse, la funzione di trasferimento è anch'essa complessa, il cui modulo è la cosiddetta Funzione di amplificazione $A(f)$, rappresentata dalla lettera "e" in Figura 5-1.

Dato che la Funzione di Trasferimento si basa sul principio di sovrapposizione degli effetti, è lecito applicare tale criterio solo se il terreno è governato da una legge costitutiva lineare. Il comportamento non lineare può essere comunque approssimato usando una procedura iterativa attraverso un'analisi lineare equivalente.

Generalmente gli eventi sismici di riferimento di input sono relativi ad affioramenti della formazione rocciosa di base (*Rock Outcropping Motion*, punto A di Figura 5-1). Occorre pertanto definire la Funzione di Amplificazione (curva "f" in Figura 5-1) come rapporto tra le ampiezze degli spettri di Fourier in superficie ed in corrispondenza dell'affioramento roccioso.

Le onde sismiche che si generano in profondità a causa di uno spostamento improvviso delle formazioni profonde, nel loro propagarsi verso la superficie, subiscono riflessioni e rifrazioni. Dato che, avvicinandosi alla superficie terrestre, la velocità di propagazione dei materiali diminuisce (materiali meno rigidi e densi) le onde vengono rifratte con un'inclinazione sempre più prossima alla verticale.

Le precedenti considerazioni costituiscono, in termini molto sintetici, la base conoscitiva per la comprensione della risposta sismica di un qualsiasi sito.

In termini monodimensionali, una analisi di risposta sismica locale monodimensionale si basa sulle seguenti assunzioni:

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

- l'interfaccia tra i terreni più superficiali è considerata orizzontale;
- la risposta dei terreni superficiali dipende principalmente dalla propagazione in direzione verticale delle onde di taglio SH;
- la superficie e il bedrock sono considerati come un semispazio indefinito in direzione orizzontale.

Nelle analisi monodimensionali le principali cause di amplificazione risultano quindi essere:

- il contrasto di impedenza tra basamento roccioso e il terreno di deposito sovrastante;
- il contrasto di impedenza tra i vari strati del terreno di deposito.

Dette amplificazioni sono il risultato di un intrappolamento delle onde sismiche per riflessioni multiple entro un determinato strato, che determina un'interferenza costruttiva di alcune onde sismiche, tali da generare un'onda stazionaria (risonanza).

Il calcolo della propagazione delle onde all'interno del terreno consiste nell'imporre l'equilibrio di un volume elementare di terreno e nel risolvere un sistema di equazioni differenziali (equazioni delle onde).

Le indagini geotecniche e le informazioni stratigrafiche profonde hanno consentito di accertare la presenza di una successione di strati piano-parallela, nella quale quindi le diverse unità geologiche sono schematizzabili come dei volumi tabulari sovrapposti, tali da semplificare il modello sismostratigrafico da adottare, che può riguardare la singola dimensione verticale.

5.2 Modellazione numerica

Il codice di calcolo utilizzato per la valutazione della risposta sismica di un deposito di terreno eterogeneo può lavorare nel campo delle tensioni totali, nel quale il modello fisico utilizzato è quello a strati continui ed omogenei a comportamento visco-elastico linearizzato di Kelvin-Voigt e consiste in N strati paralleli estesi indefinitamente in direzione orizzontale su un semispazio orizzontale corrispondente al bedrock (Figura 5-2).

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

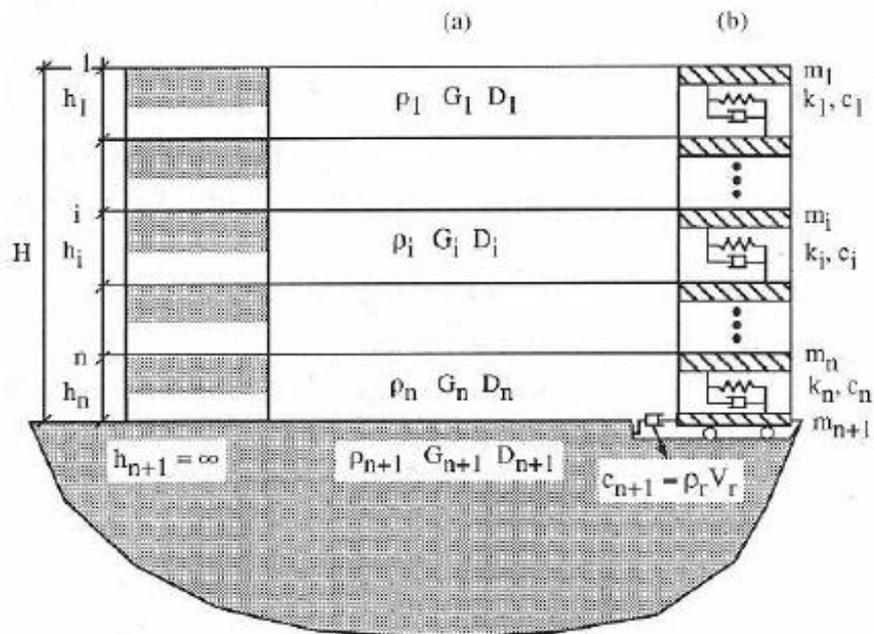


Figura 5-2. Modello a strati continui.

Ogni strato è considerato omogeneo ed isotropo e caratterizzato dai seguenti parametri:

- spessore dello strato, h ;
- peso in volume del terreno, γ_{nat} ;
- velocità delle onde di taglio, V_s ;
- curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato ($G/G_0-\gamma$);
- curve di smorzamento in funzione della deformazione a taglio ($D/D_0-\gamma$).

Il moto di input è costituito da onde S che si propagano in direzione perpendicolare alla superficie libera.

La procedura di calcolo considera, nella soluzione dell'equilibrio dinamico del sistema, il legame non lineare attraverso due tipologie di analisi:

- analisi lineare equivalente, che consiste in una serie di analisi lineari con aggiornamento successivo dei valori della rigidità a taglio $G(\gamma)$ e dello smorzamento $D(\gamma)$ fino al soddisfacimento di un criterio di convergenza delle deformazioni;
- analisi non lineare, che consiste nell'integrazione passo-passo delle equazioni del moto, modificando via via i valori dei parametri di rigidità e smorzamento.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

Nel caso particolare è stata utilizzata un'analisi di tipo lineare equivalente, che si articola nelle seguenti fasi (Figura 5-3):

1. determinato l'accelerogramma di input e , mediante la trasformata di Fourier (FFT), calcolato il rispettivo spettro di Fourier, si determina la funzione di trasferimento che consente di ottenere lo spettro di Fourier attraverso l'interfaccia tra due strati contigui. Naturalmente per determinare la funzione di trasferimento è stato necessario fare una stima iniziale di $G_{(1)}(\gamma)$ e $D_{(1)}(\gamma)$, valutati in genere per bassi valori di deformazione e per curve definite dall'utente;
2. si calcola, attraverso la funzione inversa della trasformata di Fourier (IFFT) il corrispondente accelerogramma, dal quale, con doppia integrazione, si ricava l'andamento degli spostamenti orizzontali per quella data profondità;
3. derivando rispetto all'asse che indica la profondità a partire dal piano campagna, si valuta l'andamento temporale della deformazione di taglio e si determina il suo valore massimo $\gamma_{max}^{(i)}$;
4. la deformazione di taglio effettiva da utilizzare per il passo successivo è fornita dalla seguente relazione:

$$\gamma_{eff}^{(i)} = R_{\gamma} \cdot \gamma_{max}^{(i)}$$

5. dove R_{γ} (Idriss e Sun, 1992) è un fattore costante per tutti gli strati e dipendente dalla magnitudo M del sisma secondo la seguente relazione:

$$R_{\gamma} = \frac{M - 1}{10}$$

6. si confronta la deformazione di taglio effettiva così calcolata con quella adottata nella valutazione di $G_{(1)}(\gamma)$ e $D_{(1)}(\gamma)$ ed assunta nella fase precedente;
7. se $|\gamma_{eff}^{i+1} - \gamma_{eff}^i| < \varepsilon$, dove ε rappresenta una prefissata tolleranza, allora l'analisi si arresta;
8. al contrario con il nuovo valore di γ , attraverso le curve definite inizialmente, si ricavano i corrispondenti nuovi valori di $G(\gamma)$ e $D(\gamma)$ e si ripete la procedura descritta fino a quando non viene rispettata la disequazione definita precedentemente.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

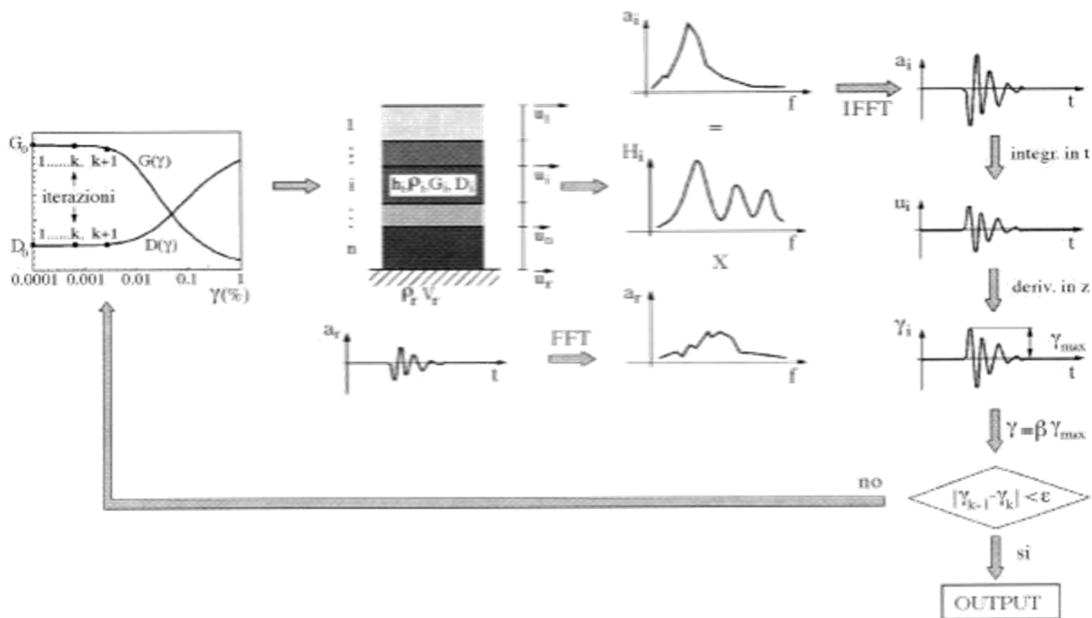


Figura 5-3. Rappresentazione schematica dell'algoritmo per l'analisi lineare equivalente.

Sebbene tale processo iterativo permetta di approssimare il comportamento non lineare tipico del terreno, è importante ricordare come tale metodologia risulti ancora un metodo di analisi lineare; infatti le proprietà del terreno relative alle deformazioni a taglio sono ipotizzate costanti durante tutta la durata dell'evento sismico, senza tenere in conto che, per un dato istante, la deformazione potrebbe essere maggiore o minore.

Risulta pertanto chiaro come il metodo lineare equivalente non può rappresentare le variazioni di rigidità del terreno che realmente accadono durante il sisma.

5.3 Risultanze analisi di risposta sismica locale

I risultati dell'analisi di risposta sismica locale condotta sono riportati nel seguito. La DGR 2193/2015 richiede, per uno studio di III Livello, le seguenti determinazioni:

- Gli spettri di risposta delle aree indagate per un periodo di ritorno $T_r=475$ anni e smorzamento $\zeta = 5\%$,
- L'amplificazione sismica secondo gli indici
 - o PGA/PGA_0
 - o SI/SI_0 (intensità di Housner), calcolato sia in accordo alla formulazione classica ($T=0.1s \div 2.5s$), sia negli intervalli indicati nella DGR2193/2015 ($T=0.1s \div 0.5s$, $T=0.5s \div 1.0s$ e $T=0.5s \div 1.5s$)

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

5.3.1 Spettri di risposta elastici

Nelle seguenti figure si riportano i risultati dell'analisi di risposta sismica locale in termini di spettro di risposta elastico, in riferimento ad un oscillatore avente uno smorzamento viscoso pari al 5%.

In particolare, sono riportati per ciascuna figura i tre spettri elastici di output di ciascun accelerogramma al bedrock (Figura 5-4) ed a piano campagna (Figura 5-5), nonché i rispettivi spettri di involucro e medio (rispettivamente in rosso e blu).

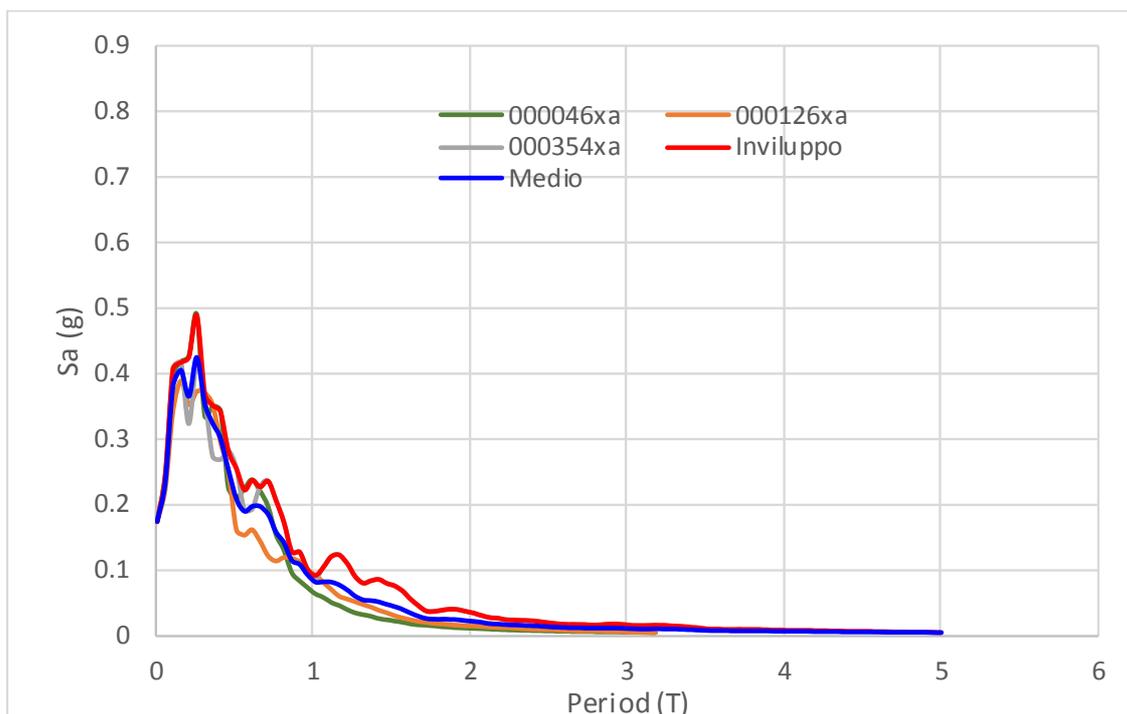


Figura 5-4. Risultati della RSL in termini di spettri di risposta elastici (Bedrock).

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

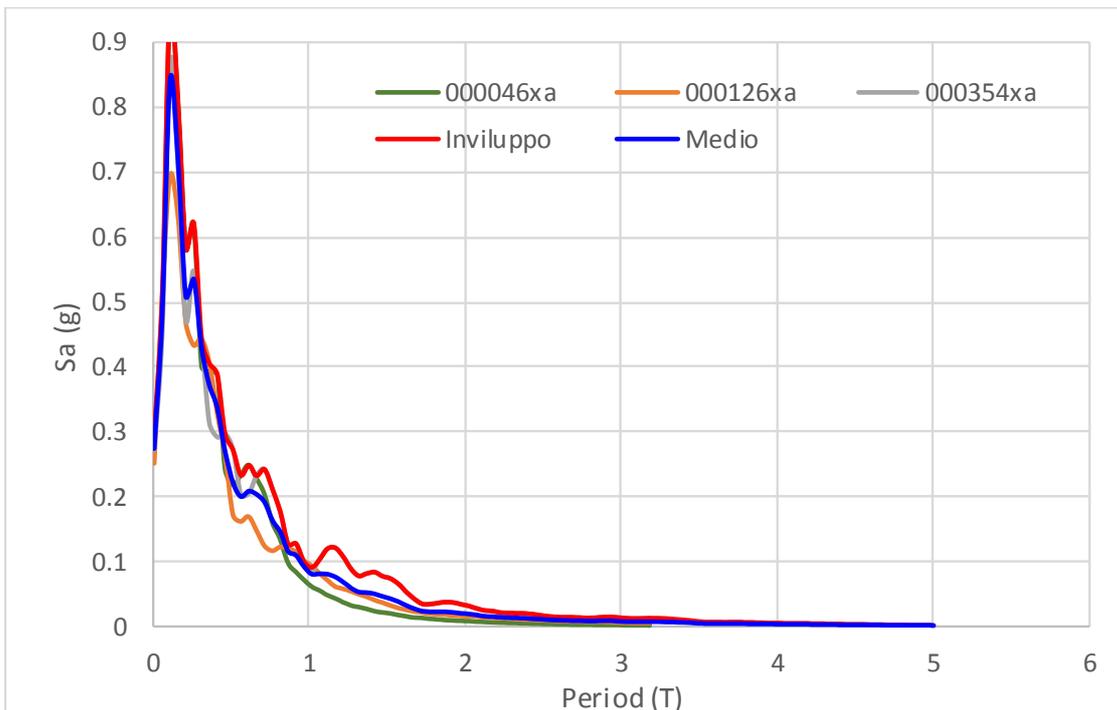


Figura 5-5. Risultati della RSL in termini di spettri di risposta elastici (superficie)

5.3.2 Fattore di amplificazione $FA = PGA/PGA_0$

I risultati sono riportati nel seguito in riferimento al singolo accelerogramma ed agli accelerogrammi involuppo e medio rispettivamente.

000046xa	000126xa	000354xa	Involuppo	Medio
PGA/PGA_0	PGA/PGA_0	PGA/PGA_0	PGA/PGA_0	PGA/PGA_0
1.69	1.46	1.57	1.69	1.58

Tabella 5-1. Fattori di amplificazione

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

5.3.3 Rapporto delle Intensità di Housner

I risultati per i due scenari sono riportati nel seguito in riferimento al singolo accelerogramma ed agli accelerogrammi involuppo e medio rispettivamente.

	000046xa	000126xa	000354xa	Invi- luppo	Medio
ΔT (s)	SI/SI ₀				
0.1÷2.5	1.11	1.09	1.06	1.07	1.08
0.1÷0.5	1.28	1.22	1.26	1.27	1.25
0.5÷1.0	1.05	1.03	1.04	1.04	1.04
0.5÷1.5	1.04	1.04	1.03	1.02	1.03

Tabella 5-2. Rapporto delle Intensità di Housner

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

6. VALUTAZIONI SUL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

6.1 Generalità e condizioni per la liquefazione

In terreni saturi sabbiosi sollecitati in condizioni non drenate da azioni cicliche dinamiche, il termine **liquefazione** comprende una serie di fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio e/o ad accumulo di deformazioni plastiche.

L'avvenuta liquefazione si manifesta, in presenza di manufatti, attraverso la perdita di capacità portante e/o lo sviluppo di elevati cedimenti e rotazioni.

Nel settore territoriale in esame sono stati rinvenuti, a partire da piano campagna e in maniera pressoché continua fra la pK 0.000 (Rotatoria Ponte delle Oche) e la pK 0+970 circa (briglia T. Savena), depositi limoso-sabbiosi appartenenti all'unità geotecnica DAS tali da richiedere l'accertamento delle verifiche di liquefazione.

In riferimento ai parametri numerici adottati per le verifiche, verranno implementati i seguenti input di riferimento:

1. sulla base della classificazione sismica ZS9 (Figura 6-1, Figura 6-2), l'intera area di progetto ricade nella Zona Sismogenetica 913 (Appennino Emiliano-Romagnolo), caratterizzata da una magnitudo momento massima prevedibile **M_w=5.91**.
2. L'accelerazione massima al piano campagna vale $a_g=0.172g$ (accelerazione di riferimento su suolo rigido per il Comune di San Lazzaro) amplificata per $FA=1.58$ (da RSL) $\rightarrow 0.271g$.
3. La falda misurata durante le indagini è attorno ai -3.8m da piano campagna.
4. Le stratigrafie verificate sono riconducibili ai profili di resistenza penetrometrica CPTU1 e CPTU3 (SGT 2009)

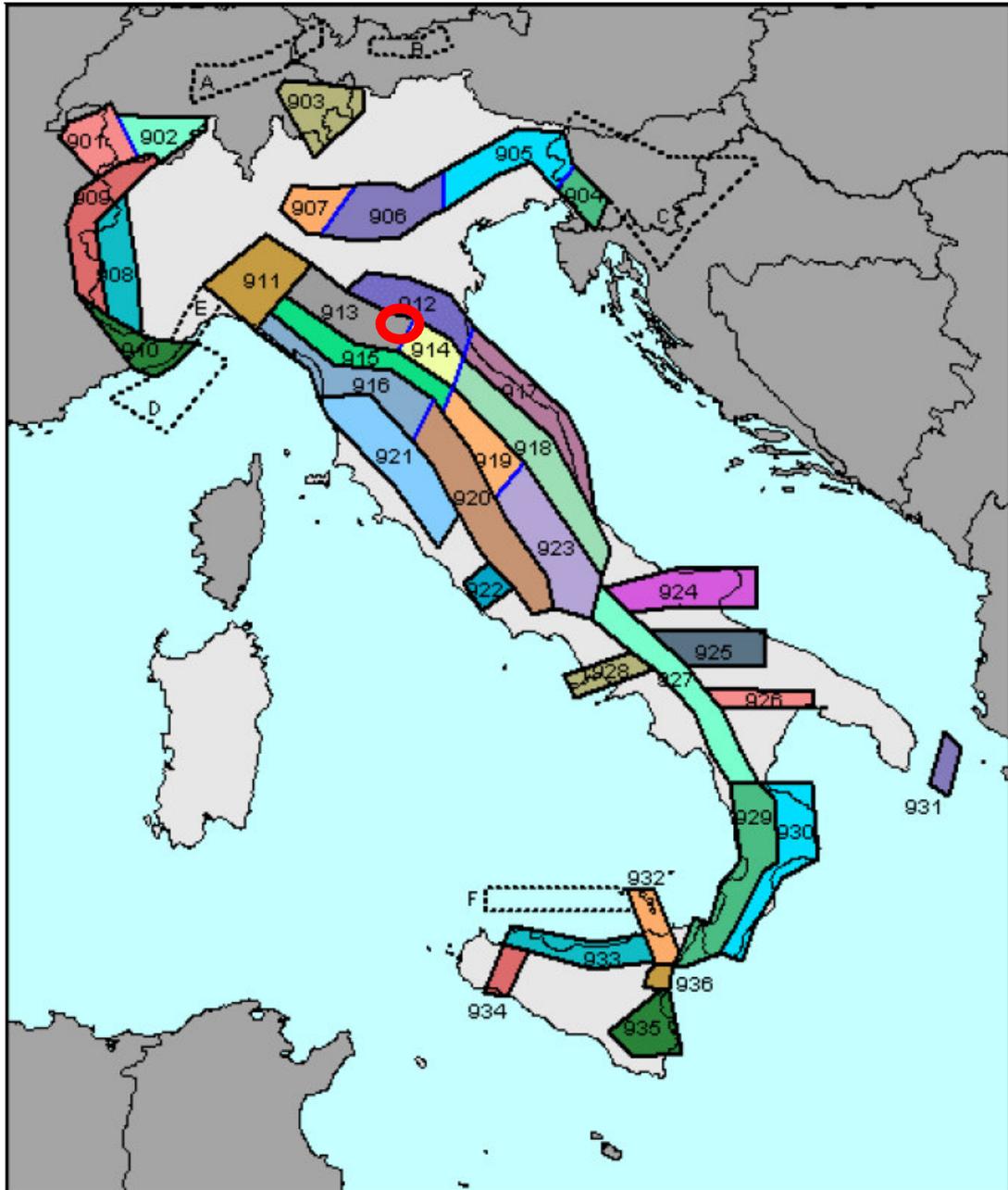


Figura 6-1. Zonazione sismogenetica ZS9. La parte di collina della Città Metropolitana di Bologna ricade nella zona sismica 913

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

ZS Name	ZS9	MwMax AR
Savoia	901	5,91
Vallese	902	6,14
Grigioni - Valtellina	903	5,91
Trieste - Monte Nevoso	904	5,68
Friuli - Veneto Orientale	905	6,60
Garda - Veronese	906	6,60
Bergamasco	907	5,91
Piemonte	908	5,68
Alpi Occidentali	909	5,68
Nizza - Sanremo	910	6,37
Tortona - Bobbio	911	5,68
Dorsale Ferrarese	912	6,14
Appennino Emiliano-Romagnolo	913	5,91
Forlivese	914	5,91
Garfagnana - Mugello	915	6,60
Versilia-Chianti	916	5,68
Rimini - Ancona	917	6,14
Medio-Marchigiana/Abruzzese	918	6,37
Appennino Umbro	919	6,37
Val di Chiana - Ciociaria	920	5,68
Etruria	921	5,91
Colli Albani	922	5,45
Appennino Abruzzese	923	7,06
Molise-Gargano	924	6,83
Ofanto	925	6,83
Basento	926	5,91
Sannio - Irpinia - Basilicata	927	7,06
Ischia - Vesuvio	928	5,91
Calabria tirrenica	929	7,29
Calabria ionica	930	6,60
Canale d'Otranto	931	6,83
Eolie - Patti	932	6,14
Sicilia settentrionale	933	6,14
Belice	934	6,14
Iblei	935	7,29
Etna	936	5,45

Figura 6-2. Zonazione sismogenetica ZS9. Magnitudo momento massima attesa per la Zona 913.

6.2 Approccio semplificato per la stima del potenziale di liquefazione

Le verifiche per l'unità DAS saranno condotte adottando metodi di analisi semplificata in termini di tensioni totali. Tali metodi sono applicati a prove penetrometriche statiche e determinano, ad ogni profondità z del deposito compreso nei primi 20 m, il coefficiente di sicurezza alla liquefazione:

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

$$F_L = \frac{CRR}{CSR}$$

dove:

- $CRR = \frac{\tau_{ult}}{\sigma'_v}$, è la resistenza normalizzata alla pressione verticale efficace iniziale;
- $CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_v} = \frac{0,65 \times \tau_{max}}{\sigma'_v}$ è la tensione normalizzata indotta dal terremoto.

I risultati delle analisi saranno presentati riportando l'indice del potenziale di liquefazione I_L definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz \quad \text{in cui} \quad w(z) = \frac{200}{z_{crit}} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_{crit}}\right)$$

z_{crit} è la profondità critica, ovvero la profondità massima entro la quale può verificarsi la liquefazione, che di norma si assuma pari a 20 m.

La variabile $F(z)$ vale (Sonmez, 2003):

$$\begin{array}{ll} F(z) = 0 & \text{per } F_L \geq 1.2 \\ F(z) = 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18.427 \cdot F_L) & \text{per } 1.2 > F_L \geq 0.95 \\ F(z) = 1 - F_L & \text{per } F_L \leq 0.95 \end{array}$$

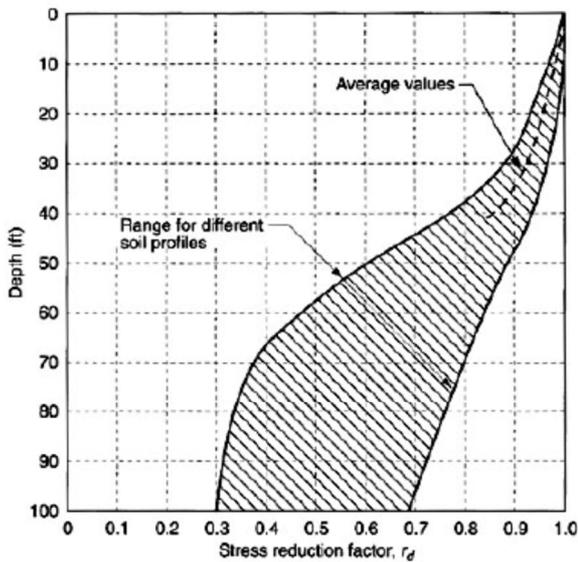
6.2.1 Valutazione del rapporto di tensione ciclica "CSR"

Il rapporto di tensione ciclica, ad una determinata profondità, può essere valutato attraverso la seguente espressione (Seed e Idriss, 1971):

$$CSR = 0.65 \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d$$

dove:

- a_{max} è l'accelerazione massima del terremoto;
- σ_v e σ'_v sono rispettivamente la tensione totale verticale e la tensione efficace verticale;
- r_d è un coefficiente correttivo che tiene conto della deformabilità del sottosuolo che può essere assunto pari a:



$$r_d = 1.0 - 0.00765 \cdot z \quad \text{for } z \leq 9.15 \text{ m}$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 \cdot z \quad \text{for } 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}$$

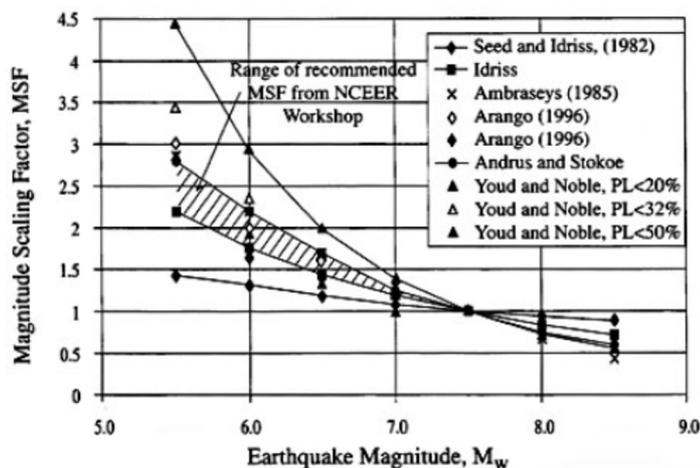
$$r_d = 0.744 - 0.008 \cdot z \quad \text{for } 23 \text{ m} < z \leq 30 \text{ m}$$

$$r_d = 0.5 \quad \text{for } z > 30 \text{ m}$$

6.2.2 Valutazione del rapporto di resistenza ciclica "CRR"

Il rapporto di resistenza ciclica può essere stimato da prove CPT e da misura della velocità delle onde di taglio.

Poiché le procedure semplificate sono state elaborate sulla base di osservazioni sul comportamento dei depositi durante eventi sismici con magnitudo $M=7.5$, per eventi di magnitudo diversa si introduce un coefficiente correttivo MSF così definito:



$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$$

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

La tensione ciclica CRR in corrispondenza della magnitudo di interesse si ottiene pertanto dalla relazione:

$$CRR_M = CRR_{7.5} \cdot MSF$$

La stima del rapporto di resistenza CRR da prove CPT viene effettuata utilizzando il metodo di Robertson (2009).

I parametri di base per le verifiche a liquefazione sono i seguenti:

a. Peso di volume del terreno

In tutte le analisi si è assunto il peso di volume illustrato in Tabella 4-2;

b. Falda

La falda è stata posta a -3.8m da piano campagna, così come rilevata durante le indagini;

c. Contenuto in fini (FC)

Il contenuto in fini è stato assunto da prove di laboratorio ovvero dalla correlazione empirica di Robertson (2009);

d. Accelerazione massima

L'accelerazione massima lungo il profilo 0÷20m sarà assunta conservativamente costante e pari alla PGA

e. Magnitudo

Il massimo valore di magnitudo momento attesa per il sito vale:

$$M_w = 5.91 \text{ (da ZS9, zona 913)}$$

6.2.3 Criteri rappresentativi dei risultati della stima del potenziale di liquefazione

Il potenziale di liquefazione è stato stimato per ciascuna prova CPT.

La valutazione del rischio di liquefazione in termini integrali (potenziale di liquefazione I_L – Sonmez, 2003) è riportata nella seguente Tabella 6-1, dalla quale risultano valori di I_L inferiori a 2.

Tabella 6-1. Indice del potenziale di liquefazione I_L dei terreni granulari saturi.

Prova	I_L
CPTU1	0.151
CPTU3	0.033

Tabella 6-2. Classificazione del potenziale di liquefazione I_L secondo Sonmez (2003).

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

$I_L = 0$	Non liquefacibile ($F_L \geq 1.2$)
$0 < I_L \leq 2$	Potenziale basso
$2 < I_L \leq 5$	Potenziale moderato
$5 < I_L \leq 15$	Potenziale alto
$15 < I_L$	Potenziale molto alto

In riferimento allo schema classificativo di Sonmez (2003, Tabella 6-2), le verticali verificate indicano un **potenziale di liquefazione basso**, pertanto non si procederà con l'ulteriore verifica dei cedimenti post-sismici attesi.

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

7. CONCLUSIONI

L'analisi e l'interpretazione dei dati di tipo geotecnico, sismico e geologico ha consentito di mettere a punto un modello di riferimento per sviluppare uno studio di III Livello utile ai fini pianificativi che si è articolato in:

- La definizione della sismo-stratigrafia dell'area e dell'approccio analitico.
- Un'analisi di risposta sismica del sito in condizioni monodimensionali che ha identificato uno spettro di risposta elastico in accelerazione per ciascuna time-history dell'accelerazione di input,
- La stima di parametri di amplificazione sismica locale,
- Le valutazioni sul potenziale di liquefazione.

L'esame complessivo dei dati scaturiti dalle simulazioni numeriche ha consentito di delineare un profilo amplificativo in linea con gli abachi previsti dalla DGR 2193/2015 per il sito in esame, basato sui dati sperimentali ottenuti dai rapporti spettrali H/V delle prove HVSR, dai quali si identifica dei picchi distinti per frequenze comprese fra 8 e 13 Hz, tali da evidenziare delle impedenze sismiche rilevanti ai fini dell'amplificazione, determinati dal substrato formazionale integro.

I risultati significativi ai fini della DGR 2193/2015 sono riportati nella sezione § 5.3.

7.1 Limiti dell'analisi numerica

La valutazione della risposta sismica locale costituisce un metodo analitico finalizzato ad individuare e quantificare le modifiche che il moto sismico subisce nel suo percorso di propagazione dagli strati più profondi e rigidi verso quelli più superficiali e tipicamente meno rigidi. Per produrre quest'analisi occorre necessariamente allestire degli scenari basati su assunzioni o semplificazioni che, da un lato sono necessarie ai fini dell'analisi stessa, da un altro introducono - inevitabilmente - delle deviazioni nella simulazione numerica rispetto alla fenomenologia reale. Di queste assunzioni o semplificazioni, si riportano di seguito le principali:

- l'analisi assume una omogeneità e continuità dei mezzi geologici attraversati dalle onde sismiche; ciononostante, è noto che i mezzi geologici sono quanto di più eterogeneo e discontinuo esista in ingegneria civile;
- gli accelerogrammi naturali di input che ad oggi sono a disposizione nelle banche dati nazionali ed internazionali e che soddisfano il requisito di spettro-compatibilità non necessariamente riproducono le caratteristiche sismogenetiche proprie delle aree di studio (contenuti in frequenza ecc.); lo studio e la classificazione degli accelerogrammi su base sismo-genetica è una scienza ancora in divenire;
- la stessa caratterizzazione delle sorgenti sismiche non è ancora totalmente completa e affidabile;

	Committente: Città Metropolitana di Bologna	Documento: Studio Geologico e Sismico di III Livello ai sensi della DGR n.2193 del 2015 (Comune di S. Lazzaro di Savena)
	Lavoro: PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD1603 Data: Ottobre 2018

- l'analisi RSL ha validità qualora le condizioni siano di *far field*, ovvero per sorgenti sismiche poste mediamente a distanza superiore ai 20km;
- nell'analisi di RSL non si tengono in conto gli effetti legati alla presenza delle onde superficiali di Rayleigh e Love, che possono avere effetti persino superiori a quello delle Vs sul moto sismico del suolo.

È quindi importante sottolineare come i risultati ottenuti costituiscano un buon riferimento per la pianificazione, scaturito sulla base di dati geotecnici, sismici e di tutte le informazioni disponibili, che certamente permette una prima ed importante classificazione del territorio; ciononostante, è bene considerare anche i limiti associati a questa modellazione: si tratta di un riferimento perfettibile e non ha un valore inteso come assoluto ed immutabile.