

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE
OBIETTIVO N. 443/01**

LINEA AV/AC TORINO – VENEZIA Tratta VERONA – PADOVA

Lotto funzionale Verona – Bivio Vicenza

PROGETTO ESECUTIVO

GENERALE

GEOLOGIA E GEOTECNICA

GENERALE

Risposta sismica locale. Allegato alle relazioni sulla modellazione sismica del sito e pericolosità sismica di base IN1710EI2RHGE000005B e IN1710EI2RHGE000006B

| | | | | |
|----------------------------|--|------------------|--|-------|
| GENERAL CONTRACTOR | | DIRETTORE LAVORI | | SCALA |
| IL PROGETTISTA INTEGRATORE | Consorzio Iricav Due ing. Paolo Carmona | | | - |
| | | | | |

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV. FOGLIO

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | N | 1 | 7 | 1 | 0 | E | I | 2 | R | H | G | E | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | A | - | - | - | D | - | - | - |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | |
|--|----------------------------|-------------|
| | VISTO CONSORZIO IRICAV DUE | |
| | Firma | Data |
| | Luca RANDOLFI | Aprile 2021 |

| Progettazione: | | | | | | | | |
|----------------|-------------|-----------------|-------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------------|
| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | IL PROGETTISTA |
| A | EMISSIONE | A. Callerio | Luglio 2021 | V. Pastore | Luglio 2021 | P. Ascari | Luglio 2021 | Ing. Paolo Ascari |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| | | |
|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| CIG. 8377957CD1 | CUP: J41E91000000009 | File: IN1710EI2RHGE0000009A_01 |
| | | Cod. origine: |



Progetto cofinanziato dalla Unione Europea

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|-------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 2 di 51 |

INDICE

| | | |
|---|--|----|
| 1 | PREMESSA..... | 3 |
| 2 | ELABORATI DI RIFERIMENTO | 3 |
| 3 | AGGIORNAMENTO/CONFERMA DELLA CATEGORIA DI SUOLO IN FASE DI PE..... | 4 |
| 3.1 | Tratti S1 -S6 da Prog. 0+000 a 21+990..... | 5 |
| 3.1.1 | Tratto S1 da Prog. 0+000 a 4+000 | 5 |
| 3.1.2 | Tratto S2 da pk 4+000 a 5+878.5 | 9 |
| 3.1.3 | Tratto S3 da pk 5+878.5 a 7+555..... | 14 |
| 3.1.4 | Tratto S4 da pk 7+555 a 13+240 | 18 |
| 3.1.5 | Tratto S5 da pk 13+240 a 20+000 | 22 |
| 3.1.6 | Tratto S6 da pk 20+000 a 24+000 | 26 |
| 3.2 | Tratto S7 da pk 24+000 a 28+000 | 30 |
| 3.3 | Tratto S8 da pk 28+000 a 32+000 | 34 |
| 3.4 | Tratti S9-S12 da pk 28+000 a 44+250 | 38 |
| 4 | CONCLUSIONI..... | 43 |
| APPENDICE A: DATI DI INPUT E METODO DI ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE | | 44 |

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|-------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 3 di 51 |

1 PREMESSA

Nel Rapporto di Verifica ITF N. IN17-RV-000000022 del 25.05.2021, in merito relazioni sismiche IN1710EI2RHGE0000005A e IN1710EI2RHGE0000006A, è stata sollevata la seguente Non Conformità (NC):

F.25 Si segnala che per i tratti S1, S2, S3, S4, S5, S6, S8, S9 ed S10 la velocità delle onde di taglio riscontrate da diverse prove dirette (down/cross-hole) e indirette (MASW), non sono crescenti con la profondità. In particolare, le prove geofisiche per le quali non si ha evidenza di un "graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità" (cfr Tab. 3.2.II NTC08) sono MASW 1, MASW 2, MASW 3, MASW 4, MASW 6, MASW 15, MASW 17, DH 49, BH PE 65, BH PE 66, BH PE 71, BH PE 76, BH 6, BH 23, BH 41, BH 47, BH 80, BH 93. Per le verticali indicate non è possibile applicare l'approccio normativo semplificato e si rende dunque necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale al fine di valutare correttamente l'incremento/decremento di valori di accelerazioni di progetto rappresentativi per le tratte.

Correlate alla suddetta NC sono anche le osservazioni riportate nelle NC F.19 e F.26, i.e.:

F.19 Tra le prove di laboratorio mancano prove di colonna risonante fondamentali ai fini della scelta delle curve di decadimento utili nell'applicazione delle analisi di risposta sismica locale. Tali analisi, come indicato nel successivo commento F.25 sono necessarie come da indicazioni normative NTC2008.

F.26 Elaborati IN1710EI2P5GE0000001A-11A: Riportare la classificazione sismica coerente con il commento F.25.

Nella presente nota, anche sulla scorta dei risultati di specifiche analisi di Risposta Sismica Locale (RSL), si conferma la classificazione dei suoli attraversati dal tracciato di progetto in Categoria C (rif. Tab. 3.2.II NTC2008), ossia trattasi di:

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.

Tale conferma è data dal presente documento per ogni tratto "omogeneo" di tracciato in accordo alla zonizzazione di cui alle Relazioni IN1710EI2RHGE0000005B e IN1710EI2RHGE0000006B.

Le già menzionate analisi di RSL sono state eseguite per un insieme significativo di profili derivati da prove geofisiche caratterizzate da inversioni dei valori di velocità delle onde di taglio (V_s), come da NC F.25 sopra citata, confermando (per i periodi di oscillazione interesse relativi alle verifiche in corso) la cautela di utilizzo del dato di spettro normativo ai fini progettuali.

2 ELABORATI DI RIFERIMENTO

- IN1710EI2RHGE0000001C-4C, Relazione geotecniche generali.
- IN1710EI2RHGE0000005B, Relazione sulla modellazione sismica del sito e pericolosità sismica di base 1/2 (da km 0+000 a 21+990).
- IN1710EI2RHGE0000006B, Relazione sulla modellazione sismica del sito e pericolosità sismica di base 2/2 (da 22+000 a 44+250).
- IN1710EI2P5GE0000001B-11B, Tavole di zonazione sismica del tracciato.

| | | | | | | |
|---|------------------|--|--|-----------|-------------------|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 4 di 51 | |

3 AGGIORNAMENTO/CONFERMA DELLA CATEGORIA DI SUOLO IN FASE DI PE

In linea generale, in stretta continuità con quanto effettuato in sede di Progetto Definitivo (PD), nella prima fase di analisi di PE il tracciato è stato zonizzato in tratti sostanzialmente omogenei dal punto di vista litologico e delle caratteristiche delle formazioni presenti nei primi 30-50 m di profondità, ossia nell'ambito del volume significativo per la definizione della risposta sismica locale in accordo alle NTC2008. In particolare, in sede di progetto esecutivo (PE) si è provveduto a un approfondimento delle assunzioni di PD, alla luce della incrementata conoscenza dei terreni derivante dall'esecuzione di indagini geotecniche e geofisiche.,

In primo luogo, i risultati delle indagini geofisiche disponibili sono stati analizzati in relazione alle caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni, determinate su verticali limitrofe di indagine mediante indagini geotecniche in sito e laboratorio,.; ciò ha permesso di evidenziare in alcuni casi, talune discrepanze, ossia valori di V_s superiori o inferiori alle attese, che possono essere legate alle modalità di raccolta del dato sismografico, all'errore strumentale ed all'alea di incertezze legata alla restituzione del dato da parte del geofisico. Inoltre, rispetto al PD, nella fase di PE è stata introdotta, una analisi più dettagliata in termini di correlazioni di V_s con i risultati delle prove di tipo CPT/SPT; è stato infatti impiegato un insieme di correlazioni da letteratura e il valore atteso di V_s è stato determinato come media dei valori predetti da esse, in modo da ridurre per quanto possibile l'incertezza epistemica del processo di correlazione stesso. In taluni casi le correlazioni hanno restituito valori di V_s in linea con le prove geofisiche, in altri casi, o su spessori definiti, meno. Da qui nasce l'interpretazione del progettista nell'inquadramento generale che non può mai fare riferimento ad un'unica prova (anche nella selezione del dato di base per analisi di RSL), ma deve tenere conto sempre delle incertezze in gioco andando a definire un profilo di progetto che sia ragionevole rispetto all'insieme delle conoscenze.

In aggiunta a quanto sopra, ogni singola prova geofisica eseguita in fase di PE e PD è stata analizzata nel dettaglio andando a verificare la qualità dei sismogrammi e del processo di picking per le prove in foro (downhole e crosshole) o i diagrammi di dispersione per le prove MASW ed il relativo profilo di inversione. Nel primo caso si è arrivati ad individuare intervalli di profondità caratterizzati da una relativa minore affidabilità del dato, nel secondo si è verificato come talune prove (soprattutto per quanto riguarda le MASW 1-13) siano risultate affette da un campo di frequenze indagato tutto sommato limitato sia verso l'intervallo di frequenze basso (a governare la massima profondità di indagine), ma soprattutto il campo di frequenze medio (che domina la risoluzione del metodo, con eventuali secondi modi).

Nei paragrafi seguenti si entra nel dettaglio delle considerazioni svolte per ogni tratto (da S1 a S12) mostrando una revisione dei profili di V_s di riferimento utilizzati per il calcolo del parametro $V_{s,30}$ da piano campagna. Inoltre, è stato introdotto un intervallo di variazione di tali profili sulla base delle prove disponibili per ogni tratto da S1 a S12, eseguendo, per un numero consistente di verticali caratterizzate da andamenti anomali del dato V_s (e.g. inversioni di velocità), specifiche analisi di RSL, in accordo al metodo descritto in Appendice A.

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|-------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 5 di 51 |

3.1 Tratti S1 -S6 da Prog. 0+000 a 21+990

Le prove MASW relative alla prima parte del tracciato (MASW 1-13, tra le prog. 0+000 e 21+990, profili S1-S6) mostrano fenomeni di inversione dei valori di V_s confermati, in taluni casi e solo parzialmente in termini di velocità misurate (il dato più importante), dai risultati di prove CH o DH condotte nella stessa tratta, in un quadro stratigrafico relativamente uniforme.

3.1.1 Tratto S1 da Prog. 0+000 a 4+000

In questa tratta, dal punto di vista litologico, si può fare risalire la maggiore rigidità osservata dalle prove geofisiche su spessori variabili nei primi 3-15m alla effettiva presenza di uno strato ghiaioso-sabbioso più superficiale (formazione 6), sovrastante la formazione delle sabbie fini addensate sottostanti (cfr. profili geotecnici). Pur se da un punto di vista dei risultati delle prove geotecniche SPT non si osserva una sostanziale differenza, o salto di proprietà (a parte qualche rifiuto legato alla presenza di ciottoli di diametro maggiore, del tutto ragionevole nello strato (6)), le prove geofisiche (es. MASW-PE-01 e MASW-PE-02), restituiscono valori di velocità nella formazione (6) anche fino a 500-600 m/s (oltre il limite superiore per tali tipi di formazioni), mentre le sabbie sottostanti mostrano valori tra 300 e 400 m/s. La presenza di una inversione non sembra riflettersi nel profilo di dispersione di calcolo scelto per l'inversione nella restituzione delle prove MASW (mono-modale).

In Figura 1 viene mostrato il profilo di riferimento costruito sull'insieme delle prove geofisiche e dei dati di correlazione su prove SPT (cfr. valori di Tabella 1) da cui è possibile calcolare un valore di $V_{s,30}$ pari a:

$$V_{s,30} = 359 \text{ m/s}$$

Il suddetto profilo, in tratto rosso continuo, è accompagnato da un intervallo di variazione destinato a rappresentare il dato fornito dalle prove disponibili.

Sulla base delle informazioni disponibili, si ritiene ragionevole, anche sulla base della NC sollevata, l'esecuzione di analisi di RSL su di un profilo V_s di riferimento definito considerando l'insieme di prove geofisiche MASW-PE-01, MASW-PE-02 e DH-PE-06 come mostrato in Figura 2, attraverso la procedura descritta in Appendice A. La scelta di un profilo rappresentativo di più prove (mostrato in Figura 2), in differenza rispetto a quanto si vedrà nel seguito, deriva dalla assonanza delle prove stesse nel mostrare uno strato più rigido entro il medesimo intervallo di proprietà.

Il risultato dell'analisi di RSL è mostrato in Figura 3 in termini di spettro di risposta elastico in accelerazione, smorzato al 5%, calcolato come media delle risposte calcolate in superficie sull'intero set di accelerogrammi scelto. Rimandando all'Appendice A per ogni dettaglio sull'analisi, si osserva qui come il confronto in Figura 3 tra spettro medio RSL e spettro di NTC per suolo di classe C ($a_{max} = 0.317g$) sia soddisfacente, con lo spettro di Norma che sovrasta (o eguaglia su ridotti intervalli spettrali) lo spettro calcolato, garantendo per il valore di PGA un sufficiente margine di sicurezza.

Tabella 1: Tratto S1. Profilo di Vs di riferimento. Valori di Vs per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | Vs (m/s) |
|----------------|------|----------|
| da | a | |
| 0.0 | 2.5 | 250 |
| 2.5 | 5.0 | 320 |
| 5.0 | 7.5 | 360 |
| 7.5 | 27.5 | 380 |
| 27.5 | 30.0 | 400 |
| 30.0 | 35.0 | 450 |

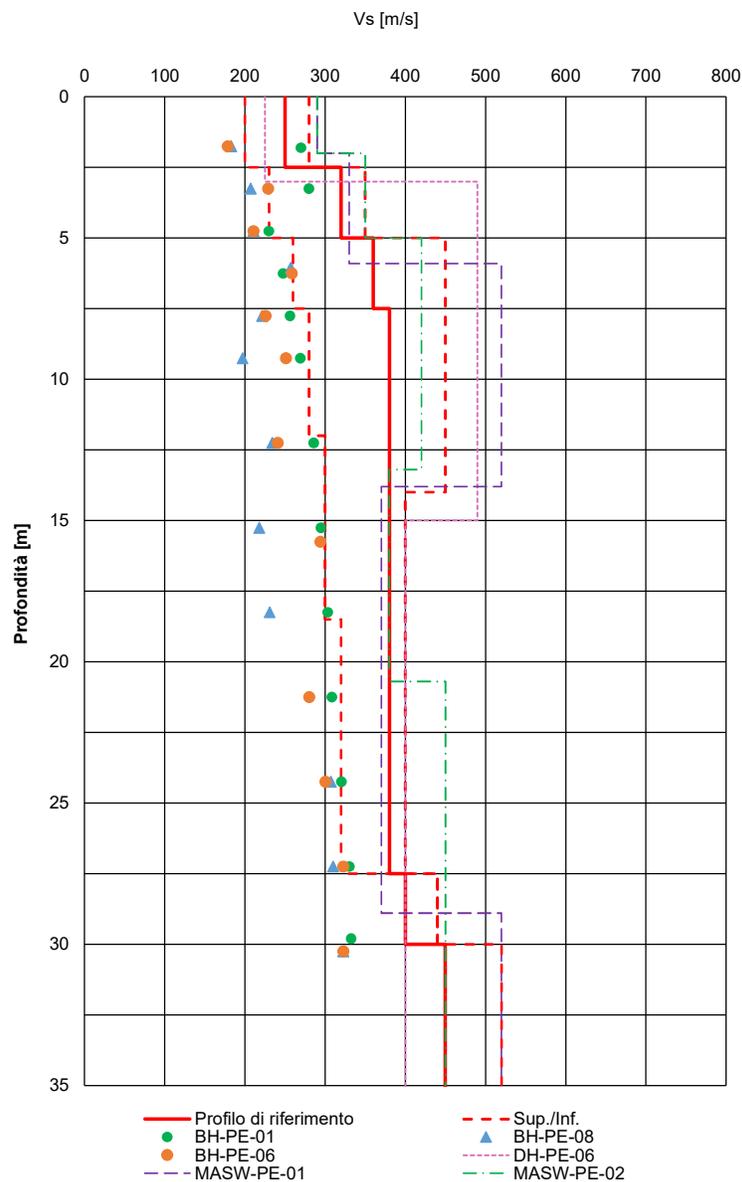


Figura 1: Tratto S1 tra pk. 0+000 e 4+000. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e Vs da correlazioni su prove SPT/CPT.

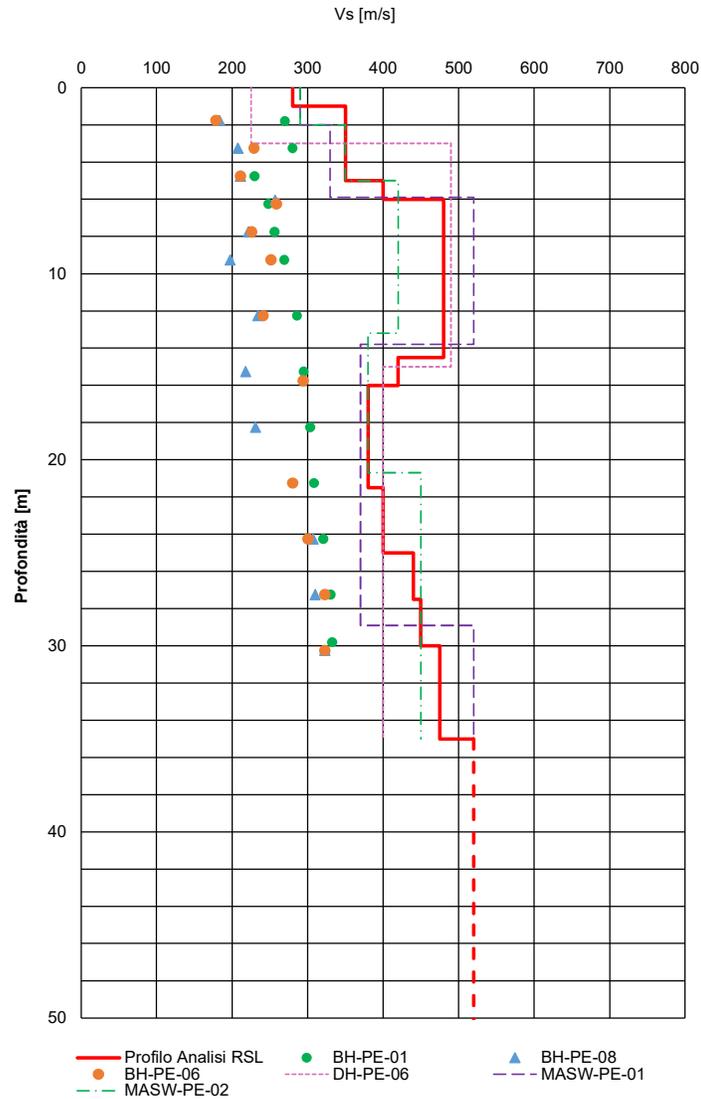


Figura 2: Tratto S1 tra pk. 0+000 e 4+000. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua) alla base dell'analisi di RSL, a confronto con i risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e Vs da correlazioni su prove SPT/CPT.

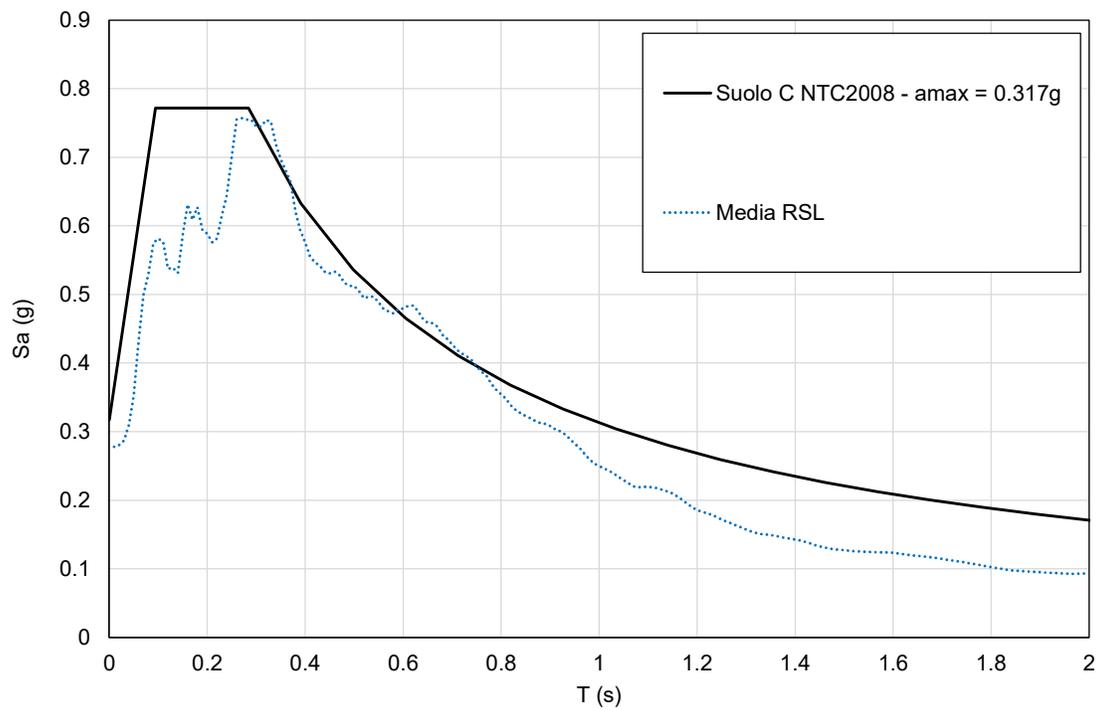


Figura 3: Tratto S1 da pk. 0+000 a 4+000. RSL1. Spettro medio risultante dalle analisi RSL a confronto con lo spettro NTC2008 per Categoria di Suolo C ($a_{max} = 0.317g$).

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|-------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 9 di 51 |

3.1.2 Tratto S2 da pk 4+000 a 5+878.5

In Figura 4 viene mostrato l'insieme dei risultati delle prove geofisiche condotte nel tratto S2 a confronto con i risultati di correlazioni sui valori N_{SPT} . I profili denotano un quadro complessivo di miglioramento delle proprietà dei terreni con la profondità, ad esclusione delle prove MASW-PE-03 e crosshole CH 01 (PD).

In particolare, la prova MASW-PE-03 (confermata parzialmente dalla CH 01) si discosta dall'insieme delle altre prove, tra le quali indagini crosshole di PE e PD (queste ultime in linea con i valori di correlazione), raccordandosi ai valori delle prove MASW condotte nel tratto S1 e oggetto di approfondimento tramite analisi RSL. Prove di tipo crosshole condotte in fase di PE mostrano valori di velocità più bassi (pari addirittura alla metà), senza sostanziali inversioni, denotando una certa variabilità del quadro di rigidità.

Alla luce di quanto sopra, si è proceduto ad eseguire N. 2 analisi di RSL (sempre in accordo a quanto riportato in Appendice A) costruendo i profili di V_s di input a partire dalle prove MASW-PE-03 (cfr. Figura 5) e crosshole CH 01 (Figura 6).

I risultati ottenuti possono essere commentati come segue.

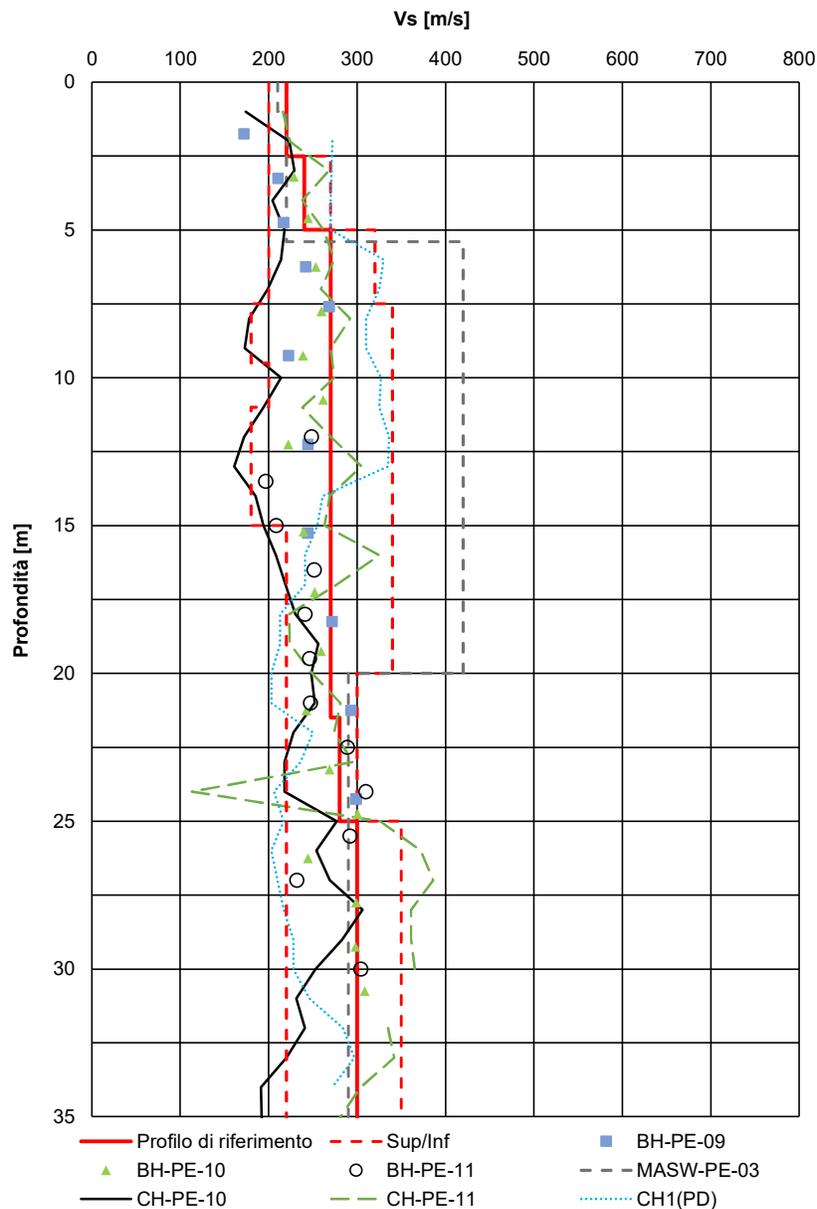
Per quanto riguarda l'analisi RSL2 eseguita a partire dal profilo di V_s derivato da MASW-PE-03, lo spettro di risposta elastico risultato dell'analisi è mostrato in Figura 7 è molto simile a quanto ottenuto per il tratto S1 (a conferma della similitudine della prova) con l'eccezione di una leggera prevalenza rispetto allo spettro di norma nel campo di periodi tra 0.8 e 1.2 s, non afferenti la progettazione delle opere d'arte (concentrate nel campo spettrale tra 0.2 e 0.4 s per la verifica delle pile dei viadotti, ad esempio) o la verifica dei rilevati (basata sul valore di PGA).

L'analisi RSL3 basata sul profilo di V_s derivato dalla prova di PD CH 01 restituisce come risultato (cfr. Figura 8) uno spettro sicuramente compreso entro il dato normativo, ad esclusione dell'intervallo 1-1.4 s, come detto sopra di non interesse per le verifiche strutturali. Il valore di PGA, governato ragionevolmente sia dall'inversione del valore di V_s del profilo, risulta particolarmente ridotto.

Tenendo conto della variabilità dei profili da indagine e delle verifiche RSL effettuate, anche per il tratto S2 lo spettro di NTC2008 per suolo di tipo C è confermato come dato di progettazione.

Tabella 2: Tratto S2 da pk. 4+000 a 5+878.5. Profilo di V_s di riferimento. Valori di V_s per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | V_s (m/s) |
|----------------|------|----------------------|
| Da | a | $V_{s,30} = 268$ m/s |
| 0 | 2.5 | 220 |
| 2.5 | 5.0 | 240 |
| 5.0 | 21.5 | 270 |
| 21.5 | 25.0 | 280 |
| 25.0 | 35.0 | 300 |

Figura 4: Tratto S2 da pk. 4+000 a 5+878.5. Profilo di V_s di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e V_s da correlazioni su prove SPT/CPT.

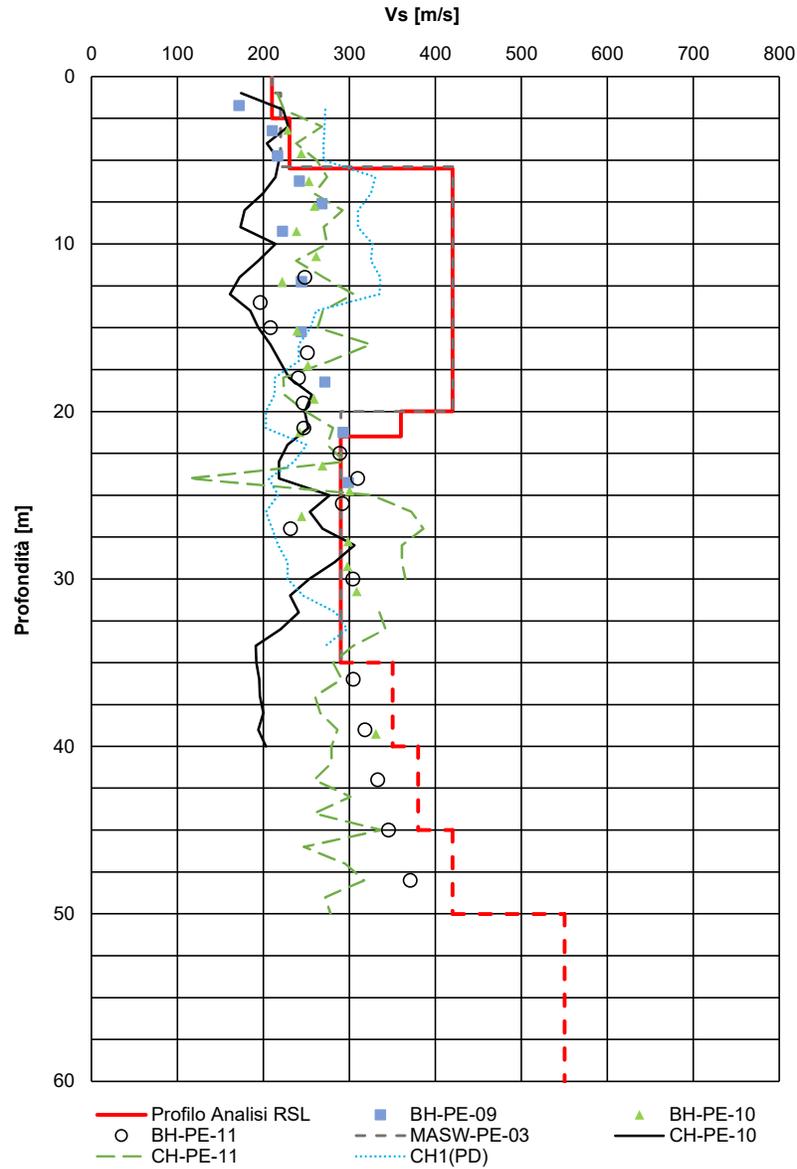


Figura 5: Tratto S2 da pk 4+000 a 5+878.5. RSL2. Profilo di V_s di riferimento (linea rossa continua) per analisi di RSL definito sulla base della prova MASW-PE-03. Con linea tratteggiata, estensione del profilo fino al bedrock sismico (profondità: 100 m).

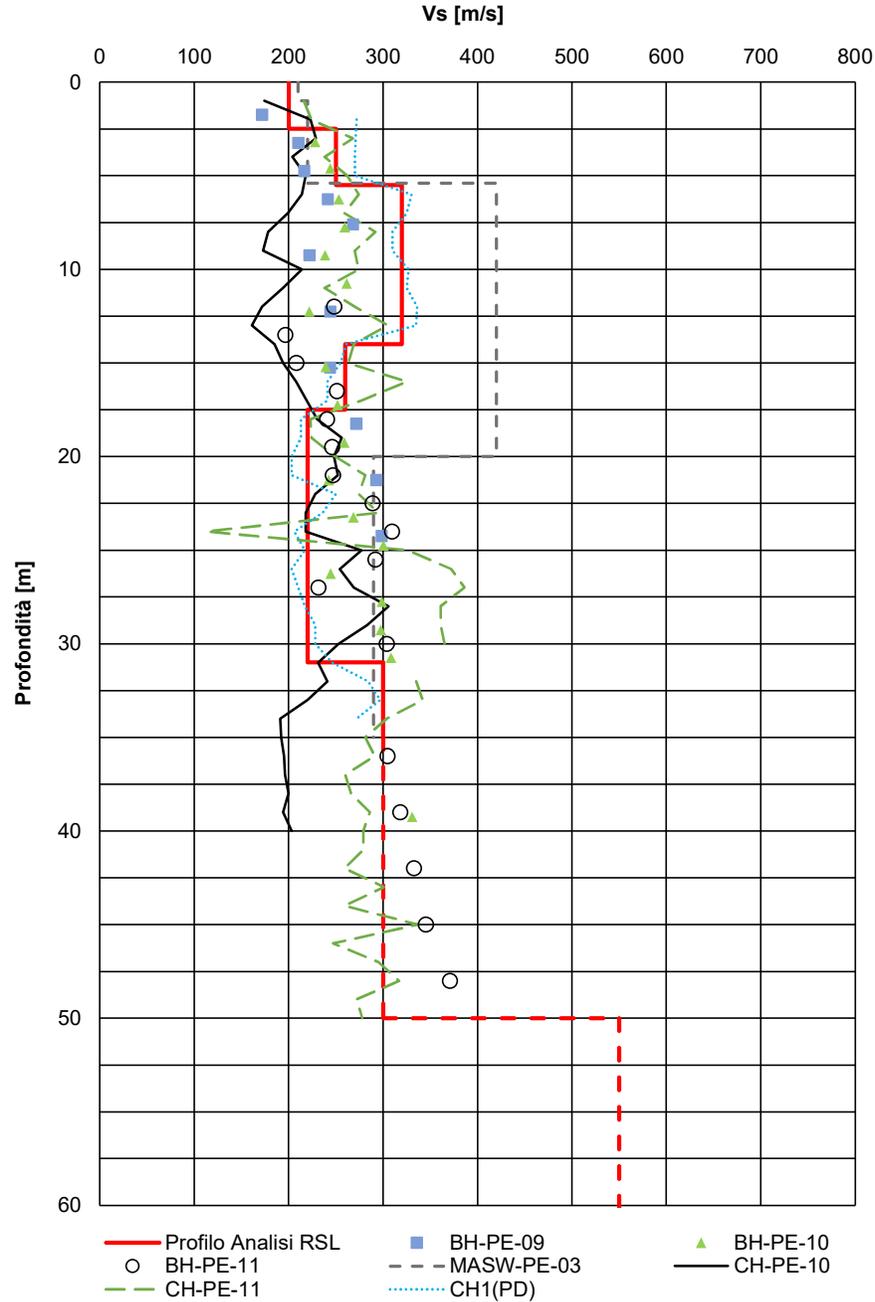


Figura 6: Tratto S2 da pk 4+000 a 5+878.5. RSL3. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua) per analisi di RSL definito sulla base della prova CH1 (PD). Con linea tratteggiata, estensione del profilo fino al bedrock sismico (profondità: 100 m).

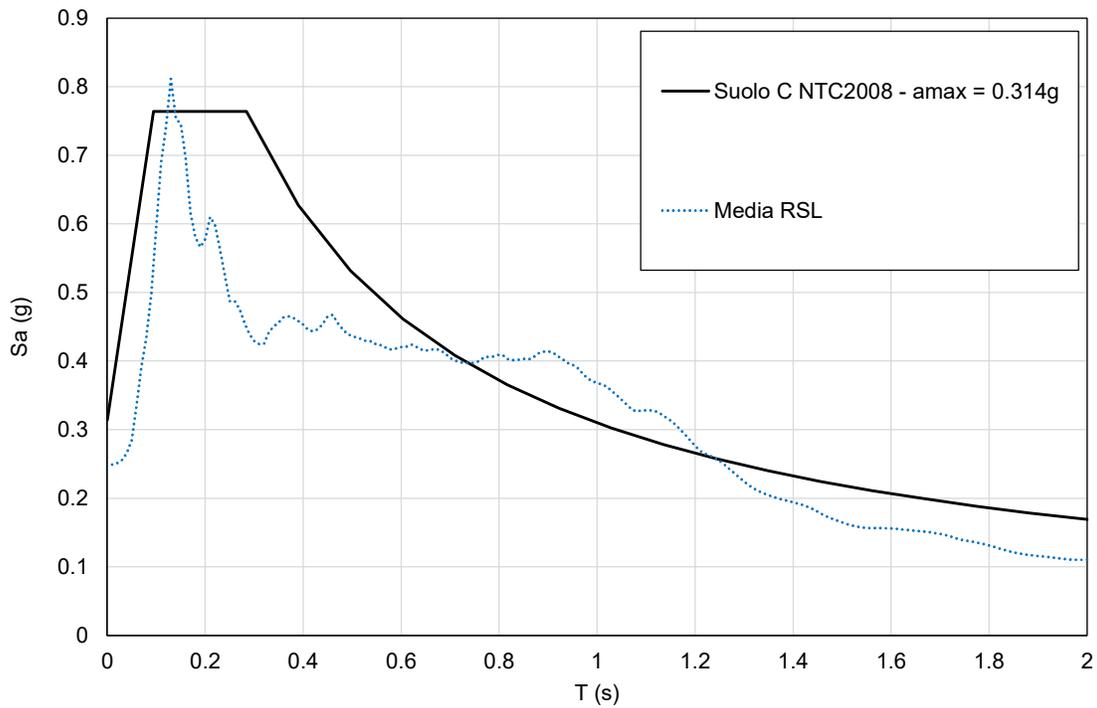


Figura 7: Tratto S2 da pk 4+000 a 5+878.5. Spettro medio SLV risultante dall'analisi RSL2 basata sulla prova MASW-PE-03 a confronto con lo spettro NTC2008 per Categoria di Suolo C ($a_{max} = 0.314g$).

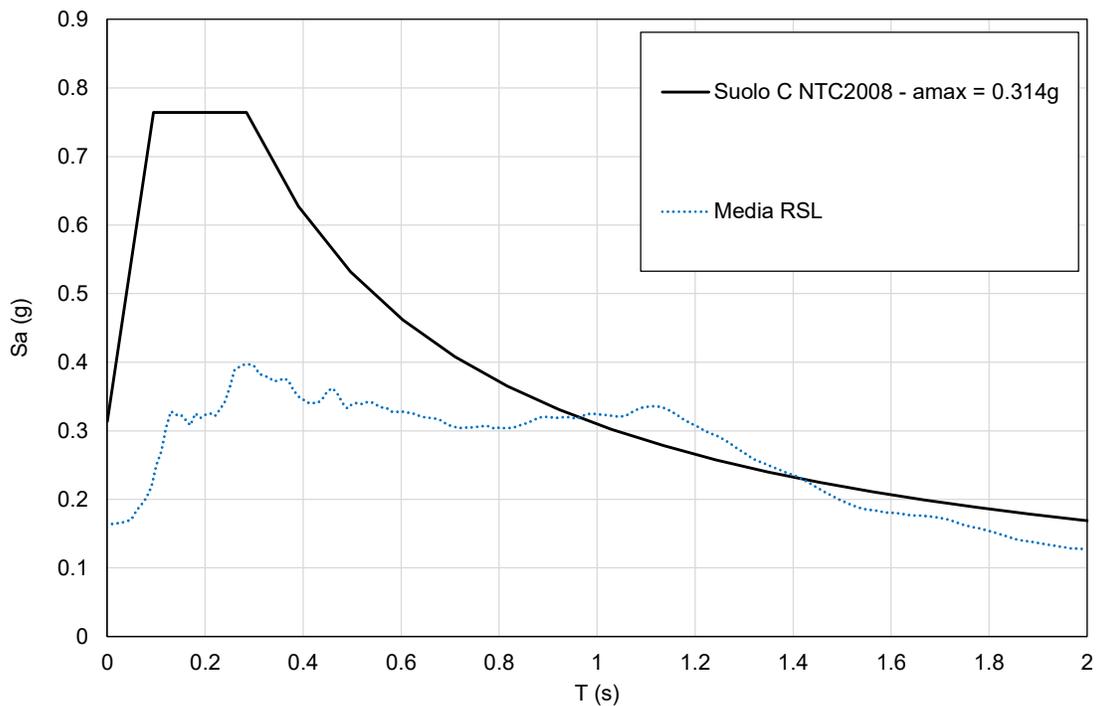


Figura 8: Tratto S2 da pk 4+000 a 5+878.5. Spettro medio SLV risultante dall'analisi RSL3 basata sulla prova CH1 (PD) a confronto con lo spettro NTC2008 per Categoria di Suolo C ($a_{max} = 0.314g$).

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 14 di 51 |

3.1.3 Tratto S3 da pk 5+878.5 a 7+555

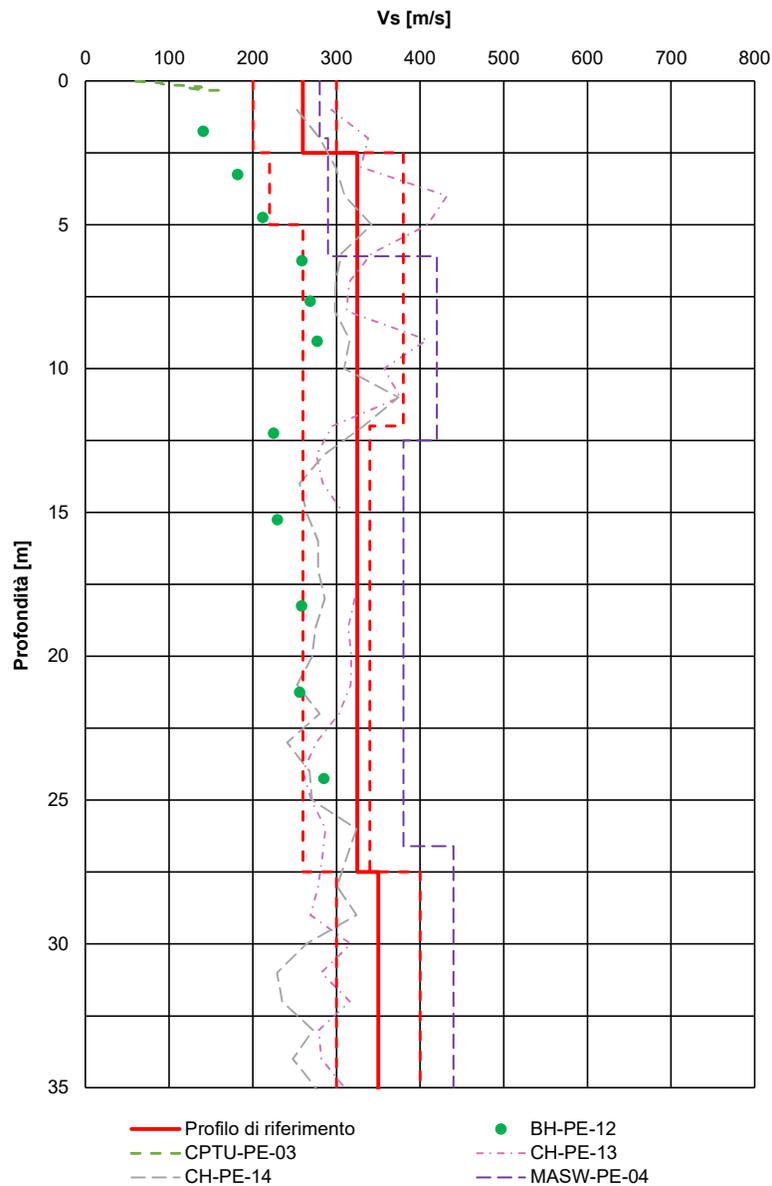
Le prove geofisiche condotte lungo il tratto S3 (cfr. Figura 9), mostrano uno strato superficiale che, seppur leggermente più “veloce” (non nella totalità delle prove), non giustificherebbe una vera e propria definizione di inversione, tenuto conto che la media non scende mai al di sotto di 10-15 m di profondità a valori inferiori a 300 m/s.

Tuttavia, la presenza comunque di inversioni giustifica l'esecuzione di analisi di RSL. In particolare, è stata condotta una analisi (RSL4) prendendo a riferimento la prova CH-PE-13 (vedi profilo di Vs in Figura 10), assegnando agli strati con VS maggiore le caratteristiche della formazione (6).

Il risultato ottenuto in termini di spettro elastico di accelerazione medio sul set di accelerogrammi (Figura 11) mostra come lo spettro NTC2008 per suolo di Tipo C prevalga su gran parte dell'intervallo analizzato, ad esclusione del range tra 0.8 e 1.2 s dove è il risultato RSL4 a prevalere leggermente. Per quanto detto ai paragrafi precedenti, anche per il tratto S3 lo spettro di NTC2008 per suolo di tipo C è confermato come dato di progettazione.

Tabella 3: Tratto S3 da pk 5+878.5 a 7+555. Profilo di V_s di riferimento. Valori di V_s per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | V_s (m/s) |
|----------------|------|----------------------|
| Da | a | $V_{s,30} = 320$ m/s |
| 0 | 2.5 | 260 |
| 2.5 | 27.5 | 325 |
| 27.5 | 35 | 350 |

Figura 9: Tratto S3 da pk 5+878.5 a 7+555. Profilo di V_s di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e V_s da correlazioni su prove SPT/CPT.

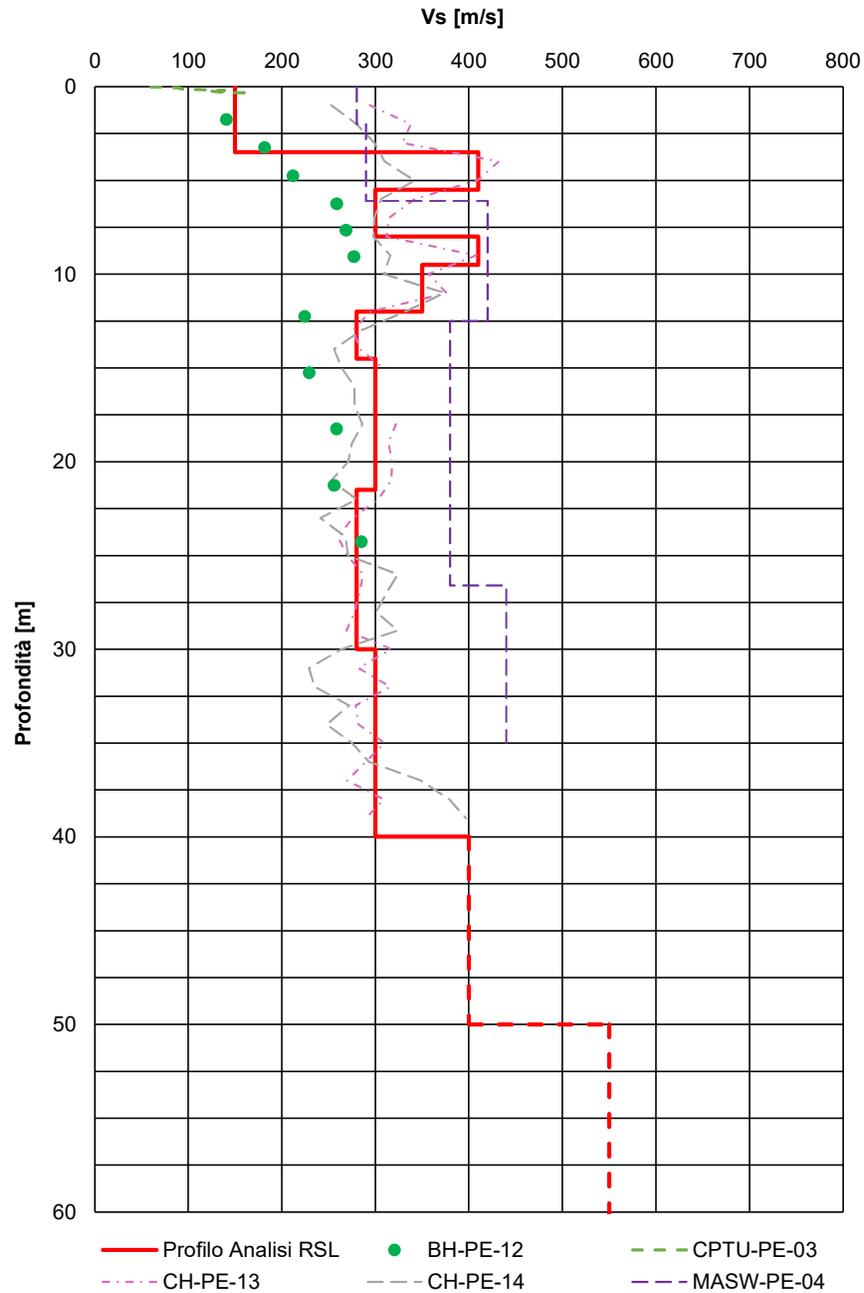


Figura 10: Tratto S3 da pk 5+878.5 a 7+555. RSL4. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua) per analisi di RSL definito sulla base della prova CH-PE-13. Con linea tratteggiata, estensione del profilo fino al bedrock sismico (profondità: 100 m).

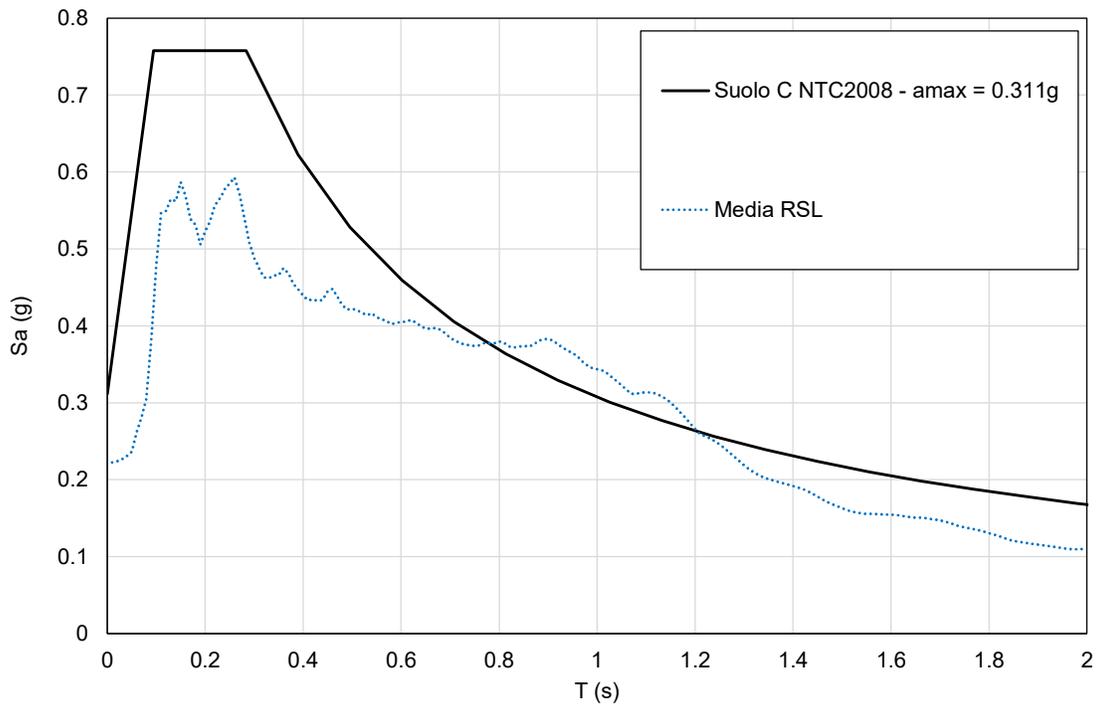


Figura 11: Tratto S3 da pk 5+878.5 a 7+555. Spettro SLV medio risultante dall'analisi RSL4 basata sulla prova CH-PE-13 a confronto con lo spettro NTC2008 per Categoria di Suolo C ($a_{max} = 0.311g$).

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 18 di 51 |

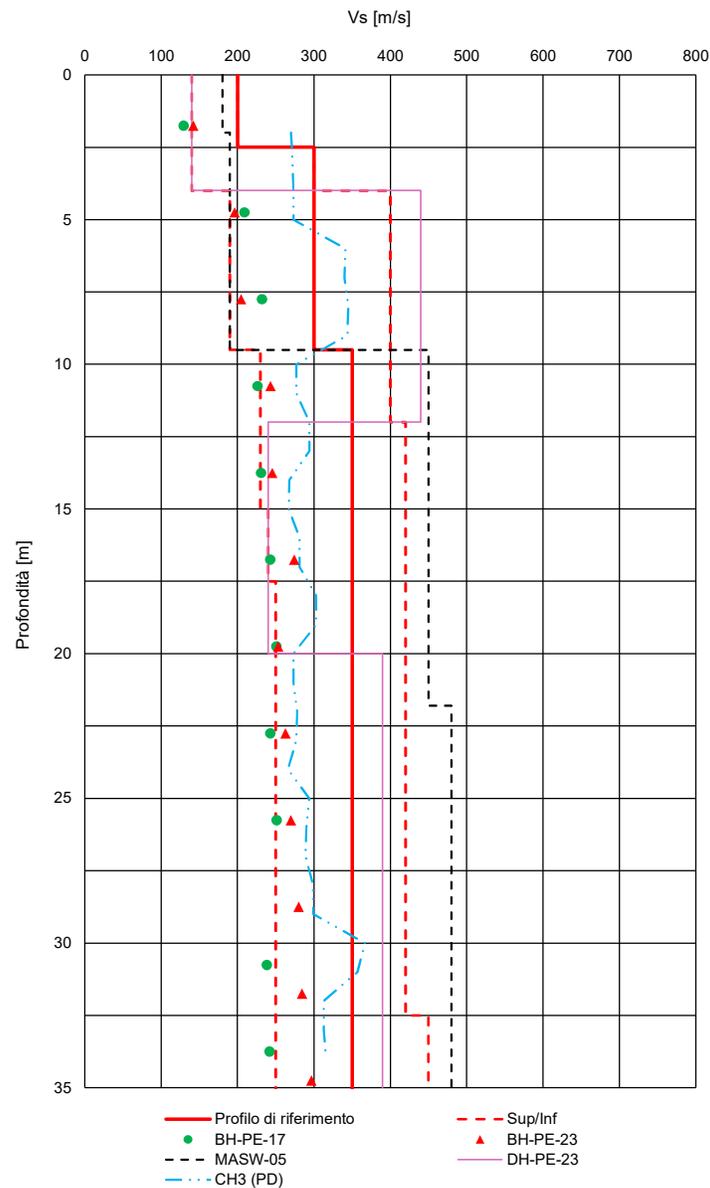
3.1.4 Tratto S4 da pk 7+555 a 13+240

Lungo il tratto S4 si osserva nella raccolta dei risultati delle prove geofisiche e dei dati di correlazione su SPT di Figura 12 l'anomalia della prova DH-PE-23 con una decisa inversione del valore di velocità a ca. 12.5 m di profondità, in un quadro abbastanza uniforme di proprietà crescenti (o debolmente crescenti come nel caso della prova CH3) con la profondità.

Pertanto, in linea con quanto mostrato nei paragrafi precedenti, è stata eseguita una analisi specifica di risposta sismica (RSL4) partendo dal dato della prova DH-PE-23 (cfr. Figura 13). Il risultato ottenuto in termini di spettro elastico di accelerazione in superficie (Figura 14) risulta ancora una volta inferiore nel campo dei periodi di interesse (da PGA a ca. 0.4 s) allo spettro di norma. Pertanto, anche per il tratto S4 lo spettro da NTC2008 per suolo di tipo C è confermato come dato di progettazione.

Tabella 4: Tratto S4 da pk 7+555 a 13+240. Profilo di V_s di riferimento. Valori di V_s per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | V_s (m/s) |
|----------------|-----|----------------------|
| Da | a | $V_{s,30} = 318$ m/s |
| 0 | 2.5 | 200 |
| 2.5 | 9.5 | 300 |
| 9.5 | 35 | 350 |

Figura 12: Tratto S4 da pk 7+555 a 13+240. Profilo di V_s di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e V_s da correlazioni su prove SPT/CPT.

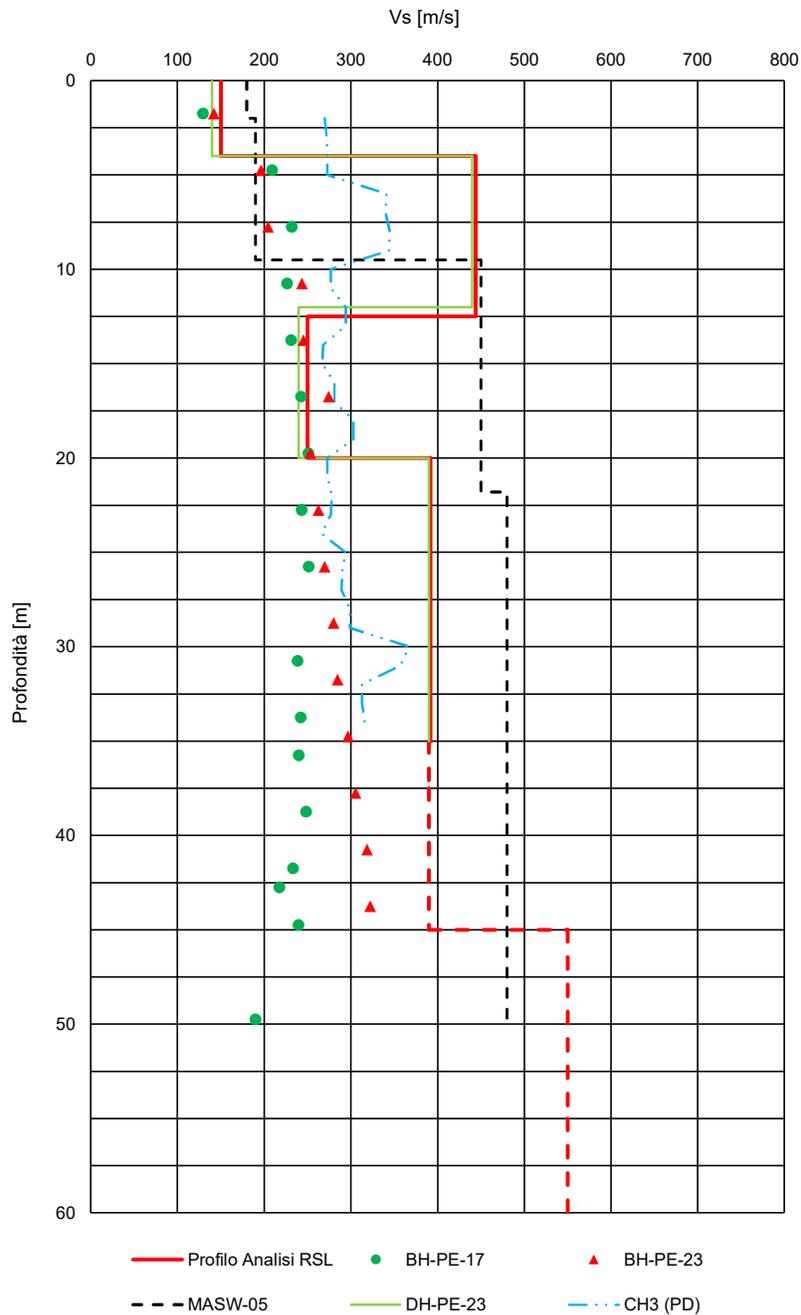


Figura 13: Tratto S4 da pk 7+555 a 13+240. RSL5. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua) per analisi di RSL definito sulla base della prova DH-PE-23. Con linea tratteggiata, estensione del profilo fino al bedrock sismico (profondità: 100 m).

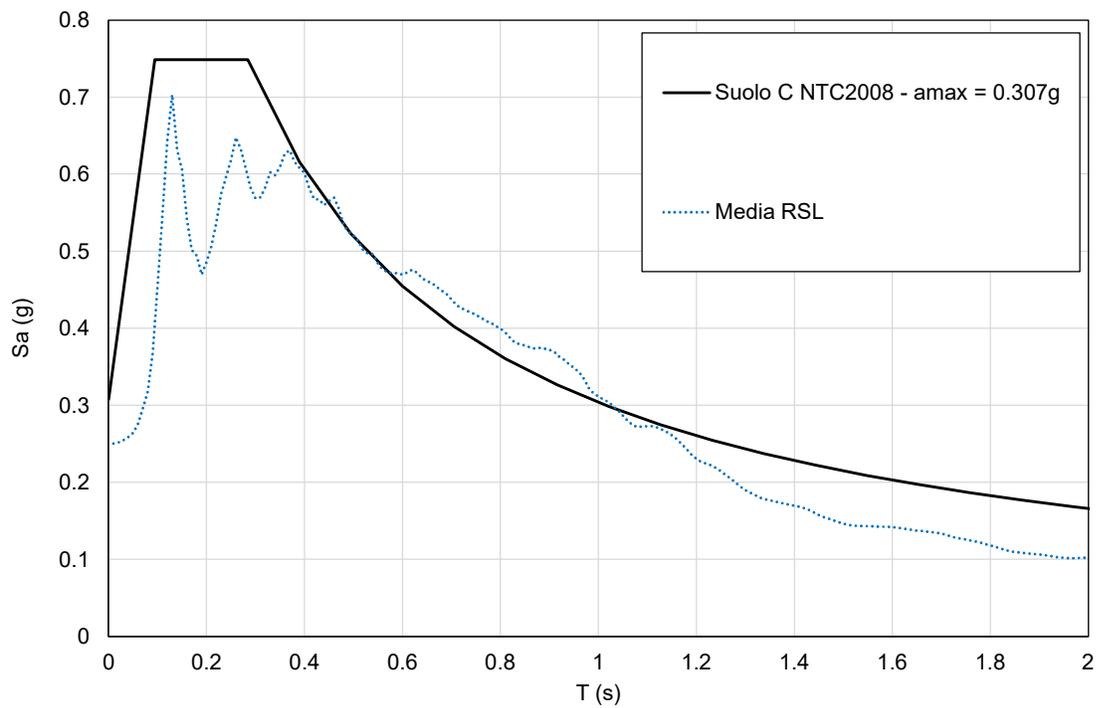


Figura 14: Tratto S4 da pk 7+555 a 13+240. Spettro medio SLV risultante dall'analisi RSL5 basata sulla prova DH-PE-23 a confronto con lo spettro NTC2008 per Categoria di Suolo C ($a_{max} = 0.307g$).

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 22 di 51 |

3.1.5 Tratto S5 da pk 13+240 a 20+000

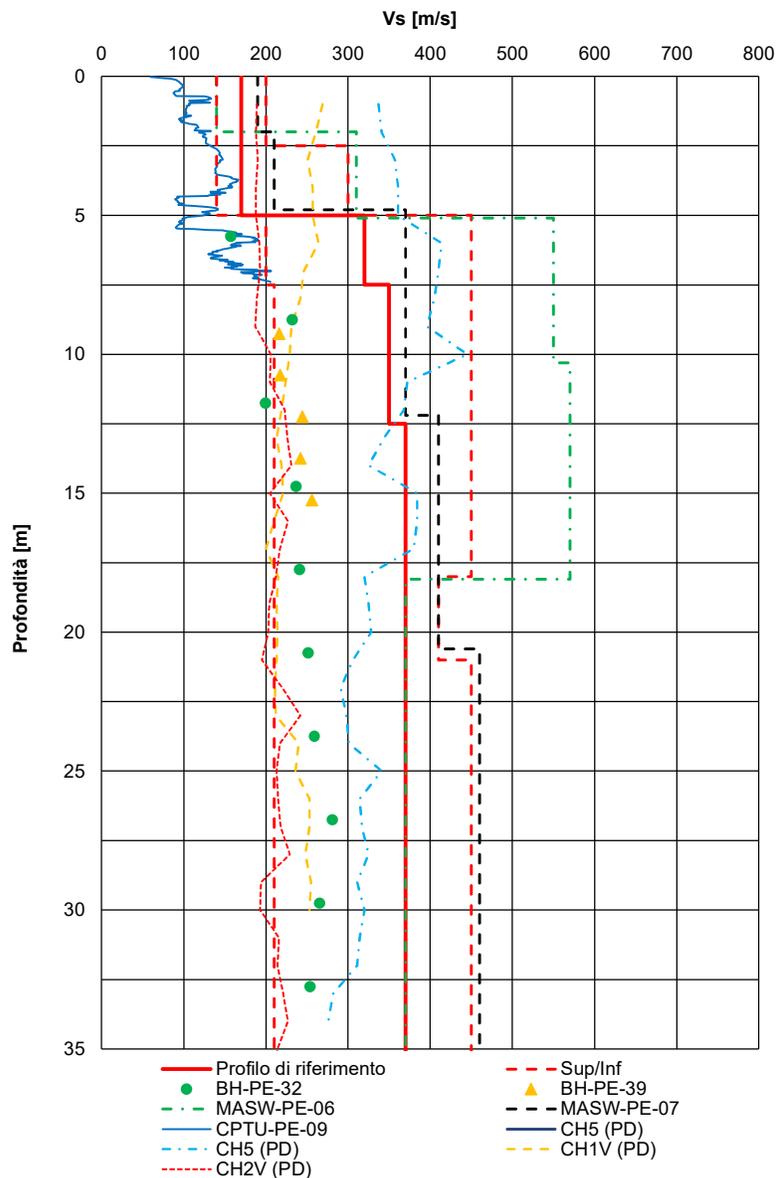
Il tratto S5 (cfr. Figura 15) è caratterizzato da uno spread dei risultati dominato dalla prova MASW PE-06 (che indica valori di V_s caratteristici uno strato semi-litoide non riscontrato in sede di sondaggio), con la prova CH5 (PD) a parziale conferma. Sembrerebbe ragionevole osservare la presenza di uno strato più rigido tra 5 e 17.5 m di profondità, pur se non con valori di V_s quali quelli evidenziati dalla prova MASW indicata e, di conseguenza, eseguire una analisi di RSL di verifica.

Nello scegliere il profilo, si è data la precedenza al caso peggiore, costruendo il profilo di calcolo RSL7 sul risultato della prova MASW-PE-06 (cfr. Figura 16). Nonostante questo, il risultato ottenuto (mostrato in Figura 17) mostra come lo spettro medio ottenuto dall'input accelerometrico si collochi sempre (fino a lambire) lo spettro di NTC2008.

Di conseguenza, anche per il tratto S5 lo spettro da NTC2008 per suolo di tipo C è confermato come dato di progettazione.

Tabella 5: Tratto S5 da pk 13+240 a 20+000. Profilo di V_s di riferimento. Valori di V_s per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | V_s (m/s) |
|----------------|------|----------------------|
| Da | a | $V_{s,30} = 304$ m/s |
| 0 | 5.0 | 170 |
| 5.0 | 7.5 | 320 |
| 7.5 | 12.5 | 350 |
| 12.5 | 35.0 | 370 |

Figura 15: Tratto S5 da pk 13+240 a 20+000. Profilo di V_s di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e V_s da correlazioni su prove SPT/CPT.

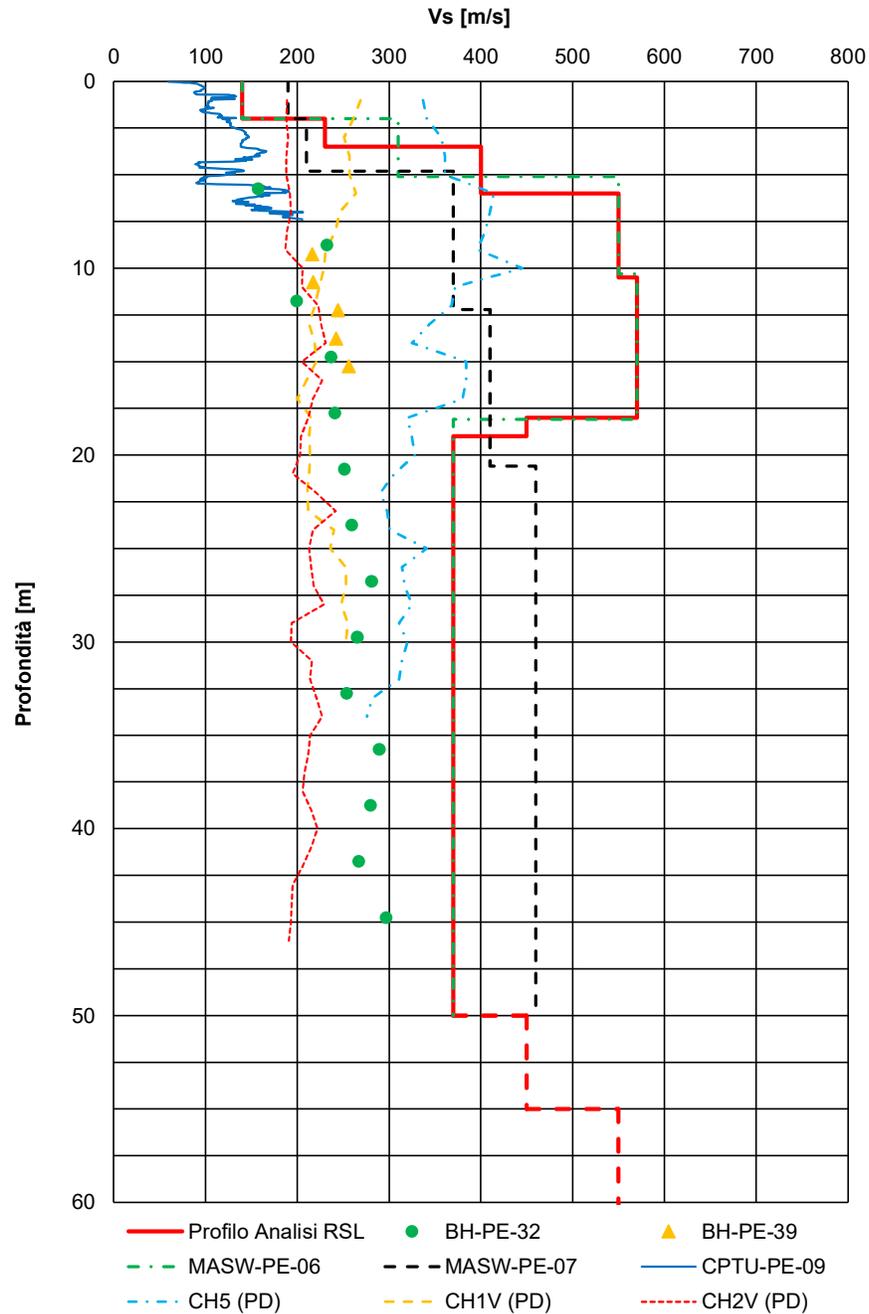


Figura 16: Tratto S5 da pk 13+240 a 20+000. RSL6. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua) per analisi di RSL definito sulla base della prova MASW-PE-06. Con linea tratteggiata, estensione del profilo fino al bedrock sismico (profondità: 100 m).

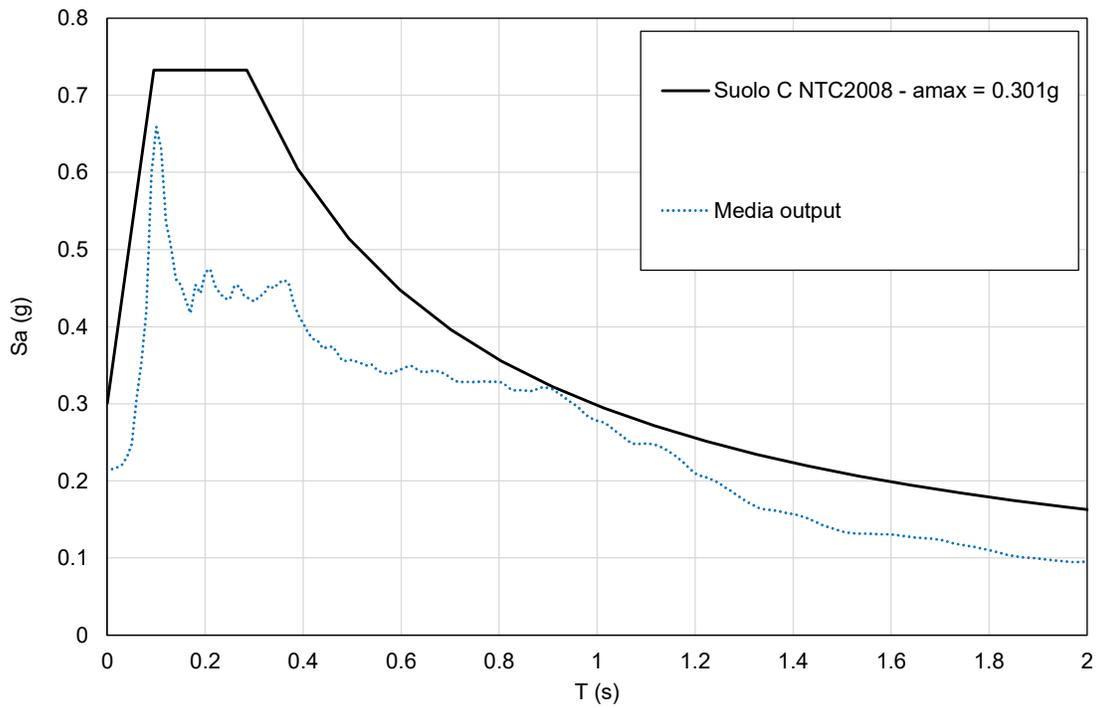


Figura 17: Tratto S5 da pk 13+240 a 20+000. Spettro medio SLV risultante dall'analisi RSL6 basata sulla prova MASW-PE-06 a confronto con lo spettro NTC2008 per Categoria di Suolo C ($a_{max} = 0.301g$).

| | | | | | |
|---|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 26 di 51 |

3.1.6 Tratto S6 da pk 20+000 a 24+000

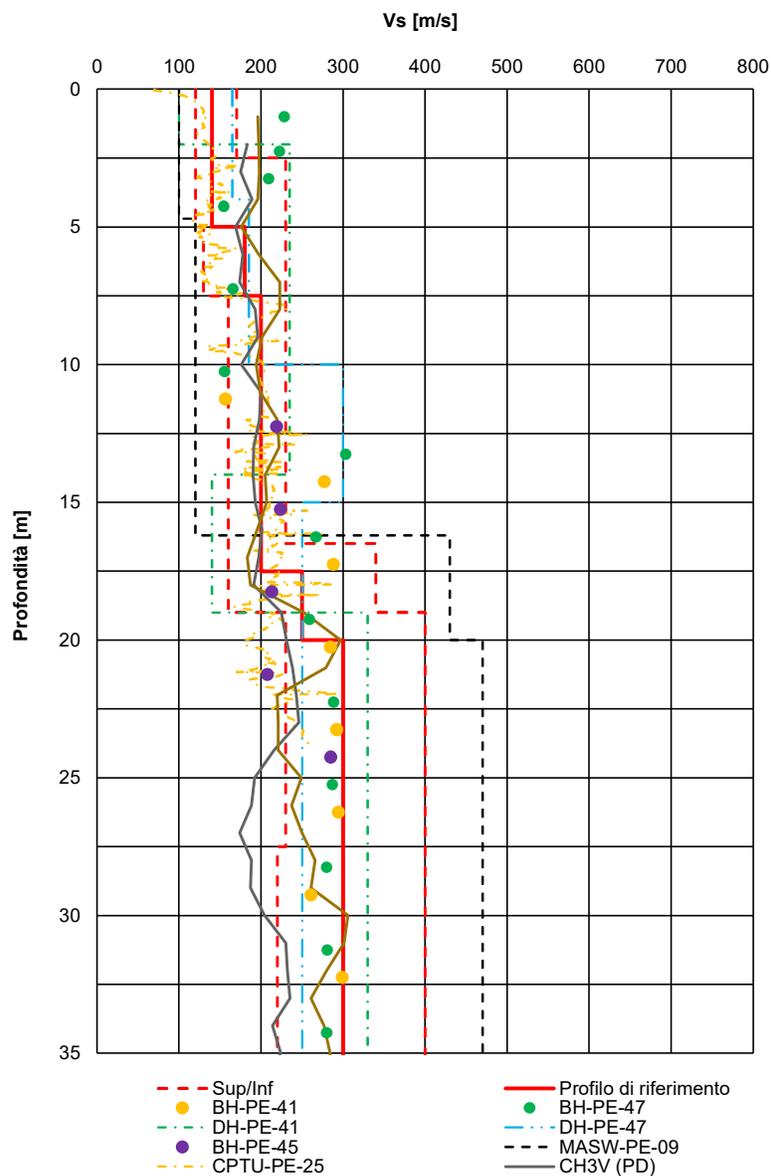
Il tratto S6 è caratterizzato da un sostanziale incremento delle caratteristiche dei terreni con la profondità (cfr. Figura 18), con valori di VS medio bassi nei primi 15m a confermare la presenza di sabbie limose e limi argillosi e velocità nell'ordine (o anche inferiori a 200 m/s). Per profondità maggiori, la presenza di sabbie fini addensate conferma l'incremento dei valori di V_s .

Nel quadro suddetto, trova eccezione la prova DH-PE-41 la quale identifica una inversione del valore di V_s tra 15 e 19 m ca. Per approfondire l'eventuale effetto in termini di RSL è stata condotta una analisi specifica (RSL7) avente quale dato di input il profilo di Figura 19. Il risultato ottenuto (Figura 20) mostra uno medio spettro risultante dalle analisi molto appiattito, con valori di PGA ridotti ed il "consueto" superamento tra 0.8 e 1.3 s.

Nonostante l'apparente cautela dello spettro normativo, si ritiene, alla luce della variabilità del dato restituito dalle indagini di confermare per il tratto S6 lo spettro da NTC2008 per suolo di tipo C quale dato di progettazione.

Tabella 6: Tratto S6 da pk 20+000 a 24+000. Profilo di V_s di riferimento. Valori di V_s per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | V_s (m/s) |
|----------------|------|----------------------|
| Da | A | $V_{s,30} = 210$ m/s |
| 0 | 5.0 | 140 |
| 5.0 | 7.5 | 180 |
| 7.5 | 17.5 | 200 |
| 17.5 | 20.0 | 250 |
| 20.0 | 35.0 | 300 |

Figura 18: Tratto S6 da pk 20+000 a 24+000. Profilo di V_s di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e V_s da correlazioni su prove SPT/CPT.

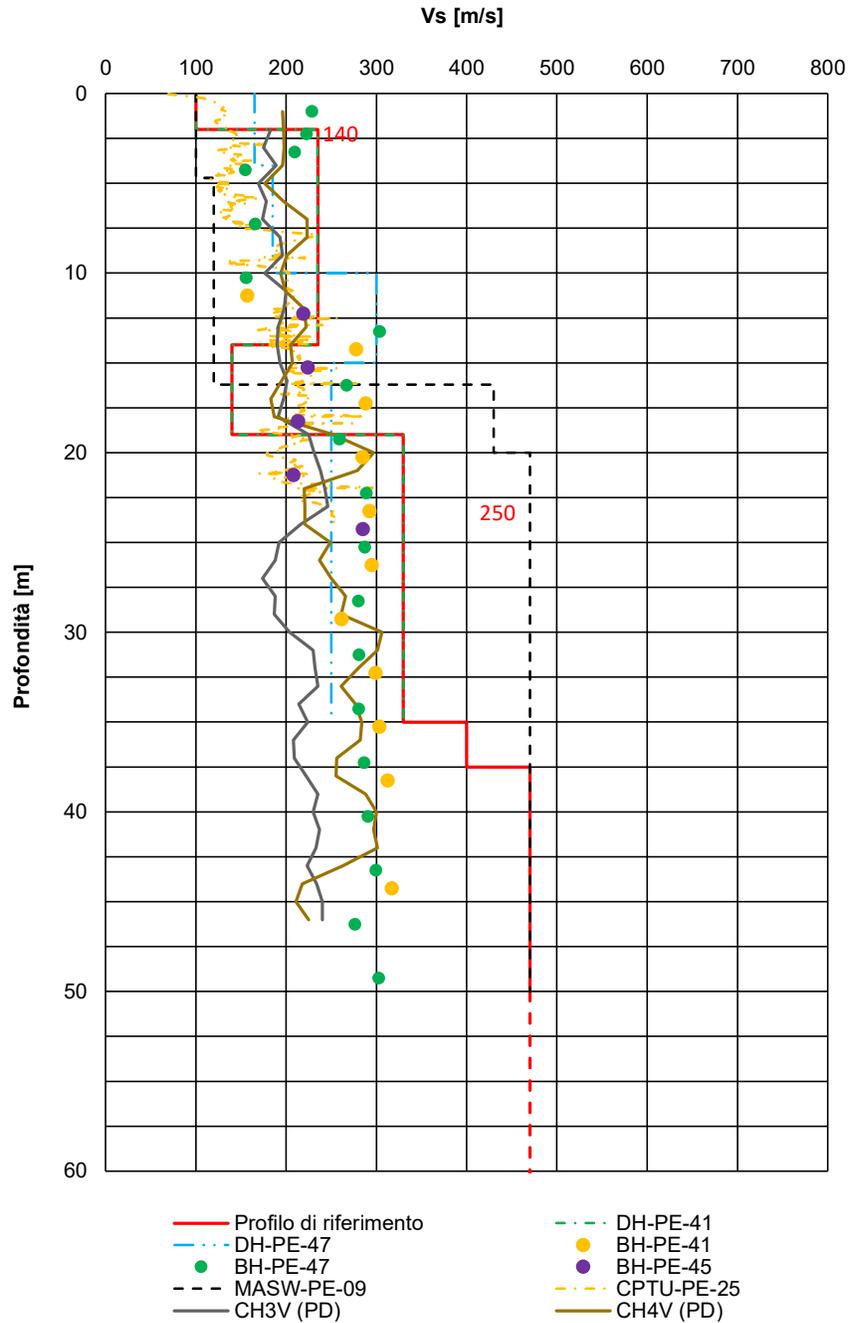


Figura 19: Tratto S6 da pk 20+000 a 24+000. RSL7. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua) per analisi di RSL definito sulla base della prova DH-PE-41. Con linea tratteggiata, estensione del profilo fino al bedrock sismico (profondità: 100 m).

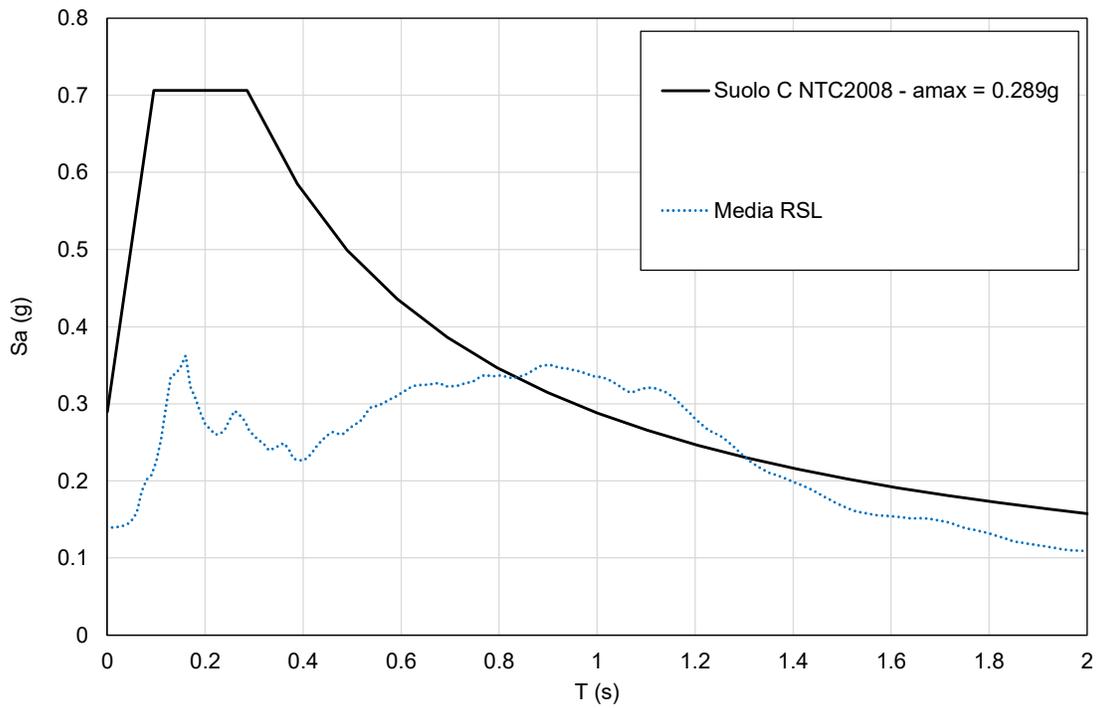


Figura 20: Tratto S6 da pk 20+000 a 24+000. Spettro medio SLV risultante dall'analisi RSL7 basata sulla prova DH-PE-41 a confronto con lo spettro NTC2008 per Categoria di Suolo C ($a_{max} = 0.289g$).

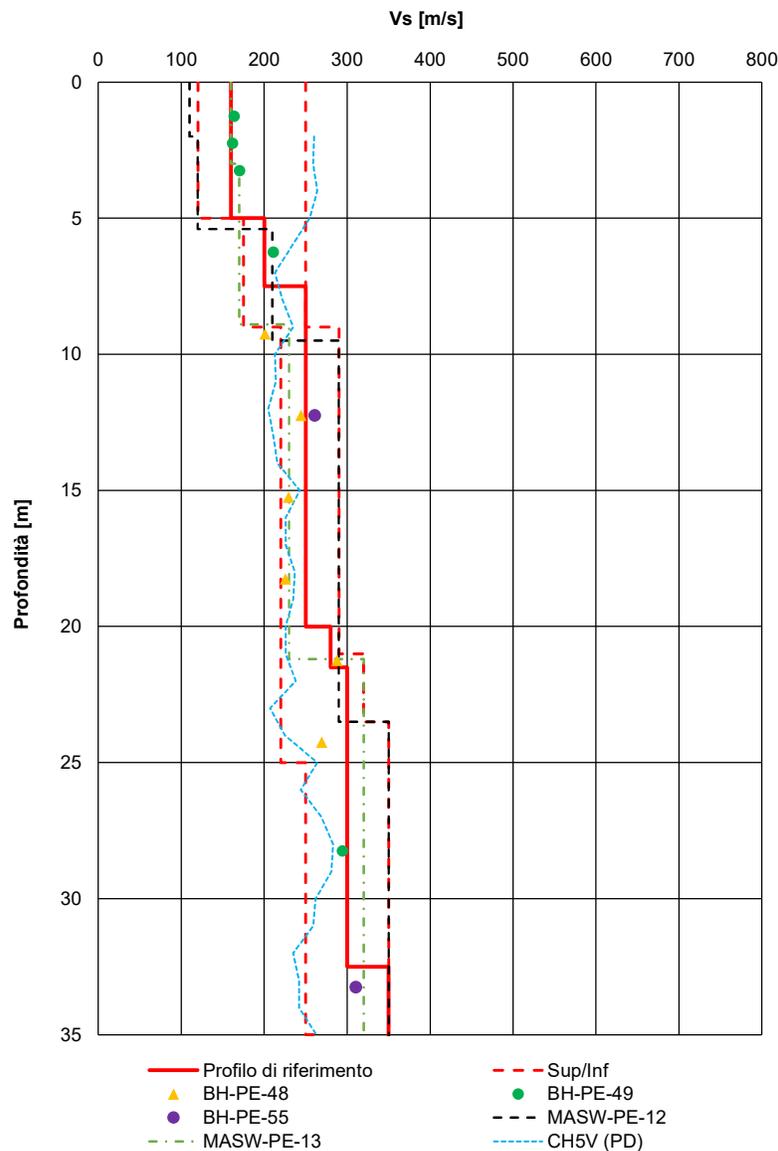
| | | | | | |
|---|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 30 di 51 |

3.2 Tratto S7 da pk 24+000 a 28+000

Nell'andamento con la profondità dei valori di V_s misurati da prove geofisiche o desunti da correlazioni sui valori di SPT (cfr. Figura 21), si osserva un incremento costante delle proprietà di rigidità dei materiali con la profondità. L'unica eccezione è rappresentata dal dato della prova CH5V (PD) che si è ritenuto di indagare eseguendo una analisi di risposta sismica locale specifica (RSL8), usando quale input il profilo regolarizzato a partire dal risultato crosshole (cfr. Figura 22). Lo spettro medio in accelerazione di Figura 23 mostra come, ancora una volta, il dato normativo sia cautelativo all'interno del range di periodi di interesse e che, pertanto, lo spettro NTC2008 per suolo di tipo C possa essere confermato come input per la progettazione.

Tabella 7: Tratto S7 da pk 24+000 a 28+000. Profilo di V_s di riferimento. Valori di V_s per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | V_s (m/s) |
|----------------|------|----------------------|
| Da | A | $V_{s,30} = 237$ m/s |
| 0 | 7.5 | 160 |
| 7.5 | 20.0 | 250 |
| 20.0 | 21.5 | 280 |
| 21.5 | 32.5 | 300 |
| 32.5 | 35.0 | 350 |

Figura 21: Tratto S7 da pk 24+000 a 28+000. Profilo di V_s di riferimento (linea rossa continua) alla base dell'analisi di RSL, a confronto con i risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e V_s da correlazioni su prove SPT/CPT.

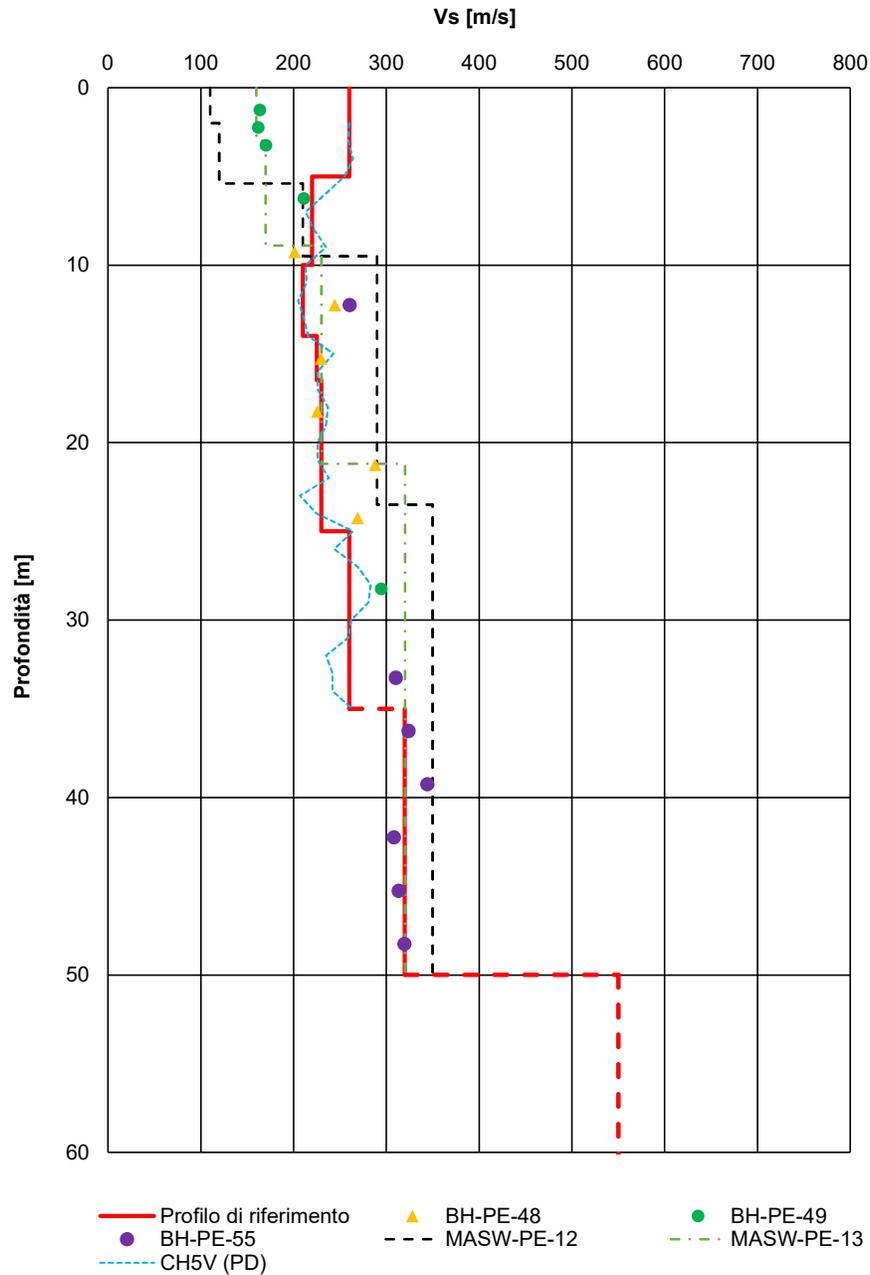


Figura 22: Tratto S7 da pk 24+000 a 28+000. RSL8. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua) per analisi di RSL definito sulla base della prova CH5V (PD). Con linea tratteggiata, estensione del profilo fino al bedrock sismico (profondità: 100 m).

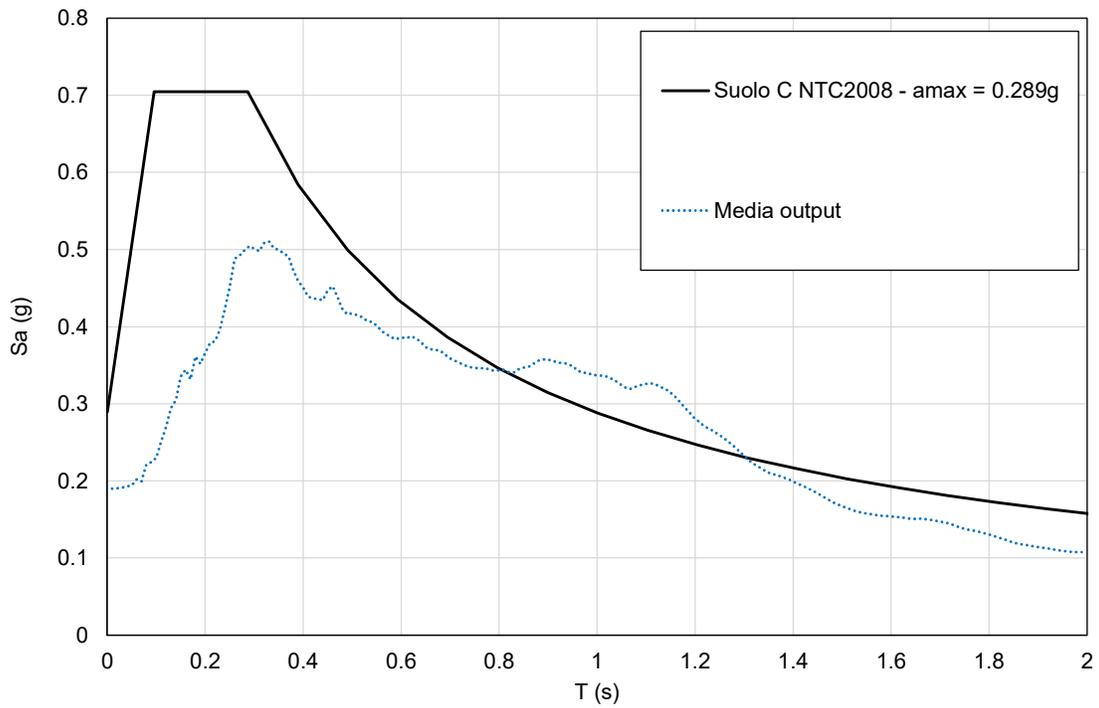


Figura 23: Tratto S7 da pk 24+000 a 28+000. Spettro medio SLV risultante dall'analisi RSL8 basata sulla prova CH5V (PD) a confronto con lo spettro NTC2008 per Categoria di Suolo C ($a_{max} = 0.289g$).

| | | | | | |
|---|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 34 di 51 |

3.3 Tratto S8 da pk 28+000 a 32+000

Per il tratto S8 (cfr. profilo di Figura 24) può essere sostanzialmente confermato quanto detto a riguardo del profilo S7. L'eccezione è qui rappresentata dalla prova MASW-PE-15 a denotare una potenziale inversione dei valori di Vs tra le profondità di 3 e 9 m.

L'analisi di RSL condotta sulla base del profilo di Figura 25 costruito sul dato MASW-PE-15 fornisce quale risultato uno spettro di accelerazione in linea con i precedenti (cfr. Figura 26) mostrando un superamento dello spettro NTC2008 in un range di periodi non di interesse per le verifiche.

Di conseguenza, è ragionevole assumere come, anche per il tratto S8, lo spettro di NTC2008 per suolo di tipo C possa essere suggerito come dato di input per le verifiche sismiche.

Tabella 8: Tratto S8 da pk 28+000 a 32+000. Profilo di Vs di riferimento. Valori di Vs per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | Vs (m/s) |
|----------------|------|-----------------------------------|
| Da | A | V_{s,30} = 245 m/s |
| 0 | 3.0 | 130 |
| 3.0 | 13.0 | 220 |
| 13.0 | 20.5 | 250 |
| 20.5 | 35.0 | 400 |

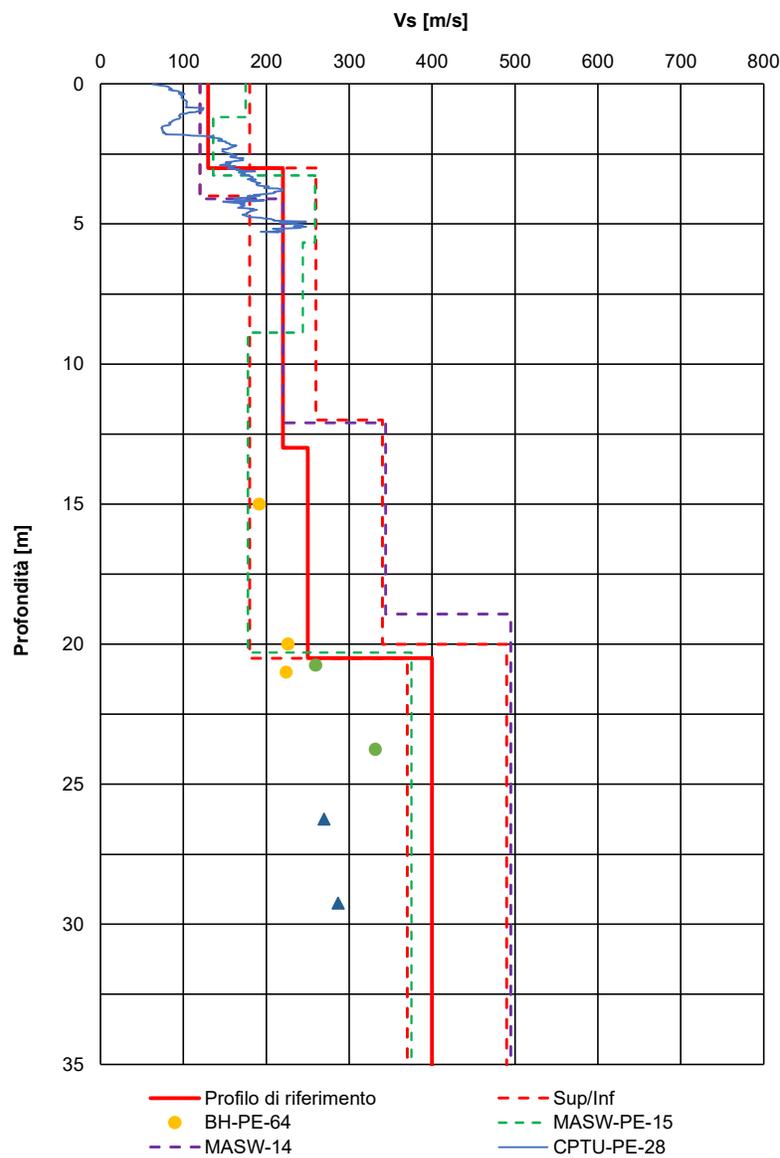


Figura 24: Tratto S8 da pk 28+000 a 32+000. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua) alla base dell'analisi di RSL, a confronto con i risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e Vs da correlazioni su prove SPT/CPT.

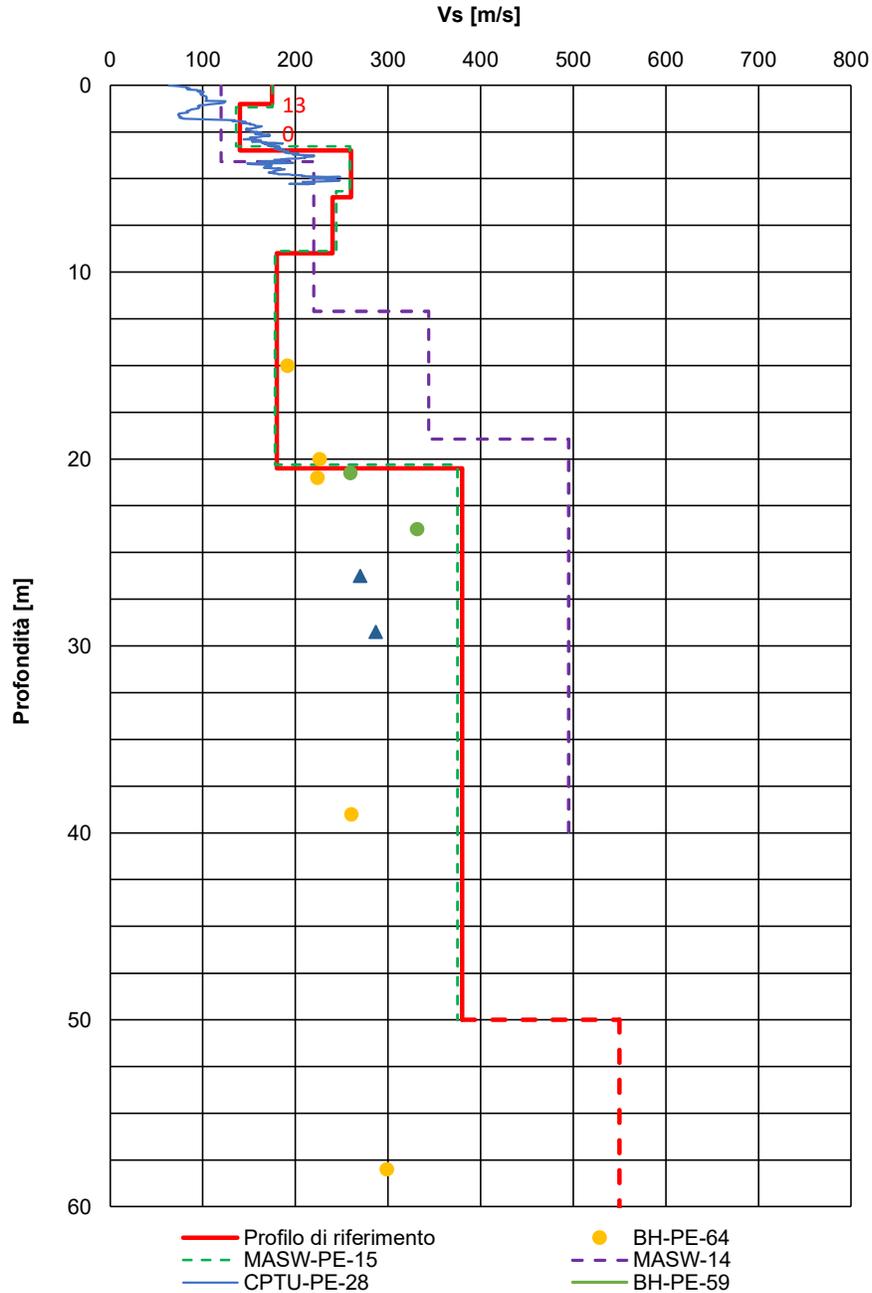


Figura 25: Tratto S8 da pk 28+000 a 32+000. RSL8. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua) per analisi di RSL definito sulla base della prova MASW-PE-15. Con linea tratteggiata, estensione del profilo fino al bedrock sismico (profondità: 100 m).

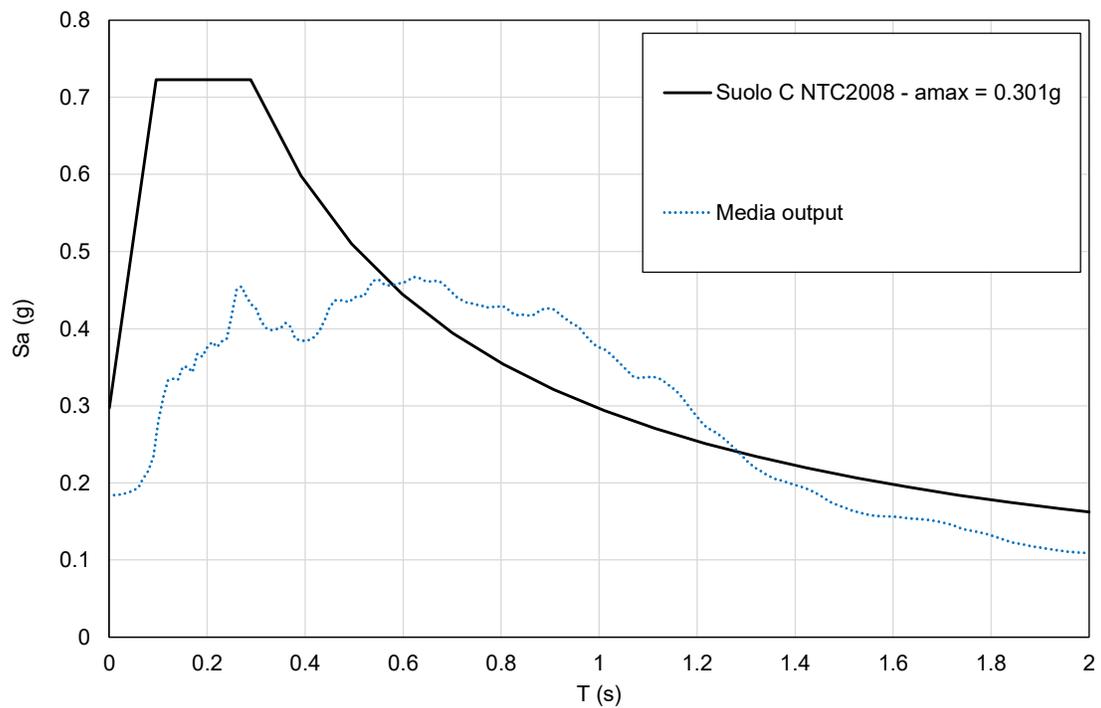


Figura 26: Tratto S8 da pk 28+000 a 32+000. Spettro medio SLV risultante dall'analisi RSL9 basata sulla prova MASW-PE-15 a confronto con lo spettro NTC2008 per Categoria di Suolo C ($a_{max} = 0.297g$).

| | | | | | |
|---|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 38 di 51 |

3.4 Tratti S9-S12 da pk 28+000 a 44+250

La seconda parte del tracciato (da **S9 a S12**) risulta sostanzialmente non affetta dal fenomeno di inversione delle velocità di propagazione delle onde di taglio osservato lungo il primo tratto. Va segnalato che le prove MASW da 14 a 26 sembrano meglio definite, con curve di dispersione di calcolo più estese e di conseguenza una maggiore profondità raggiunta ed una migliore risoluzione. Tale maggiore risoluzione del dato geofisico può mettere in evidenza locali fenomeni di aumento delle V_s di spessore limitato (cfr. MASW-PE-15, MASW-P-17, MASW-PE-26) e differenze di velocità ridotte (quasi entro il range di incertezza della misura) che non si ritiene in ogni caso possano avere influenza sullo scenario di RSL, in un quadro complessivo di aumento graduale delle proprietà dei materiali.

In sede di PE, sempre in stretta continuità con quanto fatto nel PD, sono stati successivamente elaborati i profili di V_s riferimento per tratti in grado di descrivere compiutamente il risultato dell'analisi svolta nell'ottica di una zonazione del tracciato. Tali profili sono qui aggiornati per tenere conto anche di un possibile campo di variazione (cfr. Tabelle da Tabella 9 a 12 e Figure da 27 a 30). In taluni casi il profilo di riferimento è in buon accordo con l'insieme delle prove mentre, in altri casi, la dispersione delle prove è più elevata.

Ad esempio, il tratto S9 (Figura 27, $V_{s,30} = 291$ m/s) mostra un apprezzabile spread dei valori di V_s , pur in quadro di crescita di proprietà dei materiali con la profondità, all'interno del quale si collocano eventuali diminuzioni locali dei valori V_s . Il tratto S10 (Figura 28, $V_{s,30} = 298$ m/s) è sicuramente più uniforme dal punto di vista delle proprietà di rigidità a piccole deformazioni, con prove geofisiche che restituiscono valori strettamente crescenti con la profondità, così come per S11 (Figura 29, $V_{s,30} = 315$ m/s) e S12 (Figura 30, $V_{s,30} = 235$ m/s). In particolare, il tratto finale S12 denota un valore di $V_{s,30}$ più ridotto a confermare un minore addensamento dei materiali governato dalla presenza di materiali fini superficiali (formazione (4), cfr. profilo geotecnico IN1710EI2LZGE0000022B e da lenti degli stessi più profonde, intercalate dalla formazione ghiaioso-sabbiosa meno addensata.

Si conferma sulla base di quanto sopra riportato, per il tratto di linea S9-S12 la classificazione dei suoli afferenti il tracciato in Categoria C è confermata, ossia trattasi di:

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.

Tabella 9: Tratto S9 da pk 32+000 a 36+000. Profilo di Vs di riferimento. Valori di Vs per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | Vs (m/s) |
|----------------|------|-----------------------------------|
| Da | A | |
| | | V_{s,30} = 291 m/s |
| 0 | 2.5 | 160 |
| 2.5 | 10.0 | 240 |
| 10.0 | 19.0 | 300 |
| 19.0 | 35.0 | 420 |

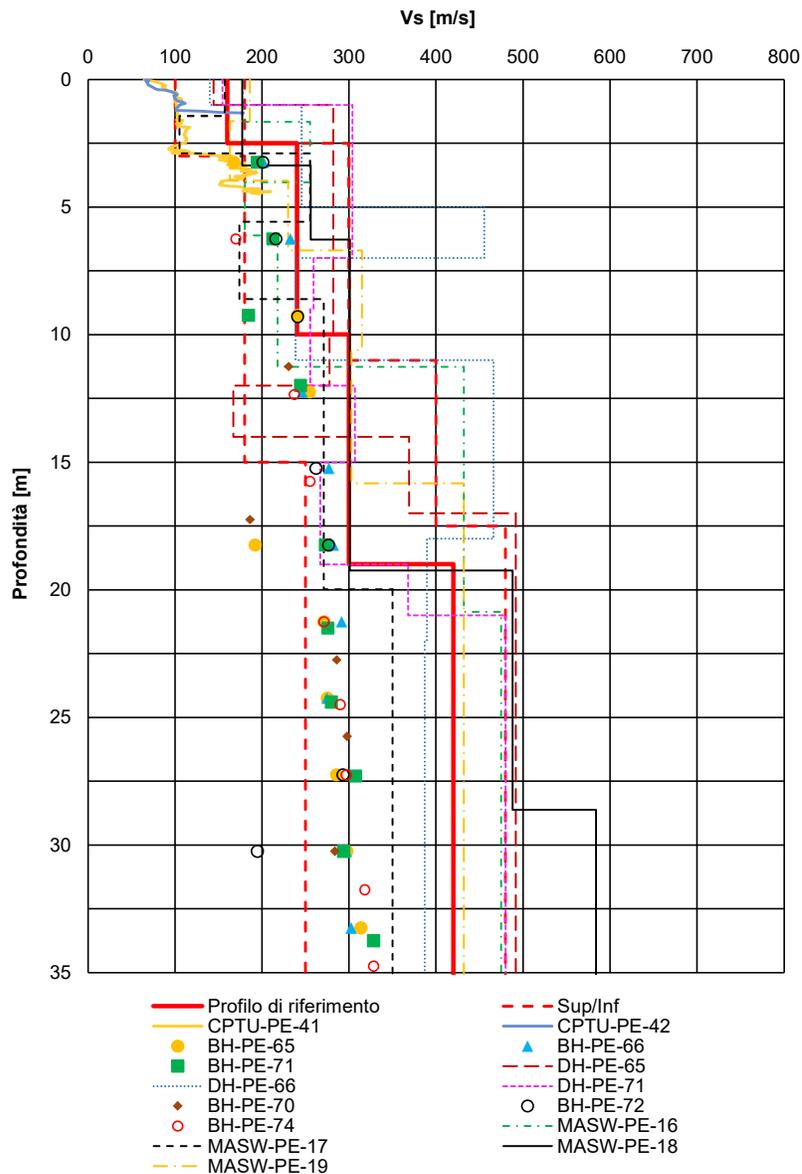


Figura 27: Tratto S9 da pk 32+000 a 36+000. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e Vs da correlazioni su prove SPT/CPT.

| | | | | | | |
|--|--|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 40 di 51 |

Tabella 10: Tratto S10 da pk 36+000 a 38+075. Profilo di Vs di riferimento. Valori di Vs per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | Vs (m/s) |
|----------------|------|------------------------|
| Da | A | Vs,30 = 298 m/s |
| 0 | 2.5 | 160 |
| 2.5 | 5.0 | 220 |
| 5.0 | 7.5 | 250 |
| 7.5 | 25.0 | 340 |
| 25.0 | 27.5 | 400 |
| 27.5 | 35.0 | 420 |

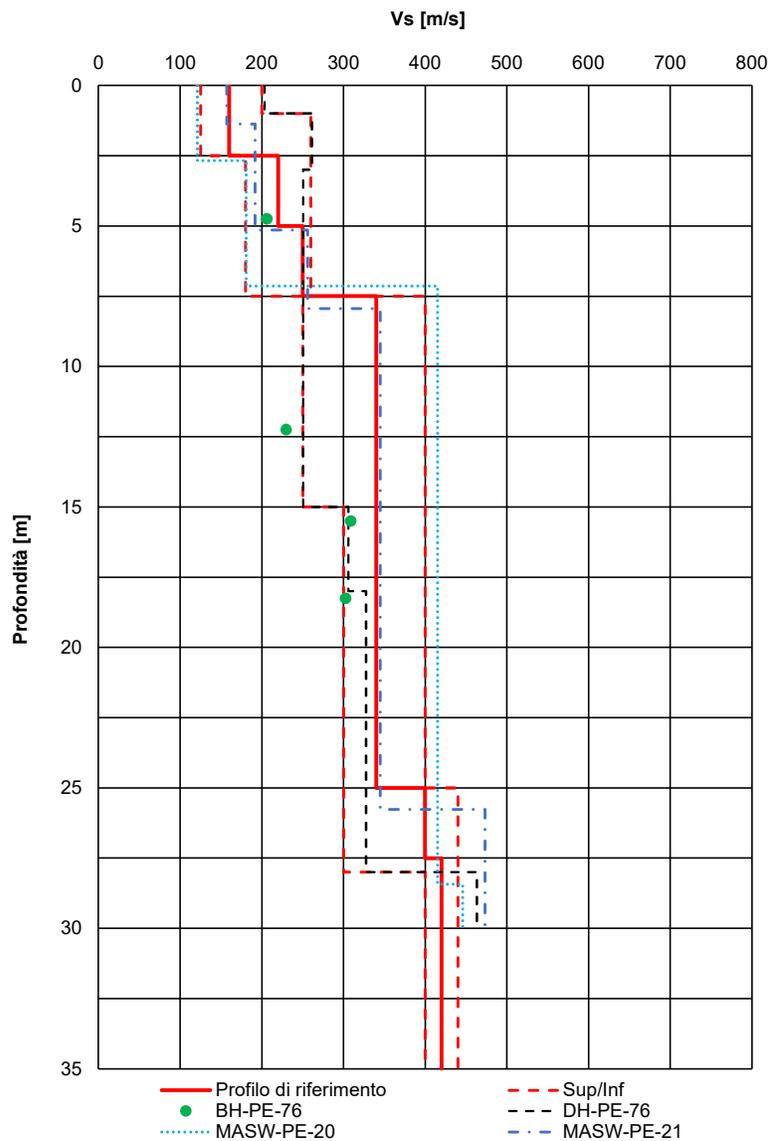


Figura 28: Tratto S10 da pk 36+000 a 38+075. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e Vs da correlazioni su prove SPT/CPT.

Tabella 11: Tratto S11 da pk 38+075 a 43+000. Profilo di V_s di riferimento. Valori di V_s per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | V_s (m/s) |
|----------------|------|----------------------|
| Da | A | $V_{s,30} = 315$ m/s |
| 0 | 5.0 | 170 |
| 5.0 | 7.5 | 220 |
| 7.5 | 17.5 | 375 |
| 17.5 | 35.0 | 450 |

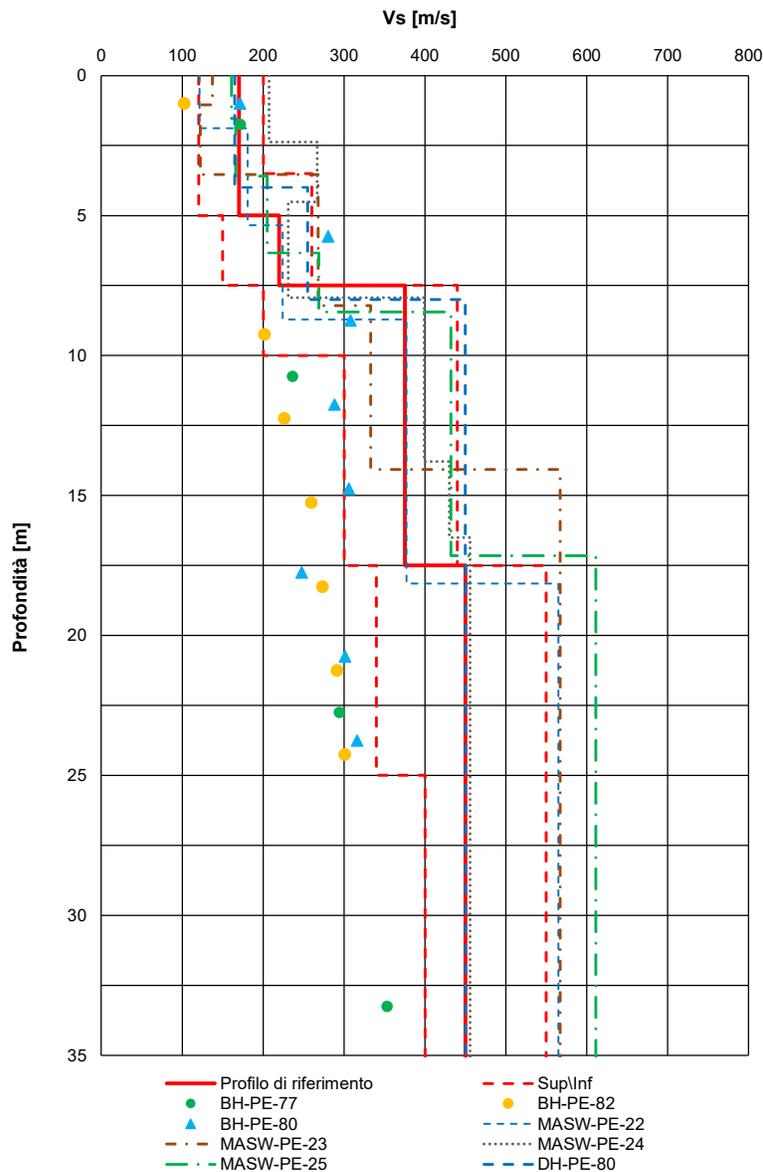
Figura 29: Tratto S11 da pk 38+075 a 43+000. Profilo di V_s di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e V_s da correlazioni su prove SPT/CPT.

Tabella 12: Tratto S12 da pk 43+000 a 44+250. Profilo di Vs di riferimento. Valori di Vs per intervallo di profondità.

| Profondità (m) | | Vs (m/s) |
|----------------|------|----------|
| Da | A | |
| 0.0 | 5.0 | 140 |
| 5.0 | 7.5 | 150 |
| 7.5 | 17.5 | 275 |
| 17.5 | 20.0 | 300 |
| 20.0 | 35.0 | 325 |

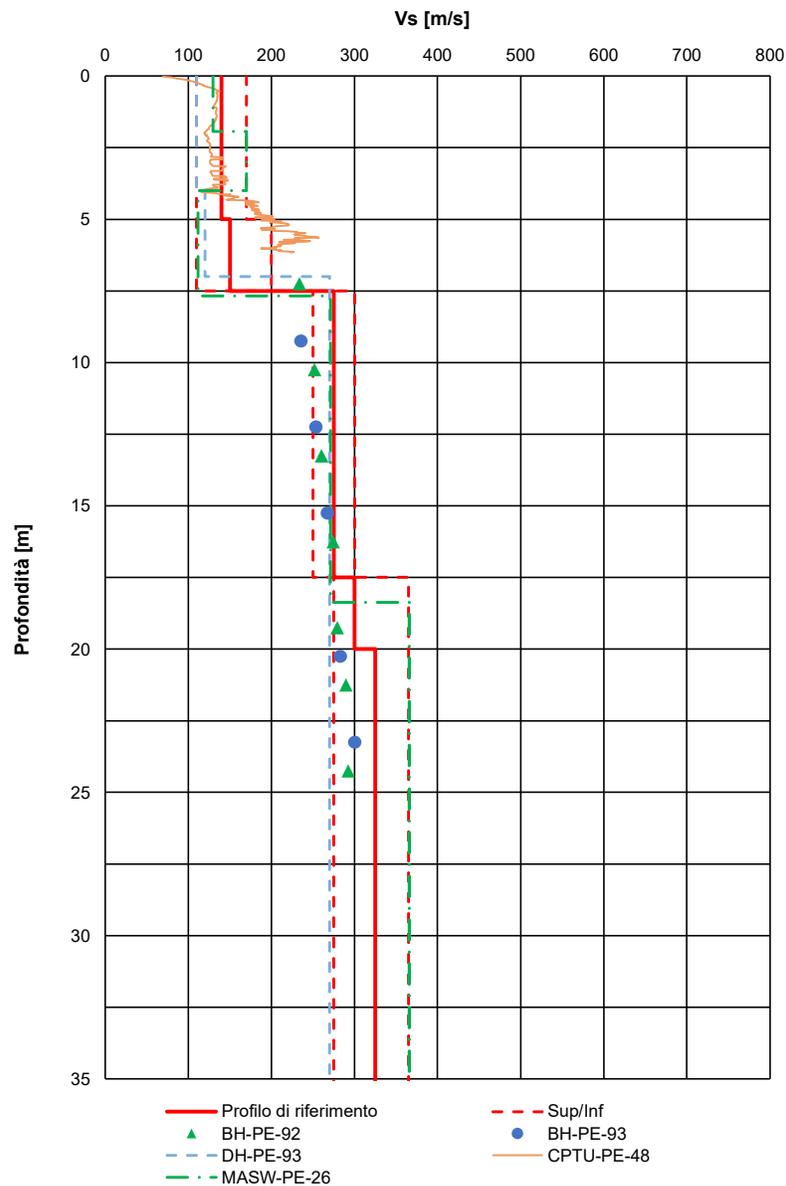


Figura 30: Tratto S12 da pk 43+000 a 44+250. Profilo di Vs di riferimento (linea rossa continua), relativo campo di variazione (linee rosse tratteggiate), risultati delle prove geofisiche afferenti il tratto e Vs da correlazioni su prove SPT/CPT.

| | | | | | |
|---|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 43 di 51 |

4 CONCLUSIONI

I profili di riferimento riportati nelle relazioni sismiche del PE, rivisti nelle figure di cui ai capitoli precedenti a valle di una ulteriore analisi, sono da considerarsi rappresentativi di stratigrafie senza evidenti inversioni di rigidità o forti gradienti, ma sempre giustificate dal quadro stratigrafico generale di un sistema nel complesso deposizionale. In taluni casi il profilo di riferimento è in buon accordo con l'insieme delle prove mentre, in altri casi, la dispersione delle prove è più elevata.

Per la prima parte del tracciato (tratti da **S1** a **S8**), allorché, dalle prove geofisiche condotte, sia stata rilevata una inversione dei valori di velocità di propagazione delle onde di taglio con l'aumentare della profondità, sono state eseguite in questa sede specifiche analisi di Risposta Sismica Locale che hanno sostanzialmente confermato la cautela nell'adottare quale riferimento lo spettro di normativa. Si segnala a tale riguardo che il risultato di analisi RSL costruite su profili desunti da un solo dato di indagine non possono essere estesi a intere tratte, ma che costituiscono una verifica locale volta a verificare, per il sito, la validità del dato normativo.

I superamenti dello spettro di norma osservati per alcune verticali di indagini specifiche sono localizzati su periodi variabili tra 0.6 e 1 s che non interessano la progettazione delle opere d'arte quali viadotti (per i quali i periodi di oscillazione di interesse siano tra 0.2 e 0.4 s) e rilevati (le cui verifiche fanno riferimento al valore di PGA), incluse le verifiche a liquefazione.

La parte finale del tracciato (da **S9** a **S12**) risulta sostanzialmente non affetta dal fenomeno di inversione delle velocità di propagazione delle onde di taglio osservato lungo il primo tratto. Va segnalato che le prove MASW da 14 a 26 sembrano meglio definite, con curve di dispersione di calcolo più estese e di conseguenza una maggiore profondità raggiunta ed una migliore risoluzione. Tale maggiore risoluzione del dato geofisico può mettere in evidenza locali fenomeni di aumento delle Vs di spessore limitato (cfr. MASW-PE-15, MASW-P-17, MASW-PE-26) e differenze di velocità ridotte (quasi entro il range di incertezza della misura) che non si ritiene in ogni caso possano avere alcuna influenza sulla RSL, in un quadro complessivo di aumento graduale delle proprietà dei materiali.

Detto quanto sopra, i profili di riferimento riportati nelle relazioni sismiche del PE, riviste e descritte ai paragrafi precedenti, sono da considerarsi rappresentativi di stratigrafie senza evidenti inversioni di rigidità o forti gradienti, ma sempre giustificate dal quadro stratigrafico generale di un sistema nel complesso deposizionale.

In conclusione, si ritiene valida la determinazione relativa alla Categoria di sottosuolo C per l'intero tracciato come da NTC2008, ossia:

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.

| | | | | | |
|---|--|----------------------|---|--------------------|-----------------------------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  | | | | |
| <p>Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E.</p> | <p>Progetto IN17</p> | <p>Lotto 10</p> | <p>Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009</p> | <p>Rev. A</p> | <p>Foglio 44 di 51</p> |

APPENDICE A

DATI DI INPUT E METODO DI ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 45 di 51 |

A.1 METODO DI ANALISI

Le analisi di risposta sismica locale, previste nel par. 3.2.2 delle NTC2018, sono simulazioni numeriche della propagazione delle onde nei depositi di terreno presenti al sito. Esse mirano a calcolare, a partire dall'input di accelerazione alla base di modello, lo scuotimento (risposta) in superficie e a diverse profondità in forma di segnale temporale e conseguente spettro di risposta. Pertanto, tali analisi permettono di stimare i fattori di amplificazione del moto legati alla presenza dei depositi, oltre agli sforzi e deformazioni (di taglio) che il passaggio delle onde sismiche induce nel terreno investigato.

Giocano in tale stima quattro fonti di variabilità, ossia:

- la definizione dell'input sismico a livello di substrato (bedrock).
- la definizione del profilo locale di velocità di propagazione delle onde di taglio, esteso ove possibile fino al substrato rigido e sua variabilità, trattata nel par. A.2 (e meglio specificata par. da 3.1 a 3.4 nel corpo principale della relazione);
- la descrizione delle proprietà non lineari del terreno in campo dinamico, trattata nel Cap. A.3;
- la modellazione del comportamento del terreno nell' analisi di propagazione (Idriss, 2004).

La scelta di un trattamento lineare equivalente (LEQ) è giustificata dai valori di accelerazione in gioco e confermata dai valori di deformazione a taglio ciclico osservati nelle analisi effettuate. I calcoli di propagazione 1D sono stati effettuati con il programma STRATA (Kottke and Rathje 2008) usando come input accelerogrammi definiti al bedrock affiorante. La procedura di de-convoluzione alla base del profilo di terreno è eseguita automaticamente dal programma. La variabilità del input sismico è stata presa in considerazione, effettuando 7 analisi di RSL con 7 accelerogrammi di input.

A.2 PROFILI DI V_S DI RIFERIMENTO

I profili di velocità delle onde di taglio sono mostrati nel corpo principale della relazione. Si osserva qui come il bedrock sismico, non individuato dalle indagini condotte, all'interno delle profondità indagate (spinte fino alla profondità di 50 m dal piano campagna), sia stato considerato ad una profondità media di 100 m da piano campagna. Analisi di sensitività condotte hanno mostrato come la profondità del bedrock non impatti sostanzialmente i risultati delle analisi che risultano sostanzialmente governati dall'andamento dei profili di velocità nei primi 20-30 m, con particolare riferimento alla presenza di inversioni. A tale riguardo si faccia riferimento specifico a quanto mostrato in Figura A.1 dove viene mostrata, a titolo esemplificativo, la dipendenza dello spettro di risposta elastico di accelerazione in superficie dalla profondità del bedrock considerata variabile tra 80 e 120 m di profondità (analisi condotta con riferimento a un profilo di V_S caratterizzato da elevati gradienti di inversione, i.e. analisi RSL2, cfr. par. 3.1.2). In Figura A.1 viene mostrato come la dipendenza delle ordinate spettrali tra 80 e 100 m di profondità del bedrock è limitata nel range di periodi di interesse (da PGA a 0.4s), mentre il dato spettrale ottenuto considerando 120 m di profondità del bedrock è generalmente caratterizzato, nello stesso intervallo di periodi, da ordinate inferiori.

Nelle analisi, al bedrock sismico è stato assegnato un valore di $V_S = 800$ m/s ed un valore di smorzamento rispetto al valore critico pari all'1%.

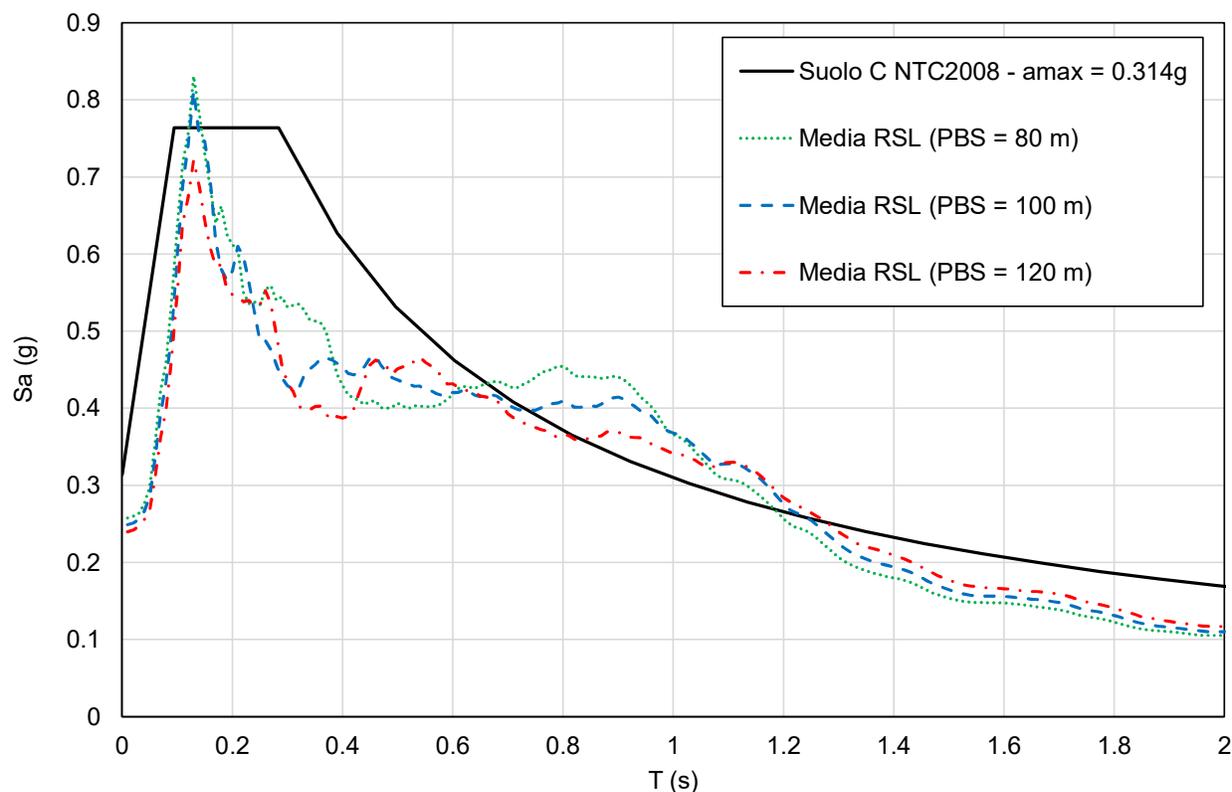


Figura A.1: Dipendenza dello spettro di risposta in superficie dalla profondità del bedrock sismico (PBS).
Analisi di sensitività tra 80 e 120 m di PBS (cfr. analisi RSL2, par. 3.1.2).

A.3 CURVE DI DEGRADO DEL MODULO DI TAGLIO E SMORZAMENTO

Nelle analisi di risposta sismica locale di tipo "standard" quali quelle in esame, dove le deformazioni cicliche indotte dal sisma rimangono ragionevolmente limitate (<1%) e il metodo di analisi è il cosiddetto lineare equivalente, le proprietà dinamiche dei terreni con maggiore influenza sui risultati, oltre al valore di velocità di propagazione delle onde di taglio in sito, sono costituite dalle cosiddette curve sperimentali di degrado, atte a descrivere la dipendenza non lineare del modulo di taglio normalizzato G/G_{max} e del fattore di smorzamento intrinseco del terreno in funzione dell'ampiezza di deformazione ciclica a taglio γ .

Nel caso in esame, per descrivere le curve di degrado del modulo a taglio dei materiali incontrati lungo la tratta si è fatto riferimento a curve di letteratura già implementate nel programma *STRATA* (cfr. Figura A.2) con particolare riferimento a:

- Per materiali a grana fine (formazione (3), cfr. profili geotecnici): Idriss (1990).
- Per la formazione (6) costituita da ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose: Seed & Idriss, Sand Upper.
- Per la formazione (2) delle sabbie fini ben addensate: Idriss (1990), Sand.

Per quanto riguarda l'andamento del damping intrinseco con la deformazione ciclica, si è fatto riferimento alla curva definita da Seed & Idriss, Sand Mean (cfr. Figura A.3).

In sede di analisi preliminari, si è valutato l'impiego delle curve di Rollins (1990) per la formazione (3), senza osservare variazioni sostanziali nei risultati.

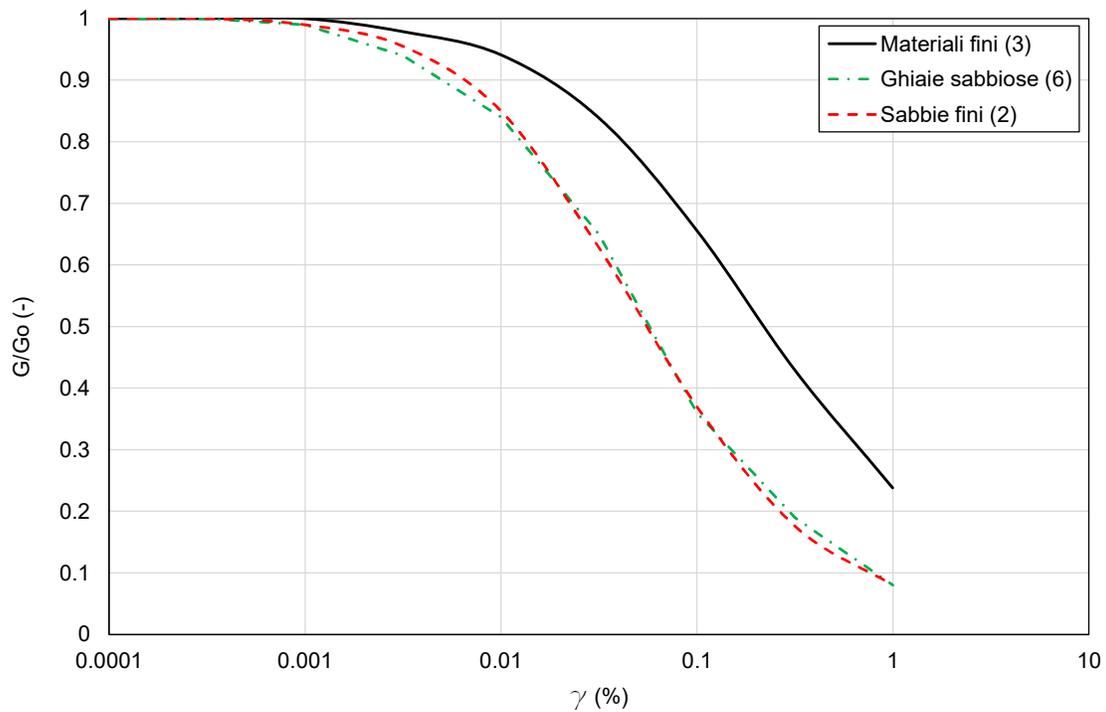


Figura A.2: Curve di degrado del modulo di taglio.

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 48 di 51 |

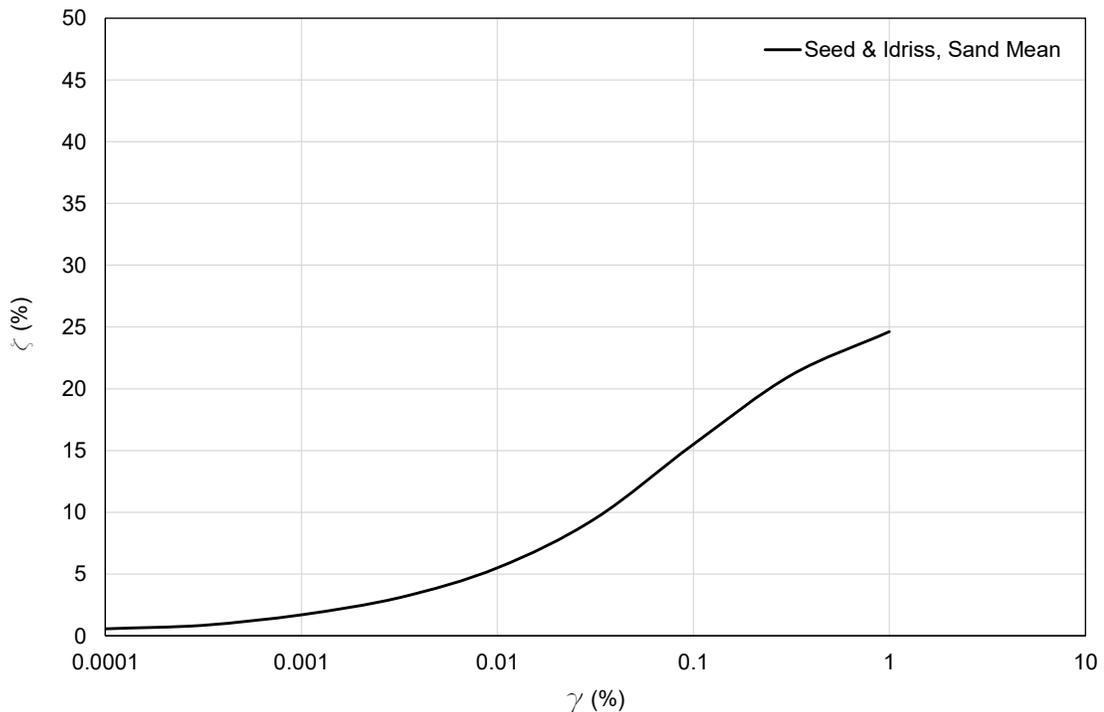


Figura A.3: Curva di smorzamento in funzione della deformazione a taglio ciclica.

A.4 SCELTA DEGLI ACCELEROGRAMMI E TRATTAMENTO

La scelta degli accelerogrammi, oltre che dallo spettro obiettivo su suolo rigido (variabile lungo la linea in funzione dell'accelerazione attesa così come descritto nei documenti IN1710EI2RHGE0000005A e IN1710EI2RHGE0000006A), è stata guidata dalla disaggregazione della pericolosità sismica nella regione circostante il sito, che permette di individuare le combinazioni magnitudo-distanza che governano la pericolosità al sito stesso.

Sempre con riferimento ai documenti sopra citati, l'analisi di disaggregazione ivi condotta ha portato ad individuare valori di magnitudo compresi tra 6 e 6.5, a seconda del tratto, ed epicentro a distanza ridotta (0-30 km).

Nella ricerca degli accelerogrammi i criteri suddetti sono stati ragionevolmente rilassati, prendendo in conto eventi con magnitudo compresa tra 5.5 e 6.5 e valori di distanza superiori. Si è data l'ovvia preferenza a terremoti italiani per ragioni di compatibilità sismo-tettonica e a registrazioni da stazioni su suolo di classe A e B. La ricerca è stata condotta attraverso il database REXELWeb (Sgobba et al., 2019) e sono stati selezionati 7 segnali accelerometrici registrati elencati in Tabella A.1. La registrazione di Mirandola, avvenuta durante il terremoto dell'Emilia del maggio 2012 è stata mantenuta nel set pur se la stazione è su sito di tipo C, per prossimità con il tracciato di progetto e rappresentatività.

| | | | | | | |
|--|--|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 49 di 51 |

Gli spettri di risposta degli accelerogrammi selezionati non scalati sono mostrati in Figura A.4 dove si può osservare come la spettro-compatibilità sia generalmente buona con eccezione della registrazione di Mirandola, che risulta caratterizzata da forti effetti di sito.

Successivamente si è proceduto a trattare gli accelerogrammi correggendoli nel dominio delle frequenze da un periodo di 0.05 a 2 s, attraverso l'impiego della procedura basata sulle wavelets di Abrahamson (1992) e Hancock et al. (2006), implementata nel software Seismomatch. Nella scelta dei parametri di correzione è stato puntualmente verificato di non introdurre eccessivi artefatti in termini di accelerazione, velocità e spostamento. Al termine della procedura di matching spettrale è stata effettuata una ulteriore scalatura al valore di velocità di picco (nel caso mostrato 0.233g).

In Figura A.5 viene mostrata media e scarto degli spettri degli accelerogrammi selezionati a seguito della procedura di correzione. La compatibilità è soddisfacente con una certa prevalenza degli spettri corretti nell'intorno del plateau spettrale.

Tabella A.1: Dati del set di accelerogrammi rappresentativi selezionato.

| ID registrazione | Terremoto | Data | Nome Stazione | M_w | R_{epi} (km) | Meccanismo di faglia | Classe sito NTC2018 |
|------------------|-----------------|------------|-------------------------|-------|----------------|----------------------|---------------------|
| Greece2016 | Grecia 2016 | 15/10/2016 | Saranda Seismic Station | 5.5 | 55.4 | TF | A |
| ICCastelE | Italia Centrale | 26/10/2016 | Castelluccio di Norcia | 5.9 | 10.8 | NF | A |
| ICCastelN | Italia Centrale | 26/10/2016 | Castelluccio di Norcia | 5.9 | 10.8 | NF | A |
| MontemE | Italia Centrale | 30/10/2016 | Montemonaco | 6.5 | 19.2 | NF | A |
| MontemN | Italia Centrale | 30/10/2016 | Montemonaco | 6.5 | 19.2 | NF | A |
| Norcia | Italia Centrale | 26/10/2016 | Norcia | 5.9 | 13.2 | NF | B |
| Mirando | Emilia-Romagna | 29/05/2012 | Mirandola | 6.0 | 5.1 | TF | C |

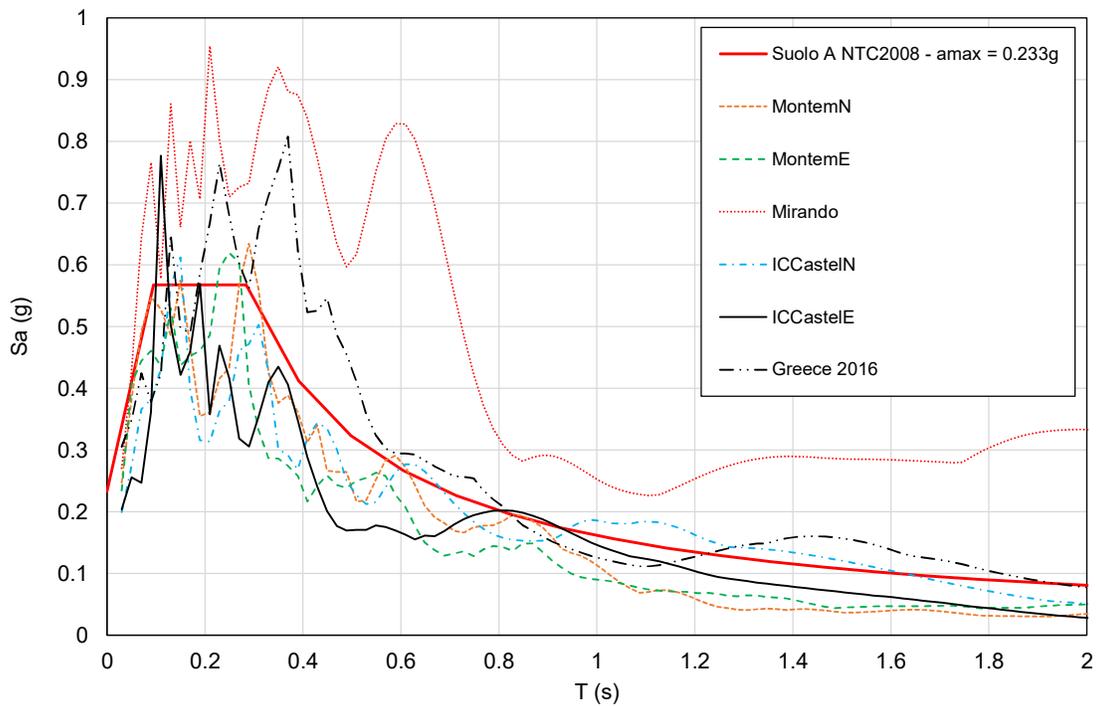


Figura A.4: Spettri di risposta elastici smorzati al 5% del set di accelerogrammi selezionato (cfr. Tabella A.1) a confronto con lo spettro elastico NTC2008 per $a_g = 0.233g$ (tratto di linea S1 tra pk 0+000 e 4+000) su suolo di tipo A.

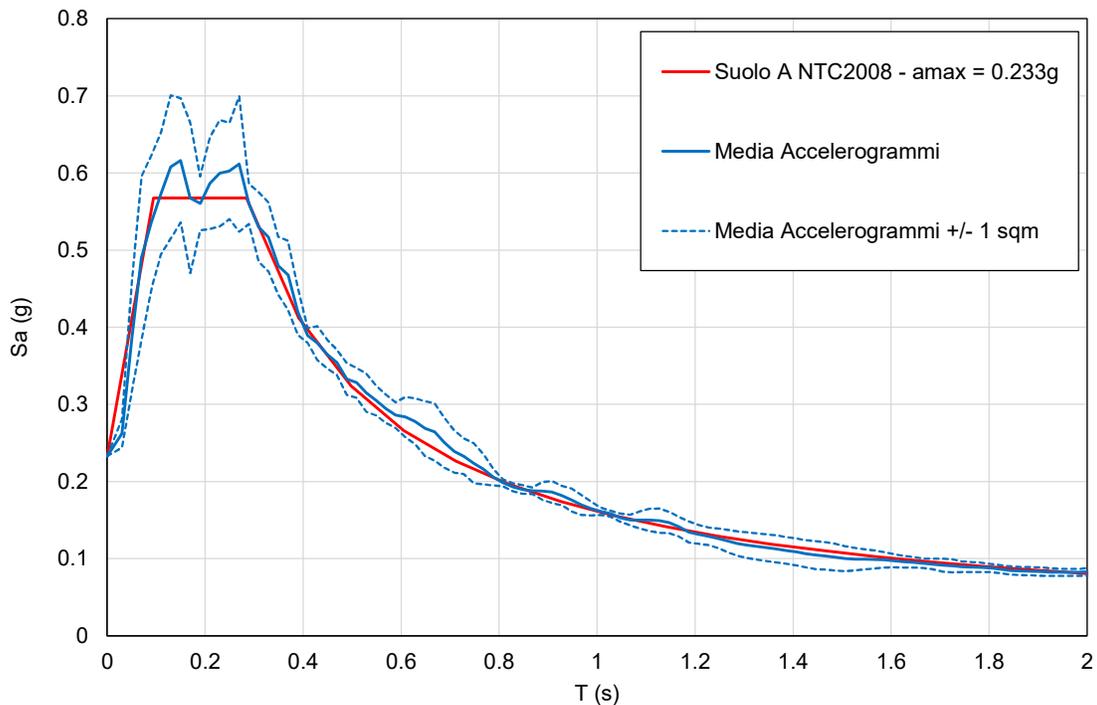


Figura A.5: Media e scarto degli spettri di risposta elastici smorzati al 5% del set di accelerogrammi selezionato dopo la procedura di spectral matching, a confronto con lo spettro elastico NTC2008 per $a_g = 0.233g$ (tratto di linea S1 tra pk 0+000 e 4+000) su suolo di tipo A.

| | | | | | |
|--|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | | | | |
| Rilevato ferroviario dal Km 32+525,00 al Km 32+825,00 RELAZIONE DI CONFRONTO P.D. / P.E. | Progetto IN17 | Lotto 10 | Codifica Documento EI2 RB GE 00 0 0 009 | Rev. A | Foglio 51 di 51 |

A.5 BIBLIOGRAFIA

- [1] Abrahamson N.A. [1992] "Non-stationary spectral matching," Seismological Research Letters, Vol. 63, No. 1, p. 30.
- [2] Idriss IM (1990) Response of soft soil sites during earthquakes. In: Duncan JM (ed) Proceedings in H. Bolton seed memorial symposium, vol 2, pp 273–290
- [3] Hancock J., Watson-Lamprey J., Abrahamson N.A., Bommer J.J., Markatis A., McCoy E., Mendis R. [2006] "An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets." Journal of Earthquake Engineering, Vol. 10 pp. 67–89.
- [4] Kottke, A. R., Wang, X. e Rathje, E. M., Strata Technical Manual, October 16, 2019.
- [5] Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., and Daily III W.D., Members, ASCE (1998). Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 1998, 124(5): 396-405.
- [6] Seed H. B., Idriss I. M. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 48 p. (as cited in the EERA Manual, Bardet et al., 2000).
- [7] Sgobba, S., Puglia, R., Pacor F., Luzi, L., Russo, E., Felicetta, C., Lanzano, G., D'Amico, M., Baraschino, R., Baltzopoulos, G., Iervolino, I. REXELweb: a tool for selection of ground-motion records from the Engineering Strong Motion database (ESM). 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE) 17 - 20 June 2019, Roma, Italy