



AUTOSTRADA REGIONALE CISPADANA DAL CASELLO DI REGGIOLO-ROLO SULLA A22 AL CASELLO DI FERRARA SUD SULLA A13

CODICE C.U.P. E81B08000060009

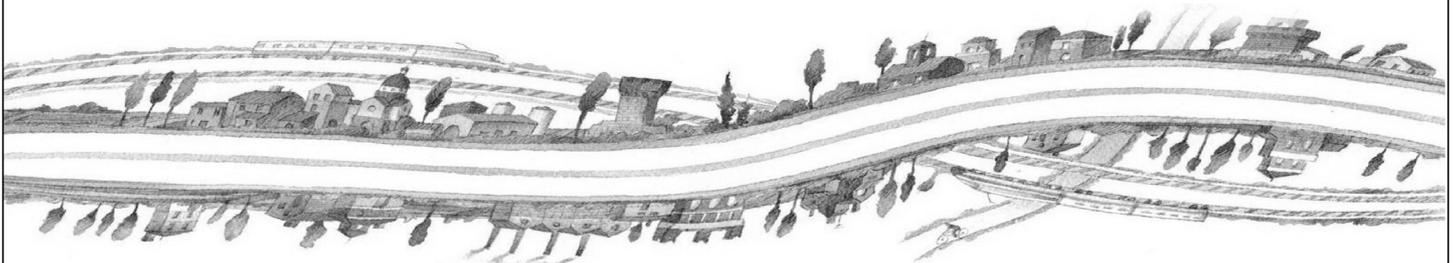
PROGETTO DEFINITIVO

**ASSE AUTOSTRADALE (COMPRESIVO DEGLI INTERVENTI LOCALI DI COLLEGAMENTO VIARIO AL SISTEMA AUTOSTRADALE)
GEOLOGIA, IDROGEOLOGIA, SISMICA E GEOTECNICA**

GEOTECNICA

RISPOSTA SISMICA LOCALE PER VERIFICHE RILEVATI E INTERVENTI DI MITIGAZIONE NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

ADDENDUM LIQUEFAZIONE - RISPOSTA SISMICA LOCALE - ZONA 5L



IL PROGETTISTA

Ing. Gianfranco Marchi
Albo Ing. Ravenna n°342

RESPONSABILE INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Antonio Anania
Albo Ing. Perugia n° A2574

Dott. Ing. Antonio Anania
IMPRESA PIZZAROTTI & C. S.p.A.
Iscritto ordine Ingegneri di Perugia n° A2574

IL CONCESSIONARIO

Autostrada Regionale
Cispadana S.p.A.
IL PRESIDENTE
Graziano Pattuzzi

G										
F										
E										
D										
C										
B										
A	01.08.2019	EMISSIONE PER OTTEMPERANZA DECRETO VIA DEL 25.07.2017				MARCHI F.	MARCHI G.	ANANIA		
REV.	DATA	DESCRIZIONE				REDAZIONE	CONTROLLO	APPROVAZIONE		
IDENTIFICAZIONE ELABORATO										DATA: AGOSTO 2019
NUM. PROGR.	FASE	LOTTO	GRUPPO	CODICE OPERA WBS	TRATTO OPERA	AMBITO	TIPO ELABORATO	PROGRESSIVO	REV.	SCALA: _
7234	PD	0	A00	A0000	0	GT	RH	03	A	

INDICE

1. PREMESSA	2
2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	3
2.1. NORMATIVE	3
2.2. BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO	3
2.3. ELABORATI PROGETTUALI DI RIFERIMENTO	4
3. AREA 5AL	5
3.1. STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	5
3.2. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEI TERRENI	5
3.2.1. Profilo onde di taglio, V_s	5
3.2.2. Modello sismo-stratigrafico e geotecnico.....	7
3.3. LOCALIZZAZIONE DEL BEDROCK SISMICO.....	8
3.4. INDIVIDUAZIONE DEL SET DI ACCELEROGRAMMI SPETTRO-COMPATIBILI.....	10
3.5. RISULTATI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE	11
4. AREA 5BL	14
4.1. STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	14
4.2. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEI TERRENI	14
4.2.1. Profilo onde di taglio, V_s	14
4.2.2. Modello sismo-stratigrafico e geotecnico.....	16
4.3. LOCALIZZAZIONE DEL BEDROCK SISMICO.....	17
4.4. INDIVIDUAZIONE DEL SET DI ACCELEROGRAMMI SPETTRO-COMPATIBILI.....	19
4.5. RISULTATI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE	20

1. PREMESSA

Nell'ambito delle attività di aggiornamento del Progetto Definitivo di Autostrada Regionale Cispadana dal casello di Reggiolo-Rolo su A22 al casello di Ferrara Sud su A13, il presente documento illustra l'analisi di risposta sismica locale ottenuta per la Zona Liquefacibile 5L, sita nel comune di Novi di Modena.

Tale area è stata ulteriormente suddivisa in due sottoaree:

- Area 5aL;
- Area 5bL

In rappresentanza di ciascuna zona è stata individuata la prova penetrometrica che ha evidenziato il valore massimo di potenziale di liquefazione IL:

- Area 5aL → CPTUV 05;
- Area 5bL → CPTUV 13

Per ulteriori chiarimenti in merito ai criteri generali adottati per l'esecuzione dell'analisi di risposta sismica locale (RSL) si rimanda al documento Rif. [1].

Nel seguito dell'elaborato verranno descritte ed approfondite, per ciascuna delle sottoaree, le seguenti tematiche, con particolare riferimento alle metodologie di analisi adottate:

- normativa di riferimento per l'analisi di risposta sismica locale;
- stima del potenziale di liquefazione;
- caratterizzazione dinamica dei terreni;
- localizzazione del bedrock sismico;
- individuazione del set di accelerogrammi spettro-compatibili;
- risultati della risposta sismica locale.

2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1. NORMATIVE

Le normative di riferimento sono riportate nell'elaborato:

- PD_0_0000_0000_0_GE_KT_01, "Elenco delle Normative di riferimento".

2.2. BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- "Microzonazione Sismica e Analisi per la condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura Emiliana di Maggio-Giugno 2012 (Ordinanza del Commissario Delegato – Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012) – Relazione illustrativa" a cura di L. Martelli e M. Romani
- "A large scale ambient vibration survey in the area damaged by May-June 2012 seismic sequence in Emilia Romagna, Italy" di E. Paolucci, D. Albarello, S. D'Amico, E. Lunedei, L. Martelli, M. Mucciarelli e D. Pileggi (2015)
- "Studio sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito ai fini della microzonazione sismica di alcuni comuni della Regione Emilia Romagna" – G. Laurenzano, E. Priolo, C. Barnaba, M. R. Gallipoli, P. Klin, M. Mucciarelli e M. Romanelli
- Ordinanza n.55 del 24 aprile 2018 della Presidenza del Consiglio dei Ministri e il Commissario del governo per la ricostruzione nei territori interessati dal sisma del 24 agosto 2016
- Guide con Cone Penetration Testing, Ed.6 2015, Robertson & Cabal
- Microzonazione del Comune di Cavezzo – Relazione Illustrativa – C.G. Lai , A. Famà, E. Zuccolo, R. M. Cosentini, D. Conca, J.C. Gómez Zapata, S. Lorini, S. Ciaffaroni, C. Meisina, R. Boni, M. Bordoni, P. Persichillo, G. Cerra, G. Perotti, F. Bozzoni, L. Martelli, G. Ercollesi

2.3. ELABORATI PROGETTUALI DI RIFERIMENTO

- Rif. [1] Elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_01: RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE;
- Rif. [2] Elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_02: CRITERI GENERALI VERIFICHE GEOTECNICHE
- Rif. [3] Elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_08: RELAZIONE DI VERIFICHE GEOTECNICHE -
ADDENDUM PER LIQUEFAZIONE

3. AREA 5aL

3.1. STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Le analisi di liquefazione evidenziano un'area con potenziale di liquefazione IL maggiore di 5 all'interno del comune di Novi di Modena in un'area denominata 5aL.

A vantaggio di sicurezza l'analisi di risposta sismica locale è stata condotta sulla base della CPTUV 05 che presenta il valore massimo del potenziale di liquefazione dell'area.

Per la stima di tale parametro si rimanda Rif. [3].

3.2. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEI TERRENI

La determinazione della stratigrafia e dei principali parametri geotecnici necessari alla caratterizzazione dei terreni è stata effettuata sulla base dell'elaborazione della prova penetrometrica in esame e delle ulteriori prove dinamiche individuate nelle immediate vicinanze:

- Prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono → **CPTUV 05**

3.2.1. Profilo onde di taglio, V_s

Il profilo delle onde di taglio, V_s , adottato nella RSL è stato dedotto dalla prova CPTU in esame attraverso la correlazione di Robertson et al. (1992).

Il dato di partenza e la schematizzazione a modello sono presentati nella figura seguente, unitamente alla Power Law di taratura.

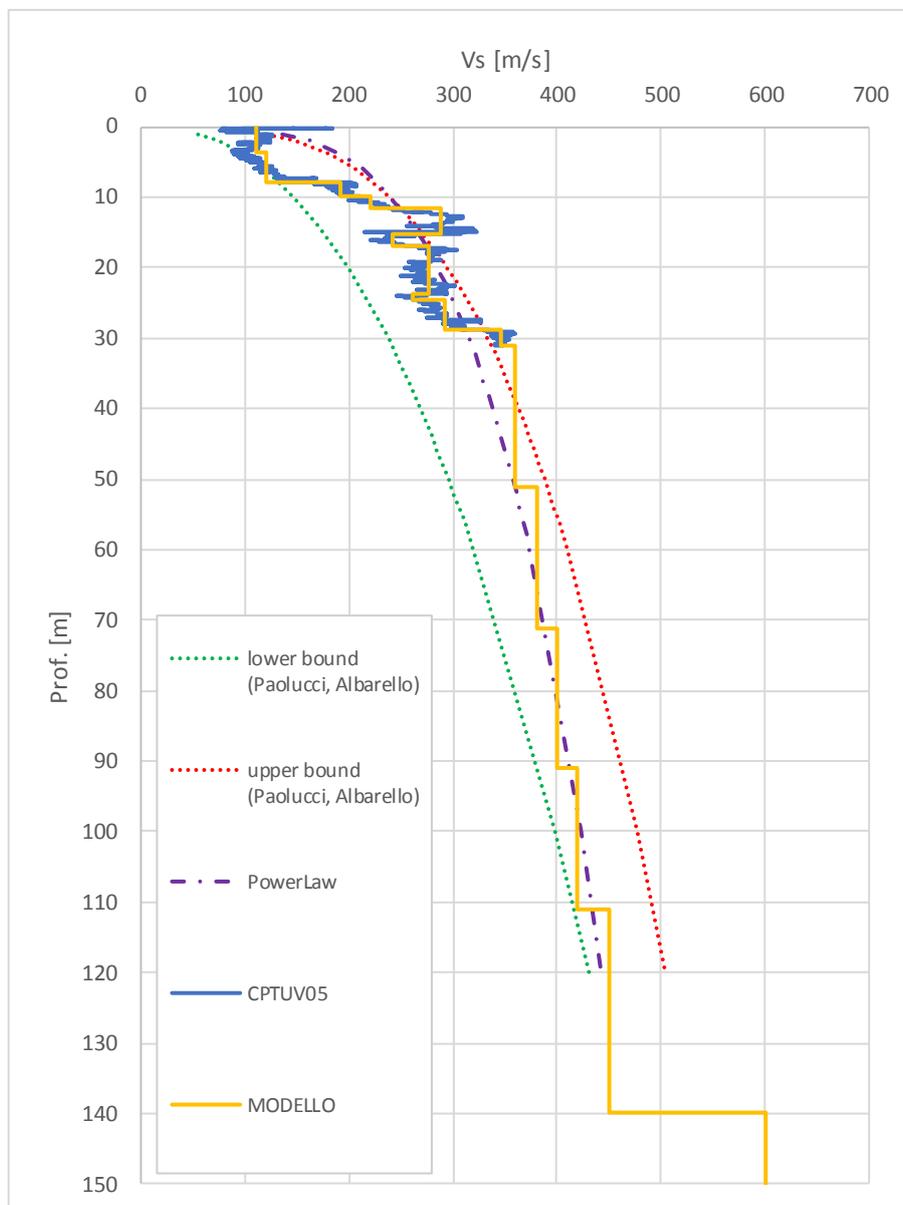


FIGURA 3-1 - PROFILO DI VS LUNGO LA VERTICALE DI INDAGINE CPTUV 05.

Per ulteriori approfondimenti si faccia riferimento al Rif. [2].

3.2.2. Modello sismo-stratigrafico e geotecnico

Dall'elaborazione di tali informazioni si ottiene il modello sismo-stratigrafico riportato nella Tabella 3-1 con il seguente significato dei simboli:

- **Unità:** unità geotecniche di interesse come definite nel Rif. [1];
- **z:** profondità dal p.c. (quota assoluta: 16.136 m) della base dello strato;
- **s:** spessore dello strato;
- **γ :** peso dell'unità di volume dello strato;
- **V_s :** media della velocità delle onde di taglio dello strato;
- **Curva:** curva di decadimento del modulo di taglio e dello smorzamento in funzione della deformazione a taglio.

TABELLA 3-1 - DISCRETIZZAZIONE PER STRATI DEI PARAMETRI DEL MODELLO SISMO-STRATIGRAFICO ADOTTATO

Strato	Unità	z [m]	s [m]	γ [kN/m ³]	V_s [m/s]	Curva
1	1	3.50	3.50	18.8	111	Vucetic & Dobry IP30
2	1	7.90	4.40	18.8	121	Vucetic & Dobry IP30
3	2	9.90	2.00	18.5	193	Geomatrix 0-50ft
4	3	11.50	1.60	18.5	222	Geomatrix 0-50ft
5	5	15.30	3.80	19.5	288	Idriss 1990
6	4	16.80	1.50	19.0	242	Geomatrix 50-150ft
7	5	23.80	7.00	19.5	277	Idriss 1990
8	4	24.50	1.50	19.0	261	Geomatrix 50-150ft
9	5	28.80	4.30	19.5	292	Idriss 1990
10	5	31.10	2.30	19.5	346	Idriss 1990
11	5	51.10	20.00	19.5	360	Idriss 1990
12	5	71.10	20.00	19.5	380	Idriss 1990
13	5	91.10	20.00	19.5	400	Idriss 1990
14	5	111.10	20.00	19.5	420	Idriss 1990
15	5	140.00	28.90	19.5	450	Idriss 1990
16	Bedrock	-	-	22.0	600	-

3.3. LOCALIZZAZIONE DEL BEDROCK SISMICO

La profondità del bedrock sismico è stata stimata attraverso la taratura di una Power Law, che definisce la tendenza media delle velocità delle onde di taglio con la profondità.

Sulla base di questa tendenza e della frequenza propria del sito, individuata mediante i risultati di prove H/V, è possibile dedurre la profondità del bedrock sismico. Per ulteriori approfondimenti si faccia riferimento al Rif. [2].

In prossimità dell'area in esame è stata effettuata una misurazione H/V, denominata HV06, attraverso cui si identifica una frequenza propria del sito di circa 0.63 Hz, Figura 3-2.

Si ottiene quindi una profondità del Bedrock pari a 140m.

Il Bedrock, ai fini della risposta sismica, è stato inoltre caratterizzato da:

- $V_s = 600\text{m/s}$;
- Smorzamento $D = 1\%$.

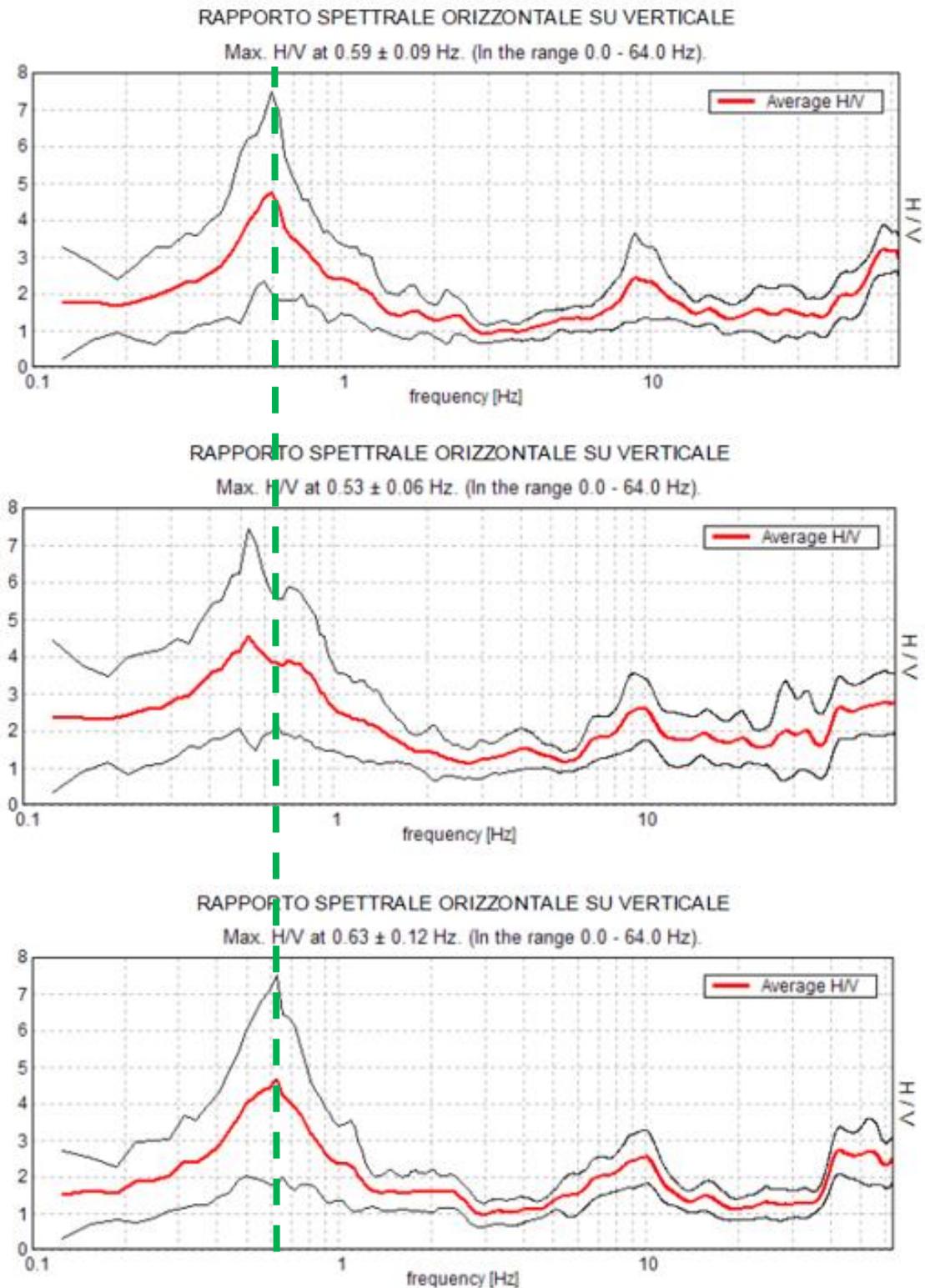


FIGURA 3-2 - RISULTATI DETERMINAZIONI H/V - HV06.

3.4. INDIVIDUAZIONE DEL SET DI ACCELEROGRAMMI SPETTRO-COMPATIBILI

Come riportato nel Rif. [2] la ricerca è stata effettuata mediante il software Rexel.

In particolare, sono stati individuati due set di accelerogrammi spettro-compatibili al fine di cogliere la variabilità della pericolosità sismica di base lungo l'asse autostradale:

- Set 1: tratta dal comune di Rolo a quello di Mirandola con l'aggiunta del comune di Ferrara;
- Set 2: tratta dal comune di Medolla a quello di Poggio Renatico.

L'area 5aL, sita nel comune di Novi di Modena, è compresa nella tratta di pertinenza del Set 1.

Di seguito si riportano gli Accelerogrammi spettro-compatibili del Set 1.

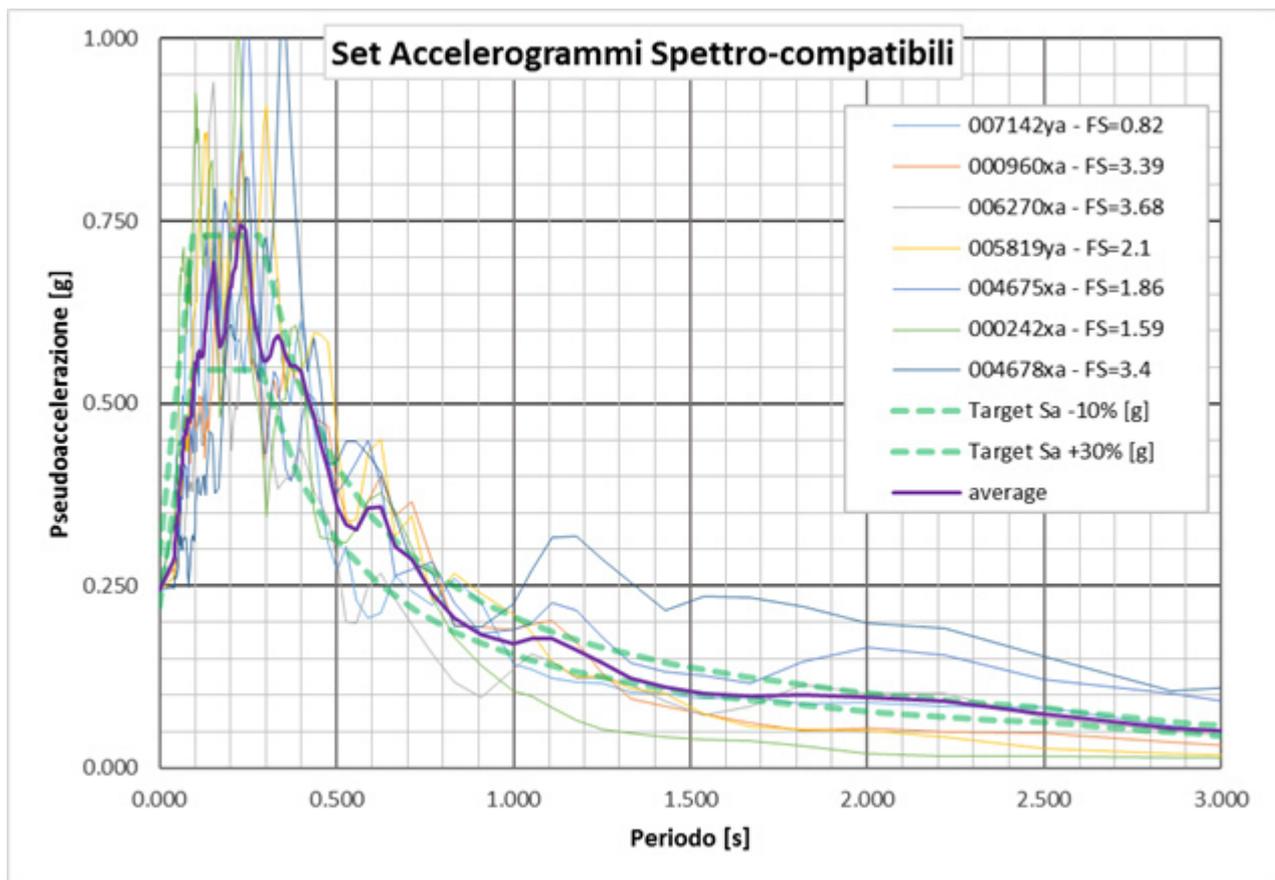


FIGURA 3-3 - SPETTRI TARGET PER LA RICERCA, SPETTRI DEI SINGOLI SEGNALI E RELATIVO SPETTRO MEDIO.

3.5. RISULTATI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

La risposta sismica locale è stata effettuata in condizioni monodimensionali mediante modellazione Lineare equivalente con il software Strata, adottando gli accelerogrammi di input, i modelli costitutivi, la profondità del bedrock sismico ed il profilo di velocità delle onde di taglio indicati nei paragrafi precedenti.

I risultati sono di seguito presentati graficamente in termini di spettro di risposta in superficie, sia medio dei 7 accelerogrammi utilizzati sia medio normalizzato secondo la metodologia presentata negli indirizzi per la microzonazione sismica dell’Ordinanza n.55 del 24 aprile 2018 della Presidenza del Consiglio dei Ministri e il Commissario del governo per la ricostruzione nei territori interessati dal sisma del 24 agosto 2016, a confronto con quelli di input (**FIGURA 3-4**) e con quelli da approccio semplificato secondo NTC 2008.

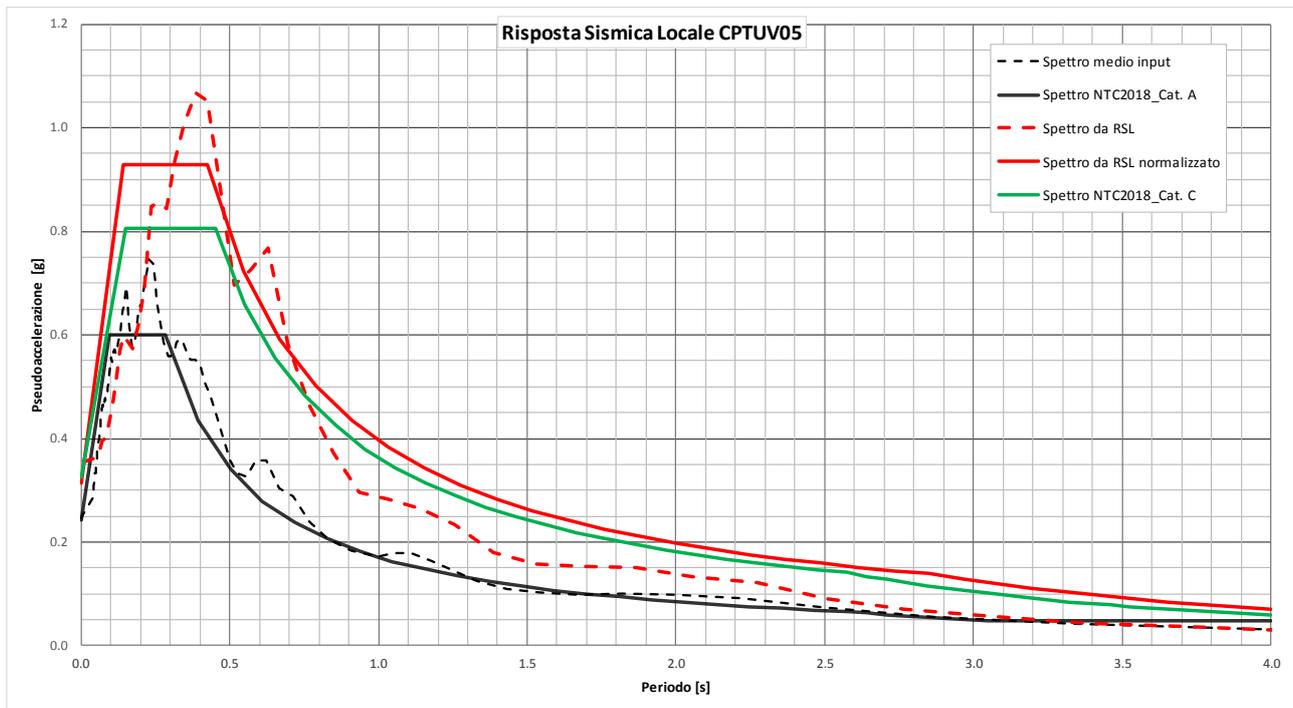


FIGURA 3-4 - SPETTRO DI RISPOSTA DA ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE 1D, SPETTRO NORMALIZZATO, SPETTRO DI INPUT E SPETTRI DA APPROCCIO SEMPLIFICATO NTC 2008.

Di seguito i valori, in forma tabellare, dello Spettro medio derivante dall’analisi di RSL normalizzato secondo la già citata l’Ordinanza n° 55 del 24 aprile 2018.

TABELLA 3-2 – SPETTRO DI RISPOSTA MEDIO NORMALIZZATO DERIVANTE DA RSL.

T [sec]	Sa [g]
0.000	0.313
0.142	0.930
0.426	0.930
0.547	0.724
0.668	0.592
0.790	0.501
0.911	0.435
1.032	0.383
1.154	0.343
1.275	0.311
1.396	0.284
1.517	0.261
1.639	0.242
1.760	0.225
1.881	0.210
2.003	0.198
2.124	0.186
2.245	0.176
2.367	0.167
2.488	0.159
2.609	0.152
2.730	0.145
2.852	0.139
2.967	0.128
3.081	0.119
3.196	0.111
3.311	0.103
3.426	0.096
3.541	0.090
3.656	0.084
3.770	0.079
3.885	0.075
4.000	0.071

Si riportano, inoltre, i parametri normativi che definiscono la forma dello spettro derivante da RSL, si noti che taluni parametri sono stati assunti fittiziamente unitari:

TABELLA 3-3 - PARAMETRI NORMATIVI CHE DEFINISCONO LA FORMA DELLO SPETTRO DERIVANTE DA RSL

Parametri descrittivi dello Spettro Normativo	
a_g	3.070 m/s^2 0.313 g
F_0	2.971
T_A	0.000 s
T_B	0.142 s
T_c	0.426 s
T_D	2.852 s
i restanti parametri (S_s , S_r , η) sono fittiziamente assunti pari all'unità	

4. AREA 5bL

4.1. STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Le analisi di liquefazione evidenziano un'area con potenziale di liquefazione IL maggiore di 5 all'interno del comune di Novi di Modena in un'area denominata 5bL.

A vantaggio di sicurezza l'analisi di risposta sismica locale è stata condotta sulla base della CPTUV 13 che presenta il valore massimo del potenziale di liquefazione dell'area.

Per la stima di tale parametro si rimanda Rif. [3].

4.2. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEI TERRENI

La determinazione della stratigrafia e dei principali parametri geotecnici necessari alla caratterizzazione dei terreni è stata effettuata sulla base dell'elaborazione della prova penetrometrica in esame e delle ulteriori prove dinamiche individuate nelle immediate vicinanze:

- Prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono → **CPTUV 13**

4.2.1. Profilo onde di taglio, V_s

Il profilo delle onde di taglio, V_s , adottato nella RSL è stato dedotto dalla prova CPTU in esame attraverso la correlazione di Robertson et al. (1992).

Il dato di partenza e la schematizzazione a modello sono presentati nella figura seguente, unitamente alla Power Law di taratura.

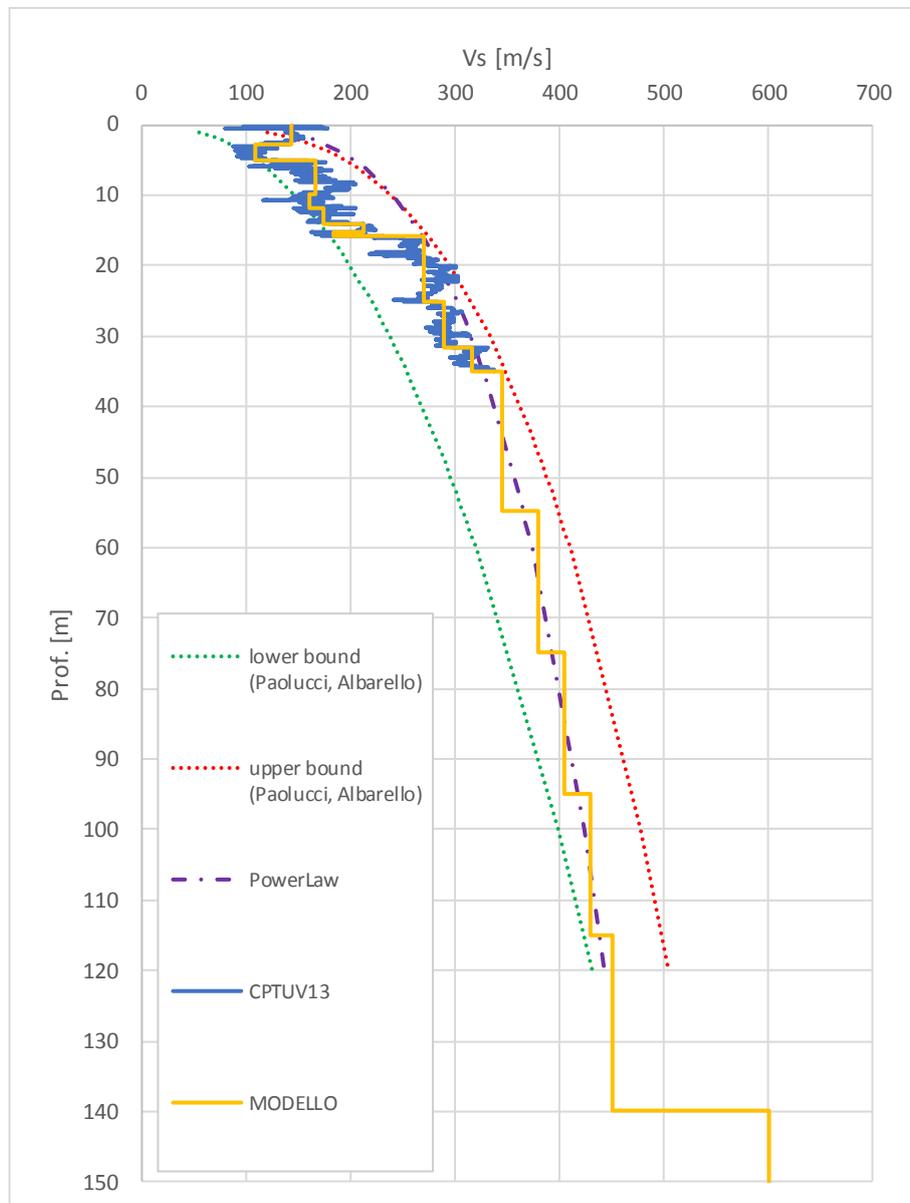


FIGURA 4-1 - PROFILO DI VS LUNGO LA VERTICALE DI INDAGINE CPTUV 13.

Per ulteriori approfondimenti si faccia riferimento al Rif. [2].

4.2.2. Modello sismo-stratigrafico e geotecnico

Dall'elaborazione di tali informazioni si ottiene il modello sismo-stratigrafico riportato nella Tabella 3-1 con il seguente significato dei simboli:

- **Unità:** unità geotecniche di interesse come definite nel Rif. [1];
- **z:** profondità dal p.c. (quota assoluta: 17.258 m) della base dello strato;
- **s:** spessore dello strato;
- **γ :** peso dell'unità di volume dello strato;
- **V_s :** media della velocità delle onde di taglio dello strato;
- **Curva:** curva di decadimento del modulo di taglio e dello smorzamento in funzione della deformazione a taglio.

TABELLA 4-1 - DISCRETIZZAZIONE PER STRATI DEI PARAMETRI DEL MODELLO SISMO-STRATIGRAFICO ADOTTATO

Strato	Unità	z [m]	s [m]	γ [kN/m ³]	V_s [m/s]	Curva
1	1	2.70	2.70	18.8	143	Vucetic & Dobry IP30
2	2	5.00	2.30	18.5	108	Geomatrix 0-50ft
3	2	9.80	4.80	18.5	166	Geomatrix 0-50ft
4	1	11.90	2.10	18.8	162	Vucetic & Dobry IP30
5	2	14.00	2.10	18.5	174	Geomatrix 0-50ft
6	5	15.20	1.20	19.5	212	Idriss 1990
7	2	15.70	0.50	18.5	183	Geomatrix 0-50ft
8	5	25.00	9.30	19.5	270	Idriss 1990
9	5	31.50	6.50	19.5	290	Idriss 1990
10	5	34.90	3.40	19.5	316	Idriss 1990
11	5	54.90	20.00	19.5	345	Idriss 1990
12	5	74.90	20.00	19.5	380	Idriss 1990
13	5	94.90	20.00	19.5	405	Idriss 1990
14	5	114.90	20.00	19.5	430	Idriss 1990
15	5	140.00	25.10	19.5	450	Idriss 1990
16	Bedrock	-	-	22.0	600	-

4.3. LOCALIZZAZIONE DEL BEDROCK SISMICO

La profondità del bedrock sismico è stata stimata attraverso la taratura di una Power Law, che definisce la tendenza media delle velocità delle onde di taglio con la profondità.

Sulla base di questa tendenza e della frequenza propria del sito, individuata mediante i risultati di prove H/V, è possibile dedurre la profondità del bedrock sismico. Per ulteriori approfondimenti si faccia riferimento al Rif. [2].

In prossimità dell'area in esame è stata effettuata una misurazione H/V, denominata HV06, attraverso cui si identifica una frequenza propria del sito di circa 0.63 Hz, Figura 4-2.

Si ottiene quindi una profondità del Bedrock pari a 140m.

Il Bedrock, ai fini della risposta sismica, è stato inoltre caratterizzato da:

- $V_s = 600\text{m/s}$;
- Smorzamento $D = 1\%$.

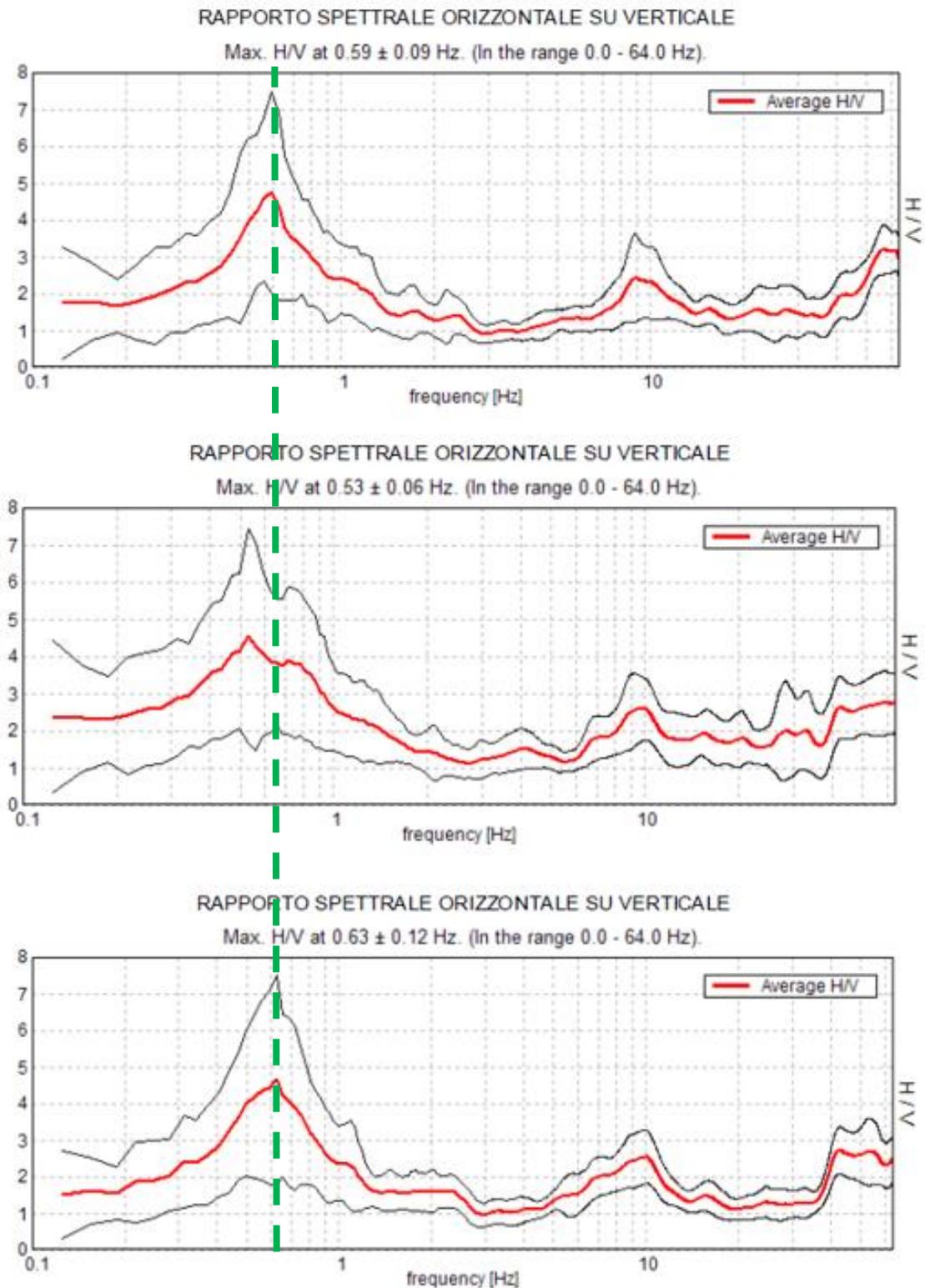


FIGURA 4-2 - RISULTATI DETERMINAZIONI H/V - HV06.

4.4. INDIVIDUAZIONE DEL SET DI ACCELEROGRAMMI SPETTRO-COMPATIBILI

Come riportato nel Rif. [2] la ricerca è stata effettuata mediante il software Rexel.

In particolare, sono stati individuati due set di accelerogrammi spettro-compatibili al fine di cogliere la variabilità della pericolosità sismica di base lungo l'asse autostradale:

- Set 1: tratta dal comune di Rolo a quello di Mirandola con l'aggiunta del comune di Ferrara;
- Set 2: tratta dal comune di Medolla a quello di Poggio Renatico.

L'area 5bL, sita nel comune di Novi di Modena, è compresa nella tratta di pertinenza del Set 1.

Di seguito si riportano gli Accelerogrammi spettro-compatibili del Set 1.

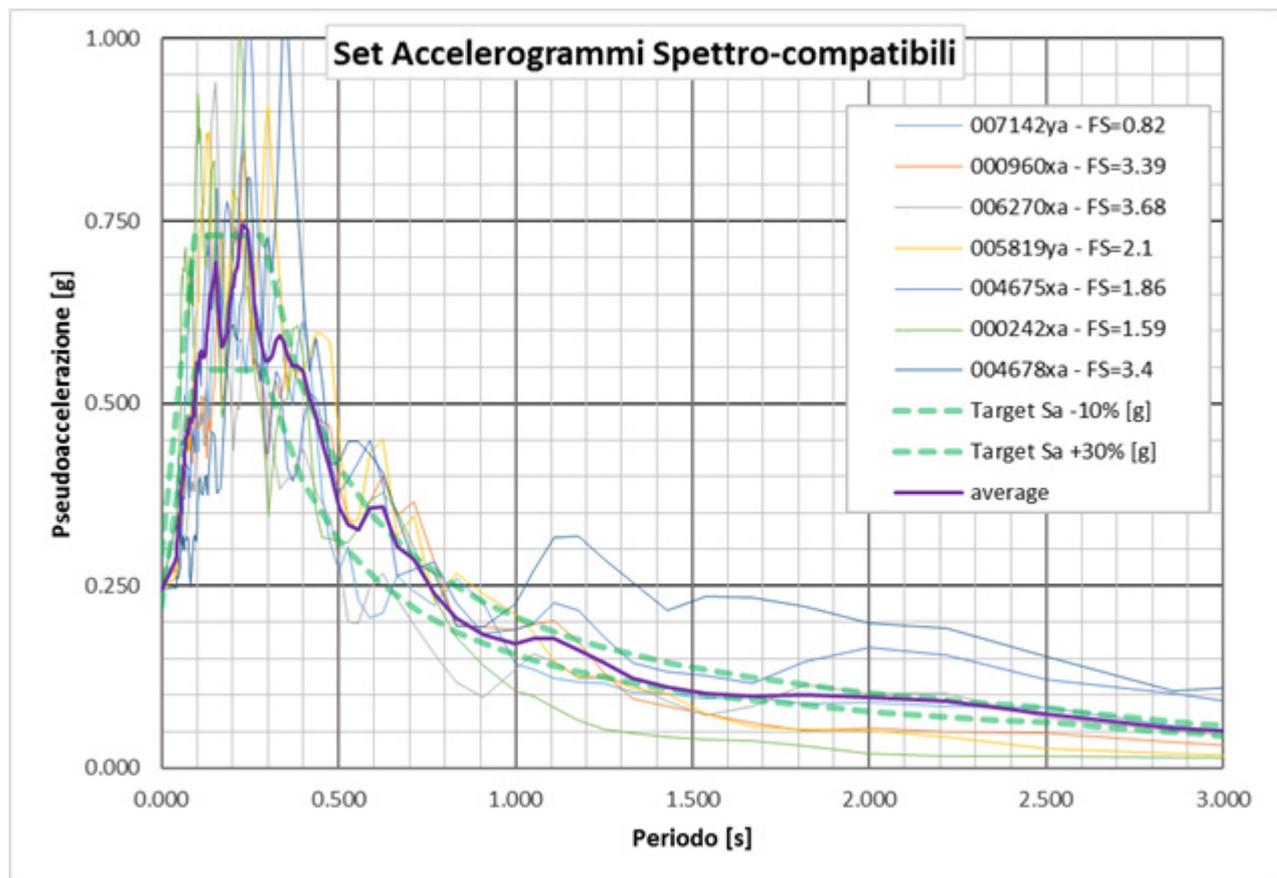


FIGURA 4-3 - SPETTRI TARGET PER LA RICERCA, SPETTRI DEI SINGOLI SEGNALI E RELATIVO SPETTRO MEDIO.

4.5. RISULTATI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

La risposta sismica locale è stata effettuata in condizioni monodimensionali mediante modellazione Lineare equivalente con il software Strata, adottando gli accelerogrammi di input, i modelli costitutivi, la profondità del bedrock sismico ed il profilo di velocità delle onde di taglio indicati nei paragrafi precedenti.

I risultati sono di seguito presentati graficamente in termini di spettro di risposta in superficie, sia medio dei 7 accelerogrammi utilizzati sia medio normalizzato secondo la metodologia presentata negli indirizzi per la microzonazione sismica dell’Ordinanza n.55 del 24 aprile 2018 della Presidenza del Consiglio dei Ministri e il Commissario del governo per la ricostruzione nei territori interessati dal sisma del 24 agosto 2016, a confronto con quelli di input (**FIGURA 3-4**) e con quelli da approccio semplificato secondo NTC 2008.

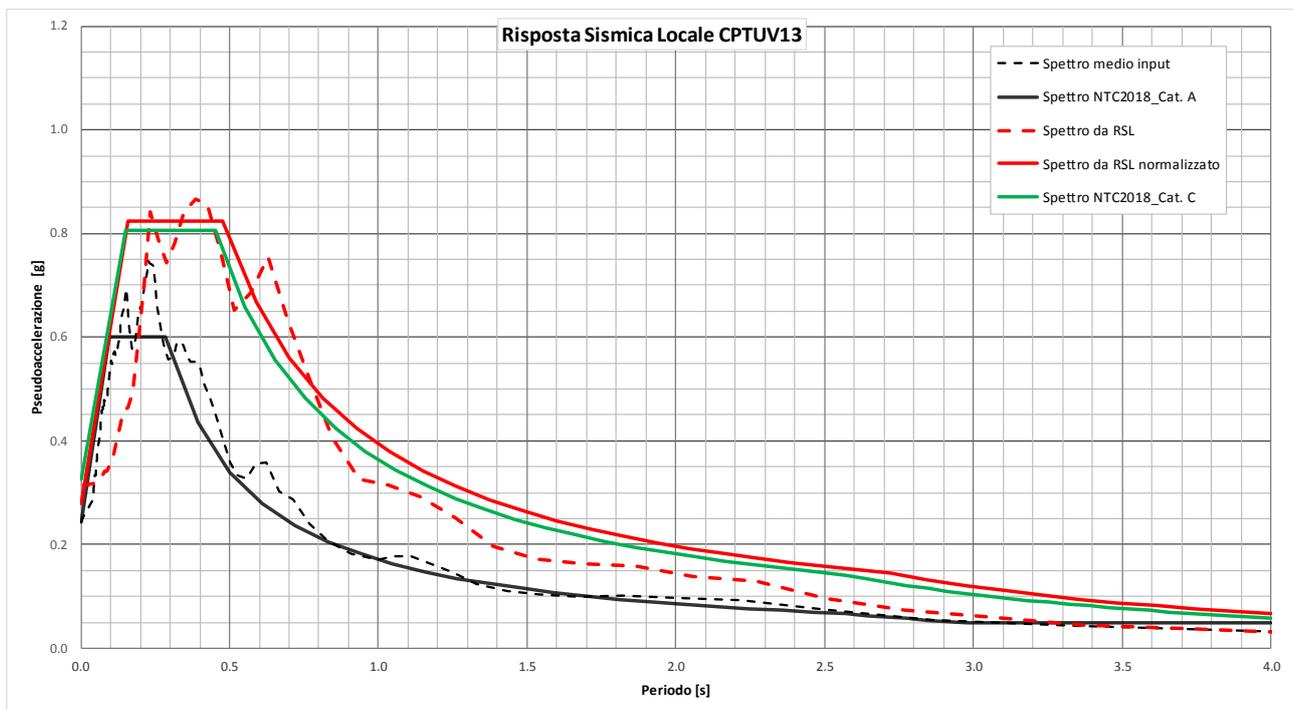


FIGURA 4-4 - SPETTRO DI RISPOSTA DA ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE 1D, SPETTRO NORMALIZZATO, SPETTRO DI INPUT E SPETTRI DA APPROCCIO SEMPLIFICATO NTC 2008.

Di seguito i valori, in forma tabellare, dello Spettro medio derivante dall’analisi di RSL normalizzato secondo la già citata l’Ordinanza n° 55 del 24 aprile 2018.

TABELLA 4-2 – SPETTRO DI RISPOSTA MEDIO NORMALIZZATO DERIVANTE DA RSL.

T [sec]	Sa [g]
0.000	0.280
0.159	0.823
0.478	0.823
0.590	0.667
0.702	0.560
0.814	0.483
0.926	0.425
1.038	0.379
1.150	0.342
1.262	0.311
1.374	0.286
1.486	0.264
1.598	0.246
1.710	0.230
1.822	0.216
1.935	0.203
2.047	0.192
2.159	0.182
2.271	0.173
2.383	0.165
2.495	0.158
2.607	0.151
2.719	0.145
2.847	0.132
2.975	0.121
3.103	0.111
3.231	0.102
3.360	0.095
3.488	0.088
3.616	0.082
3.744	0.076
3.872	0.071
4.000	0.067

Si riportano, inoltre, i parametri normativi che definiscono la forma dello spettro derivante da RSL, si noti che taluni parametri sono stati assunti fittiziamente unitari:

TABELLA 4-3 - PARAMETRI NORMATIVI CHE DEFINISCONO LA FORMA DELLO SPETTRO DERIVANTE DA RSL

Parametri descrittivi dello Spettro Normativo	
a_g	$\frac{2.744 \text{ m/s}^2}{0.280 \text{ g}}$
F_0	2.942
T_A	0.000 s
T_B	0.159 s
T_c	0.478 s
T_D	2.719 s
i restanti parametri (S_s , S_r , η) sono fittiziamente assunti pari all'unità	