

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 1 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

EMERGENZA GAS

INCREMENTO DI CAPACITÀ DI RIGASSIFICAZIONE (DL 17.05.2022 , N. 50)

FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI

MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

A	Emesso per Approvazione	G. Beverina	J. Albagli	M.Raimondi	04/03/2024
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato Autorizzato	Data

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 2 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Indice

1.	INTRODUZIONE	4
1.1	Generalità e scopo del lavoro	4
2.	RIFERIMENTI	7
2.1	Norme e prescrizioni	7
2.2	Documenti di progetto	7
2.3	Bibliografia	9
3.	ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL): STRUMENTI, MODELLI E PROCEDIMENTI	12
3.1	Generalità	12
3.2	Modellazione della risposta del terreno	12
3.2.1	Analisi nel dominio delle frequenze con modelli lineari equivalenti	13
3.2.2	Analisi nel dominio del tempo con modelli non lineari	15
4.	MOTI DI INPUT SISMICO	20
4.1	Introduzione	20
4.2	Definizione degli spettri target	20
4.3	Metodologia di selezione e matching delle registrazioni di moto al suolo	24
4.4	Input di moto sismico selezionati	26
5.	DEFINIZIONE DEL PROFILO DI TERRENO DI RIFERIMENTO PER L'ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE	29
5.1	Introduzione	29
5.2	Valutazione generale della stratigrafia del terreno per le analisi di RSL	29
5.2.1	Valutazione dei profili della velocità delle onde di taglio e del peso totale di volume	32
5.2.2	Curve di decadimento e di smorzamento	41
6.	RISULTATI DELLA RSL IN CONDIZIONI DI CAMPO LIBERO	47
6.1	Commenti generali sui risultati	49
7.	ANALISI DI SENSITIVITÀ PER LA RISPOSTA SISMICA LOCALE	51
7.1	Introduzione	51
7.2	Risultati dell'analisi di sensitività	51
8.	VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE	55

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 3 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

8.1	Generalità	55
8.2	Potenziale di liquefazione per materiali granulari: metodo di calcolo semplificato secondo la procedura NCEER	55
8.2.1	Generalità	55
8.2.2	Calcolo del Rapporto di Sollecitazione Ciclica (CSR)	56
8.2.3	Calcolo del Rapporto di Resistenza Ciclica (CRR) da prove CPT	59
8.2.3.1	Calcolo della Resistenza alla Punta Normalizzata, q_{c1N}	61
8.2.4	Calcolo della Resistenza alla Punta Normalizzata per sabbie pulite, $(q_{c1N})_{CS}$	64
8.2.5	Fattore di scala della magnitudo, MSF	67
8.2.6	Considerazioni relative al fattore di sicurezza nei riguardi della liquefazione	68
8.2.7	Risultati	69
9.	CONCLUSIONI	71
10.	APPENDICE 1	73
10.1	Risultati del matching spettrale	73

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 4 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

1. Introduzione

1.1 Generalità e scopo del lavoro

Le opere previste nel Progetto FSRU Ravenna sono le seguenti:

1. Adeguamento e ampliamento della esistente piattaforma Petra inclusiva di tutte le opere impiantistiche necessarie allo scarico del gas naturale ed il suo convogliamento nella condotta sottomarina;
2. Posa di una nuova condotta sottomarina - DP 100 *barg* lunga circa 8.5 KM, per collegare la piattaforma Petra ed il punto di arrivo a terra posto in corrispondenza dell'area impianto denominata ex-SAROM situata a Punta Marina a ridotto della linea di costa, inclusiva della realizzazione del microtunnel costiero e della posa del cavo a fibra ottica;
3. Posa del tratto di condotta a terra DN 900 - DP 75 *barg* lunga circa 31.5 km tra l'impianto trappole previsto all'interno dell'area impianto PDE e l'area del Nodo di Ravenna di Snam Rete e Gas. Il tratto include anche la realizzazione dell'impianto di correzione dell'*Indice di Wobbe*, dell'impianto di filtraggio, misura e regolazione PDE di Punta Marina e dell'impianto trappole e collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti denominato Nodo di Ravenna;
4. E' prevista l'installazione di un sistema di diga frangiflutti (break water) in prossimità del terminale.

La nuova piattaforma di ormeggio sarà posizionata a circa 8km dalla costa Punta Marina, a largo di Ravenna (Emilia Romagna), in corrispondenza dell'esistente struttura PIR/PETRA in disuso da almeno un decennio e il cui utilizzo è previsto solo come via di fuga, in quanto si prevede lo smantellamento di tutte le apparecchiature attualmente installate (vedi Figura 1).

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 5 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Il presente documento è finalizzato all'esecuzione della analisi risposta sismica locale nell'area del Progetto sulla quale sarà realizzato l'impianto di ricezione di una Floating and Storage Regasification Unit (FSRU) Ravenna, riguardante la piattaforma di ormeggio e le relative briccole di accosto e ormeggio, compresi i pali passerelle e varie altre strutture a supporto.

Il presente documento si propone pertanto di determinare gli spettri elastici di risposta del sito predisposti per i tempi di ritorno di progetto e alla valutazione degli sforzi di taglio attesi nel terreno in occorrenza delle condizioni sismiche analizzate, da adottarsi nelle verifiche di liquefazione.

Le analisi sono state implementate per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), cui fa riferimento un periodo di ritorno di 949 anni e per cui è stato calcolato lo spettro elastico orizzontale a pericolosità uniforme (UHS), con riferimento alle condizioni su roccia affiorante (velocità delle onde di taglio pari a 800 m/s) ed in accordo a quanto previsto dal Decreto Ministeriale del 17 Gennaio 2018, Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC2018, Rif. 2.2.1).

Si precisa che la descrizione di dettaglio delle indagini geotecniche eseguite in sito e la caratterizzazione geotecnica dell'area d'impianto sono oggetto della relazione geotecnica dedicata, al Rif. 2.2.13).

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 6 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502



Figura 1 - Inquadramento geografico delle opere in progetto

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 7 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

2. Riferimenti

2.1 Norme e prescrizioni

- 2.1.1 D.M. 17 gennaio 2018. “Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”” (G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018)
- 2.1.2 C.M. 21 Gennaio 2019 n.7 “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018” (Supplemento ordinario n.5 alla G.U. n.35 dell’11 febbraio 2019)
- 2.1.3 U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration - Publication No. FHWA-NHI-11-032, “LRFD Seismic Analysis and Design of Transportation Geotechnical Features and Structural Foundations - Reference Manual”, Rev.1 - August 2011.
- 2.1.4 WSDOT - Washington State Department Of Transportation (2013) - “Geotechnical Design Manual - M 46-03.09”.
- 2.1.5 UNI EN 1998-5: “Eurocode 8 - Design Of Structures For Earthquake Resistance - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects”.

2.2 Documenti di progetto

- 2.2.1 Aquater/Snamprogetti, Rel. N. 1134/1/INSU - PUNTA MARINA (RAVENNA) - Terminale di Ormezzio della SONE - Rapporto Geotecnico, 22/10/1984 (disponibile come allegato del Rif. 2.2.6)
- 2.2.2 Technip Energies / SNAM, Doc. n. 000-CI-E-17038 - EMERGENZA GAS - Incremento di capacità di rigassificazione (DL 17 Maggio 2022, n. 50) - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Relazione Pali di fondazione per Piattaforma, rev.0, 15/11/2022, Novembre 2022
- 2.2.3 Technip Energies / SNAM, Doc. n. 000-ZX-E-17083 - EMERGENZA GAS - Incremento di capacità di rigassificazione (DL 17 Maggio 2022, n. 50) - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Design Basis, rev.0, Novembre 2022

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 8 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

- 2.2.4 Technip Energies / SNAM, Doc. n. 000-ZX-E-17002 - EMERGENZA GAS - Incremento di capacità di rigassificazione (DL 17 Maggio 2022, n. 50) - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Descrizione dei Lavori per Ingegneria, Approvvigionamento, Costruzione e Installazione (EPCI) per l'Impianto di Ricezione offshore per l'ormeggio della FSRU - APPENDICE 6 - Risultati Indagini Geofisiche E Geotecniche, rev.1, 16/11/2022
- 2.2.5 Technip Energies / SNAM, Doc. n. 000-ZX-E-17000 - EMERGENZA GAS - Incremento di capacità di rigassificazione (DL 17 Maggio 2022, n. 50) - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Relazione Geologica, rev.0, 15/11/2022 (incluso in Ref. 2.2.4)
- 2.2.6 Technip Energies / SNAM, Doc. n. 000-ZX-E-17001 - EMERGENZA GAS - Incremento di capacità di rigassificazione (DL 17 Maggio 2022, n. 50) - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Relazione Geologica, rev.0, 15/11/2022 (incluso in Ref. 2.2.4)
- 2.2.7 Saipem/Rosetti Marino/Micoperi, Doc. n. 0001-CD-B-017083 Rev. B 25/09/2023 - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Composizione Pali - Riser e Scalandrone Sud
- 2.2.8 Saipem/Rosetti Marino/Micoperi, Doc. n. 0001-CD-B-017259 Rev. A 19/09/2023 - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Jacket - Composizione Pali
- 2.2.9 Saipem/Rosetti Marino/Micoperi, Doc. n. 0001-CD-B-017301 Rev. B 19/09/2023 - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - BL - Composizione Pali
- 2.2.10 Saipem/Rosetti Marino/Micoperi, Doc. n. 0001-CD-B-017082 Rev. B 19/09/2023 - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Composizione Pali - Passerelle 1
- 2.2.11 Saipem/Rosetti Marino/Micoperi, Doc. n. 0001-CD-B-017323 Rev. B 19/09/2023 - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Briccole di Accosto - Composizione Palo
- 2.2.12 Saipem/Rosetti Marino/Micoperi, Doc. n. 0001-CD-B-017353 Rev. B 19/09/2023 - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Briccole di Ormeggio - Composizione Palo
- 2.2.13 Tecon Srl, Doc. n.: TEC-017-DD-RP_REV01 Rev. B 20/12/2023 - FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti - Relazione Geotecnica

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 9 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

2.3 Bibliografia

- 2.3.1 DEEPSOIL (2024, v 7.0), A nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of 1-D Soil Columns, User Manual. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- 2.3.2 Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1969), ASCE J Soil Mech Found Div, 95, 99-137 - Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes.
- 2.3.3 Hashash, Y. M. A., and Park, D. (2001). "Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment." Engineering Geology, 62(1-3), 185-206
- 2.3.4 Newmark, N. M. (1959). "A Method of Computation for Structural Dynamics." Journal of the Engineering Mechanics Division, 85, 67-94
- 2.3.5 Masing, G. (1926). "Eigenspannungen und verformung beim messung." Proc. 2nd Int. Congress on Applied Mech., Zurich, Switzerland
- 2.3.6 Phillips, C., and Hashash, Y. M. (2009). "Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(7), 1143-1158
- 2.3.7 Groholski, D., Hashash, Y., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J., and Stewart, J. (2016). "Simplified Model for Small-Strain Nonlinearity and Strength in 1D Seismic Site Response Analysis." J. Geotech. Geoenviron. Eng., 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001496, 04016042
- 2.3.8 Chiu, P., Pradel, D. E., Kwok, A. O.-L., and Stewart, J. P (2008). "Seismic Response Analyses for the Silicon Valley Rapid Transit Project." Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV (GSP 181), Sacramento, CA
- 2.3.9 Vucetic, M. and R. Dobry (1986). "Pore pressure buildup and liquefaction at level sandy sites during earthquakes," Research report CE-86-3, Dept. Civil Eng., Rensselaer Polytechnic Institute, New York
- 2.3.10 Rayleigh, J. W. S., and Lindsay, R. B. (1945). The theory of sound, Dover Publications, New York

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 10 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

- 2.3.11 Clough, R. W., and Penzien, J. (1993). Dynamics of structures, McGraw-Hill, New York;
- 2.3.12 Hashash, Y. M. A., C. Phillips, D.R. Groholski (2010). "Recent advances in non-linear site response analysis" V Int. Conf on Recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics, San Diego, California, May 2010
- 2.3.13 Kwok, O.L.A., J.P. Stewart, Y.M.A. Hashash, N. Matasovic, R.M. Pyke, Z.L. Wang, and Z. Yang (2007). "Use of exact solutions of wave propagation problems to guide implementation of nonlinear seismic ground response analysis procedures," J. of Geotech. & Geoenviron. Eng., ASCE, 133, no. 11, 1385-1398
- 2.3.14 Schnabel, P. B., Lysmer, J. L., and Seed, H. B. (1972), EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA - Schnabel, P. B., Lysmer, J. L., and Seed, H. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites
- 2.3.15 Bardet, J. P., K. Ichii, and C. H. Lin (2000), Department of Civil Engineering, University of California - EERA, A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits
- 2.3.16 Idriss, I.M., and Sun, J.I. (1992), Univ. of California at Davis, Davis, California - SHAKE91— A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits - User manual
- 2.3.17 Kramer, S. L. (1996), PrenticeHall, Upper Saddle River, N.J - Geotechnical earthquake engineering
- 2.3.18 Darendeli, M. B. (2001). Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas
- 2.3.19 Paolucci R. et al. - S&M Selection and spectral matching of recorded ground motions for earthquake engineering analysis. USER'S MANUAL Version 1.0 - March 2022
- 2.3.20 PEER (2012): "Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles".
- 2.3.21 Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971): "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97, 1249-1273, 1971.

	 SAIPEM  ROSETTI MARINO  MICOPERI	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 11 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

- 2.3.22 Youd et alii (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- 2.3.23 Liao S.C. e Whitman R.V. (1986). Overburden Correction Factors for SPT in Sand. Journal of GED, ASCE. 112(3): 373-377.
- 2.3.24 Robertson, P.K., Wride, C.E. (1998) "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test", Can. Geotech. J., Ottawa, 35(3), 442-459.
- 2.3.25 Olsen, R.S. (1997) "Cyclic liquefaction based on the cone penetration test", Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Nat. Ctr. For Earthquake Engrg. Res., State Univ. Of New York at Buffalo, 225-276.
- 2.3.26 Robertson, P.K. (1990) "Soil classification using CPT", Can. Geotech. J., Ottawa, 27(1), 151-158.
- 2.3.27 GeoLogismiki, CLiq v.1.7.6.49, 2007.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 12 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

3. Analisi di Risposta Sismica Locale (RSL): strumenti, modelli e procedimenti

3.1 Generalità

In questa sezione è fornito un breve riassunto dei procedimenti utilizzati per l'esecuzione delle analisi di risposta sismica locale, con particolare attenzione all'implementazione disponibile nel codice adottato per le analisi di questo studio: DEEPSOIL (Rif. 2.3.1).

3.2 Modellazione della risposta del terreno

Nella pratica dell'ingegneria sismica, gli effetti di sito sono quantificati sia mediante modelli teorici che empirici; nei modelli empirici vengono adottati metodi di tipo statistico al fine di quantificare la variazione del moto al suolo attraverso il sito in esame. I modelli teorici consistono, invece, nell'implementazione delle analisi di propagazione delle onde, che sono ampiamente utilizzate per simulare gli effetti di risposta al suolo.

I modelli utilizzati per la risposta al suolo sono generalmente di tipo non lineare e coinvolgono un dominio del terreno di dimensioni limitate (dell'ordine da dieci a centinaia di metri).

Gli effetti di risposta al suolo sono più comunemente valutati utilizzando un'analisi di tipo monodimensionale, dove si assume che l'onda sismica si propaghi verticalmente attraverso una stratigrafia del terreno a strati orizzontali. Un fattore chiave che contraddistingue lo studio di risposta al suolo è sicuramente la scelta del modello del materiale del terreno. La modellazione teorica della risposta al sito monodimensionale può generalmente essere effettuata con analisi di tipo equivalente lineare (EL) o non lineare (NL).

Nel dettaglio, il modello EL è di gran lunga quello più utilizzato, in quanto richiede la definizione di parametri di input ben compresi e con significato fisico (velocità delle onde a taglio, peso di volume, curve di decadimento del modulo e di smorzamento). L'analisi NL, invece, offre una caratterizzazione

	 SAIPEM  ROSETTI MARINO  MICOPERI	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 13 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

più accurata del reale comportamento non lineare del terreno, tuttavia, l'implementazione della pratica standardizzata è principalmente limitata dalla complessità della stessa, dovuta all'iterazione di calcolo e alla definizione di parametri aggiuntivi.

3.2.1 Analisi nel dominio delle frequenze con modelli lineari equivalenti

Seed e Idriss (1969, Rif. 2.3.2) propone l'uso di uno schema lineare equivalente in cui tutti gli strati (da qui in avanti definiti come sottostrati, in quanto la necessità di una discretizzazione degli strati spessi) del profilo del terreno sono modellati con un modello costitutivo lineare-viscoelastico, assegnato con un set rappresentativo di modulo al taglio G e di rapporto di smorzamento D , che mantengono valori costanti durante l'eccitazione sismica. Siccome la non linearità degli strati è trattata come *lineare-equivalente*, questo schema potrebbe adottare le soluzioni di funzioni di trasferimento nel dominio delle frequenze, già sviluppato per i sistemi lineari, che non sarebbero, invece, possibili con un materiale realmente non lineare. Il procedimento proposto nello schema EL è iterativo (vedi Figura 2) e l'obiettivo è quello di fornire la coppia G e D più rappresentativa possibile di ogni sottostrato appartenente allo strato del terreno considerato.

L'iterazione inizia con una coppia iniziale di parametri rappresentativi a piccole deformazioni del modulo di taglio (G_{max}) e di rapporto di smorzamento del materiale (D_{min}) per tutti i sottostrati. Quindi, la soluzione con la forma più vicina è invocata, e diversi livelli di deformazione massima (γ_{max}) sono ottenuti per ogni sottostrato. Le deformazioni massime sono così calcolate e ridotte da un fattore definito come *Effective Shear Strain Ratio* (solitamente $SSR = 0.65$, ma può anche essere definito sulla base del momento magnitudo del terremoto secondo la formulazione $SSR = (M - 1)/10$) per ottenere le deformazioni effettive (γ_{eff}), che saranno utilizzate come valori di deformazione delle curve di decadimento ($G/G_{max} - \gamma$) e delle curve di rapporto di smorzamento ($D - \gamma$) per ottenere valori con deformazioni compatibili di G e D . Non appena i valori di $G(\gamma_{eq})$ e di $D(\gamma_{eq})$ sono aggiornati per ogni sottostrato, la soluzione teorica del sistema lineare è invocata nuovamente, un nuovo set di γ_{max} è ottenuto e γ_{eff} è calcolato, nuove coppie di $G(\gamma_{eq})$ e $D(\gamma_{eq})$ sono aggiornate. Le iterazioni continuano fino a che una convergenza sufficiente non viene raggiunta (solitamente un valore del 2-5%) in $G(\gamma_{eq})$ e $D(\gamma_{eq})$ per ogni sottostrato tra due iterazioni consecutive.

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	 SAIPER  ROSETTI MARINO  MICOPERI	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 14 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

I vantaggi del modello lineare equivalente è quello di una computazione semplice (grazie alla risoluzione del calcolo in dominio delle frequenze) e di pochi parametri di input.

Il codice più utilizzato per un'analisi lineare equivalente è SHAKE (Schnabel et al. 1972, Rif. 2.3.14) e la relativa versione modificata SHAKE91 (Idriss e Sun 1992, Rif. 2.3.16, EERA (Bardet et al. 2000, Rif. 2.3.15).

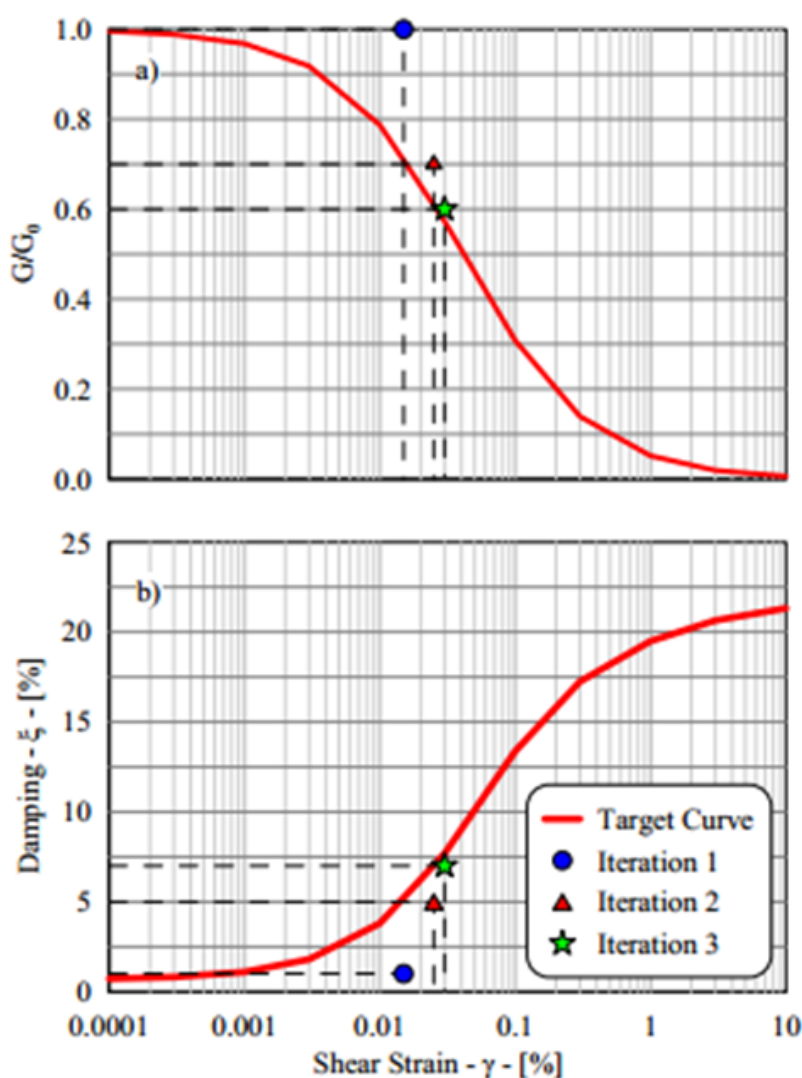


Figura 2 – Procedimento iterativo lineare equivalente: a) Curva di decadimento del modulo, b) Curva di smorzamento (Hashash et al. 2010, Rif. 2.3.12)

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 15 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

L'implementazione in DEEPSOIL è simile a quella implementata in SHAKE; non ci sono limiti riguardo il numero quantitativo di strati, proprietà di materiali o lunghezze del moto di input.

Nonostante i metodi nel dominio delle frequenze siano ampiamente utilizzati per la stima degli effetti di sito, per la semplicità e la bassa onerosità di calcolo, tuttavia presentano qualche restrizione. Ci sono casi (alta intensità sismica alla base della roccia e/o alti livelli di deformazione negli strati di terreno) nei quali una rigidità e smorzamento equivalenti del terreno non possono rappresentare in modo accurato il comportamento della colonna di terreno per ogni strato e durante l'intera durata di un evento sismico (le proprietà del terreno a deformazioni compatibili sono mantenuti costati durante il terremoto, a meno delle deformazioni piccole o grandi per un determinato tempo). In questi casi, una soluzione non lineare nel dominio del tempo è utilizzata per rappresentare l'andamento del modulo di taglio (G) e il rapporto dello smorzamento (D) durante la vibrazione.

In aggiunta, l'approccio lineare equivalente ha qualche limite relativamente ad un sovra-smorzamento alle alte frequenze e sovra-amplificazione al periodo del sito, in particolare durante una forte scossa (Kramer 1996, Rif. 2.3.17).

3.2.2 Analisi nel dominio del tempo con modelli non lineari

Il metodo di analisi impiegato nelle procedure implementate nel modello non lineare può per certi aspetti essere paragonato all'analisi di una risposta strutturale all'input di moto sismico del suolo. Allo stesso modo delle strutture, la colonna di terreno stratificata può essere idealizzata o come una successione di masse concentrate con gradi multipli di libertà (MDOF, *multi-degree-of-freedom*; vedi schematizzazione di Figura 3), o come un continuo discretizzato a elementi finiti con massa distribuita.

Quando i metodi sviluppati nel dominio delle frequenze sono derivati dalla soluzione dell'equazione dell'onda con specifiche condizioni al contorno, invece, i metodi sviluppati nel dominio del tempo risolvono un sistema di equazioni accoppiate che sono ricavate dall'equazione dinamica del moto:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g$$

Dove $[M]$ è la matrice delle masse, $[C]$ è la matrice dello smorzamento viscoso, $[K]$ è la matrice delle rigidità, $\{\ddot{u}\}$ è il vettore dell'accelerazione relativa nodale, $\{\dot{u}\}$ è il vettore delle velocità relative nodali e $\{u\}$ è il vettore dello spostamento relativo nodale. $\ddot{u}_g$ è l'accelerazione alla base della colonna di terreno e $\{I\}$ è il vettore unitario.

L'equazione di equilibrio dinamico è risolta numericamente ad ogni passo temporale usando un metodo di integrazione temporale (e.g. Newmark, 1959, Rif. 2.3.4, β -method).

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 16 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

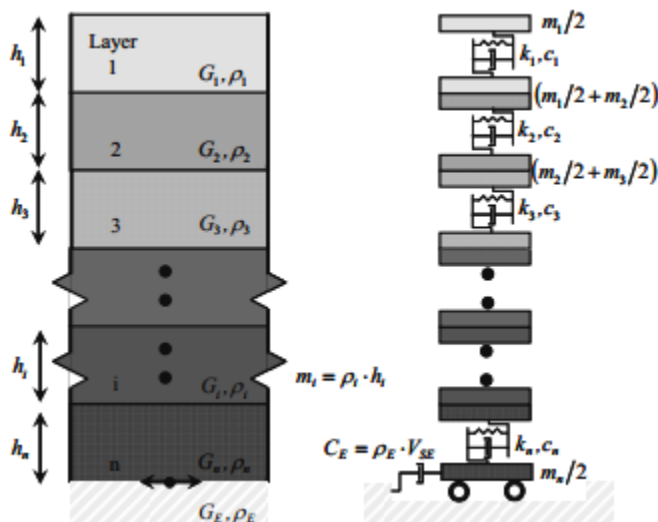


Figura 3 – Multi-degrees-of-freedom lumped parameter model: rappresentazione di un terreno stratificato orizzontalmente scosso alla base da una propagazione verticale dell'onda di taglio orizzontale (Hashash et al. 2001, Rif. 2.3.3)

Diverse soluzioni sono state sviluppate per propagare le onde di taglio attraverso un profilo di terreno di tipo non lineare; queste soluzioni sono state utilizzate in una varietà di software di analisi di risposta al sito.

Una vasta gamma di modelli costitutivi del terreno semplificati e avanzati è stata sviluppata e i modelli non lineari possono essere formulati per descrivere il comportamento del terreno sia per domini di sforzi totali che efficaci. Per l'approccio degli sforzi totali, acqua interstiziale e scheletro solido del terreno sono assunti a rispondere insieme, senza mostrare una risposta di rammollimento, invece, in termini di pressioni efficaci, il fluido interstiziale e lo scheletro solido del terreno interagiscono tra di loro risultando nei cicli di generazione/ dissipazione della sovrappressione dell'acqua e risposte contraenti/dilatanti sullo scheletro solido.

I modelli che appartengono alla famiglia dei modelli di terreno iperbolici possono essere descritti utilizzando le relazioni dei cicli sforzo-deformazione, definiti da una curva che esprime il legame costitutivo del materiale e da una serie di regole che descrivono il comportamento di carico-scarico, generazione di sovrappressioni dell'acqua e modulo ciclico di degradazione. Tale curva (*Backbone curve*, vedi Figura 4) è la relazione sforzo di taglio – deformazioni a taglio per un carico monotono.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 17 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

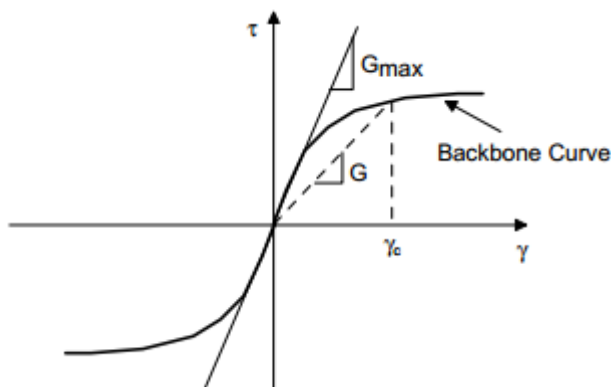


Figura 4 – Esempio di una curva *backbone* per un modello non lineare

I codici per analisi non lineare in dominio del tempo più comunemente utilizzati (compreso DEEPSOIL, Rif. 2.3.1) assumono variazioni del modello iperbolico rappresentato nella curva sforzo-deformazione del terreno, attraverso le regole estese di Masing di carico-scarico (Masing, 1926, Rif. 2.3.5) per modellare il comportamento isteretico del materiale.

Una varietà di modelli costitutivi non lineari è inclusa in DEEPSOIL, quello utilizzato in questo studio è il modello *Generalized Quadratic/Hyperbolic (GQ/H)* con controllo sugli sforzi di taglio. Al fine di considerare il corretto sforzo di taglio a grandi deformazioni (Philips e Hashash 2009, Rif. 2.3.6) per la quale viene generalmente effettuata un'estrapolazione da dati ottenuti sperimentalmente, viene adottata una correzione della resistenza al taglio, seguendo il modello *Generalized Quadratic/Hyperbolic (GQ/H)* proposta da Groholski et al. 2016, Rif. 2.3.7. Questo modello ha uno schema di adattamento della curva che automaticamente corregge le curve di riferimento (e.g. Darendeli 2001, Rif. 2.3.18, basato su determinati valori di sforzi di taglio a grandi deformazioni).

I parametri coinvolti nell'adattamento della curva sono utilizzati per preservare il più possibile le curve di decadimento del modulo ottenute da studi di riferimento e modificano i valori a grandi deformazioni basati sui valori di sforzi a taglio a grandi deformazioni, dati come parametri di input per tutti gli strati del terreno.

Quando vengono utilizzate le curve costitutive basate sui dati di resistenza al taglio, le analisi forniscono una modellazione più realistica del comportamento a grandi deformazioni, risultando in genere in una diminuzione delle deformazioni di taglio massime lungo il profilo del terreno (Chiu et al. 2008, Rif. 2.3.8) e una leggera crescita dei valori di accelerazione spettrale in superficie.

Lo smorzamento viscoso è incorporato nella maggior parte dei metodi di analisi non lineari poiché lo smorzamento a piccole deformazioni ($< 10^{-4} - 10^{-2} \%$) non viene adeguatamente colto dai modelli non lineari. Questo accade a seguito del comportamento della curva costitutiva del materiale che è quasi lineare a piccole deformazioni, e quindi causa uno smorzamento quasi nullo quando questa viene utilizzata in congiunzione alle regole estese di Masing. L'aggiunta del termine di smorzamento viscoso evita risposte non realistiche per problemi che coinvolgono piccole deformazioni (Vucetic e Dobry, 1986, Rif. 2.3.9). Lo smorzamento viscoso è spesso assunto proporzionale sia alla massa che alla rigidezza del sistema. La formulazione dello smorzamento, originariamente proposta da Rayleigh e Lindsay (1945), Rif. 2.3.10 definisce la matrice dello smorzamento viscoso $[C]$ come segue:

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 18 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

$$[C] = a_0[M] + a_1[K],$$

dove a_0 e a_1 sono i coefficienti di smorzamento di Rayleigh e dipendono da due periodi di oscillazione (solitamente il primo e un altro target).

DEEPSOIL consente di specificare lo smorzamento viscoso mediante schemi semplificati ($a_0 = 0$) o completi. Inoltre, DEEPSOIL incorpora una formulazione di smorzamento viscoso estesa, dove la matrice dello smorzamento può essere costituita da qualsiasi combinazione delle matrici della massa e della rigidità (Clough e Penzien, 1993, Rif. 2.3.11) nella forma:

$$[C] = [M] \cdot \sum_b^{N-1} a_b ([M]^{-1} [K])^b,$$

dove N è il numero delle frequenze/modi incorporati. Il coefficiente a_b è un valore scalare assumendo un valore di rapporto di smorzamento costante D_n attraverso il profilo definito come segue:

$$D_n = \frac{1}{4\pi f_n} \sum_{b=0}^{N-1} a_b (2\pi f_n)^{2b},$$

dove f_n è la frequenza naturale all' n -esimo modo di vibrare ($f_n = (n - 1) \cdot V_s / 4H$). Per valori di $b = 1/2$ (Hashash et al, 2001, Rif. 2.3.3) si può dimostrare che lo smorzamento viscoso del sistema non dipende dalla frequenza. Nel presente studio si è utilizzato lo smorzamento viscoso indipendente dalla frequenza.

Come già menzionato, diversi modelli non lineari seguono le regole di Masing (Masing 1926, Rif. 2.3.5) per descrivere un comportamento isteretico quando un terreno è sottoposto a carico ciclico. L'adozione delle regole di Masing può comportare una sovrastima dello smorzamento ad alte deformazioni (Kwok et al., 2007, Rif. 2.3.13). Perciò, per superare questa problematica Phillips e Hashash (2009), Rif. 2.3.6, hanno proposto una formulazione che modifica i criteri di carico-scarico secondo quanto previsto dalla regola di Masing. Il modello *non-Masing* incluso in DEEPSOIL è il modello *MDRF Pressure-Dependent Hyperbolic*. Questo modello è implementato come fattore di riduzione che altera in modo efficace le regole di Masing introducendo un fattore di riduzione: le curve di decadimento del modulo e di smorzamento possono quindi essere adattate contemporaneamente. Il comportamento dello smorzamento è quindi modificato come:

$$D_{Masing, hysteretic} = F(\gamma_m) \cdot \xi_{Masing},$$

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 19 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

dove $F(\gamma_m)$ è il fattore di riduzione calcolato come funzione di γ_m , la massima deformazione a taglio subita dal suolo in un dato momento, e ξ_{Masing} è lo smorzamento isteretico delle regole calcolato utilizzando le regole di Masing, basato sulla curva di decadimento del modulo. Due formulazioni di $F(\gamma_m)$ sono implementate in DEEPSOIL. In questo caso studio è stato adottato il modello *MDRF Pressure-Dependent Hyperbolic* (Phillips e Hashash, 2009, Rif. 2.3.6), in cui il fattore di riduzione segue la formulazione seguente:

$$F(\gamma_m) = p_1 - p_2 \left(1 - \frac{G_{\gamma_m}}{G_{max}} \right)^{p_3},$$

dove p_1 , p_2 e p_3 sono parametri adimensionali selezionati per ottenere il miglior fitting possibile rispetto la curva di smorzamento target.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 20 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

4. Moti di input sismico

4.1 Introduzione

Questa sezione presenta la selezione degli input sismici che saranno considerati per l'implementazione delle analisi di risposta sismica locale.

4.2 Definizione degli spettri target

Lo spettro target di progetto è stato definito sulla base delle normative territoriali (NTC-18, Rif. 2.1.1) per il periodo di ritorno $T_r = 949$ anni, per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), così come è stato considerato nel progetto delle strutture. Nelle figure di seguito sono riportati gli spettri elastici di riferimento su roccia (categoria del sottosuolo A) ottenuti a partire da una vita nominale della struttura di 50 anni ed un coefficiente d'uso della costruzione (cu) di 2, definito per una classe d'uso IV.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 21 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

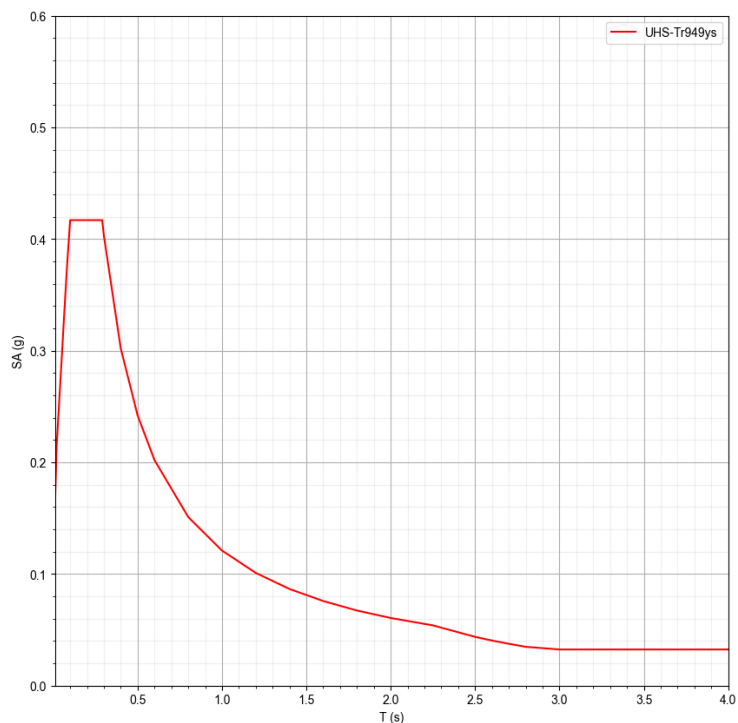


Figura 5 - Uniform Hazard Spectrum (UHS) ottenuto da NTC-18 (Rif. 2.1.1) per Tr 949 (SLV) (componente orizzontale, 5% damping, categoria del sottosuolo A) (scala naturale)

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 22 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

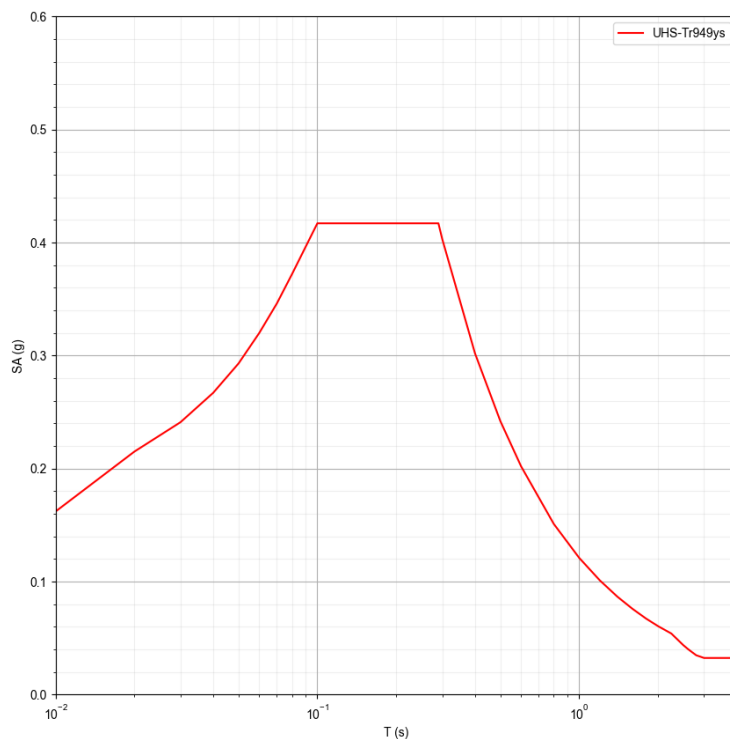


Figura 6 - Uniform Hazard Spectrum (UHS) ottenuto da NTC-18 (Rif. 2.1.1) per Tr 949 (SLV) (componente orizzontale, 5% damping, categoria del sottosuolo A) (scala semilogaritmica)

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 23 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Tabella 1 – Uniform Hazard Spectrum (UHS) da NTC-18 (Rif. 2.1.1) per Tr 949 (SLV) (componente orizzontale, 5% damping, categoria del sottosuolo A)

t(s)	Sa (g)
0.01	1.62E-01
0.02	2.15E-01
0.03	2.41E-01
0.04	2.67E-01
0.05	2.93E-01
0.06	3.20E-01
0.07	3.46E-01
0.08	3.72E-01
0.1	4.17E-01
0.3	4.17E-01
0.4	3.02E-01
0.5	2.42E-01
0.6	2.02E-01
0.8	1.51E-01
1	1.21E-01
1.2	1.01E-01
1.4	8.66E-02
1.6	7.58E-02
1.8	6.73E-02
2	6.06E-02
2.25	5.40E-02
2.5	4.37E-02
2.6	4.04E-02
2.7	3.75E-02
2.8	3.48E-02
3	3.24E-02

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 24 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

4	3.24E-02
---	----------

4.3 Metodologia di selezione e matching delle registrazioni di moto al suolo

Lo spettro orizzontale UHS di riferimento definito su condizioni equivalenti rocciose (categoria di sottosuolo A), presentato nella sezione precedente 4.2, è stato assunto come spettro target per la selezione delle storie temporali del moto di accelerazione di input, utilizzate per la RSL.

Il procedimento sviluppato può essere riassunto in due fasi: la prima prevede la selezione e la seconda il matching degli spettri di risposta. La fase di selezione è implementata in accordo con i seguenti passaggi:

- 1) Sono estratti dal database gli *Earthquake Ground Motions (EGMs)* rappresentativi del moto di riferimento su roccia al sito studiato;
- 2) Tutte le registrazioni sono valutate in accordo con i limiti della media ($\epsilon_{threshold,avg}$) e del massimo errore di accelerazione spettrale ($\epsilon_{threshold,max}$) definiti dalle formule seguenti:

$$\epsilon_{acc,avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{S_{e,acc}(T(i)) - S_{e,target}(T(i))}{S_{e,target}(T(i))} \right| \leq \epsilon_{threshold,avg},$$

$$\epsilon_{acc,max} = \max \left| \frac{S_{e,acc}(T(i)) - S_{e,target}(T(i))}{S_{e,target}(T(i))} \right| \leq \epsilon_{threshold,max}.$$

- 3) Ogni registrazione che soddisfa i requisiti precedenti è valutata sulla base dei seguenti criteri (C_j). Considerando ogni criterio, le registrazioni sono classificate dal migliore al peggiore e valutate con s_{ij} da 1 (migliore) a 100 (peggiore). Quindi, gli EGMs hanno una classifica s_{ij} per ogni i -th moto al suolo e j -th criterio.
 - a. C1: media spettro compatibile con l'intero range di periodi
 - b. C2: massima deviazione spettrale sull'intero range di periodi
 - c. C3: spettro compatibilità all'interno del range di periodi desiderato ($T_{1min} < T < T_{1max}$)
 - d. C4: spettro compatibilità all'interno del restante range di periodi ($T > T_{1max}$)
 - e. C5: dipendenza dalla classe di sito

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	 SAIPEM  ROSETTI MARINO  MICOPERI	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 25 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

f. C6: vicinanza alla PGA target

- 4) Il peso definito dall'utente per ogni criterio (W_j) è combinato con le corrispondenti valutazioni (S_i). Gli N EGMs migliori (i.e. le registrazioni con la minor valutazione S_i) sono selezionati, dopo aver verificato che nel set selezionato non ci siano componenti orizzontali corrispondenti allo stesso evento e alla stessa stazione. La valutazione cumulativa è quindi ottenuta come segue:

$$S_i = \sum_{j=1}^6 S_{ij} W_j.$$

Successivamente la fase di selezione, che fornisce n set di registrazioni non scalate, si può procedere con la fase di matching. In questo caso, le registrazioni sono iterativamente scalate nel dominio delle frequenze in modo tale da trovare il migliore spettro di risposta che più si avvicina a quello target.

Il matching spettrale è un procedimento effettuato per ogni registrazione selezionata e può essere definito nei seguenti passaggi per $k=1 \dots M$ iterazioni (solitamente, $M=5$ iterazioni sono sufficienti).

- 1) Gli spettri di risposta di accelerazione $S_{acc,k}(T_m)$ sono calcolati (a partire dalla registrazione non scalata se $k=1$ e per l'accelerogramma modificato per $k>1$) per un set di periodi T_m .
- 2) Il rapporto di risposta spettrale $R_k(T_m) = S_{acc,target}(T_m) / S_{acc,k}(T_m)$ è calcolato.
- 3) L'ampiezza dello spettro di Fourier $|FAS|_k$ è calcolato e moltiplicato nel dominio delle frequenze da R_k a frequenze discrete $f_k = 1/T_m$. Le frequenze intermedie definite tra f_k e f_{k+1} (or f_{k-1}) sono interpolate linearmente.
- 4) La fase della trasformata di Fourier viene mantenuta immutata.
- 5) La trasformata di Fourier inversa è calcolata e l'accelerogramma modificato viene prodotto per lo step 1 all'iterazione $k + 1$.

Il procedimento esplicito viene implementato nel software open-source S&M, rilasciato dal Politecnico di Milano, vedi Rif. (2.3.19).

Per implementare la RSL su 7 diverse storie temporali, vengono selezionate le registrazioni di una direzione orizzontale (tra le 3 componenti disponibili nei database contenuti in S&M) ed eseguito il matching per ogni evento sismico.

Di seguito (vedi Tabella 2, Figura 7) sono riportati gli eventi selezionati e gli spettri di risposta elastici ottenuti sono rappresentati assieme allo spettro target H-UHS e lo spettro medio, sovrapposti per confronto.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 26 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

4.4 Input di moto sismico selezionati

Al fine di migliorare l'accordo spettrale tra gli spettri di risposta delle storie temporali e lo spettro target, è stato implementato il procedimento di matching spettrale descritto nella precedente sezione. Nelle figure seguenti sono mostrate in termini di spettri elastici le storie temporali selezionate (Figura 7) e successivamente sottoposte al processo di spectral matching (Figura 8) per il periodo di ritorno considerato della sollecitazione sismica ($T_r=949$ anni). In Tabella 2 sono invece riportati i dettagli degli accelerogrammi selezionati.

Infine, i dettagli delle storie temporali in termini di accelerazione, velocità e spostamento confrontati pre e post spectral matching sono riportati in Appendice 1.

Tabella 2 - Eventi selezionati e spettro compatibili con H-UHS per T_r 949 anni. La classe di sito (SC) è attribuita in accordo con la classificazione EC8.

Event	Date	Mw	Waveform	Rep(km)	SC	Vs30(m/s)
South-Iceland	21/06/2000	6.4	20000621_0051_105_Tr	21.37	B	560.33
Near-Miyakejima-Island	30/07/2000	6.4	20000730_1225_TKY011_NS	21.59	B	408
Christchurch	21/02/2011	6.2	20110221_2351_CACS_H1	19.38	B	452
Norcia	30/10/2016	6.5	20161030_0640_CSC_EW	14.9	B	683
Mammoth Lakes-10	07/01/1983	5.34	RSN320_2	8.91	B	382.12
Coalinga-05	22/07/1983	5.77	RSN409_2	8.55	B	474.15
Chalfant Valley-02	21/07/1986	6.19	RSN550_2	15.42	B	585.12

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 27 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

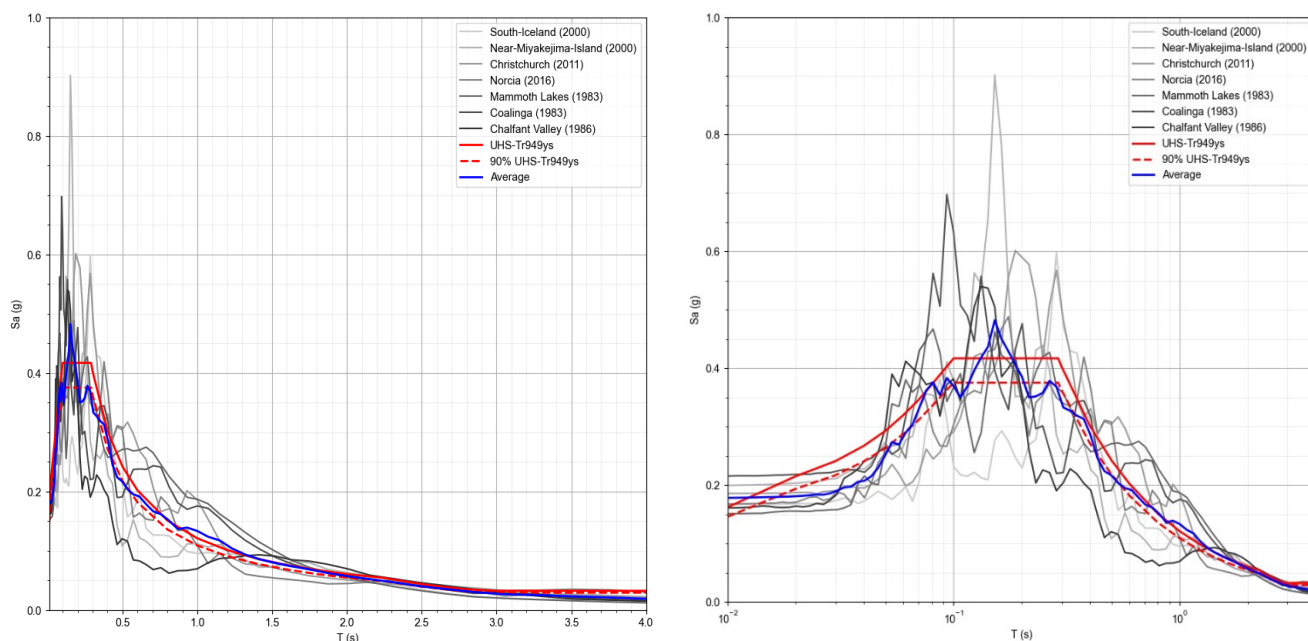
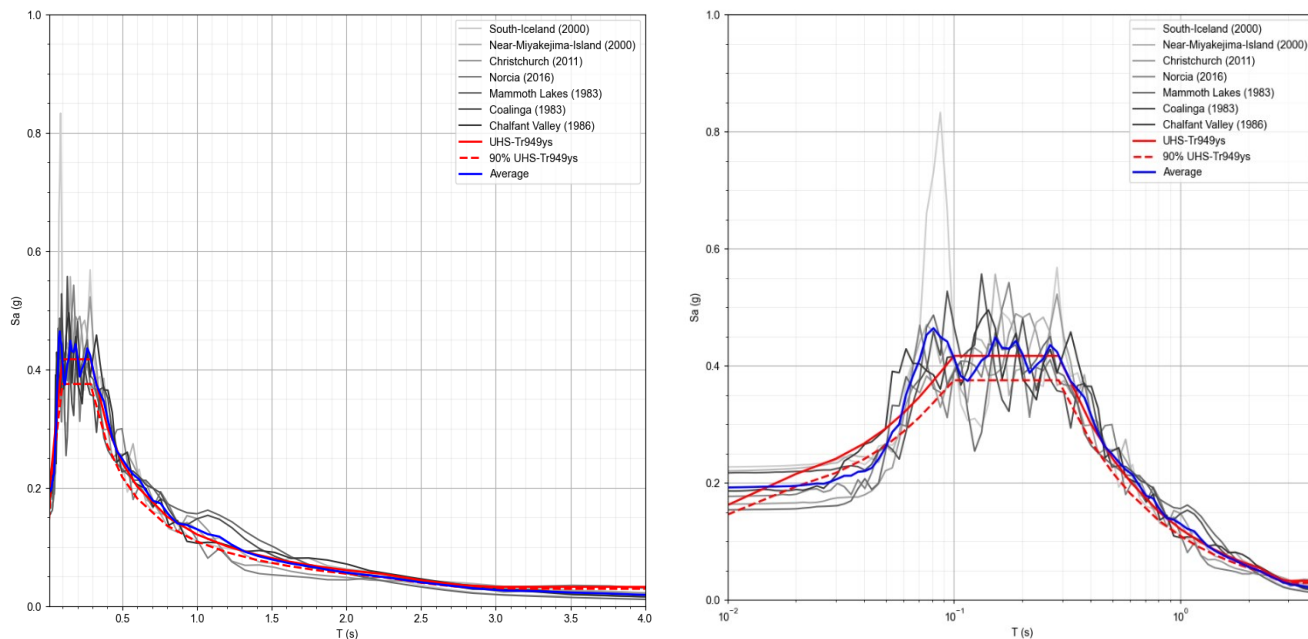


Figura 7 - Spettri di risposta elastici (5% smorzamento) degli eventi selezionati e spettro compatibile con H-UHS definito per $T_r=949$ anni. La linea blu è lo spettro medio (scala orizzontale normale e logaritmica)



Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 28 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Figura 8 - Spettri di risposta elastici (5% smorzamento) ottenuti dal matching spettrale delle storie temporali selezionate per H-UHS definito per $T_r=949$ anni. La linea blu è lo spettro medio (scala orizzontale normale e logaritmica)

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 29 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

5. Definizione del profilo di terreno di riferimento per l'analisi di risposta sismica locale

5.1 Introduzione

La presente sezione fornisce la definizione del profilo di terreno di riferimento considerato per la propagazione delle storie temporali nelle analisi di RSL. Maggiori dettagli sulle condizioni geotecniche del sito sono riportati nella relazione geotecnica delle opere (Rif. 2.2.13).

I principali dati geotecnici disponibili fanno riferimento all'indagine geotecnica eseguita nell'anno 1984 (Rif. 2.2.1) ma in aggiunta sono recentemente stati resi disponibili i risultati preliminari delle indagini geotecniche eseguite per questo progetto. In particolare sono ad oggi disponibili i dati numerici di alcune prove CPTU eseguite nell'area del pontile e di n.3 prove SCPT con la misurazione delle velocità delle onde di taglio (si veda la Figura 9 che mostra l'ubicazione delle indagini).

Il profilo delle velocità delle onde di taglio e dei parametri geotecnici richiesti per la propagazione delle onde sismiche è stato definito sulla base dell'interpretazione dei dati geotecnici riportati in Rif. 2.2.13 come descritto nelle sezioni seguenti.

5.2 Valutazione generale della stratigrafia del terreno per le analisi di RSL

I profili necessari per l'analisi di RSL richiedono la definizione delle seguenti informazioni: lo spessore e la tipologia di strati che costituiscono il profilo, il profilo delle velocità delle onde di taglio, la densità o il peso di volume del profilo, le curve di decadimento di modulo e di smorzamento (Modulus Reduction and Damping Curves (MRDC)) per ognuno degli strati individuati.

I dati disponibili sono utilizzati per valutare ognuno degli aspetti sopra menzionati. Nelle seguenti sottosezioni, il processo di interpretazione dei dati geotecnici disponibili è stato sviluppato per la definizione di ogni aspetto del profilo di terreno di progetto descritto.

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 30 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

La Figura 9 rappresenta la mappa con le ubicazioni dei test in situ CPT disponibili della recente campagna di indagine 2024, con sovrapposte le opere del progetto FSRU. I risultati in termini di resistenza alla punta q_c , attrito laterale f_s , pressione u_2 e rapporto delle resistenze R_f sono riportati in Figura 10.

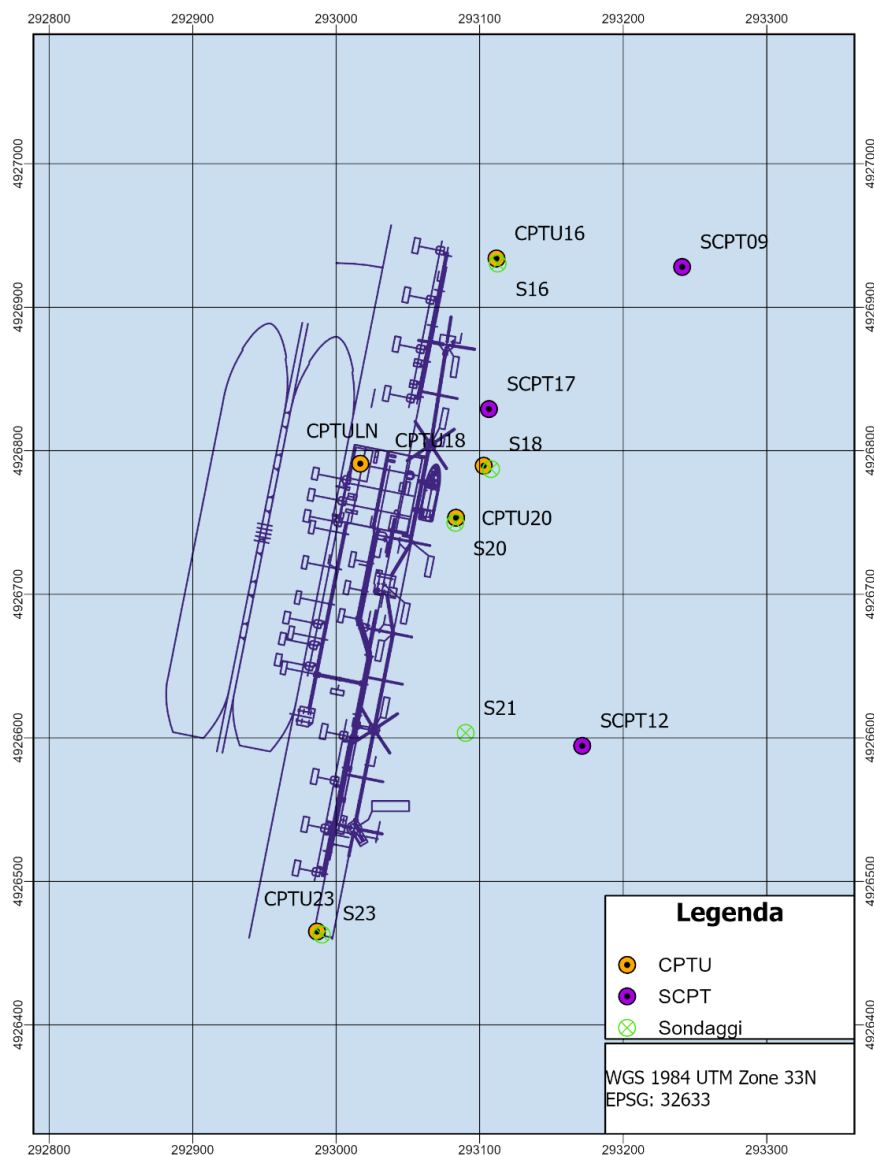


Figura 9 – Mappa delle prove CPT e SCPT disponibili dalla recente (2024) campagna di indagine

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 31 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Le condizioni geotecniche locali sono discusse nel dettaglio nella relazione geotecnica di progetto (Rif. 2.2.13), a cui si rimanda per approfondimenti. Nel presente paragrafo si procede a richiamarne sinteticamente gli aspetti salienti, al fine di giungere alla definizione dei profili di riferimento da adottarsi nelle analisi di risposta sismica locale.

Al sito è stata identificata una stratigrafia generale che, facendo principalmente riferimento alla zona di progetto, può essere riassunta come descritto nel seguito (vedi Tabella 3).

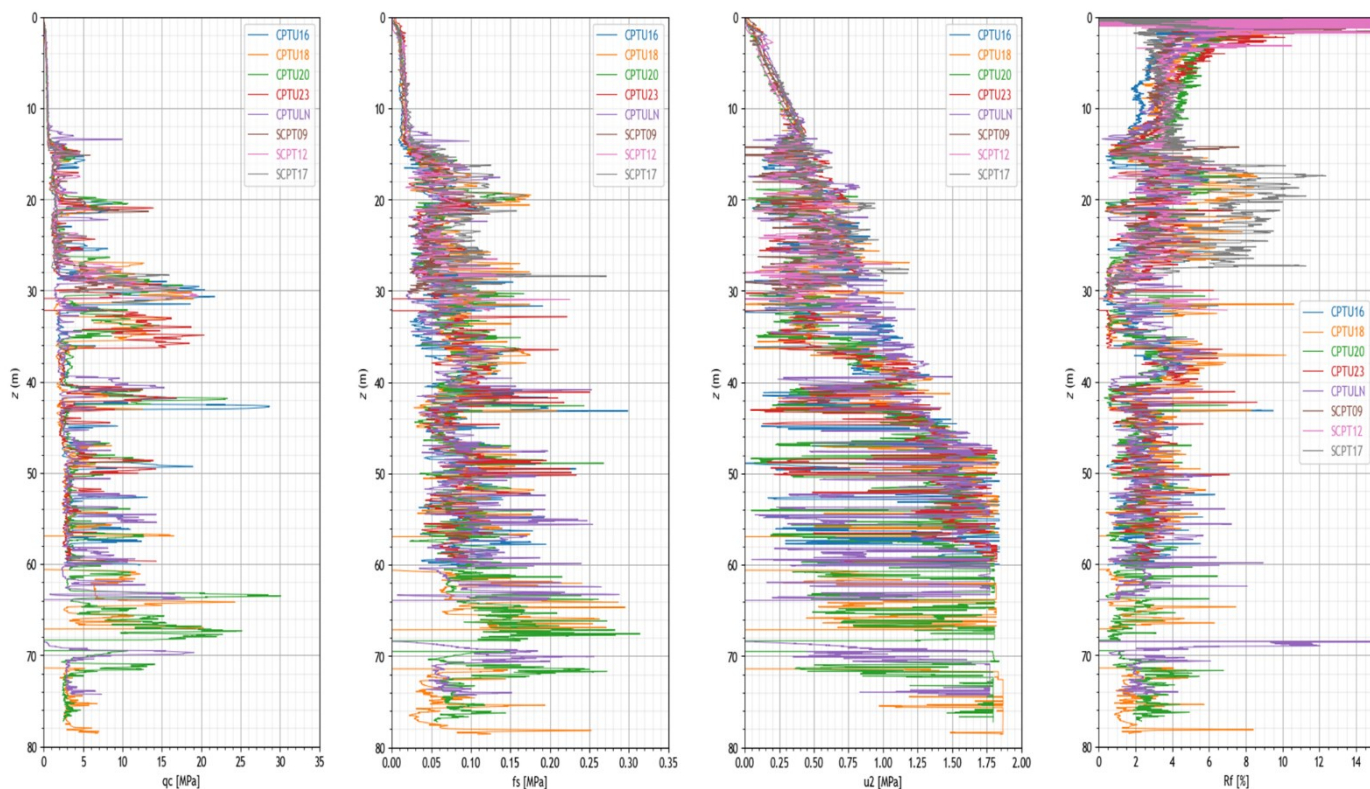


Figura 10 – Dati CPT (2024) (metri da fondale marino)

Tabella 3 - Stratificazione assunta di riferimento per il profilo di terreno

Profondità (m da fondale)		Soil type
da	a	
0.0	15.0	CLAY
15.0	16.5	SAND

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 32 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

16.5	20.3	CLAY
20.3	21.3	SAND
21.3	28	CLAY
28	31.5	SAND
31.5	33	CLAY
33	35	SAND
35	41	CLAY
41	43	SAND
43	80	CLAY
80	83	SAND
83	165	CLAY

5.2.1 Valutazione dei profili della velocità delle onde di taglio e del peso totale di volume

Per la definizione del profilo della velocità delle onde di taglio sono stati considerati i dati delle prove CPT e di SCPT ubicate in Figura 9. Come già anticipato, per lo svolgimento delle analisi di risposta sismica locale è inoltre necessario definire i parametri dinamici del terreno, con particolare riferimento al profilo della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) e alle curve di decadimento $G/G_0 - \gamma$ e del fattore di smorzamento $D - \gamma$.

Per la determinazione dei profili di V_s con la profondità, è possibile nel caso in esame fare riferimento sia a misure dirette che a stime indirette basate sull'interpretazione con correlazioni empiriche dei risultati delle prove penetrometriche statiche (CPT), come nel seguito dettagliato.

Per quanto riguarda le prove penetrometriche statiche CPT, i valori di V_s possono essere stimati a partire dai risultati di queste indagini tramite la procedura proposta da Robertson (si veda ad esempio il Rif. 2.3.20):

$$V_s = \left[\left(10^{(0.55 \cdot I_c + 1.68)} \right) (q_t - \sigma_v) / p_a \right]^{0.5} \quad (\text{Robertson, 2009})$$

dove i simboli sopra adottati rivestono i significati riportati nel seguito; per maggiori dettagli sull'interpretazione delle prove CPT in accordo all'approccio "classico" di Robertson, si rimanda alla relazione geotecnica di progetto (Rif. 2.2.13):

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 33 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

- V_s : velocità delle onde di taglio (m/s);
 q_t : resistenza alla punta corretta (kPa);
 I_c : Indice di Robertson (SBTn);
 σ_v : tensione verticale (kPa);
 p_a : pressione atmosferica (100 kPa).

I risultati in termini di V_s delle interpretazioni delle prove CPT, sono raccolti in Figura 11 e Figura 12. È immediato osservare il buon accordo reciproco tra i valori ottenuti dall'interpretazione delle prove CPT, nonché tra queste ultime e le prove SCPT disponibili.

Alla luce di questi risultati, si è ritenuto ragionevole tenere conto di tutti i dati e procedere alla definizione di un unico profilo che segue l'andamento medio derivato dall'interpretazione delle prove CPT, e prosegue con il medesimo andamento di crescita per profondità superiori a quelle indagate dalle prove penetrometriche statiche (curva di colore nero in Figura 11 e Figura 12); al di sotto degli -80 m s.l.m., massima profondità rispetto al quale abbiamo dati CPT disponibili, è stato assunto un graduale incremento della V_s , fino a 800 m/s. Il profilo completo, fino alle condizioni elastiche di roccia affiorante è raffigurato di seguito in Figura 13. Al fine di valutare l'impatto della scelta dell'andamento delle V_s al di sotto della massima profondità indagata dalle prove CPT è stata poi eseguita una analisi di sensitività come descritto nel capitolo 7.

Il peso di volume naturale del terreno, invece, è stato assegnato sulla base delle informazioni geotecniche pregresse, in quanto ancora non si dispongono dei risultati finali dei test di laboratorio in corso. Per i terreni più superficiali sono stati assegnati valori compresi tra circa 17 kN/m³ e 18.5 kN/m³, invece, per i valori più profondi è stato assegnato un peso di volume naturale di circa 19 kN/m³.

La stratificazione ed i parametri utilizzati per le analisi di RSL sono riassunti nella seguente tabella.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 34 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

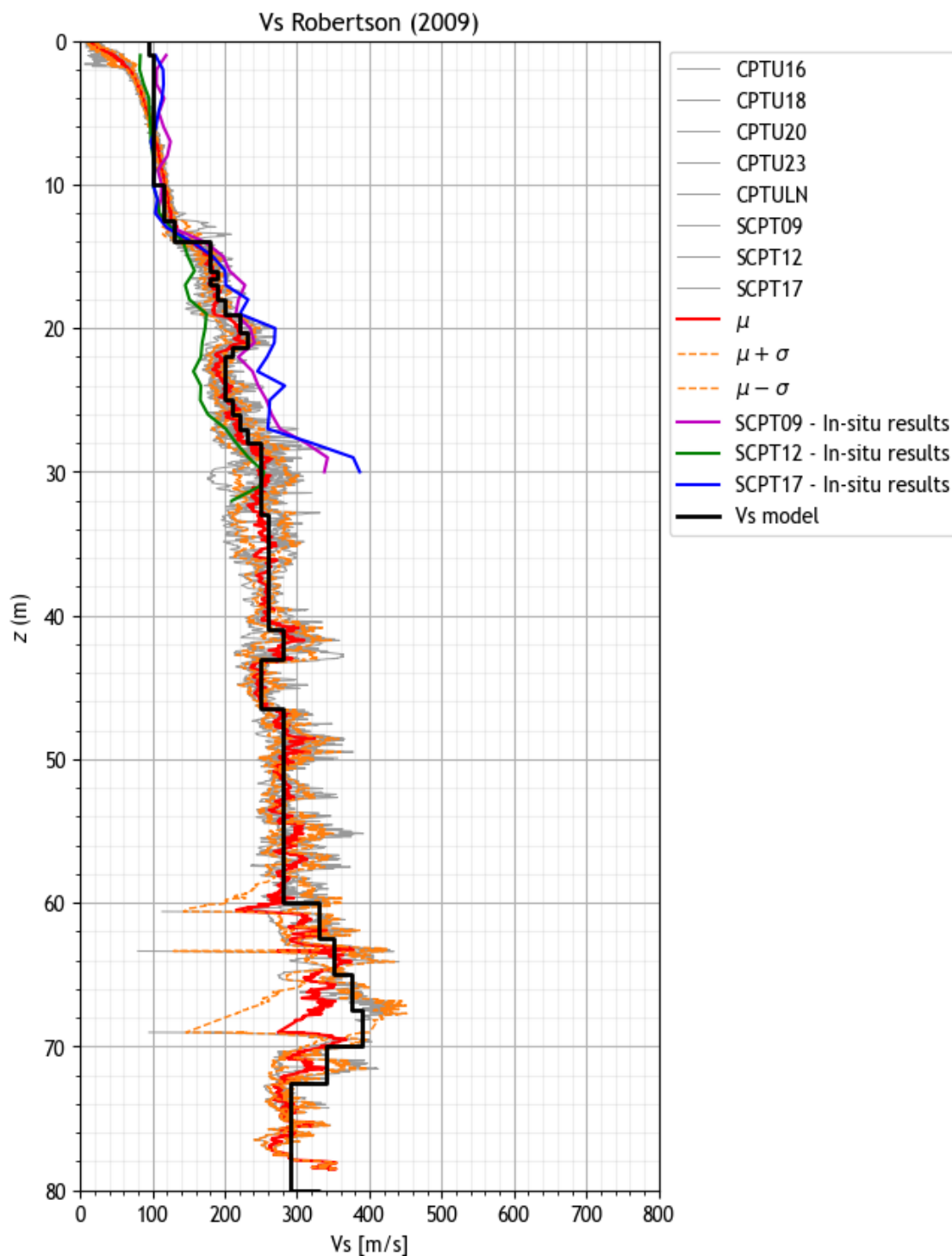


Figura 11 – Velocità delle onde di taglio V_s – tratto 0-80m di profondità da fondale marino

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 35 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 36 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

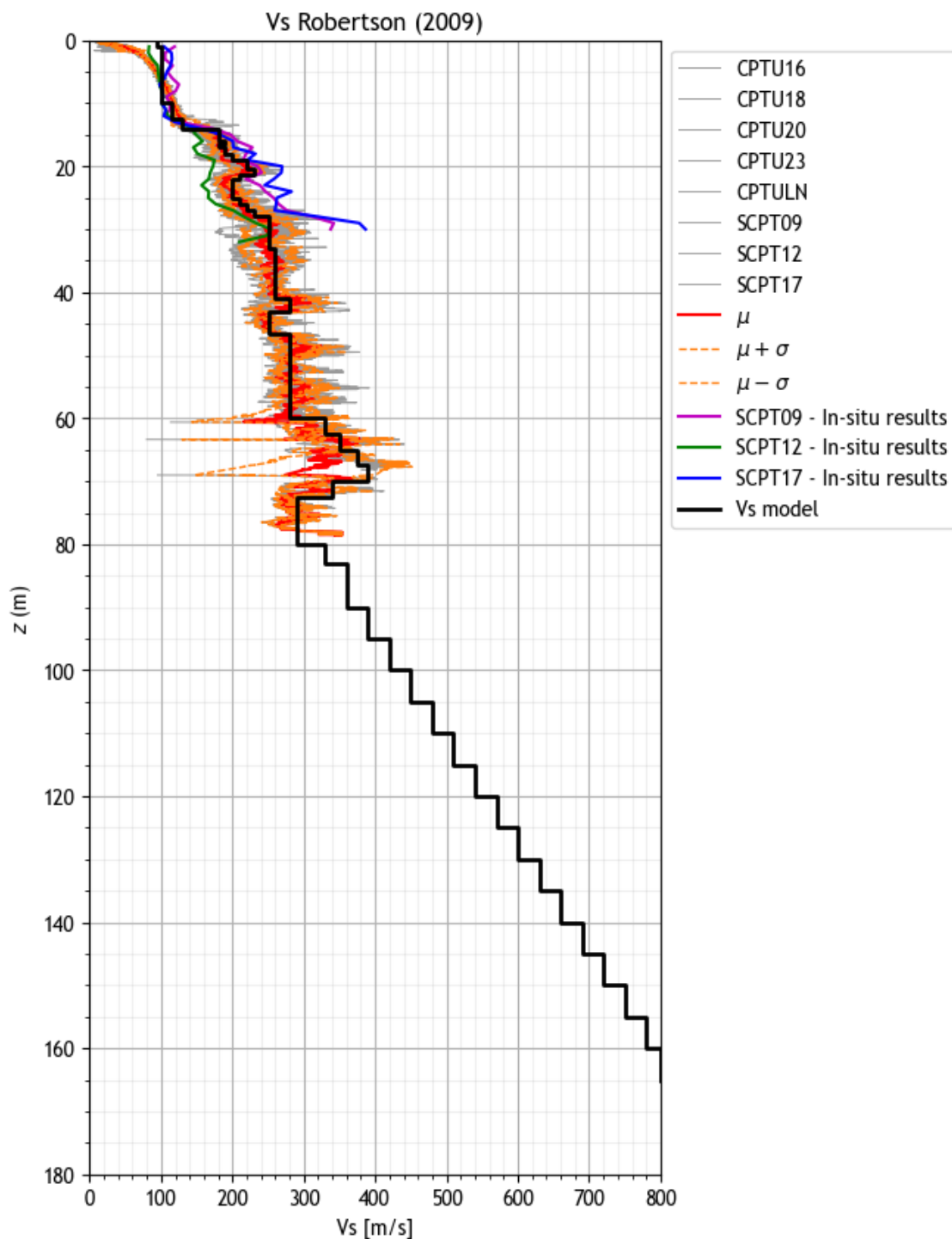


Figura 12 - Velocità delle onde di taglio V_s – massime profondità

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 37 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 38 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Tabella 4 – Stratigrafia e parametri di input per RSL

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 39 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Strato	Materiale	Profondità		Spessore strato [m]	Vs [m/s]	γ [kN/m3]
		da	a			
		[mslm]	[mslm]			
1	CLAY	0	1	1	95	17.17
2	CLAY	1	2	1	100	17.17
3	CLAY	2	5	3	100	17.17
4	CLAY	5	10	5	100	18.15
5	CLAY	10	12.5	2.5	115	18.15
6	CLAY	12.5	14	1.5	130	18.15
7	CLAY	14	15	1	180	18.15
8	SAND	15	16	1	180	18.64
9	SAND	16	16.5	0.5	190	18.15
10	CLAY	16.5	17	0.5	180	18.15
11	CLAY	17	18	1	190	19.13
12	CLAY	18	19	1	200	19.13
13	CLAY	19	20.3	1.3	220	19.13
14	SAND	20.3	21.3	1	230	19.13
15	CLAY	21.3	22	0.7	210	19.13
16	CLAY	22	23	1	200	19.13
17	CLAY	23	24	1	200	19.13
18	CLAY	24	25	1	200	19.13
19	CLAY	25	26	1	210	19.13
20	CLAY	26	27	1	220	19.13
21	CLAY	27	28	1	230	19.13
22	SAND	28	29	1	250	19.13
23	SAND	29	30	1	250	19.13
24	SAND	30	31.5	1.5	250	19.13
25	CLAY	31.5	33	1.5	250	19.13
26	SAND	33	35	2	260	19.13
27	CLAY	35	38	3	260	19.13
28	CLAY	38	41	3	260	19.13
29	SAND	41	43	2	280	19.13
30	CLAY	43	45	2	250	19.13
31	CLAY	45	46.5	1.5	250	19.13
32	CLAY	46.5	50	3.5	280	19.13
33	CLAY	50	52	2	280	19.13
34	CLAY	52	54.5	2.5	280	19.13
35	CLAY	54.5	57.5	3	280	19.13
36	CLAY	57.5	60	2.5	280	19.13
37	CLAY	60	62.5	2.5	330	19.13
38	CLAY	62.5	65	2.5	350	19.13
39	CLAY	65	67.5	2.5	375	19.13
40	CLAY	67.5	70	2.5	390	19.13
41	CLAY	70	72.5	2.5	340	19.13
42	CLAY	72.5	75	2.5	290	19.13
43	CLAY	75	80	5	290	19.13
44	SAND	80	83	3	330	19.13
45	CLAY	83	90	7	360	19.13
46	CLAY	90	95	5	390	19.13
47	CLAY	95	100	5	420	19.13
48	CLAY	100	105	5	450	19.13
49	CLAY	105	110	5	480	19.13
50	CLAY	110	115	5	510	19.13
51	CLAY	115	120	5	540	19.13
52	CLAY	120	125	5	570	19.13
53	CLAY	125	130	5	600	19.13
54	CLAY	130	135	5	630	19.13
55	CLAY	135	140	5	660	19.13
56	CLAY	140	145	5	690	19.13
57	CLAY	145	150	5	720	19.13
58	CLAY	150	155	5	750	19.13
59	CLAY	155	160	5	780	19.13
60	CLAY	160	165	5	800	19.13

Documento di proprietà Snam Rete Gas

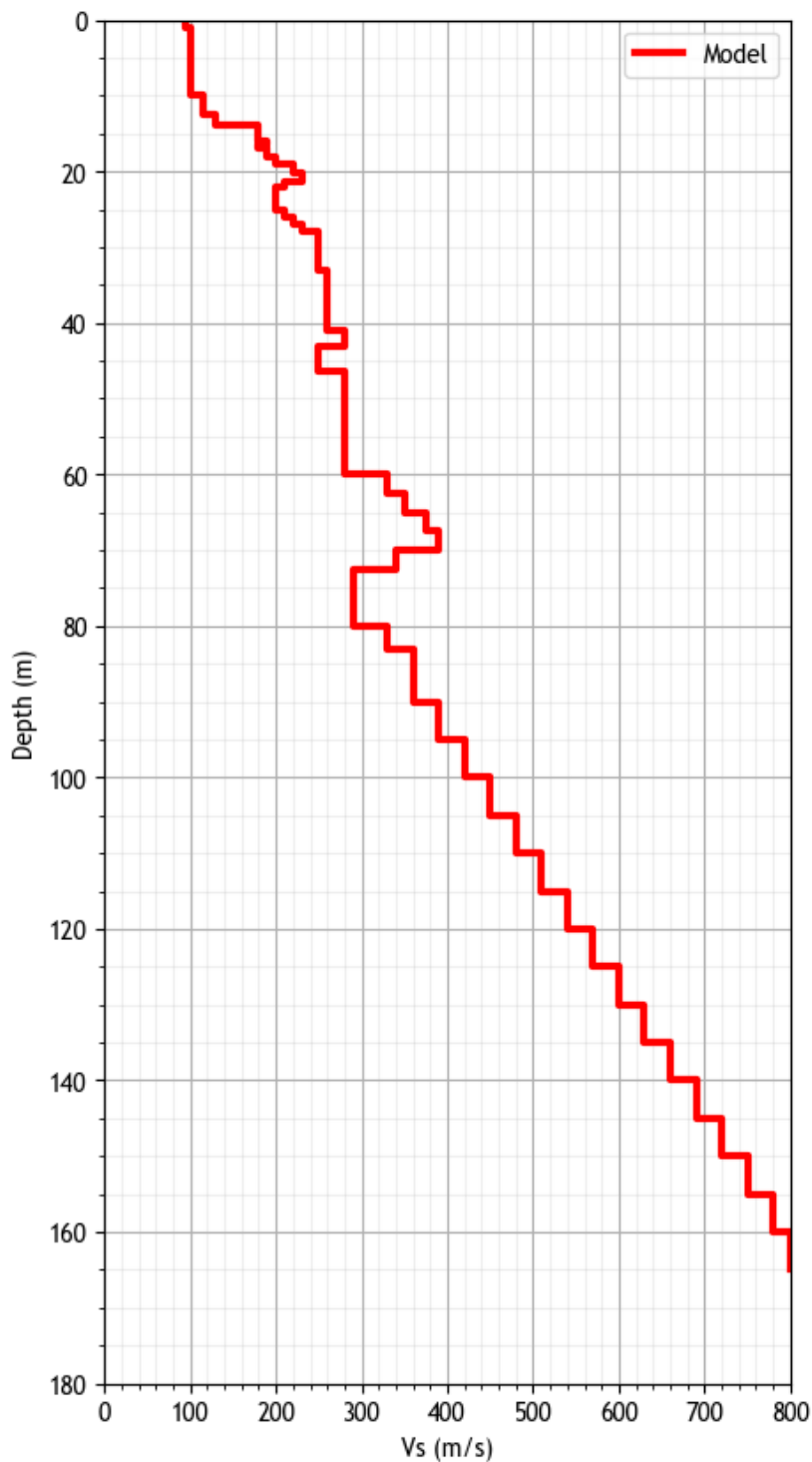
File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODEL

LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

ON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 40 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502



Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 41 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Figura 13 – Profilo della velocità delle onde di taglio con la profondità

5.2.2 Curve di decadimento e di smorzamento

Per le analisi RSL lineari non lineari e per le analisi RSL lineari equivalenti, il comportamento non lineare dei terreni è descritto mediante l'evoluzione della rigidità al taglio e dell'equivalente rapporto di smorzamento viscoso con il livello di deformazione. La forma e il decadimento (o la crescita) di queste curve dipendono fortemente dal tipo di terreno considerato, dalla distribuzione granulometrica, dalla frequenza con cui l'eccitazione esterna dovrebbe colpire il suolo, dal numero di cicli equivalenti in cui l'eccitazione esterna viene convertita, tenendo conto del livello di rigidità e di degradazione della resistenza che può causare e di molti altri fattori e parametri del suolo che sono specifici del tipo di terreno. Per i materiali argillosi, tra i possibili fattori di influenza, gli effetti predominanti sono associati all'indice di plasticità e al rapporto di sovra-consolidazione. Per i materiali a grana grossa, come i terreni sabbiosi, possono essere rilevanti altri parametri, come il D_{50} (dimensione delle particelle corrispondente alla frequenza cumulativa del 50%), dedotti dalle analisi al setaccio, o il coefficiente di uniformità, C_u , nonché la pressione di confinamento efficace.

Tuttavia, quando possibile, la calibrazione dei parametri geometrici che definiscono le curve, o la definizione delle curve stesse, si basa su test di laboratorio ciclici e dinamici dedicati, eseguiti su campioni di terreno disponibili. Data la attuale mancanza di questi ultimi, sono state utilizzate le curve $G/G_0 - \gamma$ e $D - \gamma$ proposte in letteratura da Darendeli, (2001, Rif. 2.3.19), si veda Figura 14.

Le curve proposte da Darendeli (si veda Figura 14) sono funzioni della pressione di confinamento effettiva, dell'OCR, dell'indice di plasticità, della frequenza dell'eccitazione e del numero equivalente di cicli. La frequenza di eccitazione e il numero equivalente di cicli sono convenzionalmente fissati a 1Hz e 10 cicli, rispettivamente. Per gli strati granulari è stato utilizzato un OCR pari a 1 e un indice plastico nullo; per gli strati coesivi, invece, è stato tenuto conto della generale variabilità dell'indice plastico riscontrata nei materiali ($IP=18\div30$), con OCR definito tra 1 e 2.5.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 42 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

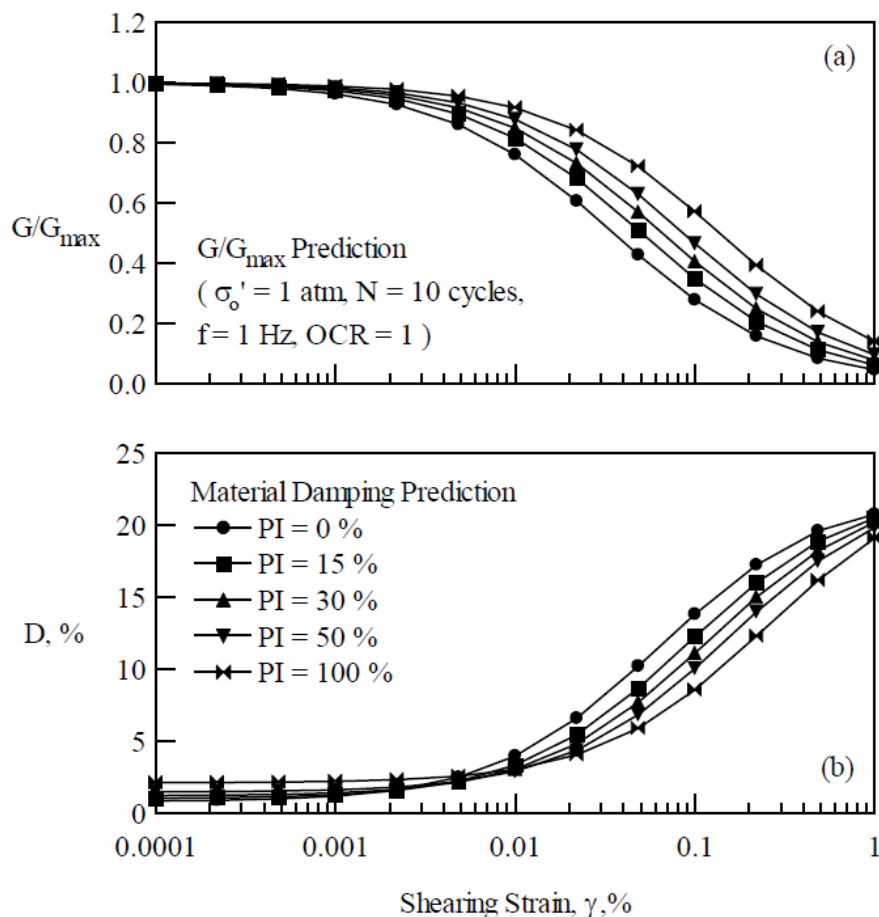


Figura 14 – Curve di decadimento di modulo a taglio e di smorzamento (in funzione dell'indice di plasticità) proposto da Darendeli, (2001, Rif. 2.3.19)

Inoltre, è stata presa in considerazione l'interpretazione dei dati CPT in termini di resistenza al taglio non drenata C_u e di angolo di attrito di picco ϕ_p , come riportato nella Figura 15.

La Tabella 5 riporta i parametri di resistenza e i valori adottati per il profilo del suolo di riferimento utilizzato nella RSL, in conformità anche ai parametri di progettazione indicati nel Rif. 2.2.13. Inoltre, si deve tenere conto del fatto che durante un moto sismico, il suolo è in genere sottoposto a un elevato tasso di sollecitazione, a seconda del contenuto di frequenza del moto incidente al suolo. Quello che viene solitamente chiamato "strain rate effect" si riflette solitamente

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 43 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

in un aumento della rigidità e della resistenza del terreno. Nel caso in esame, in mancanza di prove specifiche a questo riguardo, le resistenze statiche sono state amplificate di un valore pari a 1.3.

Alcuni esempi delle curve di decadimento e smorzamento risultanti sono riportati in Figura 16.

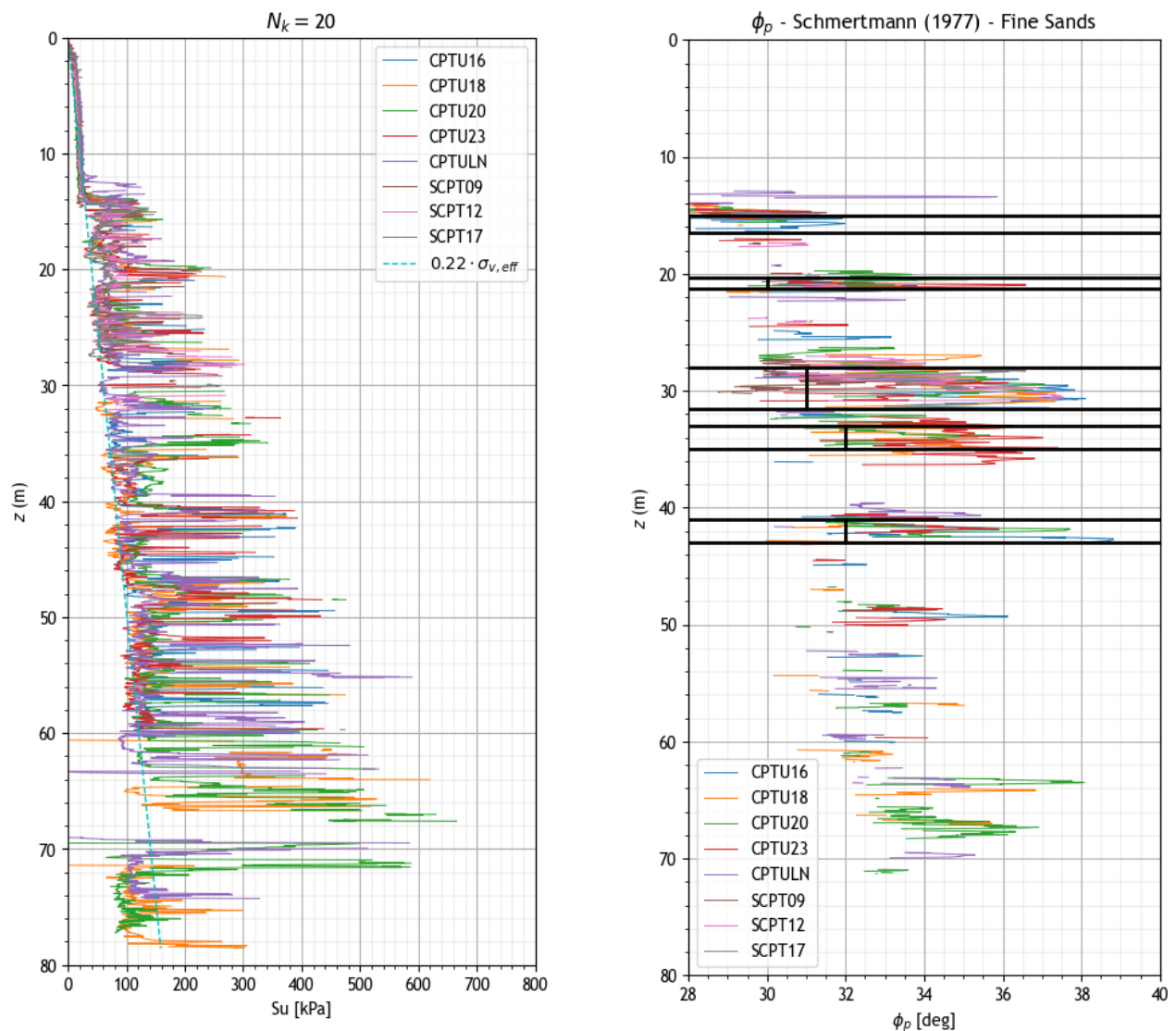


Figura 15 - Risultati di resistenza al taglio non drenata e drenata da prove CPT disponibili

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 44 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Tabella 5 – Parametri considerati di resistenza e valori di riferimento del profilo di terreno (Cu: resistenza a taglio non drenata; ϕ' : angolo d'attrito)

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 45 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Profondità		Materiale	Cu [kPa]	ϕ' [deg]
da [mslm]	a [mslm]			
0	1	CLAY	10	
1	2	CLAY	13	
2	5	CLAY	16	
5	10	CLAY	20	
10	12.5	CLAY	29	
12.5	14	CLAY	29	
14	15	CLAY	29	
15	16	SAND		28
16	16.5	SAND		28
16.5	17	CLAY	40.5	
17	18	CLAY	42	
18	19	CLAY	44	
19	20.3	CLAY	46.5	
20.3	21.3	SAND		30
21.3	22	CLAY	50.5	
22	23	CLAY	52.3	
23	24	CLAY	54.3	
24	25	CLAY	56.4	
25	26	CLAY	58.4	
26	27	CLAY	60.5	
27	28	CLAY	62.5	
28	29	SAND		31
29	30	SAND		31
30	31.5	SAND		31
31.5	33	CLAY	72.3	
33	35	SAND		32
35	38	CLAY	81	
38	41	CLAY	87	
41	43	SAND		32
43	45	CLAY	96.2	
45	46.5	CLAY	99.7	
46.5	50	CLAY	104.6	
50	52	CLAY	110	
52	54.5	CLAY	114.5	
54.5	57.5	CLAY	120	
57.5	60	CLAY	126	
60	62.5	CLAY	131	
62.5	65	CLAY	136	
65	67.5	CLAY	141.6	
67.5	70	CLAY	146.9	
70	72.5	CLAY	100	
72.5	75	CLAY	100	
75	80	CLAY	100	
80	83	SAND		32
83	90	CLAY	150	
90	95	CLAY	150	
95	100	CLAY	150	
100	105	CLAY	180	
105	110	CLAY	180	
110	115	CLAY	180	
115	120	CLAY	180	
120	125	CLAY	180	
125	130	CLAY	180	
130	135	CLAY	180	
135	140	CLAY	180	
140	145	CLAY	180	
145	150	CLAY	180	
150	155	CLAY	180	
155	160	CLAY	180	
160	165	CLAY	180	

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società si riserva il diritto di modificare i dati senza preavviso. Legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 46 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

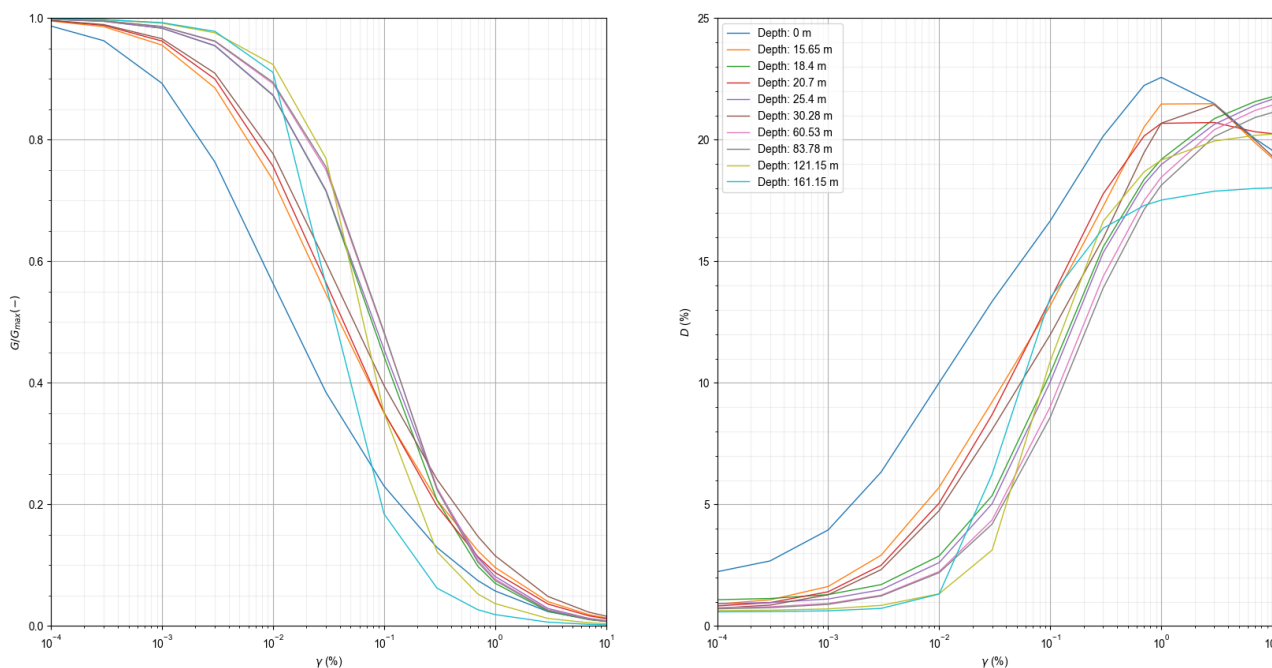


Figura 16 – Curve di decadimento del modulo di rigidezza a taglio e smorzamento al variare della profondità (Darendeli, 2001, Rif. 2.3.19)

	 SAIPEM  ROSETTI MARINO  MICOPERI	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 47 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

6. Risultati della RSL in condizioni di campo libero

Nel presente paragrafo si riportano i risultati ottenuti dalle analisi di RSL condotte sulla base dei dati definiti ai paragrafi precedenti (stratigrafia e parametri definiti in Tabella 4 e Tabella 5).

Alla base della colonna di terreno definita, si è ipotizzato un substrato rigido ($V_s = 800\text{m/s}$) in corrispondenza del quale è stata applicata la sollecitazione sismica selezionata per il tempo di ritorno di progetto (SLV, T_r 949 anni).

In accordo con le condizioni del suolo e le metodologie descritte nelle sezioni precedenti, è stata effettuata una analisi di risposta sismica del sito per il caso sismico di progetto (T_r 949 anni).

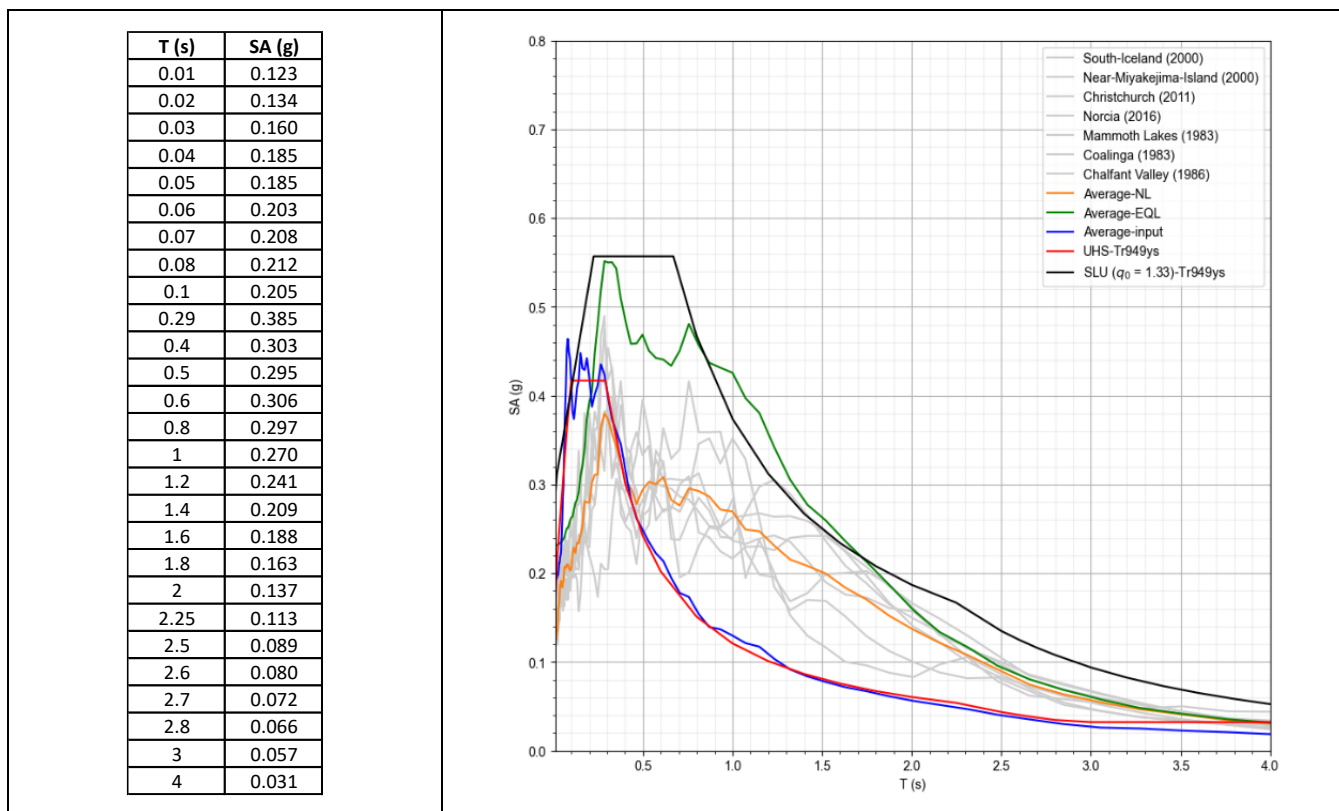
I risultati sono riportati nella Tabella 6 in forma di spettri di risposta in accelerazione orizzontale in condizioni di campo libero, S_A (unità in g), al 5% di smorzamento critico in corrispondenza del fondale marino. Nella stessa figura sono riportate le quantità rilevanti per l'intero profilo del terreno, in relazione alle analisi di propagazione non lineare (profili con la profondità di accelerazione massima, spostamento massimo, deformazione massima di taglio e la sollecitazione massima di taglio).

I valori massimi di sollecitazione di taglio con profondità forniti possono anche essere utilizzati nelle analisi di valutazione della liquefazione attraverso la valutazione del coefficiente di stress ciclico (CSR). La CSR è il rapporto tra la tensione massima di taglio, τ_{max} , e la tensione verticale effettiva, σ'_v . Tuttavia, poiché lo sforzo di taglio in un punto del profilo varia nel tempo durante l'eccitazione sismica, sarebbe eccessivamente prudente considerare il valore massimo della CSR per le verifiche di liquefazione. A questo proposito, il valore massimo della CSR è convenzionalmente moltiplicato per un fattore di riduzione di 0.65, per ottenere un valore medio più rappresentativo del livello di sollecitazione che si verifica durante l'intera durata del moto al suolo. Le verifiche di liquefazione sono riportate nel capitolo 8.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 48 di 76	Rev. A

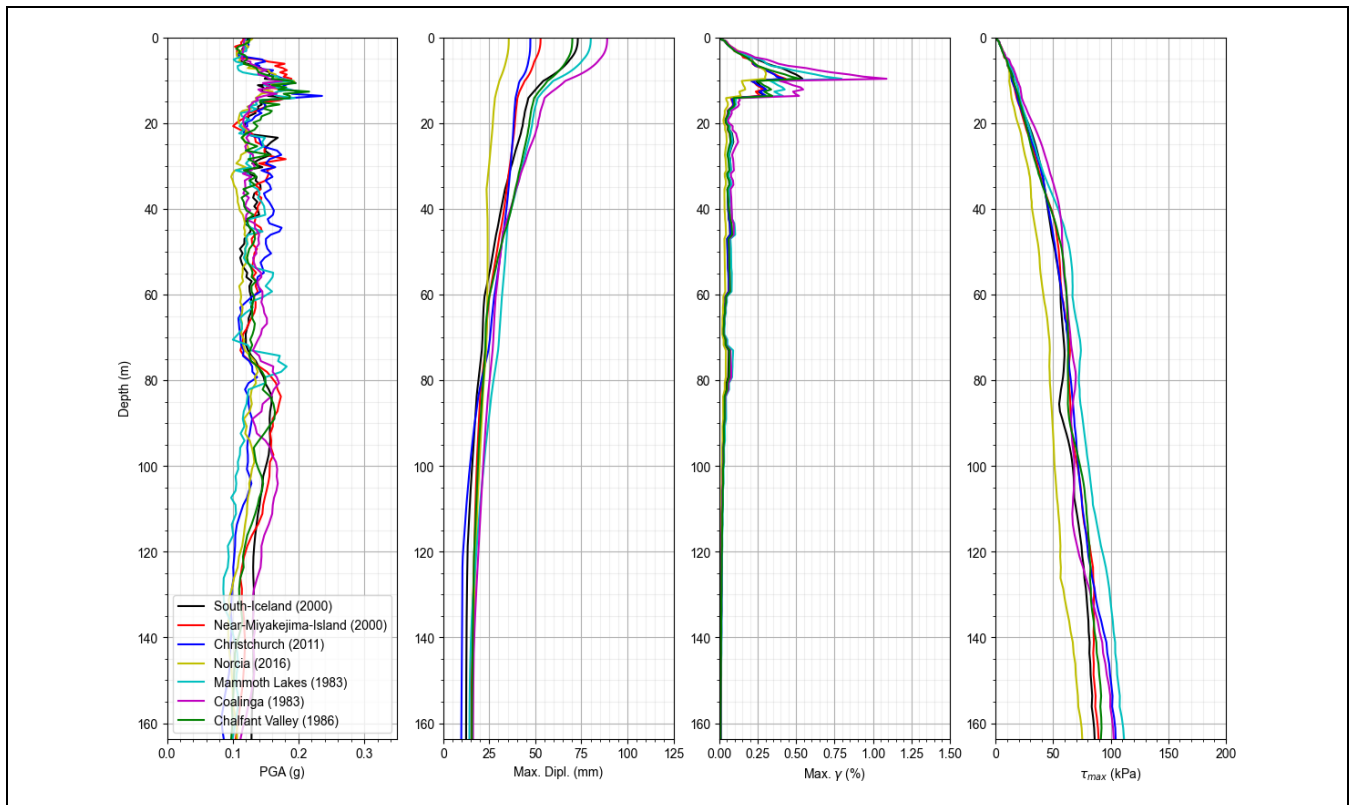
Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Tabella 6 – Risultati RSL per Tr 949 anni (SLV). Spettro di risposta di accelerazione orizzontale; profili quantitativi, PGA (g), max spostamento, max deformazione a taglio (%) e massimo sforzo (kPa)



	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 49 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502



6.1 Commenti generali sui risultati

I risultati presentati nella sezione precedente mostrano principalmente effetti non lineari nella prima profondità di 20 (m), dove le deformazioni a taglio raggiungono i valori massimi. In particolare, le deformazioni a taglio massime medie raggiungono circa lo 0.5%.

Infatti, questi effetti non lineari portano ad un aumento delle ordinate spettrali per i periodi medio-alti (0.2 - 0.8 s), in relazione al comportamento di maggiore deformabilità del suolo che favorisce un maggiore contributo dei periodi di vibrazione medio-alta. In particolare, il primo picco è evidenziato intorno a 0.2-0.3s. Gli effetti non lineari sono anche visibili dalle differenze tra i risultati ottenuti dall'analisi non lineare (linea arancione in Tabella 6) e quelli ottenuti dall'analisi lineare equivalente (linea verde in Tabella 6).

Data la presenza di argille soffici caratterizzate da ridotte resistenze, alte deformabilità e ridotte velocità delle onde di taglio, si ritiene l'analisi non lineare quella più corretta ed appropriata

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 50 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

per la stima della propagazione delle onde sismiche. Lo spettro orizzontale (5% damping) risultante è mostrato in Tabella 6 (linea arancione) insieme ai valori numerici per alcuni periodi di oscillazione.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 51 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

7. Analisi di sensitività per la risposta sismica locale

7.1 Introduzione

I dati geotecnici disponibili, sebbene ritenuti sufficienti per caratterizzare gli aspetti principali del comportamento dei geomateriali in risposta alle eccitazioni dinamiche studiate, non consentono di caratterizzare l'intero dominio computazionale coinvolto nelle analisi. Allo scopo di affrontare il più prudente degli scenari possibili valutati, è stata effettuata un'ulteriore analisi di sensibilità per determinare l'effetto di un andamento diverso delle velocità delle onde di taglio con la profondità al di sotto della quota dove non sono disponibili informazioni geotecniche (ad es. una profondità diversa del livello di roccia equivalente al quale si assumono le velocità d'onda di taglio di 800m/s). Siccome la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo è stata dettagliata in modo completo fino a circa 80m di profondità non verranno effettuate analisi di sensibilità relative alla modellazione dei relativi strati in questa parte più superficiale della stratigrafia.

7.2 Risultati dell'analisi di sensitività

Nell'analisi di sensibilità implementata si è deciso di valutare l'effetto di un cambiamento nella velocità dell'onda di taglio degli strati più profondi. Con questo scopo, è stato considerato un diverso, minore tasso di aumento con profondità del profilo di velocità dell'onda di taglio (si veda Figura 17).

La Figura 18 mostra il confronto tra lo spettro di risposta in superficie di riferimento e quello ottenuto applicando il profilo di velocità modificato per l'analisi di sensitività.

Dai risultati ottenuti non si notano particolari differenze tra i due modelli; ciò è attribuito ad un comportamento prevalente elastico del materiale sotto gli 80m, per cui nonostante la riduzione del tasso di crescita della velocità dell'onda di taglio con la profondità, e quindi la definizione di una colonna di terreno più alta, non sono emersi effetti particolari sugli spettri se non una ulteriore leggera dissipazione di energia causata dalla maggiore lunghezza della colonna di terreno modellata nell'analisi di sensitività.

In conclusione, l'impatto del profilo di velocità modificato al di sotto degli 80m di profondità, dove non si hanno più informazioni geotecniche, può essere considerato trascurabile dal punto di vista ingegneristico.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 52 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

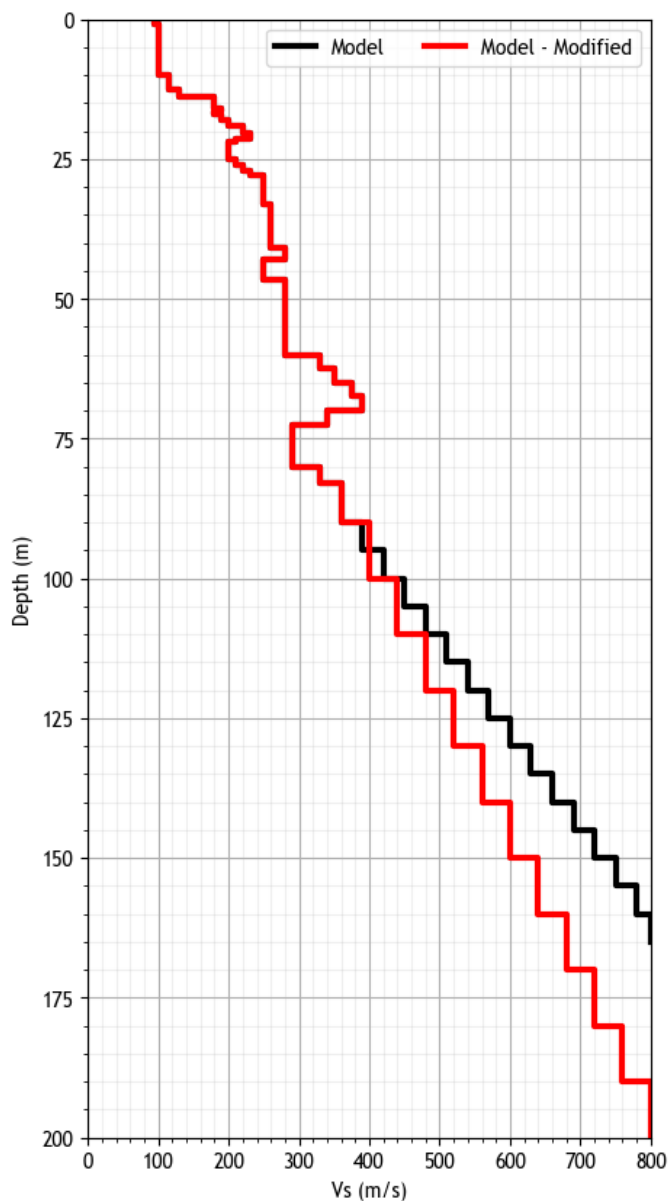
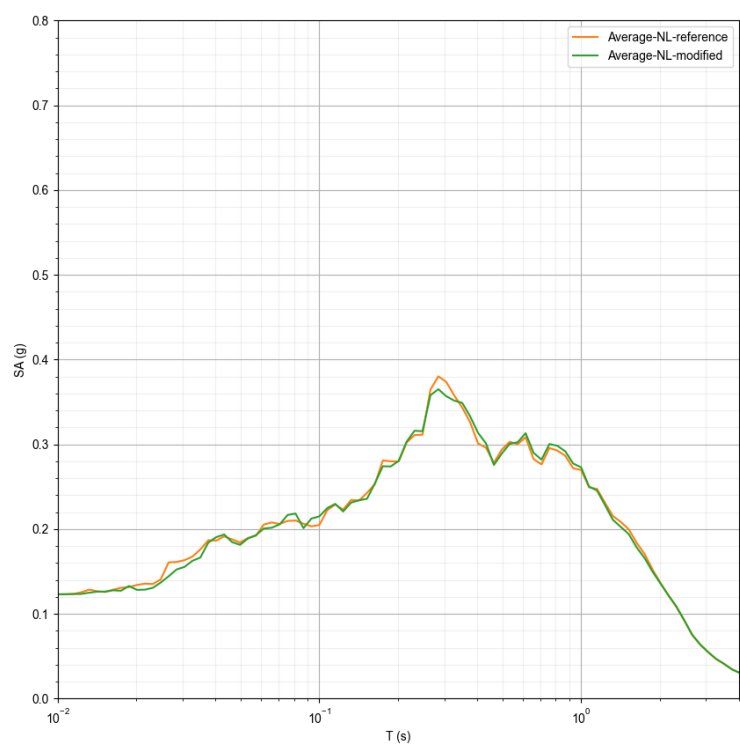
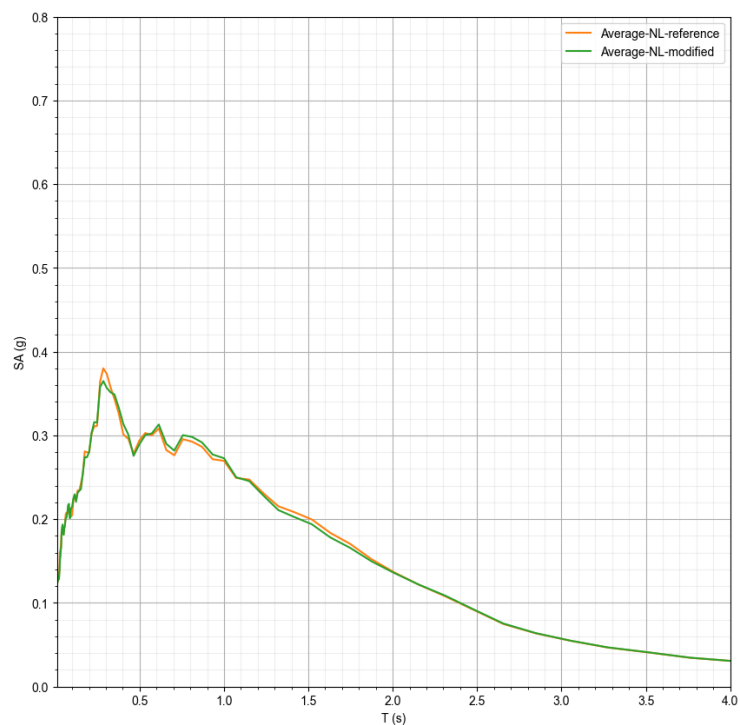


Figura 17 Confronto tra la velocità delle onde di taglio di riferimento (linea nera) e l'andamento modificato (linea rossa) adottato nell'analisi di sensibilità

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 53 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502



Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 54 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Figura 18 – Confronto tra lo spettro di risposta elastico in superficie ottenuto usando nell'analisi non lineare il modello di riferimento numerico (linea arancione) e il modello modificato nella analisi di sensitività (linea verde) (scala normale e logaritmica)

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 55 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

8. Verifiche di liquefazione

8.1 Generalità

La liquefazione sismica è definita come la perdita di resistenza, e il conseguente comportamento fluido, di un terreno saturo soggetto a una sollecitazione ciclica come quella indotta da un terremoto.

Sabbie sciolte, o con un basso grado di addensamento, hanno un comportamento contraente quando soggette ad un carico ciclico. L'azione sismica può trasferire gli sforzi normali dallo scheletro solido alla pressione interstiziale dell'acqua se il terreno in stato di saturazione non è sufficientemente in grado di dissipare le sovrappressioni così generate. Il risultato è una riduzione degli sforzi efficaci di confinamento all'interno del terreno e una perdita di resistenza e di rigidità, che contribuisce alle deformazioni del terreno. A tal fine, è stato quindi valutato il fenomeno di liquefazione a partire dall'interpretazione dei risultati delle prove CPT (approccio SBTn) e sulla base dei risultati delle precedenti analisi di risposta sismica locale (si vedano le sezioni 5 e 6) per la definizione della sollecitazione sismica con la profondità.

Dettagli sulle metodologie e sulle assunzioni di calcolo adottate sono riportati nei paragrafi seguenti. In particolare, nel seguito si farà diretto riferimento ai profili di sforzo di taglio mobilitato nel terreno dall'input sismico, ottenuti dall'analisi di RSL. Per quanto riguarda invece la Magnitudo da considerare nelle analisi, questa è stata scelta pari a 6, in accordo al riferimento delle analisi di disaggregazione della pericolosità sismica dell'area in esame.

8.2 Potenziale di liquefazione per materiali granulari: metodo di calcolo semplificato secondo la procedura NCEER

8.2.1 Generalità

Per la valutazione del potenziale di liquefazione del sito è stata usata la procedura "semplificata" introdotta da Seed e Idriss (1971, Rif. 2.3.21). Essa è divenuta uno standard nella

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	 SAIPEM  ROSETTI MARINO  MICOPERI	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 56 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

pratica professionale in tutto il mondo e si è evoluta negli ultimi 30 anni fino alla più recente rivalutazione effettuata dallo US National Centre for Earthquake Engineering Research (NCEER, Rif. 2.3.22).

Il quadro complessivo proposto dal NCEER è considerato adeguatamente standardizzato e globalmente riconosciuto per lo scopo del presente studio.

La procedura semplificata è basata sul calcolo della sollecitazione sismica su uno strato di terreno, espressa in termini di rapporto di sollecitazione ciclica (cyclic stress ratio, CSR), e della capacità dello strato stesso di resistere alla liquefazione, espressa in termini di rapporto di resistenza ciclica (cyclic resistance ratio, CRR). Quest'ultima può essere calcolata a partire da indagini in-situ, come le CPT recentemente eseguite nell'area di interesse.

La sollecitazione è quindi confrontata con la resistenza ciclica per calcolare un fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione, definito con la seguente formula:

$$F_s = CRR_M / CSR \quad (1)$$

dove CRR_M e CSR sono definiti rispettivamente ai paragrafi 8.2.3 e 8.2.2.

8.2.2 Calcolo del Rapporto di Sollecitazione Ciclica (CSR)

Secondo la procedura NCEER, il CSR viene valutato come:

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma'_{v0}) \quad (2)$$

dove:

$$\tau_{av} = 0.65 (a_{max}/g) \times \sigma_{v0} \times r_d \quad (3)$$

Nelle equazioni (2) e (3) τ_{av} è una quantificazione dello sforzo di taglio indotto nello strato di terreno dal passaggio delle onde sismiche, a_{max} è l'accelerazione orizzontale di picco alla superficie del suolo (PGA, espressa in m/s^2), g è l'accelerazione di gravità, σ_{v0} e σ'_{v0} sono rispettivamente la pressione verticale totale ed efficace. Nelle equazioni (2) e (3), σ_{v0} e σ'_{v0} sono calcolate in questo caso in riferimento alla condizione attuale di campo libero.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 57 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Infine, r_d è un fattore di riduzione dello sforzo con la profondità che può essere calcolato con le seguenti formule:

$$r_d = 1.0 - 0.00765 z \quad \text{per } z \leq 9.15 \text{ m} \quad (4)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 z \quad \text{per } 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \quad (5)$$

$$r_d = 0.744 - 0.008 z \quad \text{per } 23 \text{ m} < z \leq 30 \text{ m} \quad (6)$$

Le equazioni (4) e (5) sono suggerite da Liao e Whitman (1986, Rif. 2.3.23), mentre la terza è una ragionevole estensione per profondità fino a 30 m suggerita dal NCEER (Rif. 2.3.22). Si tenga conto che le formule (4-5-6) costituiscono una media su un intervallo di valori la cui ampiezza aumenta con la profondità, come chiaramente rappresentato nel grafico seguente di Figura 19 (da Seed e Idriss, 1971, Rif. 2.3.21).

Il rapporto NCEER fornisce anche un'altra formulazione per calcolare il fattore di riduzione dello sforzo r_d , elaborata da T.F.Blake (1996), che approssima la curva media riportata in Figura 19:

$$r_d = \frac{1 - 0.4113 z^{0.5} + 0.04052 z + 0.001753 z^{1.5}}{1 - 0.4177 z^{0.5} + 0.05729 z - 0.006205 z^{1.5} + 0.001210 z^2} \quad (7)$$

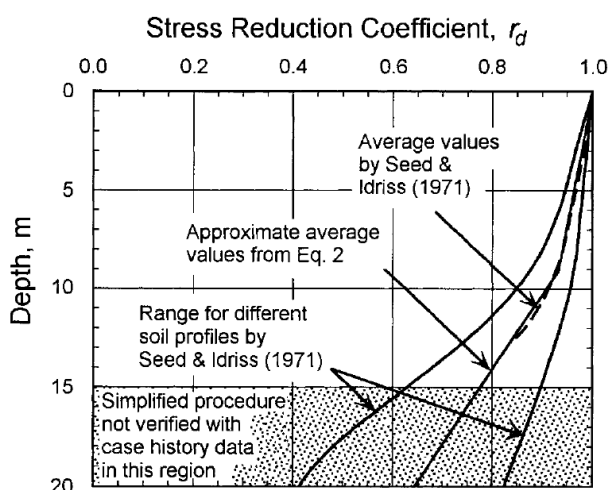


Figura 19 - Fattore di riduzione r_d (da Seed e Idriss, 1971, Rif. 2.3.21)

Come precedentemente anticipato, nel presente studio si sono direttamente adottati i risultati ottenuti dalle analisi di risposta sismica locale (RSL) per la definizione del profilo del CSR con la

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 58 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

profondità (si veda Figura 20); non è pertanto risultato necessario adottare la procedura “semplificata” di cui sopra (con valutazione del fattore di riduzione dello sforzo r_d).

Nel dettaglio, il software di calcolo utilizzato nelle analisi RSL (Deepsoil 7.0, Rif. 2.3.1) fornisce tra i vari output anche il profilo dello sforzo di taglio massimo mobilitato dal terreno al passaggio del segnale sismico ($\tau_{\max}$), normalizzato rispetto allo sforzo verticale efficace ($\tau_{\max}/\sigma'_{v0}$). In accordo a quanto esplicitamente raccomandato al § 6.3.5 del Rif. 2.1.3, il valore dello sforzo di taglio medio (τ_{av}) da considerarsi nella definizione del CRS di cui alla precedente formula (2) è pertanto definito mediante la seguente relazione:

$$\tau_{av} = 0.65 \times \tau_{\max}$$

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 59 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

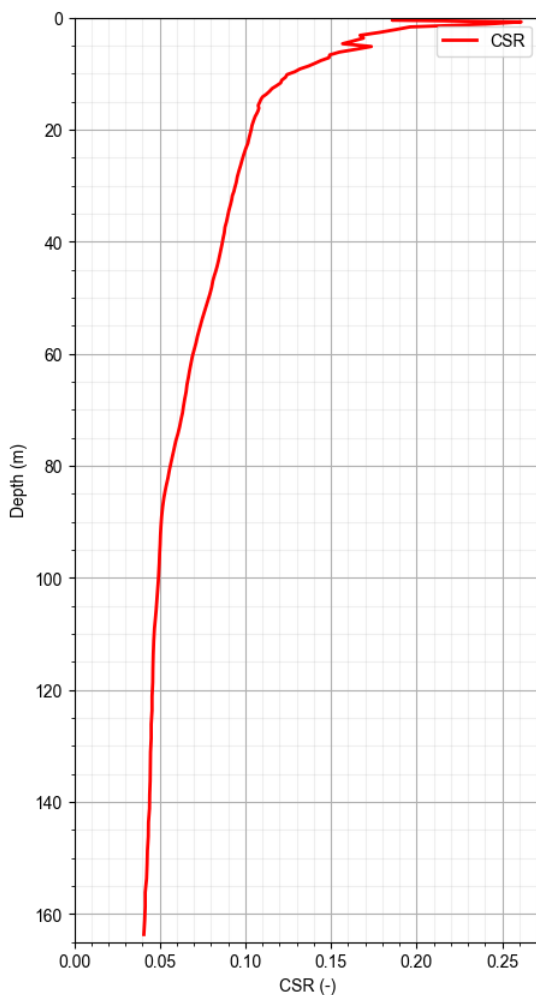


Figura 20 – Profilo CSR ottenuto per Tr 949 anni da risultati RSL

8.2.3 Calcolo del Rapporto di Resistenza Ciclica (CRR) da prove CPT

La procedura adottata per il calcolo del Rapporto di Resistenza Ciclica (CRR) proposto dal NCERR (Rif. 2.3.22) è riportato di seguito.

L'abaco di Figura 21 (da Robertson e Wride, 1998, Rif. 2.3.24) riporta la curva proposta per la determinazione diretta del CRR per sabbie pulite (contenuto di fini $FC \leq 5\%$) da profili CPT. La curva è stata sviluppata a partire da prove CPT di letteratura, selezionate da diverse campagne d'indagine, incluse quelle di Stark e Olson (1995) e di Suzuki et al. (1995). L'abaco, valido solamente per terremoti

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 60 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

con magnitudo $M=7.5$, riporta il CRR in funzione della resistenza alla punta adimensionale, corretta e normalizzata q_{c1} (si veda il par. 8.2.3.1), per siti dove gli effetti della liquefazione sono o non sono stati osservati in superficie. La curva limite del CRR separa prudenzialmente le regioni dell'abaco con dati indicativi di una avvenuta/non-avvenuta liquefazione (in Figura 21 rispettivamente punti "pieni" e punti "vuoti").

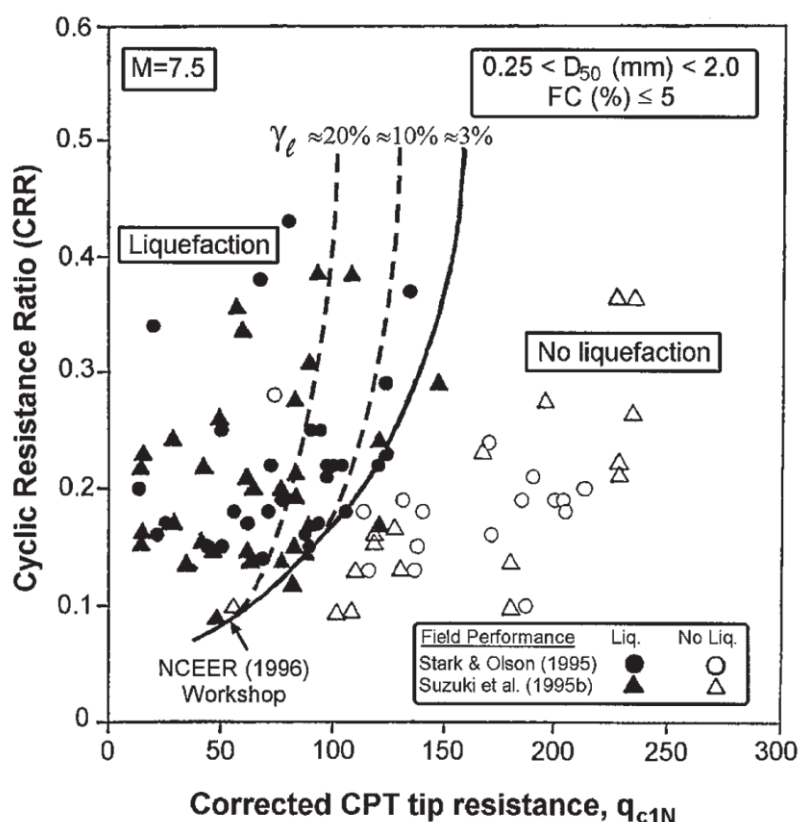


Figura 21 - CSR e CRR in funzione di q_{c1N} (da Robertson e Wride, 1998, Rif. 2.3.24)

La curva limite, per sabbie "pulite" e terremoti di magnitudo 7.5, può essere approssimata con le seguenti formule (Robertson e Wride, 1998, Rif. 2.3.24)

$$\text{se } (q_{c1N})_{CS} < 50 \quad CRR_{7.5} = 0.833 \times [(q_{c1N})_{CS}/1000] + 0.05 \quad (8)$$

$$\text{se } 50 \leq (q_{c1N})_{CS} < 160 \quad CRR_{7.5} = 93 \times [(q_{c1N})_{CS}/1000]^3 + 0.08 \quad (9)$$

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 61 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

dove $(q_{c1N})_{CS}$ è la resistenza alla punta per sabbie pulite normalizzata alla pressione atmosferica di 100kPa (1atm), come spiegato al par. 8.2.4.

8.2.3.1 Calcolo della Resistenza alla Punta Normalizzata, q_{c1N}

La procedura per il calcolo di CRR da prove CPT richiede che la resistenza alla punta venga normalizzata, utilizzando le seguenti formule:

$$q_{c1N} = C_Q \times (q_c / P_a) \quad (10)$$

$$C_Q = (P_a / \sigma'_{v0})^n \quad (11)$$

dove:

C_Q = fattore di normalizzazione per la resistenza alla punta;

P_a = 1 atm, da utilizzare nella stessa unità di misura di σ'_{v0} e di q_c ;

n = esponente dipendente dal tipo di terreno (meglio definito nel prosieguo del paragrafo);

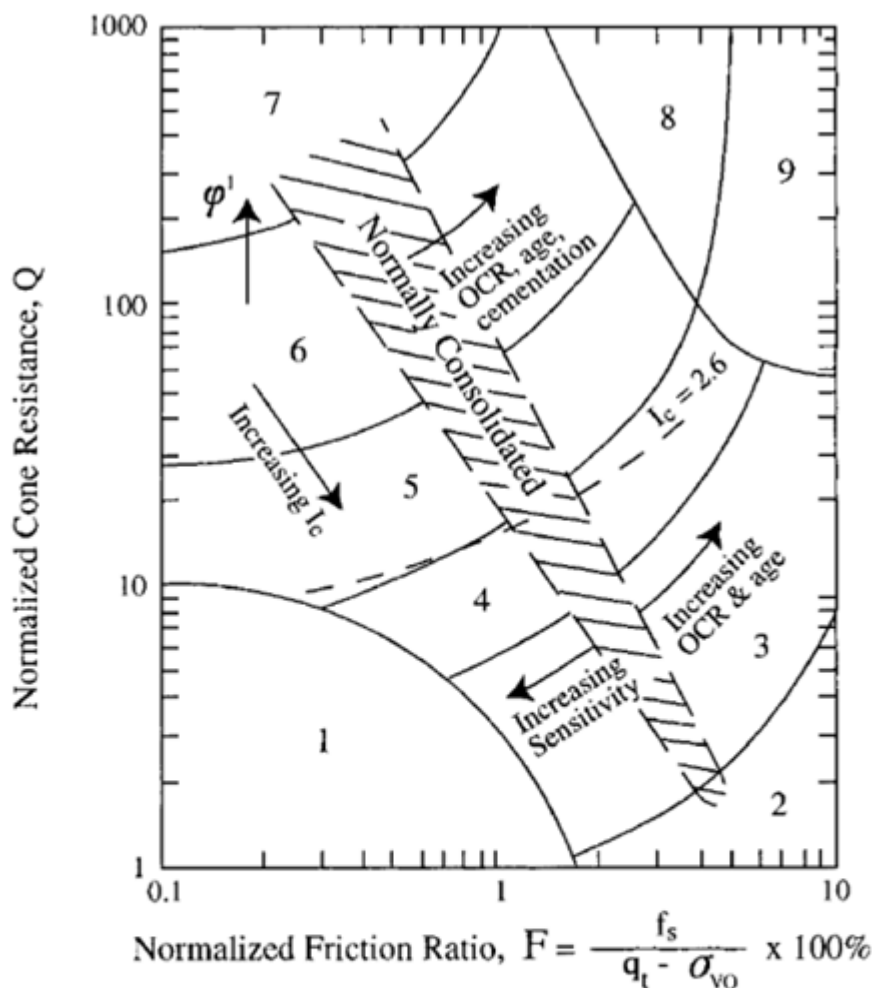
q_c = resistenza alla punta registrata in sito.

A basse profondità, C_Q assume valori maggiori perché gli sforzi verticali σ'_{v0} sono minori; tuttavia, è opportuno non utilizzare valori >1.7 . Come spiegato in seguito, il valore dell'esponente n varia tra 0.5 e 1, a seconda della granulometria del terreno (Olsen, 1997, Rif.2.3.25).

Il Friction Ratio F (resistenza laterale f_s divisa per la resistenza alla punta q_c) normalmente aumenta con terreni a grana fine e alto indice di plasticità, permettendo in prima approssimazione di determinare il tipo di terreno (coesivo-granulare) e il contenuto di fini. Roberston e Wride (1998, Rif. 2.3.24) hanno elaborato l'abaco riportato in Figura 22, che permette di determinare il tipo di comportamento del terreno investigato.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 62 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502



- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1. Sensitive, fine grained | 6. Sands - clean sand to silty sand |
| 2. Organic soils - peats | 7. Gravelly sand to dense sand |
| 3. Clays - silty clay to clay | 8. Very stiff sand to clayey sand* |
| 4. Silt mixtures - clayey silt to silty clay | 9. Very stiff, fine grained* |
| 5. Sand mixtures - silty sand to sandy silt | |

**Heavily overconsolidated or cemented*

Figura 22 – Classificazione del tipo di comportamento del terreno proposta da Robertson (da 2.3.22, 2.3.24 e 2.3.26)

I confini tra i terreni tipo 2÷7 hanno la forma di cerchi concentrici e possono essere utilizzati per tenere conto del tipo di terreno nel calcolo di q_{c1N} e CRR. Il raggio di questi cerchi è detto “Indice

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 63 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

della tipologia di comportamento del terreno”, o “*Soil behaviour type index*”, I_c , calcolato con la seguente espressione:

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5} \quad (12)$$

dove:

$$Q = [(q_c - \sigma_{v0})/P_a] \times [P_a/\sigma'_{v0}]^n \quad (13)$$

$$F = [f_s/(q_c - \sigma_{v0})] \times 100\% \quad (14)$$

Nelle formule (13) e (14) tutte le variabili (q_c , σ_{v0} , P_a , f_s , σ'_{v0}) devono essere espresse nella medesima unità di misura (per es. kPa o MPa).

L'abaco di Robertson della precedente figura è stato sviluppato assumendo l'esponente n con valore pari a 1.0, che è quello appropriato per terreni argillosi. Per sabbie pulite, tuttavia, è più corretto adottare $n = 0.5$, mentre un valore intermedio tra 0.5 e 1.0 sarebbe appropriato per limi e limi sabbiosi. Robertson e Wride (Rif. 2.3.24) suggeriscono la seguente procedura per l'elaborazione dell'indice I_c .

In prima approssimazione si differenziano i terreni tra quelli caratterizzati come argillosi e quelli sabbiosi e limosi. In questa fase si assume $n = 1.0$ (tipico delle argille) e si calcola la resistenza alla punta adimensionale con la seguente formula:

$$Q = [(q_c - \sigma_{v0})/P_a] \times [P_a/\sigma'_{v0}]^{1.0} = [(q_c - \sigma_{v0})/\sigma'_{v0}] \quad (15)$$

Se si ottiene un valore $I_c > 2.6$, il terreno è classificato come argilloso e di conseguenza troppo ricco di fini per poter liquefare. Se invece $I_c < 2.6$, il terreno è probabilmente di natura granulare, e di conseguenza C_Q , q_{c1N} e Q vengono ricalcolati con le equazioni (11), (10) e (13), utilizzando un valore di $n = 0.5$; anche I_c viene quindi ricalcolato, attraverso l'equazione (14).

Se da questo ricalcolo si ottiene ancora $I_c < 2.6$, il terreno è classificato come non plastico e di tipo granulare. Questo valore di I_c viene quindi utilizzato per stimare la resistenza alla liquefazione CRR. Se invece da questo ricalcolo si ottiene $I_c > 2.6$, è probabile che il terreno sia fortemente limoso e possibilmente anche plastico; in questo caso q_{c1N} viene ricalcolato attraverso le equazioni (10-11), utilizzando un valore intermedio di n e procedendo per successive iterazioni a mezzo dell'utilizzo di

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 64 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

un software dedicato (Rif. 2.3.27); ripercorrendo le equazioni da (10) a (14) si ottiene così un nuovo valore di I_c , da utilizzare per il calcolo di CRR.

8.2.4 Calcolo della Resistenza alla Punta Normalizzata per sabbie pulite, $(q_{c1N})_{CS}$

La resistenza alla punta normalizzata nel caso di sabbie limose viene ulteriormente corretta al valore “equivalente” per sabbie pulite, secondo la seguente relazione:

$$(q_{c1N})_{CS} = K_c \times q_{c1N} \quad (16)$$

dove K_c è un fattore di correzione per la granulometria, calcolato con le seguenti relazioni (Robertson e Wride, 1998, Rif. 2.3.24):

$$\text{per } I_c \leq 1.64: \quad K_c = 1.0 \quad (17)$$

$$\text{per } I_c \geq 1.64: \quad K_c = -0.403 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88 \quad (18)$$

La curva di K_c definita da (17) e (18) è riportata in Figura 23. Si noti che per $I_c > 2.6$ la curva è riportata con una linea tratteggiata, per indicare che in tale intervallo di valori il terreno è troppo ricco di componente argillosa o troppo plastico per poter liquefare.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 65 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

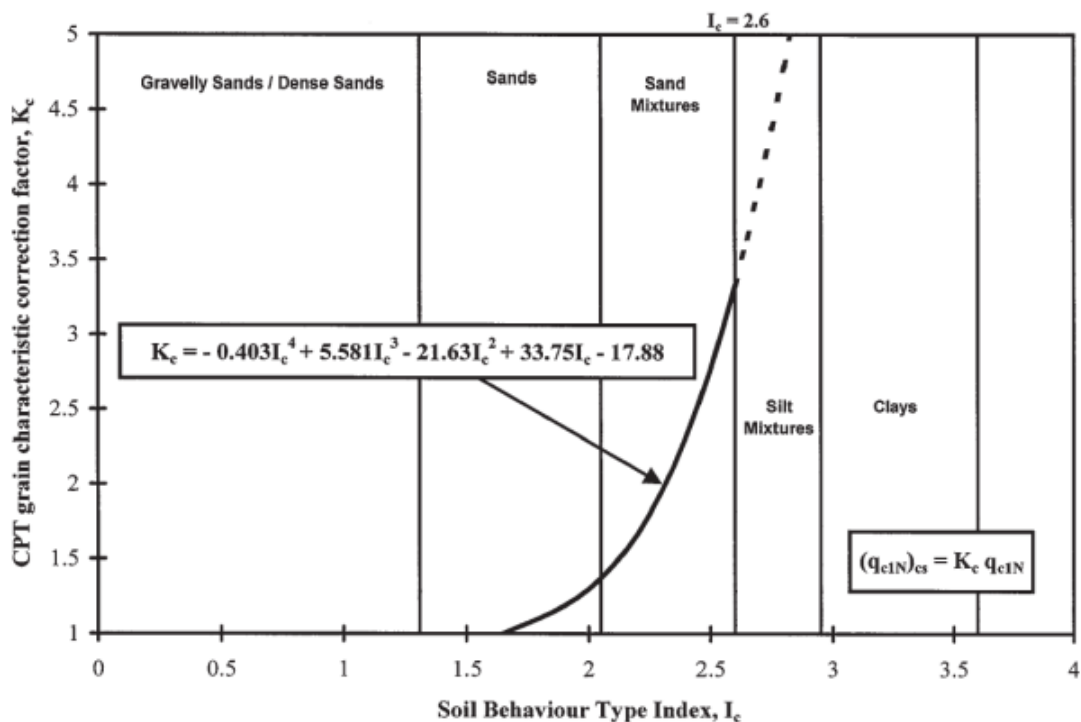


Figura 23 – Fattore di correzione per la granulometria, K_c (da Robertson e Wride, 1998, Rif. 2.3.24)

Inoltre, come riportato dettagliatamente nel Rif. 2.3.24, la correzione tramite il fattore K_c va utilizzata con cautela in presenza di sabbie che ricadono nell'abaco di Figura 22 nella zona compresa tra $1.64 < I_c < 2.36$ e con un friction ratio $R_f < 0.5\%$, al fine di non confondere sabbie pulite molto sciolte con sabbie con alto contenuto di limo. In questa zona si raccomanda di porre $K_c = 1$.

La procedura fin qui descritta è riassunta nel diagramma di flusso riportato in Figura 24.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 66 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

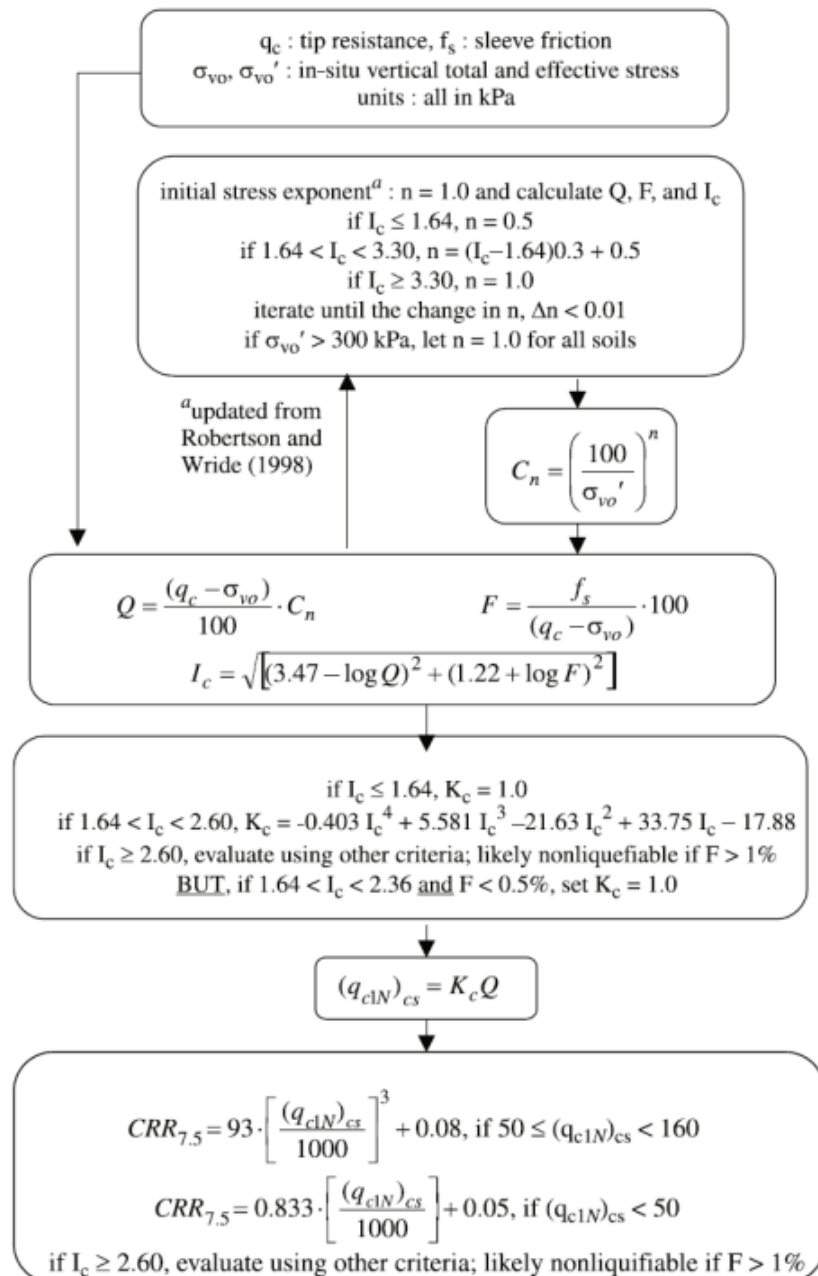


Figura 24 – Calcolo del $CRR_{7.5}$ secondo la procedura di calcolo di Robertson e Wride (1998, Rif. 2.3.24, (come riportata da Zhang et al., 1992))

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 67 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Si segnala che l'utilizzo del software CLiq (Rif.2.3.27) ha permesso anche, in fase di pre-processing dei dati, l'applicazione di un sistema di "filtro" che ha consentito la rimozione dalle successive fasi di interpretazione/analisi delle letture corrispondenti a repentine variazioni del parametro I_c , sintomo del cambio di comportamento/tipologia di materiale da granulare a coesivo (o viceversa), in quanto corrispondenti a situazioni "miste" per cui le successive correlazioni di interpretazione/analisi non sarebbero risultate pienamente applicabili/affidabili.

8.2.5 Fattore di scala della magnitudo, MSF

La curva di CRR per sabbie pulite riportata in Figura 21 (abaco di Robertson e Wride: CRR vs. q_{c1N}) è applicabile solamente a terremoti di magnitudo 7.5. Come riportato in Rif.2.3.22, per correggere la curva per sabbie pulite per magnitudo minori (o maggiori) di 7.5, è necessario adottare un fattore di scala della magnitudo, MSF ("Magnitude Scaling Factor"). La resistenza ciclica del terreno alla liquefazione per un terremoto può quindi essere espressa come:

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

dove CRR_M è la resistenza ciclica del terreno per un generico terremoto di magnitudo "M" e $CRR_{7.5}$ è la resistenza ciclica per un terremoto di magnitudo $M=7.5$.

Come anche riportato nel Rif. 2.3.22, è anche in alternativa possibile considerare un fattore di amplificazione della magnitudo, pari all'inverso di MSF, da applicarsi al CSR invece che al CRR. La riduzione di CRR oppure l'amplificazione di CSR porta ovviamente al medesimo risultato in termini di valutazione del fattore di sicurezza del potenziale di liquefazione.

In letteratura sono stati proposti diversi fattori di scala della magnitudo (MSF) per correggere la curva di CRR per sabbie pulite (abaco di Robertson e Wride: CRR vs. q_{c1N}), ampiamente discussi nel Rif. 2.3.22. Per magnitudo inferiori a 7.5, lo NCEER suggerisce la seguente relazione:

$$MSF = 10^{2.24/M^{2.56}} \quad (19)$$

dove il fattore MSF assume valore <1 per $M>7.5$ e >1 per $M<7.5$. Il rapporto di resistenza ciclico CRR risulta pertanto, per uno stesso terreno, inversamente proporzionale all'intensità del terremoto

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 68 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

considerato. Nell'abaco di cui alla Figura 25 riportata, si riporta l'andamento di MSF in funzione della magnitudo (M) secondo le raccomandazioni dello NCEER (Rif.2.3.22).

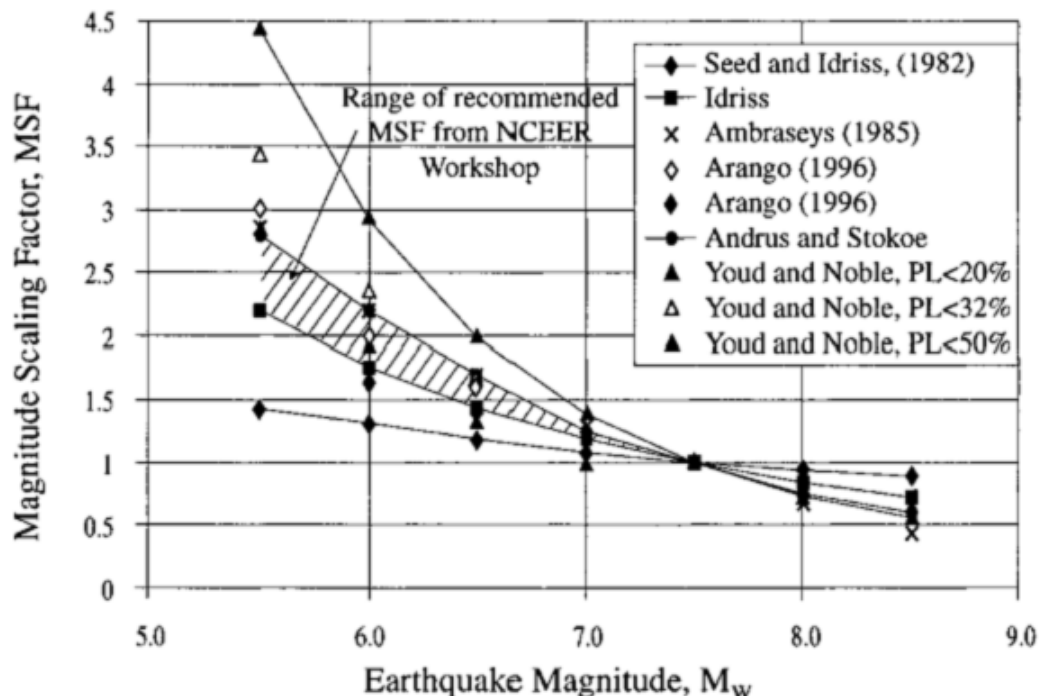


Figura 25 – Fattori di scala della magnitudo (da Rif. 2.3.24)

8.2.6 Considerazioni relative al fattore di sicurezza nei riguardi della liquefazione

Nell'analizzare i risultati delle analisi di liquefazione, dovrà essere tenuto in considerazione che vi è in letteratura un consenso generalizzato in merito al fatto che, nel caso in cui il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione risulti inferiore a circa $1.2 \div 1.3$, vi sia un potenziale per l'accumulo di sovrappressioni (cfr. Rif. 2.1.4). Pertanto, anche se non avviene liquefazione nel senso più "stretto" del termine, potrebbero iniziare a riconoscersi sintomi dello stesso fenomeno con relative perdite di resistenza e deformazioni ed è quindi raccomandata particolare cautela. Coerentemente con quanto sopra, l'Eurocodice 8 (Rif. 2.1.5) raccomanda un fattore di sicurezza minimo pari a 1.25, mentre le recenti NTC2018 (Rif.2.1.1, § 7.11.3.4.3) stabiliscono che "l'adeguatezza del margine di sicurezza nei confronti della liquefazione deve essere valutata e motivata dal progettista".

	 SAIPEM  ROSETTI MARINO  MICOPERI	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 69 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

Nell'analisi dei risultati verrà pertanto adottata la filosofia suggerita dalle NTC2018, considerando volta per volta i risultati ottenuti e tenendo in considerazione come fattore di sicurezza il valore di riferimento raccomandato dall'EC8 pari a 1.25.

8.2.7 Risultati

Nel presente paragrafo sono discussi i risultati delle verifiche di liquefazione eseguite in accordo alla procedura descritta nei paragrafi precedenti e considerando le 9 CPT recentemente eseguite nell'area in oggetto. Tali analisi sono state condotte con il supporto del software di calcolo dedicato CLiq (Rif. 2.3.27), che implementa la metodologia sopra descritta.

Le verifiche sono state eseguite con riferimento al profilo del CSR ottenuto dalla risposta sismica locale per il tempo di ritorno della sollecitazione sismica di 949 anni (SLV).

I risultati sono rappresentati in termini di profili con la profondità del fattore di sicurezza (F_s) rispetto alla liquefazione per ogni indagine e di CSR e CRR (vedi Figura 26), in cui l'esito della verifica alla liquefazione è eseguita con riferimento al profilo CSR ottenuto dalla RSL per il profilo delle velocità delle onde di taglio ottenuto dall'interpretazione delle prove CPT (Figura 20).

Dalle analisi di liquefazione eseguite con riferimento al tempo di ritorno pari a 949 anni emerge che, in corrispondenza di tutte le prove CPT analizzate, il fattore di sicurezza rispetto alla liquefazione risulta praticamente sempre superiore a 1.25.

Se ne può concludere che la liquefazione degli strati sabbiosi presenti in sito può essere esclusa in presenza di evento sismico con periodo di ritorno pari a 949 anni (SLV di progetto).

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 70 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

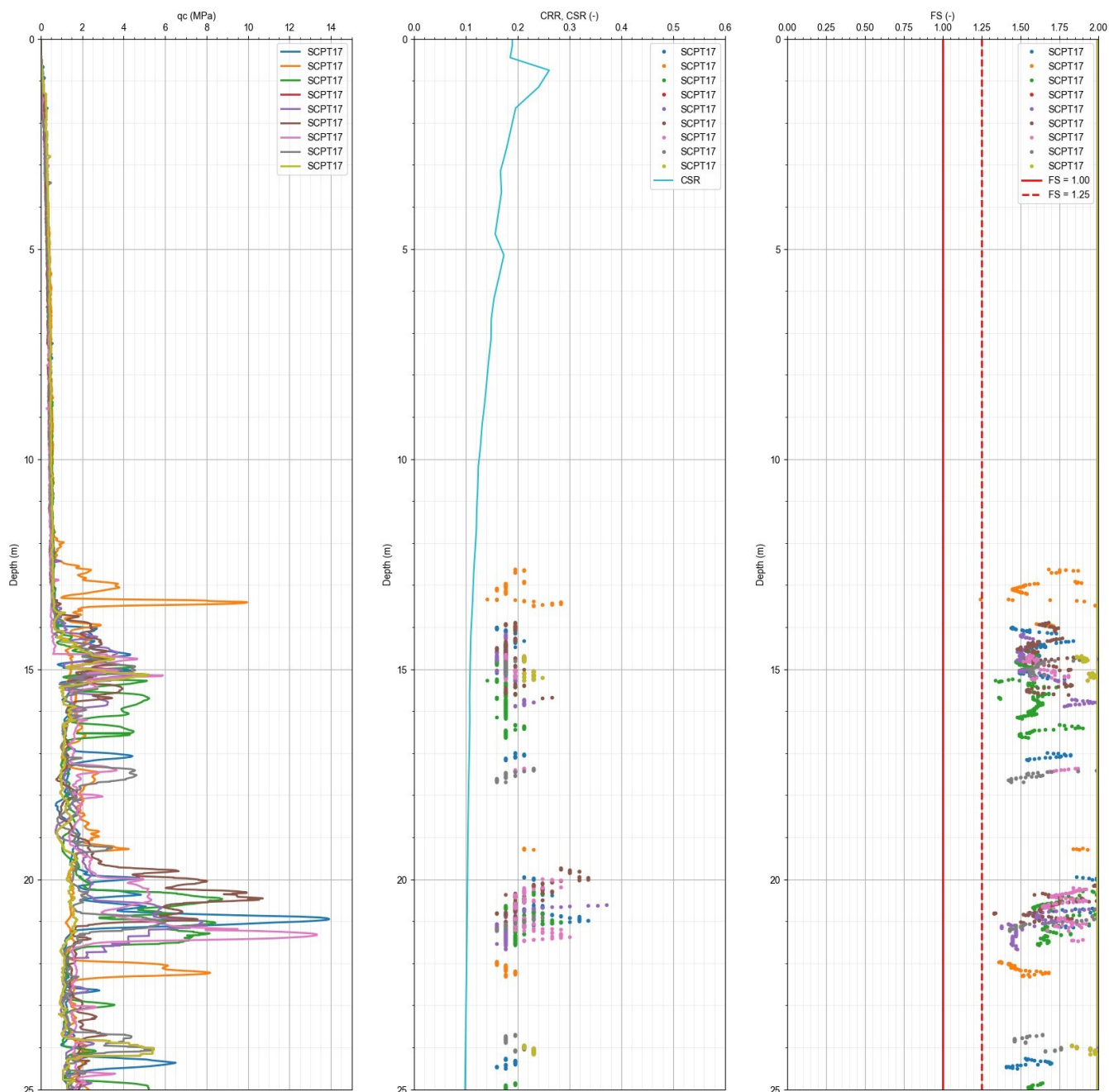


Figura 26 – Profilo di q_c , CSR, CRR e Fattore di sicurezza rispetto alla liquefazione

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 71 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

9. Conclusioni

La nuova piattaforma di ormeggio sarà posizionata a circa 8km dalla costa Punta Marina, a largo di Ravenna (Emilia Romagna), in corrispondenza dell'esistente struttura PIR/PETRA.

Il presente documento è finalizzato all'esecuzione della analisi risposta sismica locale nell'area del Progetto sulla quale sarà realizzato l'impianto di ricezione di una Floating and Storage Regasification Unit (FSRU) al largo di Ravenna, riguardante la piattaforma di ormeggio e le relative briccole di accosto e ormeggio, compresi i pali passerelle e le varie strutture accessorie.

Con tale finalità sono state selezionate sette storie temporali di accelerazione orizzontale, successivamente adattate spettralmente per migliorare l'accordo con l'UHS di progetto, come illustrato nella sezione 4.

Le forme d'onda ottenute sono state utilizzate nell'analisi di propagazione monodimensionale condotta utilizzando il modello computazionale elaborato nella sezione 2.3.22. Il profilo del suolo adottato è stato definito sulla base dei dati geotecnici disponibili di cui al rif. 2.2.13 e secondo la reinterpretazione delle prove CPT e tenendo in considerazione le misurazioni delle onde di taglio fatte dalle prove SCPT. I dati sono stati utilizzati per caratterizzare i geomateriali coinvolti in termini di peso unitario, velocità dell'onda di taglio, resistenza, smorzamento e comportamento non lineare, attraverso la definizione di curve di riduzione del modulo e smorzamento appropriate, come discusso nella sezione 5. Il modello è stato utilizzato per effettuare sia analisi lineari equivalenti che non lineari, con l'ausilio del software open source DeepSoil (rif. 2.3.1).

I risultati dell'analisi di RSL, documentati nella sezione 6, mostrano, come atteso data la tipologia di terreni presenti in sto, la presenza di effetti non lineari; questo comportamento è principalmente attribuito alla presenza sul posto di un materiale argilloso molto soffice e di ridotte proprietà meccaniche caratterizzato da velocità delle onde di taglio relativamente basse fino a circa 20m di profondità dal suolo.

Al fine di valutare il possibile effetto di diverse ipotesi di modellazione per gli strati più profondi del profilo, meno documentate nei rapporti geotecnici disponibili, sono state eseguite ulteriori analisi

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 72 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

di sensibilità. Come descritto nella sezione 7, questi confermano l'adeguatezza del modello computazionale adottato.

Infine è stato valutato anche il rischio di liquefazione all'interno dei materiali sabbiosi (capitolo 8) con la conclusione che tali fenomeni non sono attesi nei pochi strati granulari presenti in sito nelle profondità di interesse e per l'evento sismico di progetto caratterizzato da un periodo di ritorno di 949 anni.

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 73 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

10. Appendice 1

10.1 Risultati del matching spettrale

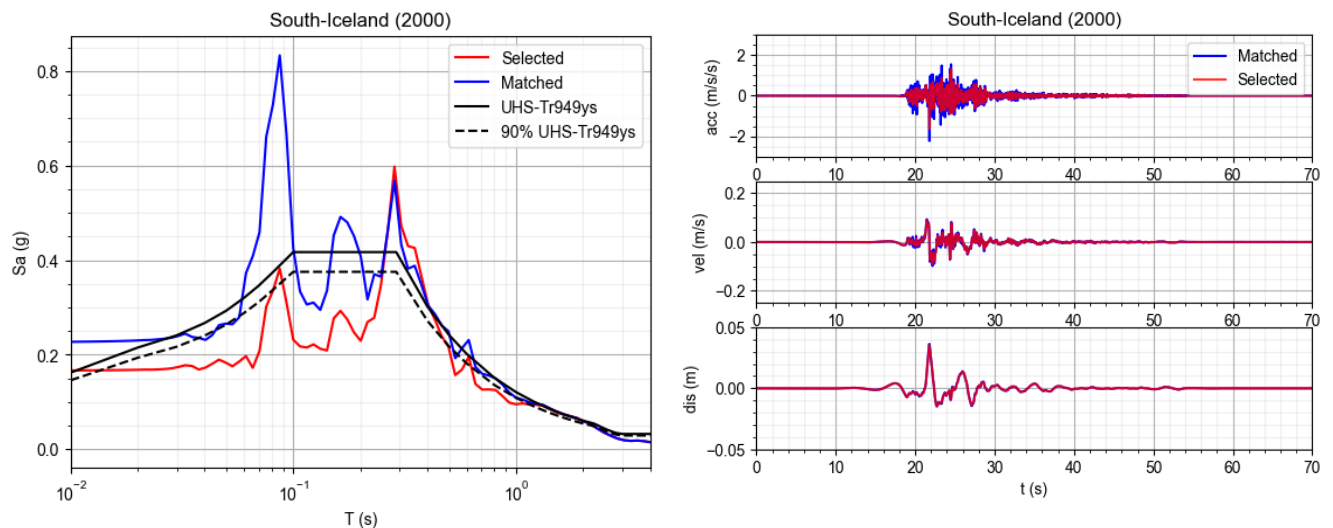


Figura 27 – Tr 949 anni, South-Iceland 2000

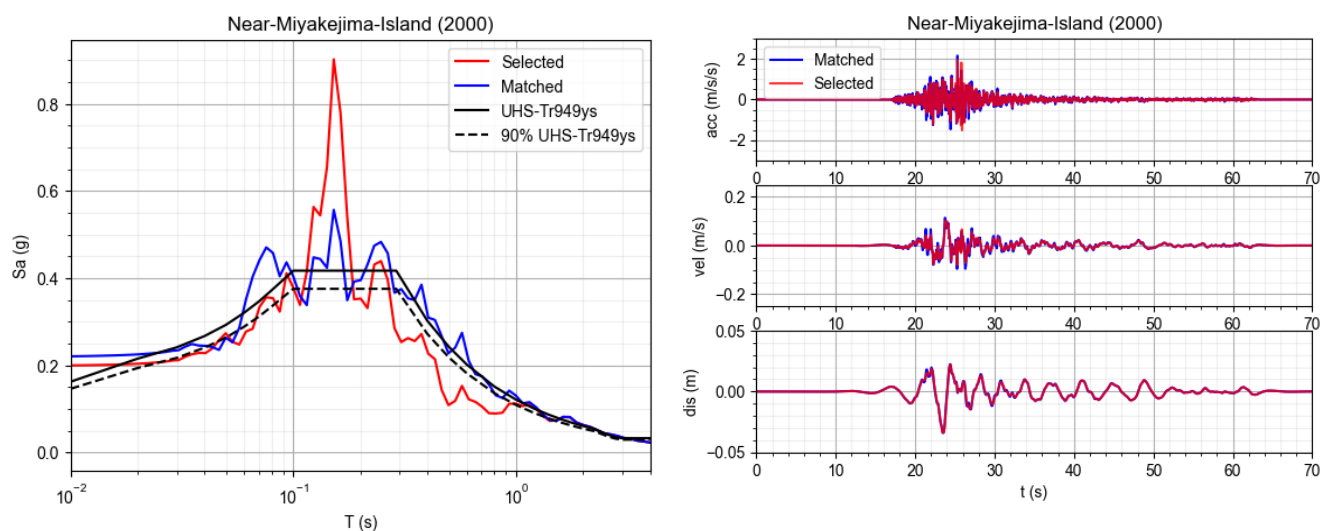


Figura 28 – Tr 949 anni, Near-Miyakejima Island 2000

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 74 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

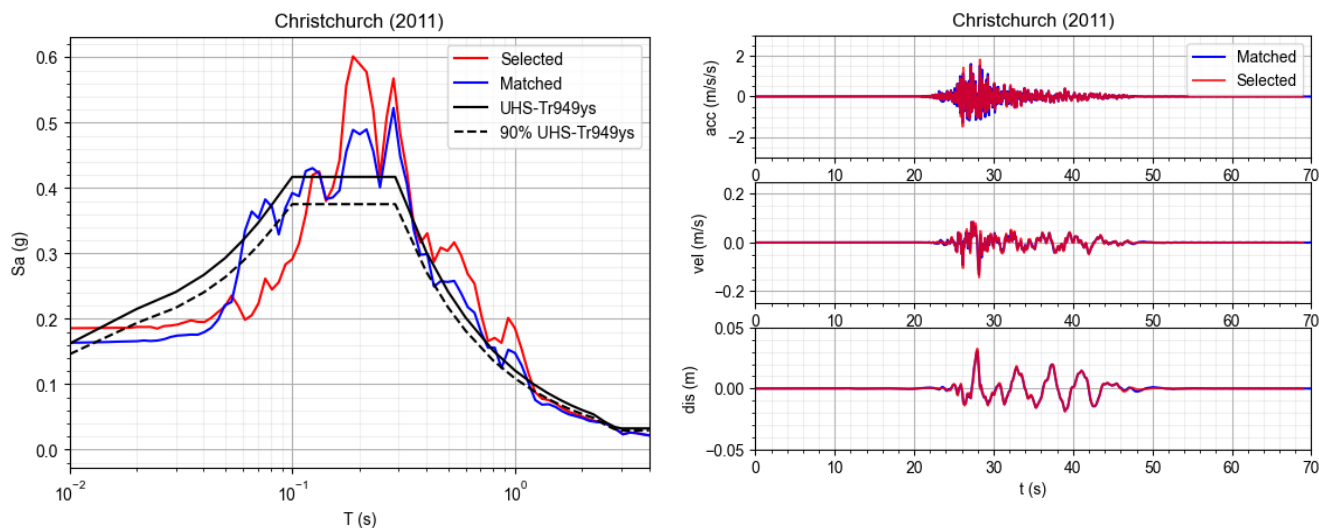


Figura 29 – Tr 949 anni, Christchurch 2011

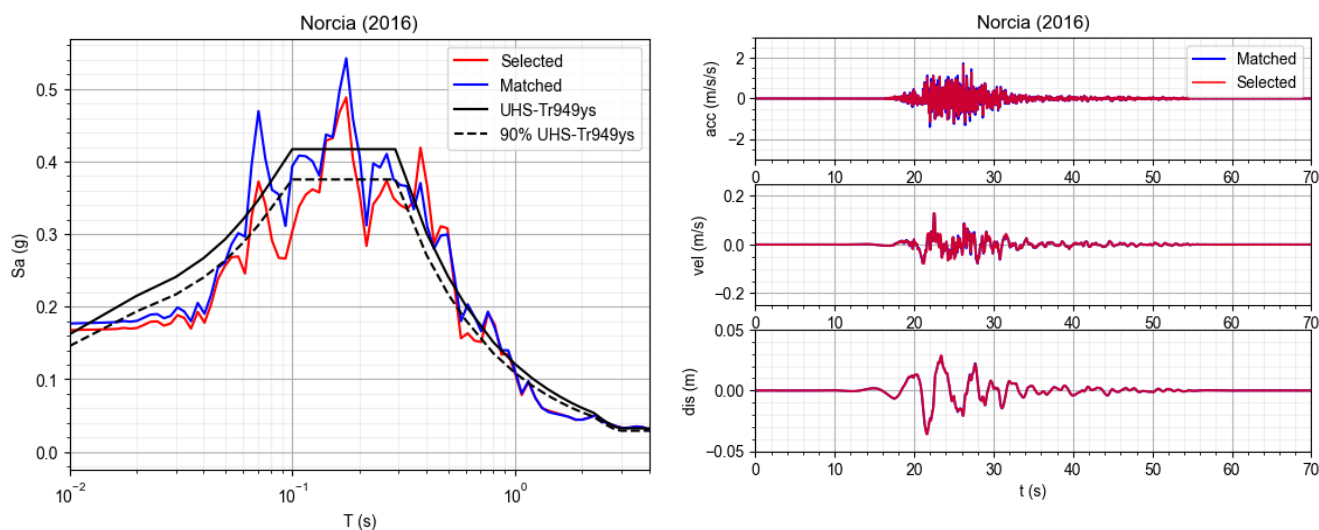


Figura 30 – Tr 949 anni, Norcia 2016

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 75 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

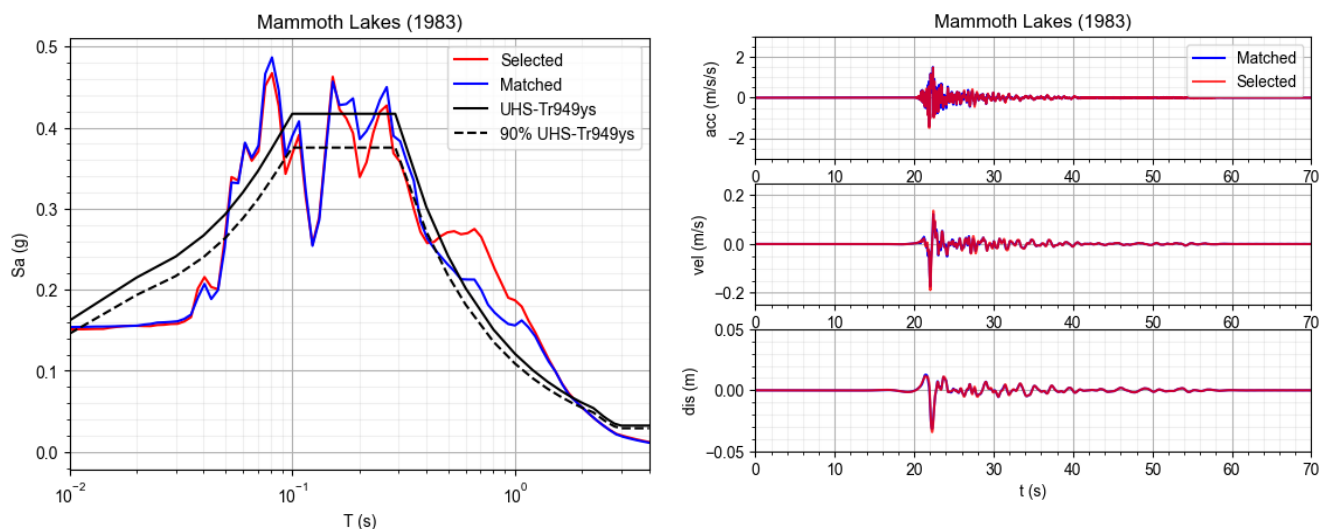


Figura 31 – Tr 949 anni, Mammoth Lakes 1983

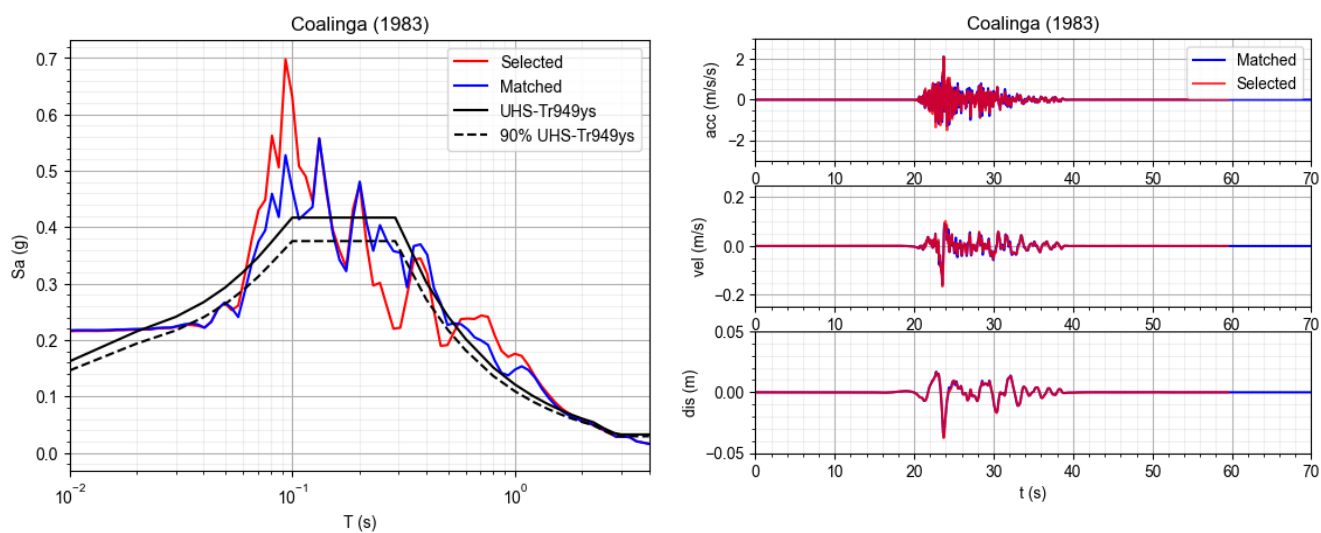


Figura 32 – Tr 949 anni, Coalinga 1983

Documento di proprietà **Snam Rete Gas**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

File dati: 0001-CI-E-012502_A - MODELLAZIONE SISMICA CONCERNENTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE CON ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) E VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

	  	COMMESSA GC/R22011/001	COD. TECNICO 2109/A
	LOCALITA' REGIONE EMILIA ROMAGNA	0001-CI-E-012502	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 76 di 76	Rev. A

Rif. Rosetti Marino S.p.A: 123A40-DDL-ST-RE-12502

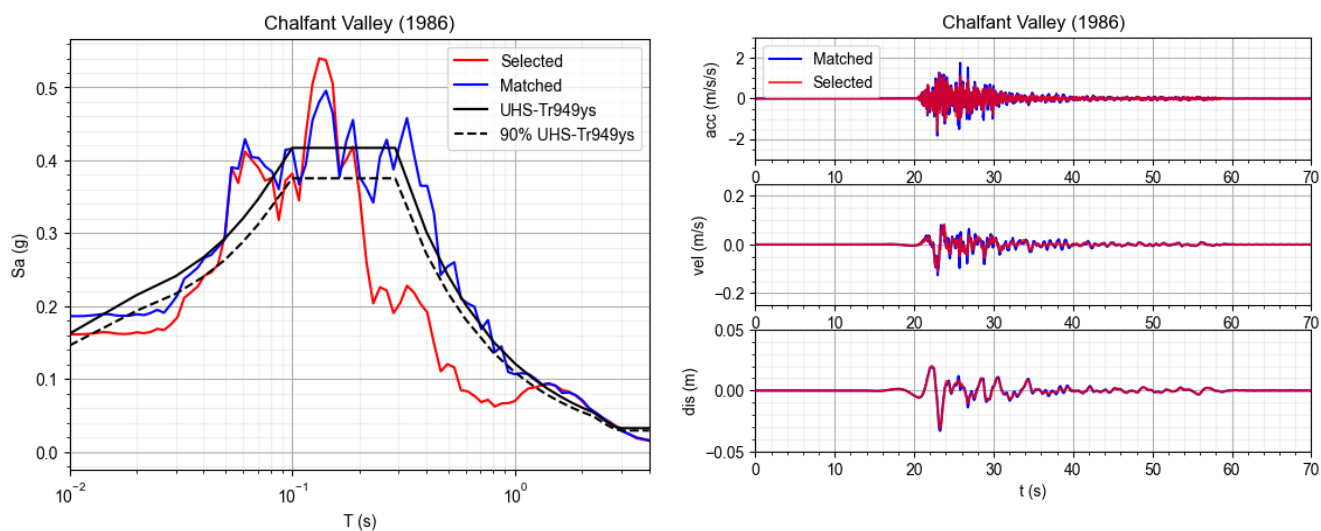


Figura 33 – Tr 949 anni, Chalfant Valley 1986