

Validazione codice di calcolo

Informativa sull'affidabilità dei codici di calcolo D.M. 14-01-2008 paragrafo 10.2.

Le fasi di progettazione e sviluppo dei software **GeoStru** sono sottoposti al controllo gestione di qualità aziendale ISO (*International Organization for Standardization*) 9001:2000 certificato da CVI ITALIA srl - **Certificato nr. 7007 1 04**.

Sono stati forniti degli esempi di calcolo, in allegato a questo documento, al fine di verificare la validità delle procedure di calcolo ed effettuare le procedure di controllo con altri strumenti di calcolo.

I software **GeoStru** sono dotati di sistemi di controllo dei dati di input e di output molto sofisticati i quali sono in grado di rilevare errori gravi tali da non consentire le corrette elaborazioni.

RSL

Risposta Sismica Locale

Versione 2011.0 Rev. 0

1 – Premessa.....	3
2 – Individuazione dei campi di impiego del programma	3
3 – Descrizione delle basi teoriche e sperimentazione del programma	3
3.1 – Analisi territoriale	3
3.1.1 – Procedura di calcolo	4
3.1.2 – Metodi di calcolo per la valutazione del fattore di amplificazione	4
3.1.2.1 – Metodo di Medvedev	4
3.1.2.2 – Metodo approssimato del rapporto di impedenza sismica.....	5
3.1.2.3 – Metodo di Midorikawa	5
3.1.2.4 – Metodo di Midorikawa-Fujiimoto	6
3.1.2.5 – Metodo di Borcherdt per magnitudo del sisma inferiore al VII° della scala MCS	6
3.1.2.6 – Metodo di Borcherdt per magnitudo del sisma pari o superiore al VII° della scala MCS.....	6
3.1.2.7 – Metodo ID.....	7
3.1.2.8 – Metodo “Micro” di Giulio Riga	7
3.1.2.9 – Metodo proposto dalla Regione Lombardia.....	7
3.2 – Analisi Locale	13
3.2.1 – Procedura di calcolo	13
3.2.2 – Esempio 1	17
3.2.3 – Esempio 2	19
3.2.4 – Esempio 3	22

1 – Premessa

Alla luce di quanto prescritto dalla norma **D.M. 14 gennaio 2008**, al punto 10.2, il presente report di validazione vuole dimostrare la affidabilità del programma **RSL**. La norma sopra citata richiede esplicitamente che siano discussi i seguenti punti:

1. Individuazione dei campi di impiego del programma;
2. Descrizione delle basi teoriche;
3. Sperimentazione del programma attraverso l'ausilio di casi di prova completamente risolti e commentati.

2 – Individuazione dei campi di impiego del programma

Il programma RSL è un programma che risponde alla domanda sulla pericolosità sismica di un territorio o di un particolare sito fornendo valutazioni qualitative e quantitative del fattore di amplificazione. Permette infatti di compiere due tipi di analisi denominati "Territoriale" e "Locale".

Il primo fa riferimento ad un'analisi che in letteratura è nota come di livello 2, adatta alla classificazione *qualitativa* del rischio sismico a cui sono soggette ampie porzioni di territorio. Questo avviene attraverso l'interpolazione dei valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio e dell'amplificazione stratigrafica, di un certo numero di punti sul territorio ove si siano effettuati dei campionamenti. Il coefficiente di amplificazione viene calcolato secondo vari metodi noti in letteratura geotecnica messi a disposizione dell'utente, o tramite diretto input utente. Il risultato finale si traduce in due mappe che individuano zone del territorio rispettivamente a pari velocità di propagazione delle onde di taglio ed a pari fattore di amplificazione.

Il secondo invece, è noto in letteratura come un'analisi di livello 3, e permette di valutare *quantitativamente* l'amplificazione stratigrafica di un particolare sito, desunta dalla soluzione dell'equazione differenziale che governa il problema della propagazione delle onde di taglio in solidi con comportamento alla Kelvin-Voigt.

3 – Descrizione delle basi teoriche e sperimentazione del programma

3.1 – Analisi territoriale

Prima di affrontare la procedura di calcolo che sta alla base di tale analisi, è opportuno descrivere cosa ci si attende da questa tipologia di analisi.

Le analisi di livello 2 vengono compiute a valle di quelle di livello 1, e rispetto a queste approfondiscono aspetti che in prima istanza si trascurano. Quelle di livello 1 si rivolgono a territori di proporzioni regionali o provinciali, così da individuare grossolanamente zone affini per caratteristiche geologiche per cui ci si aspetta un certa risposta sismica, individuando altresì aree in cui è necessario approfondire con ulteriori indagini di maggiore dettaglio. Quelle di livello 2 sono appunto analisi che hanno in primo luogo l'obiettivo fornire tali dettagli e si rivolgono a porzioni di territorio su scala provinciale o comunale. In pratica, mentre quelle di livello 1 si basano su dati storici ed informazioni su aree di ampiezza tipicamente geologiche, quelle di livello 2 hanno il compito di scendere di scala ed affrontare problemi più locali. Per queste ultime

infatti sono necessarie un certo numero di indagini tali da permettere una classificazione geologica di maggiore dettaglio di ampie porzioni di territorio. Non sono quindi richieste indagini capillari, ma in numero sufficiente ad individuare aree che possano ritenersi sufficientemente omogenee. In questa fase sono altresì individuate zone per le quali sono richieste ulteriori studi più approfonditi e di dettaglio.

3.1.1 – Procedura di calcolo

Come input si presuppone la conoscenza della stratigrafia, e dei parametri caratteristici dei terreni che la compongono, in alcuni punti del territorio. Per ciascun punto in cui si è effettuata l'indagine (da qui in avanti denominati "punti di indagine") si valutano i parametri caratteristici del terreno medi, ovvero si valuta la velocità di propagazione delle onde di taglio media compiendo una media pesata sullo spessore degli strati delle suddette velocità in ciascuno strato. In questo modo si ottiene un comportamento medio tale da poter idealmente considerare il singolo punto di indagine come una stratigrafia omogenea, ovvero costituita da un unico strato di terreno ideale, avente le suddette caratteristiche medie. Il fattore di amplificazione medio viene valutato sulla base di vari metodi discussi nelle sezioni successive.

Una volta noti i parametri medi e l'amplificazione in ciascun punto di indagine si genera una maglia di punti molto fitta, e per ciascun di essi si valutano la velocità di propagazione delle onde di taglio ed il fattore di amplificazione. Questi vengono interpolati a partire dai relativi valori calcolati per i punti di indagine, attraverso il metodo noto in letteratura come metodo di Shepard. Da qui si individuano tutti i punti con il medesimo valore rispettivamente di velocità delle onde di taglio e di fattore di amplificazione impiegati per tracciare le relative isocline.

3.1.2 – Metodi di calcolo per la valutazione del fattore di amplificazione

Nei successivi sottoparagrafi vengono illustrati i vari metodi di valutazione del fattore di amplificazione adoperati in RSL, tratti dalla letteratura scientifica in campo Geotecnico.

3.1.2.1 – Metodo di Medvedev

L'amplificazione calcolata secondo il metodo di Medvedev ha la seguente espressione:

$$F_a = [1 + \log_{10}(n_o + n_w)] \cdot (n_1 \cdot n_2)$$

dove: n_o rappresenta l'incremento di intensità sismica; n_w l'incremento di intensità sismica dovuto alla presenza di falda freatica al di sopra dei 10 m di profondità; n_1 il fattore che tiene conto della morfologia del terreno in superficie; n_2 il fattore che tiene conto della morfologia dello strato roccioso.

Ciascuno di questi parametri è calcolato secondo le seguenti espressioni:

$$n_o = 1,67 \cdot \ln(R_o/R_n)$$

$$n_w = e^{-0,04Z} \cdot Z$$

$$n_1 = 1 + \log_{10}(1 + \sin \beta)$$

$$n_2 = 1 + \log_{10}(1 + \sin \alpha)$$

dove:

α è l'inclinazione media del pendio;

β è l'inclinazione media del bedrock;

Z la profondità dal piano campagna;

$R_o = V_o \cdot \gamma_o$ è la rigidità della roccia di riferimento;

$R_n = V_n \cdot \gamma_n$ è la rigidità dello strato superficiale.

Quest'ultimo, nel caso di una stratificazione articolata è ottenibile dall'espressione seguente:

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot h_i \cdot \gamma_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

dove:

V_i è la velocità delle onde di taglio dello strato i -esimo;

γ_i è il peso per unità di volume dello strato i -esimo;

h_i è lo spessore dello strato i -esimo.

3.1.2.2 - Metodo approssimato del rapporto di impedenza sismica

Questo metodo, valuta l'amplificazione di una stratigrafia in corrispondenza della sua frequenza fondamentale pari a:

$$f = \frac{V_s}{4 \cdot H}$$

dove:

V_s rappresenta la velocità media delle onde di taglio nella stratigrafia al di sopra dello strato rigido;

H lo spessore della stratigrafia al di sopra dello strato di bedrock.

L'amplificazione è quindi pari a :

$$F_a = \frac{1}{\frac{1}{I} + \frac{\pi \cdot D}{2}}$$

con

$$I = \frac{V_{sb} \cdot \gamma_{sb}}{V_{sc} \cdot \gamma_{sc}}$$

che rappresenta l'impedenza sismica, e dove:

D rappresenta il fattore di smorzamento;

V_{sb} e γ_{sb} rispettivamente la velocità delle onde di taglio e la densità del bedrock;

V_{sc} e γ_{sc} rispettivamente la velocità delle onde di taglio e la densità medi degli strati al di sopra del bedrock valutati come media pesata sullo spessore degli strati stessi.

3.1.2.3 - Metodo di Midorikawa

Questo metodo prevede la valutazione del fattore di amplificazione secondo la relazione empirica seguente:

$$F_a = 68 \cdot V_s^{-0.6} \quad \text{per } V_{s30} < 1100 \text{ m/s}$$

$$F_a = 1 \quad \text{per } V_{s30} \leq 1100 \text{ m/s}$$

dove:

V_s rappresenta la velocità media delle onde di taglio valutata come media pesata sullo spessore degli strati;

V_{s30} la velocità equivalente delle onde di taglio fino alla profondità di 30 m.

Convenzionalmente in questo metodo viene assunto come bedrock uno strato in cui la velocità delle onde di taglio è maggiore di 600 ÷ 700 m/s.

3.1.2.4 – Metodo di Midorikawa-Fujiimoto

Questo metodo prevede la valutazione del fattore di amplificazione a partire da una relazione empirica suggerita da Midorikawa e Fujiimoto, di seguito riportata:

$$F_a = 10^{2.367 - 0.852 \cdot \log(V_{s30}) + 0.166}$$

dove:

V_{s30} la velocità equivalente delle onde di taglio fino alla profondità di 30 m.

Convenzionalmente in questo metodo viene assunto come bedrock uno strato in cui la velocità delle onde di taglio è maggiore di 600 m/s.

3.1.2.5 – Metodo di Borchardt per magnitudo del sisma inferiore al VII° della scala MCS

Questo metodo si basa sulla correlazione tra la velocità delle onde di taglio e l'amplificazione spettrale orizzontale media (ASHA) per eventi sismici di intensità fino al VII grado della scala MCS, ed è pari a:

$$ASHA = \frac{700}{V_s}$$

dove:

$ASHA$ rappresenta il fattore di amplificazione;

700 la velocità nominale delle onde di taglio nel bedrock;

V_s la velocità media delle onde di taglio fino alla profondità di 30 m.

3.1.2.6 – Metodo di Borchardt per magnitudo del sisma pari o superiore al VII° della scala MCS

Questo metodo, analogo al precedente, si basa sulla correlazione tra la velocità delle onde di taglio e l'amplificazione spettrale orizzontale media (ASHA) per eventi sismici di intensità pari o superiori al VII grado della scala MCS, ed è pari a:

$$ASHA = \frac{600}{V_s}$$

dove:

$ASHA$ rappresenta il fattore di amplificazione;

600 la velocità nominale delle onde di taglio nel bedrock;

V_s la velocità media delle onde di taglio fino alla profondità di 30 m.

3.1.2.7 – Metodo ID

Questo metodo di valutazione del fattore di amplificazione si basa sull'impedenza sismica smorzata di un fattore D, secondo la seguente espressione:

$$F_a = \frac{V_s \cdot \gamma_s}{V_b \cdot \gamma_b} \left(1 - \frac{\pi}{2} \cdot D \cdot \frac{V_s \cdot \gamma_s}{V_b \cdot \gamma_b} \right) \leq 1,35$$

dove:

D rappresenta il fattore di smorzamento;

V_s e γ_s rispettivamente la velocità media delle onde di taglio e la densità media degli strati sovrastanti il bedrock;

V_b e γ_b rispettivamente la velocità delle onde di taglio e la densità del bedrock.

3.1.2.8 – Metodo “Micro” di Giulio Riga

Questo metodo, suggerito da Giulio Riga, ricalca le indicazioni dell'Ordinanza 3274, e viene valutata a mezzo della seguente espressione:

$$F_a = \ln \left[0,66 - 0,215 \cdot \ln \left(\frac{V_{s30}}{1000} \right) \right] + 0,81$$

dove:

V_{s30} la velocità equivalente delle onde di taglio fino alla profondità di 30 m.

3.1.2.9 – Metodo proposto dalla Regione Lombardia

Questo metodo si basa sulle indicazioni fornite dalla Regione Lombardia per quanto riguarda la caratterizzazione del territorio dal punto di vista sismico, in emanazione della Delibera della Giunta Regionale del 22 dicembre 2005 - n.8/1566, in attuazione dell'Art. 57 delle L.R. 11 marzo 2005 n.12 pubblicata sul Bollettino Ufficiale Regione Lombardia 3° Supplemento Straordinario del 19 gennaio 2006.

Il metodo si basa su una prima tipizzazione litologica della stratigrafia, che permette di selezionare una scheda tra le cinque proposte. Successivamente in funzione della profondità e della velocità delle onde di taglio dello strato superficiale, l'abaco contenuto nella scheda precedentemente scelta permette di individuare la relativa curva atta a valutare il fattore di amplificazione in funzione al periodo proprio del sito calcolato come:

$$T = \frac{4 \cdot \sum_{i=1}^n h_i}{\frac{\sum_{i=1}^n V_{si} \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}}$$

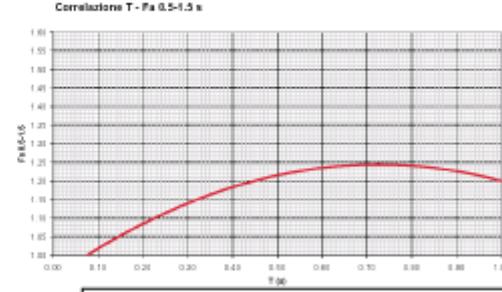
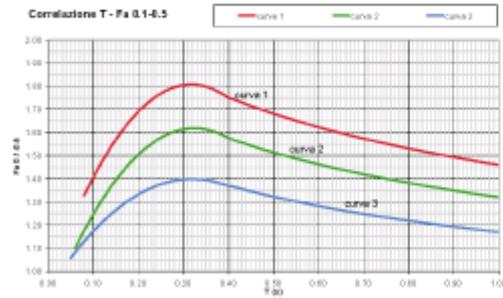
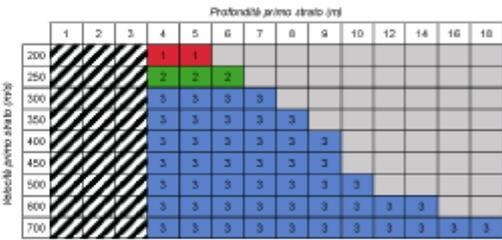
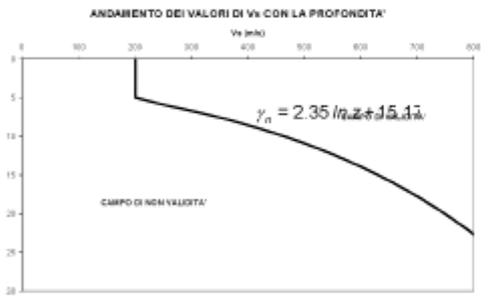
Di seguito vengono riportate le schede pubblicate sul bollettino ufficiale di cui sopra:

EFFETTI LITOLOGICI – SCHEDA LITOLOGIA GHIAIOSA

PARAMETRI INDICATIVI

GRANULOMETRIA:
 Da ghiaie e ciottoli con blocchi a ghiaie e sabbie limose debolmente argillose passando per ghiaie con sabbie limose, ghiaie sabbiose, ghiaie con limo debolmente sabbiose e sabbie con ghiaie

NOTE:
 Comportamento granulare
 Struttura granulo-sostenuta
 Frazione ghiaiosa superiore al 35%
 Frequenti clasti con $D_{max} > 20$ cm
 Frazione sabbiosa fino ad un massimo del 65%
 Matrice limoso - argillosa fino ad un massimo del 30% con frazione argillosa subordinata (fino al 5%)
 Presenza di eventuali trovanti con $D > 50$ cm



$$Fa_{0.5-1.5} = -0.58T^2 + 0.84T + 0.94$$

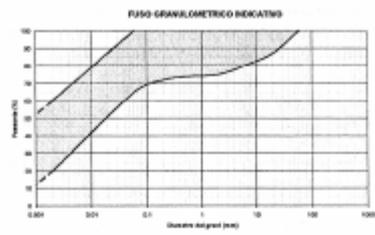
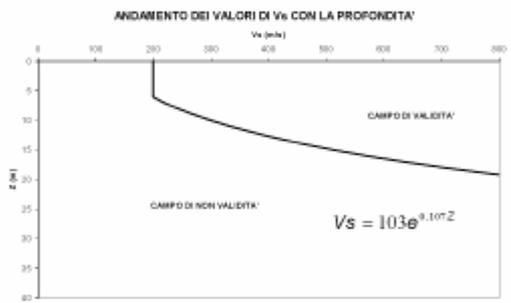
Curva	Tratto polinomiale	Tratto logaritmico
1	$0.08 < T \leq 0.40$ $Fa_{0.1-0.1} = -8.5T^2 + 5.4T + 0.95$	$0.40 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.1} = 1.46 - 0.32LnT$
2	$0.06 < T \leq 0.40$ $Fa_{0.5-0.5} = -7.4T^2 + 4.8T + 0.84$	$0.40 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.32 - 0.28LnT$
3	$0.05 < T \leq 0.40$ $Fa_{0.5-0.5} = -4.77T^2 + 3.0T + 0.92$	$0.40 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.1} = 1.17 - 0.22LnT$

EFFETTI LITOLGICI – SCHEDA LITOLOGIA LIMOSO – ARGILLOSA TIPO 1

PARAMETRI INDICATIVI

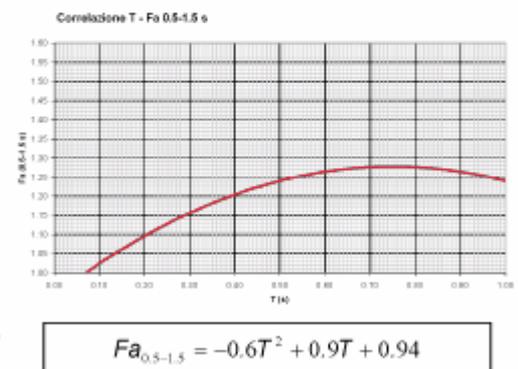
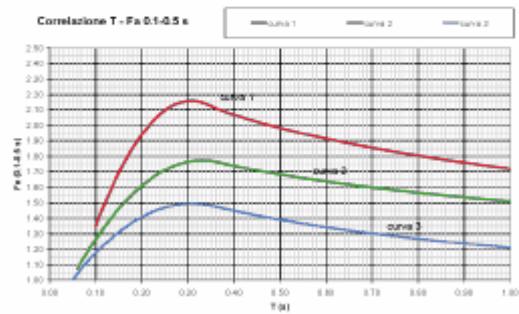
GRANULOMETRIA:
 Da limi ghiaioso – argillosi debolmente sabbiosi ad argille con limi passando per limi argillosi, limi con sabbie argillose, limi e sabbie con argille, argille ghiaiose, argille ghiaiose debolmente limose ed argille con sabbie debolmente limose

NOTE:
 Comportamento coesivo
 Struttura matrice-sostenuta
 Frazione limosa superiore al 40%
 Presenza di clasti immersi con $D_{max} < 2-3$ cm
 Frazione ghiaiosa fino ad un massimo del 25%
 Frazione sabbiosa fino ad un massimo del 35%
 Frazione argillosa compresa tra 20% e 60%
 Presenza di eventuali sottili orizzonti ghiaioso fini e sabbioso medio-grossolani

Profondità primo strato (m)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18
200				1	1									
250				2	2	1								
300				2	2	2	2	2	2	2				
350				3	3	3	3	2	2	2	2			
400				3	3	3	3	3	3	3	3			
450				3	3	3	3	3	3	3	3	3		
500				3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
600				3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
700				3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3



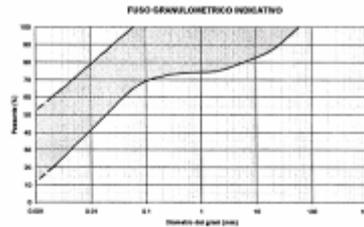
Curva	Tratto polinomiale	Tratto logaritmico
1	$0.08 < T \leq 0.35$ $Fa_{0.1-0.5} = -18.7T^2 + 11.5T + 0.39$	$0.35 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.72 - 0.38LnT$
2	$0.06 < T \leq 0.35$ $Fa_{0.1-0.5} = -9.5T^2 + 6.3T + 0.73$	$0.35 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.51 - 0.25LnT$
3	$0.05 < T \leq 0.35$ $Fa_{0.2-0.3} = -7.3T^2 + 4.5T + 0.80$	$0.35 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.21 - 0.26LnT$

EFFETTI LITOLOGICI – SCHEDA LITOLOGIA LIMOSO – ARGILLOSA TIPO 2

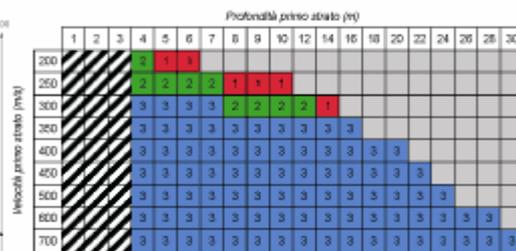
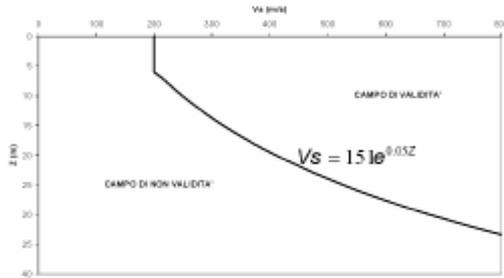
PARAMETRI INDICATIVI

GRANULOMETRIA e NOTE: come per la litologia limoso - argillosa TIPO 1, a cui in aggiunta è possibile associare i seguenti range di valori per alcuni parametri geotecnici significativi validi per argille con limi ghiaiosi debolmente sabbiosi:

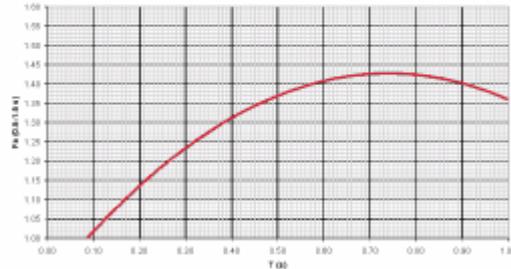
PARAMETRO		INTERVALLO
Peso di volume naturale	γ (kN/m ³)	19.5-20.0
Peso specifico particelle solide	γ_s (kN/m ³)	25.7-26.7
Contenuto d'acqua naturale	w (%)	20-25
Limite di liquidità	w _L (%)	30-50
Limite di plasticità	w _p (%)	15-20
Indice di plasticità	I _p (%)	15-30
Indice dei vuoti	e	0.5-0.7
Grado di saturazione	S _v (%)	90-100
Coefficiente di spinta a riposo	K ₀	0.5-0.6
Indice di compressione	C _c	0.15-0.30
Indice di rigonfiamento	C _s	0.02-0.06
Coefficiente di consolidazione secondaria	C _a	0.001-0.005
Grado di consolidazione	OCR	1-3
Numero colpi prova SPT (nei primi 10 m)	N _{spt}	15-30



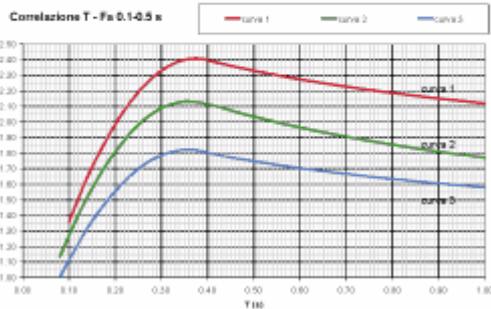
ANDAMENTO DEI VALORI DI V_s CON LA PROFONDITA'



Correlazione T - Fa 0.5-1.5 e



$$Fa_{0.5-1.5} = -T^2 + 1.48T + 0.88$$



Curva	Tratto polinomiale	Tratto logaritmico
1	0.10 < T ≤ 0.40 $Fa_{0.1-0.5} = -13.9T^2 + 10.4T + 0.46$	0.40 < T ≤ 1.00 $Fa_{0.1-0.5} = 2.12 - 0.30LnT$
2	0.08 < T ≤ 0.40 $Fa_{0.3-0.5} = -12.8T^2 + 9.2T + 0.48$	0.40 < T ≤ 1.00 $Fa_{0.3-0.5} = 1.77 - 0.38LnT$
3	0.05 < T ≤ 0.40 $Fa_{0.3-0.5} = -10.6T^2 + 7.6T + 0.46$	0.40 < T ≤ 1.00 $Fa_{0.3-0.5} = 1.58 - 0.24LnT$

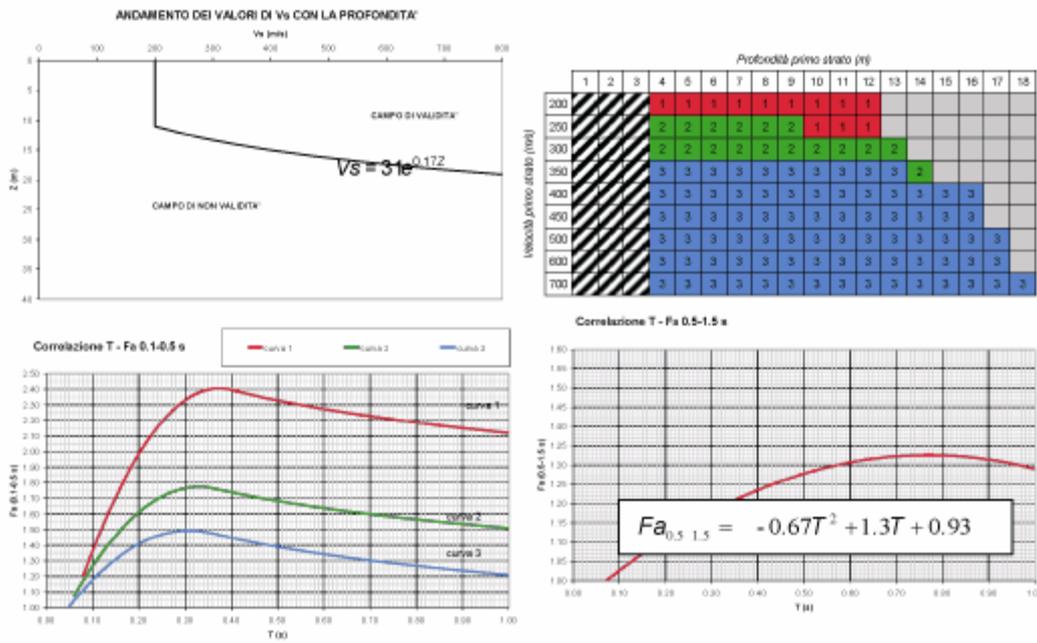
EFFETTI LITOLOGICI – SCHEDA LITOLOGIA LIMOSO – SABBIOSA TIPO 1

PARAMETRI INDICATIVI

GRANULOMETRIA:
Da limi con sabbie debolmente ghiaiose a limi debolmente sabbioso-argillosi passando per limi con sabbie, limi debolmente argillosi, limi debolmente sabbiosi, limi debolmente ghiaiosi e sabbie con limi debolmente argillosi

NOTE:
Comportamento coesivo
Frazione limosa ad un massimo del 95%
Presenza di clasti immersi con $D_{max} < 2-3$ cm
Frazione ghiaiosa fino ad un massimo del 10%
Frazione sabbiosa fino ad un massimo del 45%
Frazione argillosa fino ad un massimo del 15%

A FIANCO: range di valori per alcuni parametri geotecnici significativi per limi sabbiosi debolmente argillosi



Curva	Tratto polinomiale	Tratto logaritmico
1	$0.08 < T \leq 0.40$ $Fa_{0.1-0.5} = -13.9T^2 + 10.4T + 0.46$	$0.40 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.5} = 2.12 - 0.30LnT$
2	$0.06 < T \leq 0.35$ $Fa_{0.1-0.5} = -9.5T^2 + 6.3T + 0.73$	$0.35 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.51 - 0.25LnT$
3	$0.05 < T \leq 0.35$ $Fa_{0.1-0.5} = -7.3T^2 + 4.5T + 0.80$	$0.35 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.21 - 0.26LnT$

EFFETTI LITOLGICI – SCHEDA LITOLOGIA LIMOSO – SABBIOSA TIPO 2

PARAMETRI INDICATIVI

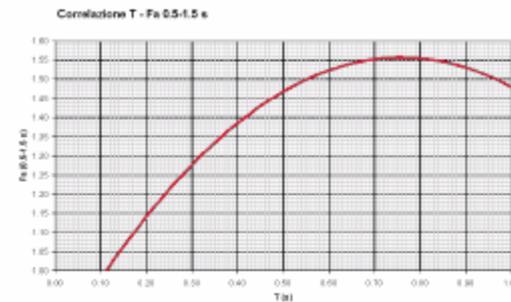
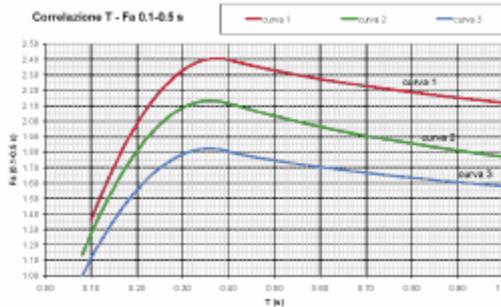
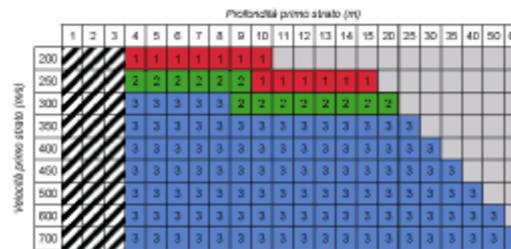
GRANULOMETRIA:
Da limi con sabbie debolmente ghiaiose a limi debolmente sabbioso-argillosi passando per limi con sabbie, limi debolmente argillosi, limi debolmente sabbiosi, limi debolmente ghiaiosi e sabbie con limi debolmente argillosi

NOTE:
Comportamento coesivo
Frazione limosa ad un massimo del 95%
Presenza di clasti immersi con $D_{max} < 2-3$ cm
Frazione ghiaiosa fino ad un massimo del 10%
Frazione sabbiosa fino ad un massimo del 45%
Frazione argillosa fino ad un massimo del 15%

A FIANCO: range di valori per alcuni parametri geotecnici significativi validi per limi sabbiosi debolmente argillosi

FUSO GRANULOMETRICO INDICATIVO

PARAMETRO	INTERVALLO	
Peso di indagine naturale	(g/ln)	18.0-18.5
Peso specifico particelle solide	γ_s (kN/m ³)	20.0-27.0
Contenuto d'acqua naturale	w (%)	30-50
Limite di liquidità	LL (%)	25-35
Limite di plasticità	PL (%)	15-20
Indice di plasticità	I _p (%)	5-15
Indice dei vuoti	e	0.6-0.9
Grado di saturazione	S (%)	90-100
Coefficiente di spinta e riposo	K ₀	0.4-0.6
Indice di compressione	C _c	0.10-0.30
Indice di sigillamento	C _s	0.05-0.05
Coefficiente di consolidazione secondaria	C _α	0.025-0.030
Numero colpi prova SPT (testi prova: 30 cm)	N ₆₀	0-20



$$Fa_{0.5, 1.5} = -1.33T^2 + 2.02T + 0.79$$

Curva	Tratto polinomiale	Tratto logaritmico
1	$0.10 < T \leq 0.40$ $Fa_{0.1-0.5} = -13.9T^2 + 10.4T + 0.46$	$0.40 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.5-1.5} = 2.12 - 0.30LnT$
2	$0.08 < T \leq 0.40$ $Fa_{0.1-0.5} = -12.8T^2 + 9.2T + 0.48$	$0.40 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.5-1.5} = 1.77 - 0.38LnT$
3	$0.05 < T \leq 0.40$ $Fa_{0.1-0.5} = -10.6T^2 + 7.6T + 0.46$	$0.40 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.5-1.5} = 1.58 - 0.24LnT$

3.2 – Analisi Locale

Sulla scorta di quanto già descritto in premessa al punto 3.1, l'analisi locale è classificata come di livello 3. Questo livello di analisi ha l'obiettivo di risolvere in maniera puntuale la classificazione delle aree dal punto di vista del rischio sismico, soprattutto per quelle individuate dall'analisi di livello precedente come necessarie di ulteriori approfondimenti. In pratica si rivolgono ad aree di ampiezza indicativamente paragonabile a quelle dei lotti di terreno, fornendo dati quantitativi sull'entità delle amplificazioni.

3.2.1 – Procedura di calcolo

La procedura di calcolo adoperata da RSL per la valutazione della funzione di trasferimento, e quindi dell'amplificazione, presuppone come base di partenza un accelerogramma, od uno spettro di risposta in accelerazione, e la conoscenza della stratigrafia del sito attraverso i seguenti parametri geotecnici per ogni strato: peso per unità di volume; velocità di propagazione delle onde di taglio; coefficiente di spinta laterale; modulo di taglio iniziale (opzionale); spessore; indice di plasticità. La non linearità del calcolo è introdotta dalla dipendenza dalla deformazione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso.

Schematicamente la procedura è riassumibile nel seguente modo:

1. Valutazione dello spettro di Fourier dell'accelerogramma (omessa nel caso si debba analizzare uno spettro);
2. Le seguenti operazioni vengono ripetute sino al raggiungimento di un errore relativo percentuale ritenuto accettabile tra due iterazioni successive:
 - 2.1. Stima della funzione di trasferimento;
 - 2.2. Valutazione della deformazione indotta in ciascuno strato;
 - 2.3. Correzione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso per ogni strato;
 - 2.4. Ripetizione delle operazioni 2.1, 2.2 e 2.3 fino a quando la differenza di deformazione tra un'iterazione e la precedente non rimane al di sotto di una soglia ritenuta accettabile;
3. Nel caso di un accelerogramma: trasformazione inversa di Fourier dello spettro precedentemente calcolato ed opportunamente pesato a mezzo della funzione di trasferimento calcolata. Nel caso di uno spettro: amplificazione dello spettro moltiplicando gli opportuni coefficienti per le accelerazioni relative a ciascuna frequenza.

Attraverso questa procedura è possibile "trasferire" l'accelerogramma dal bedrock alla superficie. La deformazione per ciascuno strato viene corretta sulla base del rapporto fra deformazione effettiva e massima come suggerito dalla letteratura scientifica, ovvero

$$\frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{max}} = \frac{M - 1}{10}$$

dove M rappresenta la magnitudo del sisma.

Per la valutazione della funzione di trasferimento, RSL considera un suolo variamente stratificato composto da N strati orizzontali di cui l' N -esimo è il letto di roccia (bedrock). Ponendo come ipotesi che ciascuno strato si comporti come un solido di Kelvin-Voigt, la propagazione delle onde che attraversano gli strati verticalmente può essere definita dall'equazione dell'onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1)$$

dove: u rappresenta lo spostamento; t il tempo; ρ la densità; G il modulo di deformazione al taglio; η la viscosità. Per onde armoniche lo spostamento può essere scritto come:

$$u(z, t) = U(z)e^{i\omega t} \quad (2)$$

che sostituita nella (1) pone

$$(G + i\omega\eta) \frac{dU}{dz} = -\rho\omega^2 U \quad (3)$$

dove ω rappresenta la frequenza angolare. La (3) può essere riscritta come

$$G^* \frac{dU}{dz} = -\rho\omega^2 U \quad (4)$$

avendo posto $G^* = G + i\omega\eta$, ovvero il modulo di deformazione al taglio *complesso*. Questo può essere ulteriormente riscritto come

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad (5)$$

avendo posto

$$\eta = \frac{2G}{\omega} \xi \quad (6)$$

dove ξ rappresenta il coefficiente di smorzamento viscoso. Ciò posto, e fatta convenzione che l'apice * indica la natura complessa della variabili in gioco, la soluzione dell'equazione generica dell'onda è la seguente:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t - k^*z)} + Be^{i(\omega t + k^*z)} \quad (7)$$

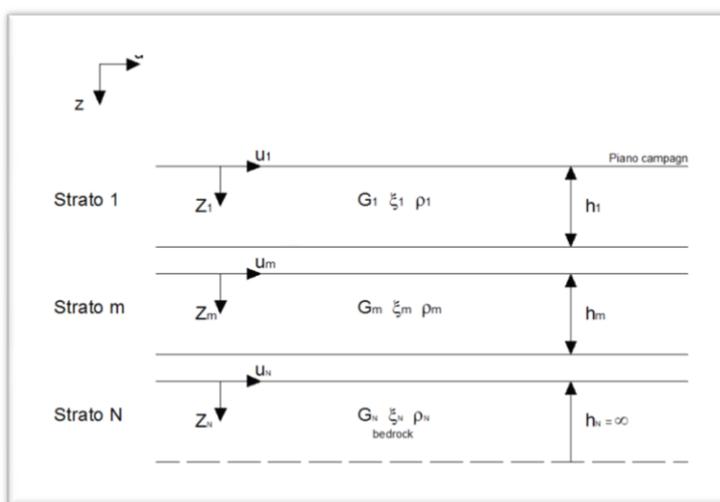


Figura 1: Esempio di stratigrafia per riferimento.

dove A e B dipendono dalle condizioni al contorno e rappresentano l'ampiezza d'onda che viaggia rispettivamente verso l'alto (-z) e verso il basso (+z), mentre k^* rappresenta il numero d'onda complesso dato dalla seguente espressione:

$$k^* = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \quad (8)$$

Il taglio invece è dato da:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{\partial u}{\partial z} \quad (9)$$

Introducendo un sistema di riferimento locale Z per ciascuno strato, lo spostamento rispettivamente in sommità ed al fondo è

$$u_m(Z_m = 0, t) = (A_m + B_m)e^{i\omega t} \quad \text{per } m = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$$u_m(Z_m = h_m, t) = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m})e^{i\omega t} \quad \text{per } m = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

dove h_m è lo spessore dello strato m -esimo. Poiché lo spostamento fra i vari strati deve essere congruente, ovvero lo spostamento in sommità ad uno strato deve essere uguale allo spostamento sul fondo di quello immediatamente sopra, se ne deduce che

$$u_m(Z_m = h_m, t) = u_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t) \quad (12)$$

da cui consegue che

$$A_{m+1} + B_{m+1} = A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m} \quad (13)$$

Il taglio in sommità ed al fondo dell' m -esimo strato è dato da:

$$\tau_m(Z_m = 0, t) = ik_m^* G^* (A_m - B_m) e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$\tau_m(Z_m = h_m, t) = ik_m^* G^* (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \quad (15)$$

Poiché fra uno strato e l'altro il taglio deve essere continuo si ha

$$\tau_m(Z_m = h_m, t) = \tau_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t) \quad (16)$$

ovvero

$$A_{m+1} - B_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) \quad (17)$$

Sommando la (13) alla (17) e sottraendo la (17) alla (13) si ottiene

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (18)$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (19)$$

dove α_m^* rappresenta il coefficiente di impedenza complesso al contorno tra gli strati m ed $m+1$, ed è dato dalla seguente espressione:

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} \quad (20)$$

Poiché in superficie il taglio è nullo si deduce che $A_1 = B_1$. Come facilmente constatabile, le (18) e (19) sono ricorsive, e se applicate dallo strato 1 allo strato m è possibile scrivere quanto segue:

$$A_m = a_m(\omega)A_1 \quad (21)$$

$$B_m = b_m(\omega)B_1 \quad (22)$$

Questa ulteriore considerazione permette di scrivere la seguente relazione:

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{a_i(\omega)+b_i(\omega)}{a_j(\omega)+b_j(\omega)} \quad (23)$$

F_{ij} rappresenta la funzione di trasferimento, ovvero la funzione che mette in relazione il modulo della deformazione tra i punti i e j . In pratica lo stato deformativo di una stratigrafia rimane definito una volta nota la deformazione di un suo qualsiasi punto. Inoltre poiché $|\ddot{u}| = \omega|\dot{u}| = \omega^2|u|$, analogamente, note rispettivamente la velocità e l'accelerazione di un qualsiasi punto all'interno della stratigrafia, lo stato delle velocità e delle accelerazioni rimane definito.

Per i terreni invece, il programma RSL adopera il seguente legame costitutivo:

$$\sigma = G(\gamma) \cdot \gamma$$

dove σ rappresenta la tensione, G il modulo di deformazione al taglio, e γ la deformazione al taglio.

Come è facilmente deducibile tale legame è non lineare poiché G è funzione di γ . Nella procedura di calcolo infatti, da una stima iniziale del modulo di deformazione al taglio, si ottiene la tensione ipotizzando un legame lineare, per poi ottenere un nuovo valore di γ . Grazie a questo valore aggiornato si valuta un nuovo modulo G così da ripetere la procedura fino a quando la differenza tra la deformazione aggiornata e quella ottenuta dalla precedente iterazione viene ritenuta accettabile. Il modello per $G(\gamma)$ adoperato è quello suggerito da Ishibashi e Zhang (1993) che tiene conto degli effetti della pressione di confinamento e dell'indice di plasticità:

$$G = G_{max} \cdot K(\gamma, PI) (\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (24)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad (25)$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145PI^{1.3}) \quad (26)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{per } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{per } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{per } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{per } PI > 70 \end{cases} \quad (27)$$

dove G_{max} è dato dalla relazione

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (28)$$

dove ρ è la densità del terreno e V_s la velocità di propagazione delle onde di taglio nello stesso. La (28) fornisce il valore iniziale di G per la prima iterazione.

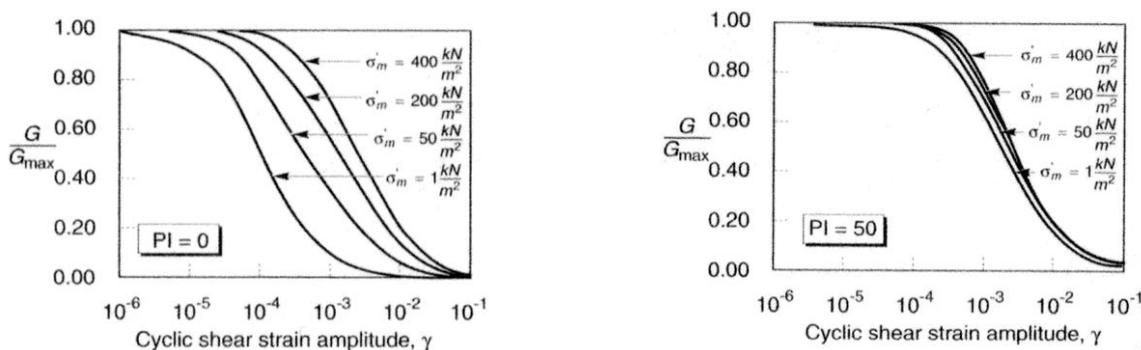


Figura 2: Influenza della pressione di confinamento e della plasticità sul modulo di deformazione al taglio.

Per quanto riguarda invece il coefficiente di smorzamento viscoso ξ , in conseguenza del modello introdotto dalla (24) si ha:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145PI^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \quad (29)$$

da cui si deduce che anche ξ deve essere ricalcolato ad ogni iterazione.

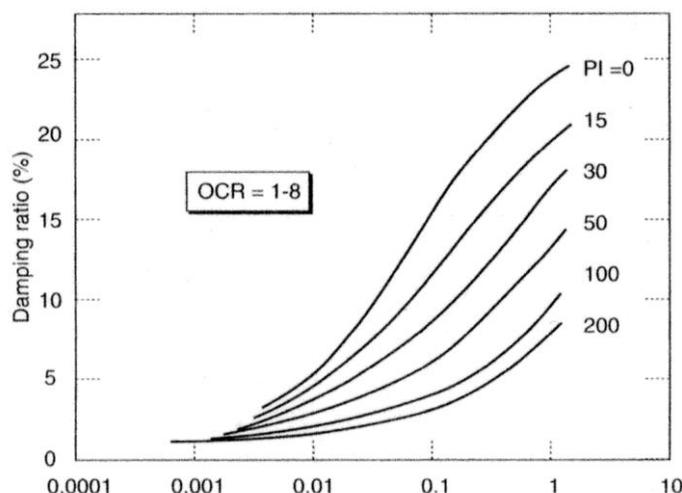


Figura 3: Influenza della plasticità sul coefficiente di smorzamento viscoso.

3.2.2 - Esempio 1

Questo esempio prende da riferimento il test eseguito dal prof. T. Sanò in sede della conferenza tenutasi in Valmonte dal 14 al 19 settembre 2009 ed eseguito dal suo codice di calcolo denominato PSHAKE. Questo è un'evoluzione del noto SHAKE, in cui in input anziché un spettro od un accelerogramma viene fornito uno spettro di potenza delle accelerazioni. Il file di riferimento è "Esempio_1.rsl" contenuto nella cartella "Esempi".

Nell'effettuare questo test di validazione le differenze tra i due software da tenere presenti sono:

1. Lo spettro fornito in input ad RSL è il risultato di un'analisi compiuta da PSHAKE sullo spettro di potenza del suo input;
2. I valori caratteristici dei terreni funzione della deformazione, in PSHAKE vengono ricavati dall'interpolazione di valori discreti forniti tabellarmente in input, mentre in RSL vengono calcolati puntualmente dalla loro formulazione analitica di Ishibashi-Zhang;
3. Il modello dei terreni adoperato in PSHAKE non tiene conto dell'influenza dell'indice di plasticità dei terreni che in RSL è stato posto pari a 15, in quanto è risultato essere il valore che meglio approssima il comportamento dei terreni di PSHAKE;
4. Poiché PSHAKE lavora con gli spettri di potenza, non è stato possibile ottenere un diretto confronto tra il risultato finale di quest'ultimo con quello di RSL, ma si sono confrontate le funzioni di trasferimento fornite in output da entrambi i codici di calcolo, e che stanno alla base del trasferimento delle accelerazioni.

Ciò premesso di seguito viene riportato un grafico, frequenza-amplificazione, che mette a confronto le due funzioni di trasferimento.

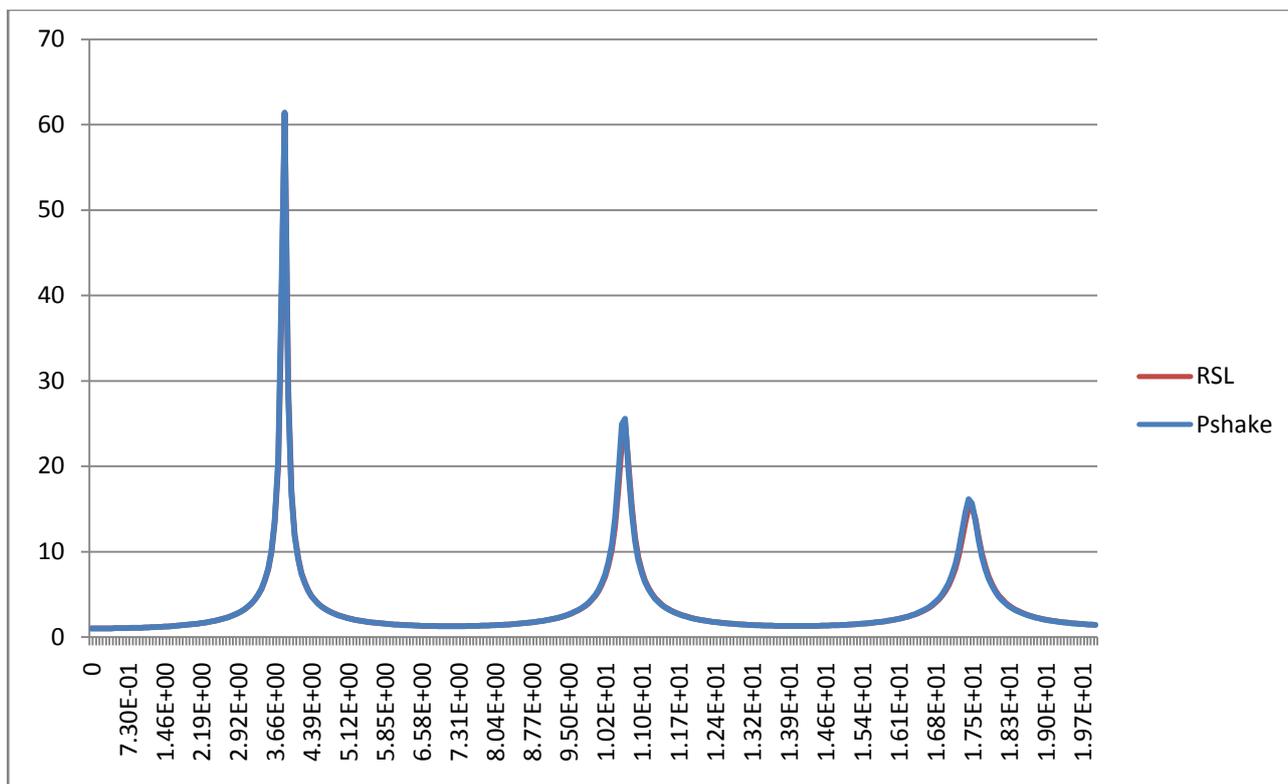


Figura 1: Confronto tra la funzione di trasferimento elaborata da RSL e PSHAKE

Come è facilmente deducibile non sono apprezzabili differenze. La media degli scarti tra le due curve è 0,0327 con uno scarto quadratico medio di 0,3.

3.2.3 – Esempio 2

Questo esempio ed il successivo, si basano sugli esempi di calcolo proposti dall'articolo "Risposta sismica locale: confronto tra analisi numeriche nel dominio del tempo e delle frequenze" pubblicato su "Rivista Italiana di Geotecnica" n.2 aprile-giugno 2010. In questo esempio si prende in esame il caso di un unico strato omogeneo con l'accelerogramma denominato nell'articolo stesso TMZ-270. I files di riferimento sono "Esempio_2.1.rs" e "Esempio_2.2.rs" rispettivamente per bedrock rigido ed elastico, contenuti nella cartella denominata "Esempi".

Le differenze da prendere in considerazione tra quanto illustrato nell'articolo ed il calcolo effettuato con RSL sono:

1. Il modello costitutivo dei terreni in RSL considera l'incidenza dell'indice di plasticità nella valutazione dei parametri strain-dependent, cosa che non fanno i programmi di calcolo adoperati per eseguire i confronti riportati nell'articolo, che viene quindi posto pari a 18 in quanto rappresenta il valore che meglio pare approssima i risultati dell'articolo;
2. Il modello costitutivo dei terreni in RSL considera uno smorzamento globale del terreno e non su uno specifico modo di Rayleigh così come invece viene introdotto nei software sopraccitati;
3. Il modello costitutivo dei terreni in RSL considera anche l'incidenza della pressione di confinamento (introdotta dal coefficiente di spinta laterale) nella valutazione dei parametri strain-dependent, cosa che apparentemente, almeno per quanto deducibile dall'articolo, non viene presa in considerazione dai software sopraccitati;
4. Il confronto tra i risultati non può essere effettuato numericamente in quanto nell'articolo vengono forniti esclusivamente risultati grafici.

I parametri caratteristici del sito adoperati per il calcolo della funzione di amplificazione sono i seguenti:

Parametro	Valore
Spessore:	16 m
Peso per unità di volume:	14.1 kN/m ³
Indice di plasticità:	18
Velocità delle onde di taglio:	361.5 m/s
Coefficiente di spinta laterale:	0.3
Modulo di taglio iniziale:	187830.76 kPa

Tabella 1 - Parametri caratteristici dello strato visco-elastico omogeneo adoperato nel calcolo del fattore di amplificazione

Per il caso di bedrock rigido i risultati sono i seguenti:

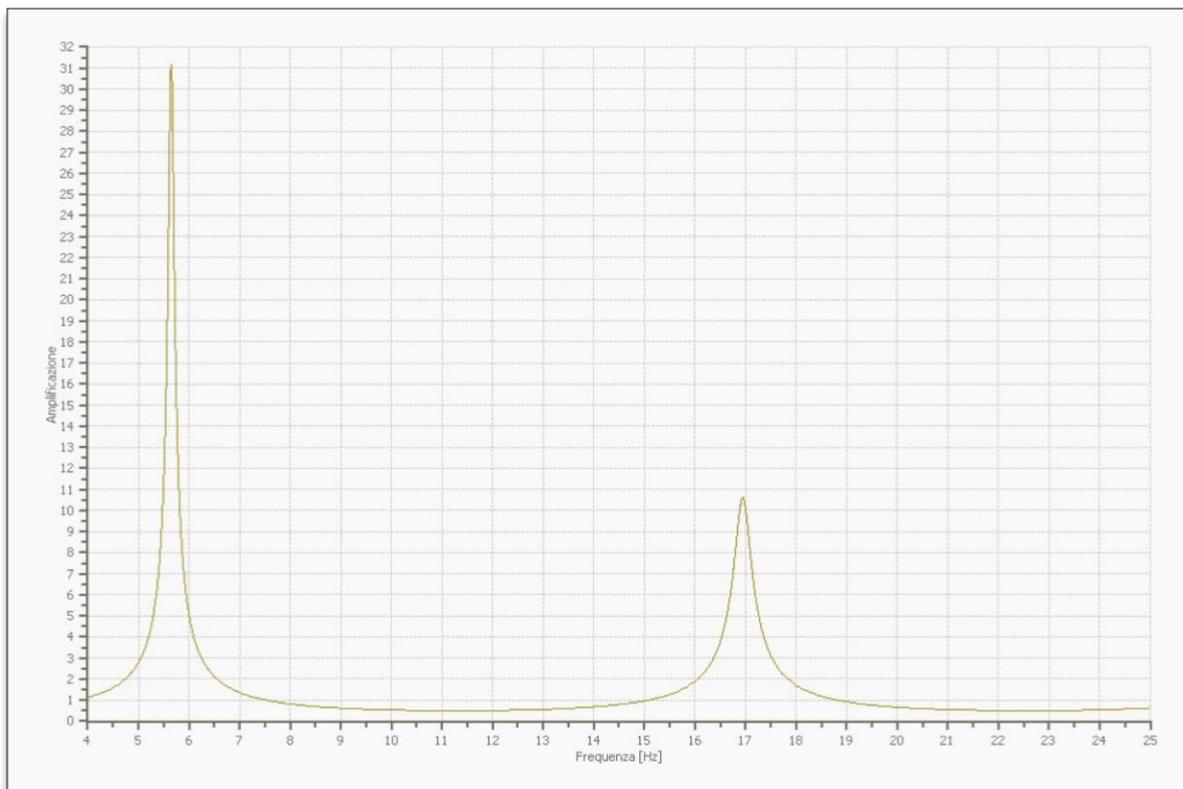


Figura 1 – Funzione di amplificazione calcolata con RSL per uno strato visco-elastico omogeneo su bedrock rigido

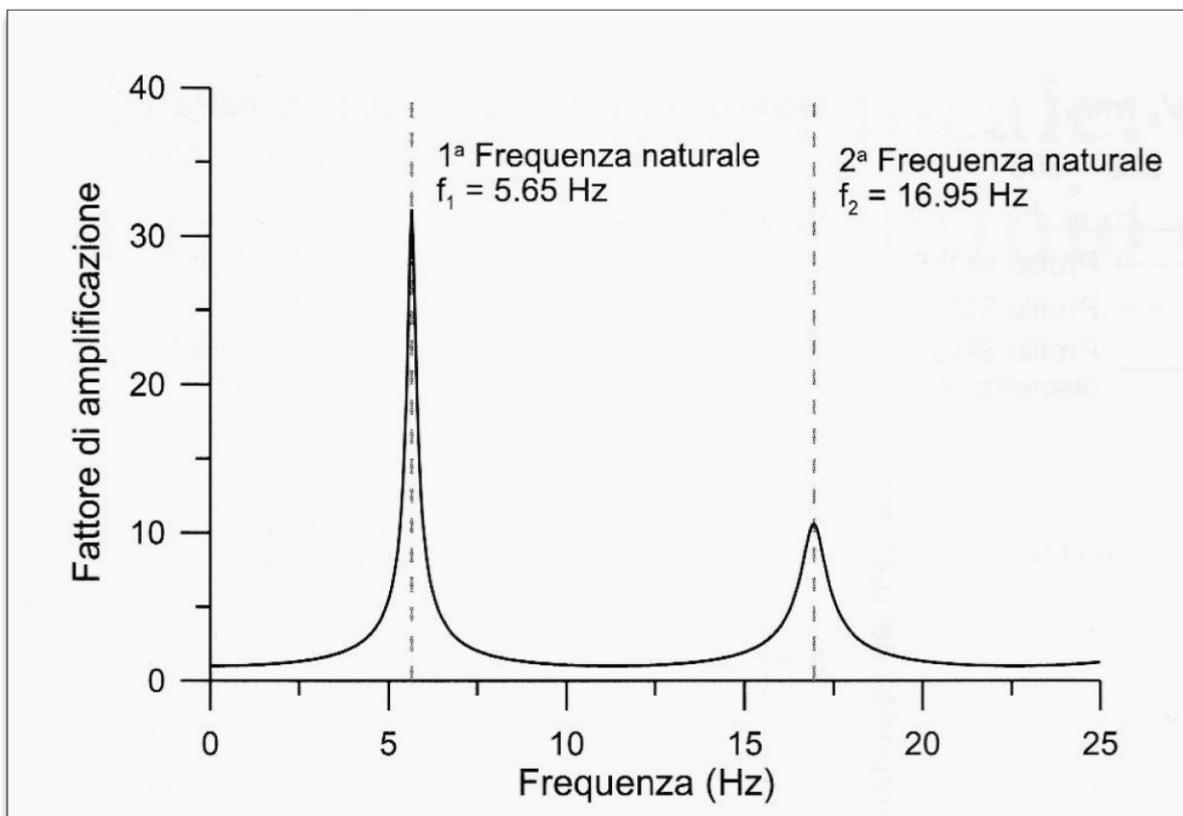


Figura 2 - Soluzione analitica della funzione di amplificazione di uno strato visco-elastico omogeneo su bedrock rigido

Mentre per il bedrock elastico si sono adoperati i seguenti parametri:

Parametro	Valore
Peso per unità di volume:	20.0 kN/m ³
Velocità delle onde di taglio:	1200
Rapporto di smorzamento:	0 %

Tabella 2 - Parametri caratteristici dello strato roccioso elastico

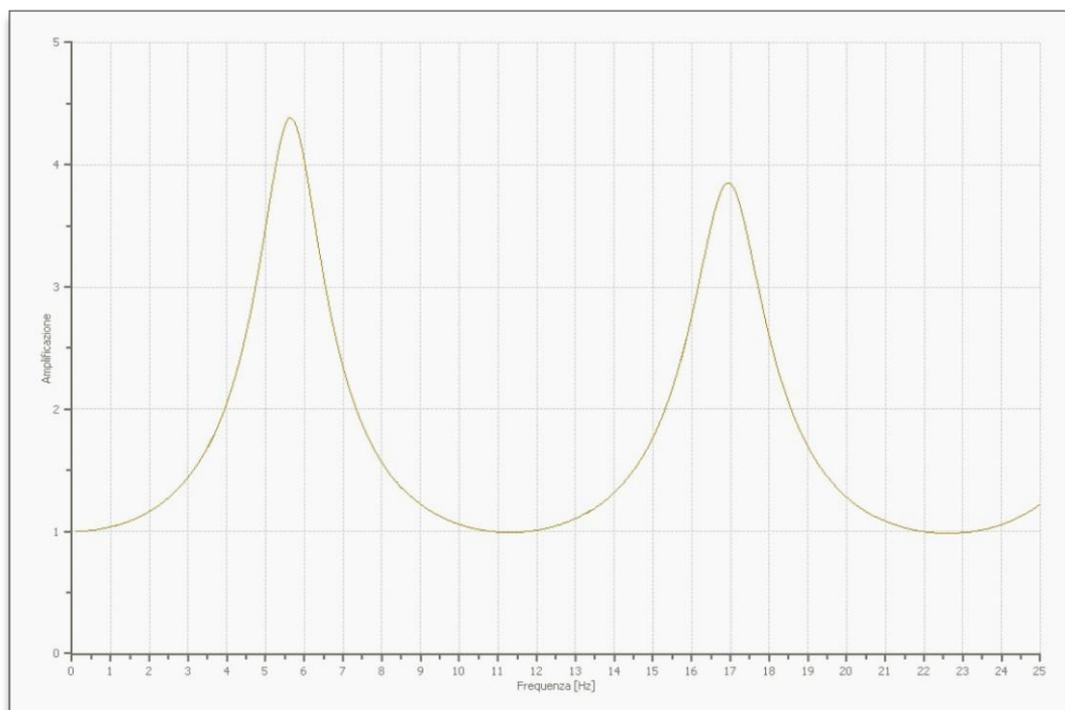


Figura 3 - Funzione di amplificazione calcolata con RSL per uno strato visco-elastico omogeneo su bedrock elastico

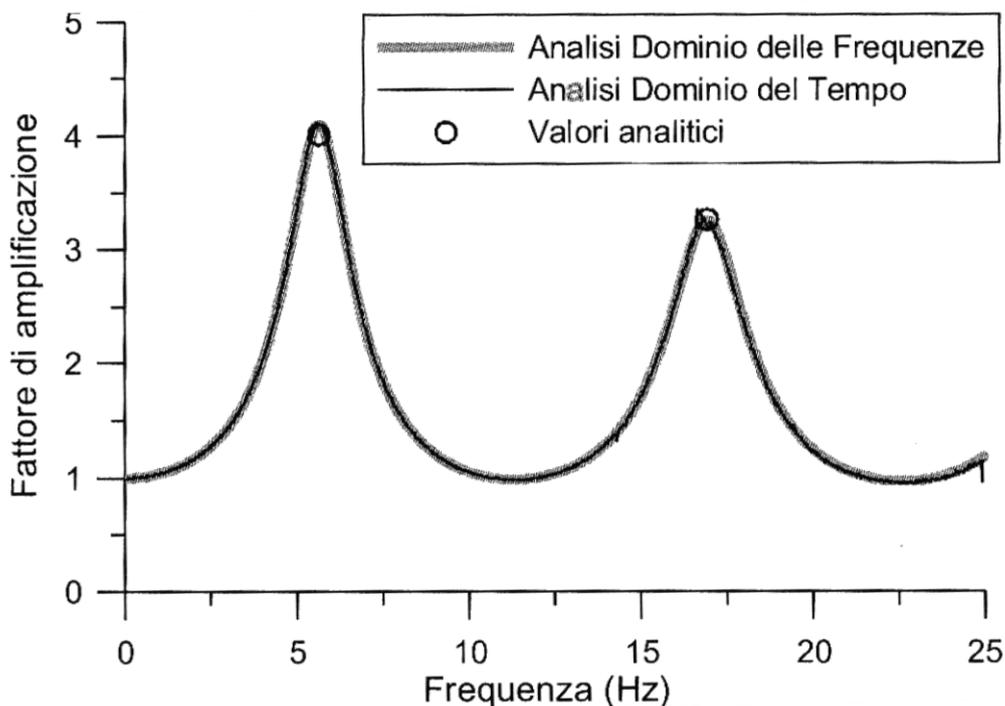


Figura 4 - Confronto tra le analisi lineari nel dominio del tempo e delle frequenze per lo strato di profilo omogeneo (HOM) su substrato deformabile

Per quanto riguarda la soluzione su bedrock rigido non si apprezzano differenze rispetto alla soluzione analitica riportata nel succitato articolo. Al contrario, per la soluzione su suolo elastico, si possono apprezzare delle differenze esclusivamente sul valore dell'amplificazione, che in RSL risulta maggiore rispetto ai risultati ottenuti con altri software. Ciò dipende soprattutto dall'incidenza dell'indice di plasticità sulla risposta in termini di amplificazione del terreno. L'introduzione di questo parametro da parte di RSL nella procedura di calcolo si fa risentire soprattutto nei picchi di amplificazione, ma non ne modifica, come facilmente constatabile dalle figure sopra, la frequenza di picco.

3.2.4 - Esempio 3

Per quanto introdotto nell'esempio precedente, i files di riferimento sono "Esempio_3.1.rsl" ed "Esempio_3.2.rsl" rispettivamente per il bedrock rigido ed elastico. Le differenze tra le procedure di calcolo sono le medesime dell'esempio precedente con l'aggiunta della seguente:

1. nell'articolo non viene illustrato in maniera del tutto esplicita la discretizzazione della stratigrafia in input ai programmi adoperati, quindi in RSL si è suddiviso l'intera stratigrafia in 16 strati di spessore pari ad 1m, tutti con le medesime caratteristiche ad eccezione della velocità di propagazione delle onde di taglio e quindi del modulo di deformazione tagliante, che segue l'andamento riportato nell'articolo ed indicato come "profilo Sds".

Il profilo delle velocità Sds adoperato in RSL ha la seguente espressione:

$$V_s = 143(1 + 6,1875 \cdot z)^{0,5}$$

dedotta dalle indicazioni riportate nell'articolo, anche in questo caso poco esplicita.

Il confronto tra la funzioni di amplificazione di RSL e quelle dell'articolo per bedrock rigido è il seguente:

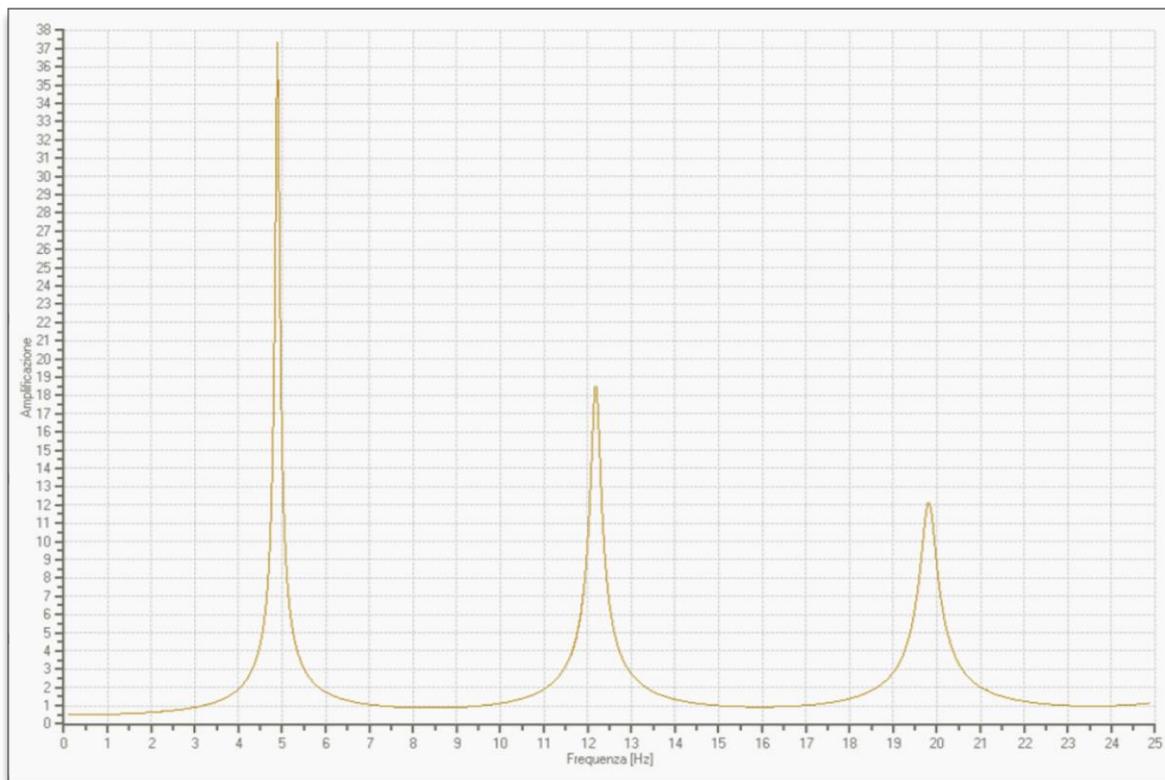


Figura 5 - Funzione di amplificazione calcolata con RSL per un profilo stratigrafico composto da 16 elementi e profilo della velocità delle onde di taglio variabile con la profondità (Profilo Sds) su bedrock rigido

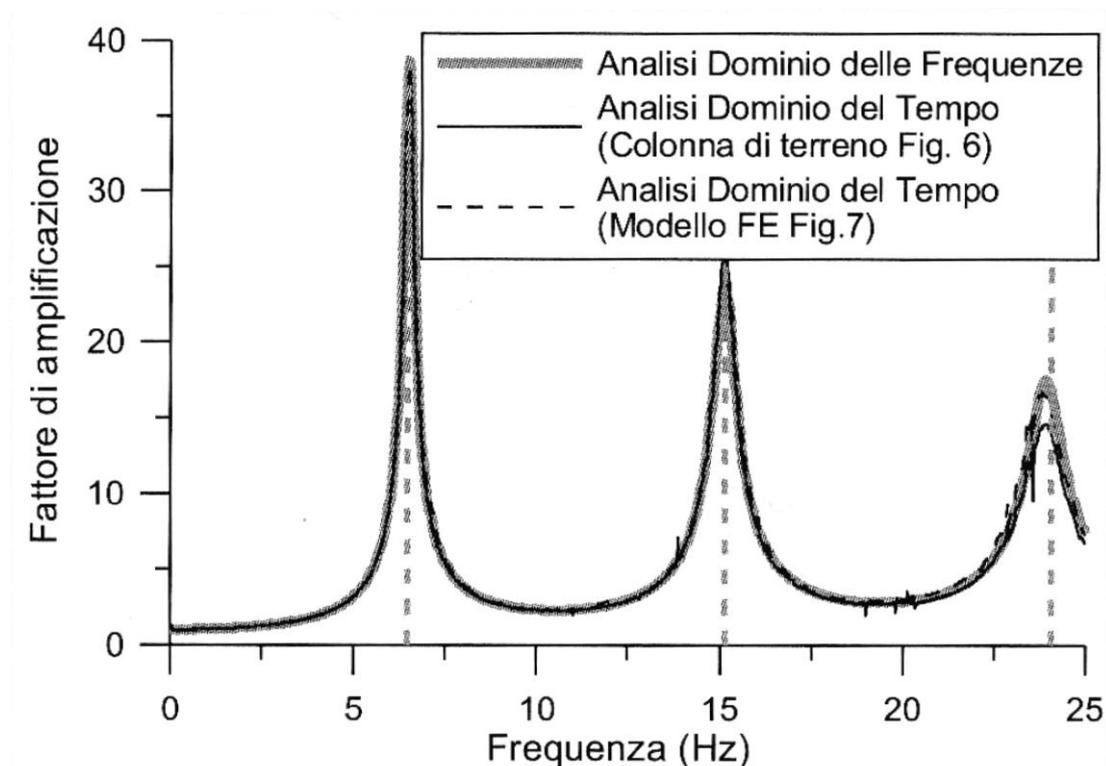


Figura 6 - Confronti tra la colonna di terreno (Figura 6 articolo) e lo schema a contorni "silenziosi" (Figura 7 articolo) per il profilo di sottosuolo Sds su bedrock rigido

Mentre per il caso di bedrock elastico, utilizzando i medesimi parametri caratteristici del precedente esempio, si ha:

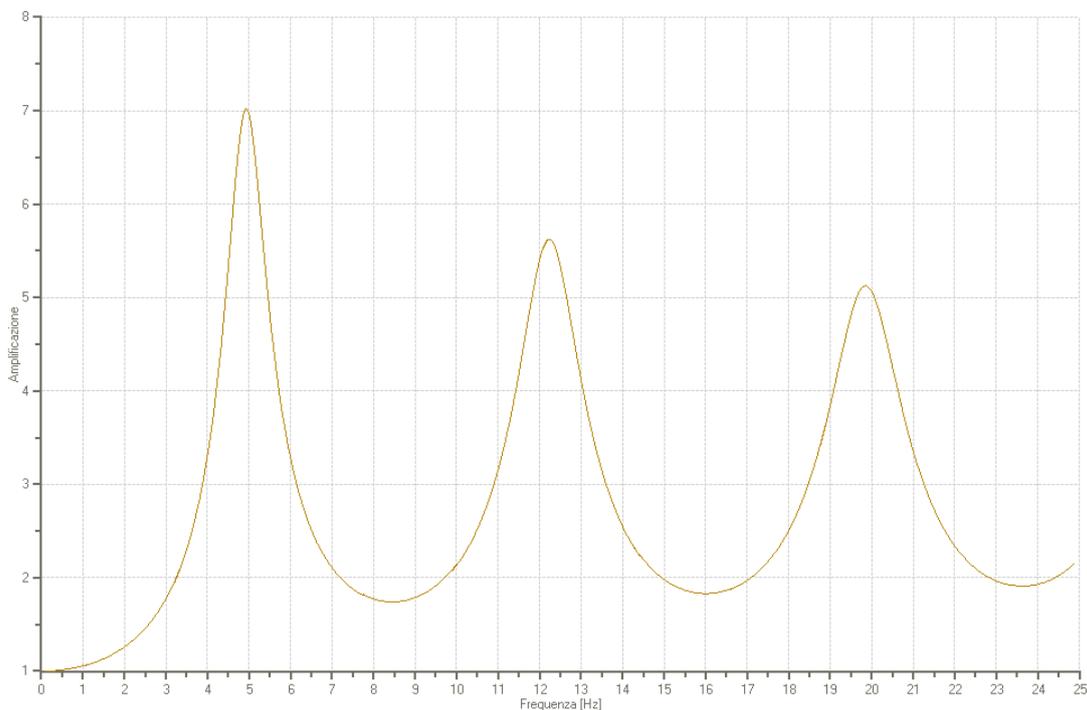


Figura 7 - Funzione di amplificazione calcolata con RSL per un profilo stratigrafico composto da 16 elementi e profilo della velocità delle onde di taglio variabile con la profondità (Profilo Sds) su bedrock elastico

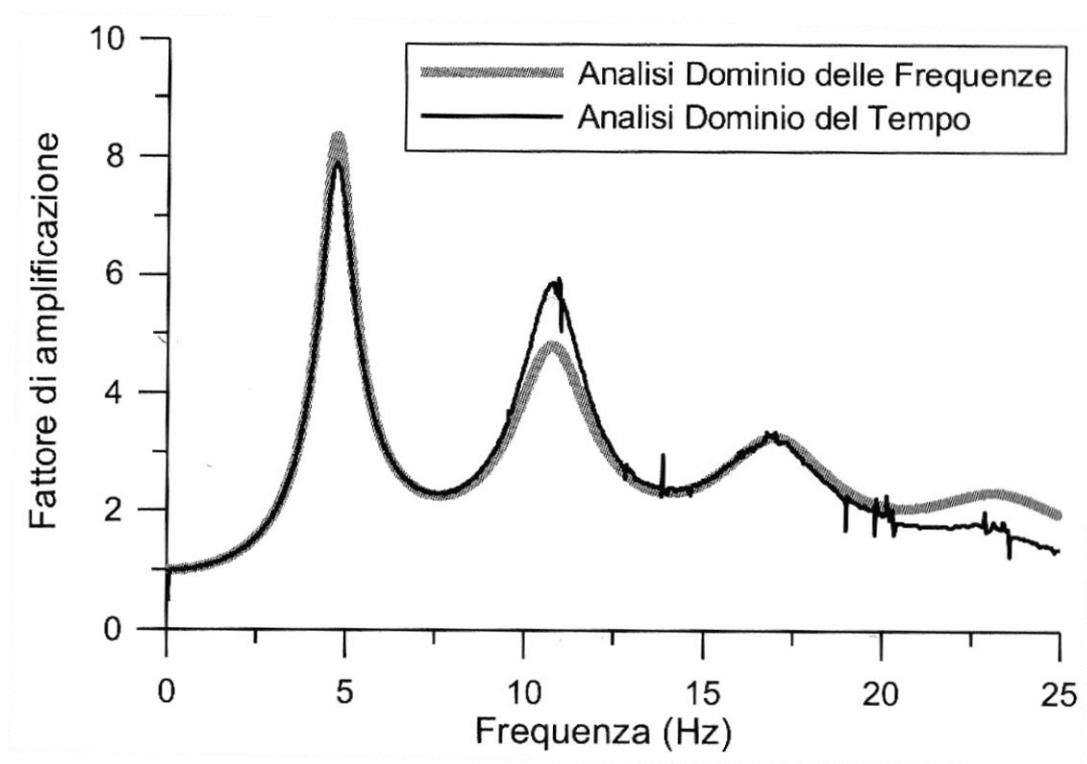


Figura 8 - Confronto tra le analisi lineari equivalenti nel dominio delle frequenze e nel dominio del tempo per lo strato di profilo Sds su bedrock elastico

Per quanto riguarda il caso di bedrock rigido, si possono notare differenze sia in termini di amplificazione che di frequenze. La prima è ancora funzione dell'indice di plasticità che viene preso in considerazione da RSL, ma anche per via del tipo di smorzamento viscoso adoperato. In RSL lo smorzamento è una proprietà globale del terreno, mentre nei calcoli effettuati per la redazione dell'articolo sono stati impiegati fattori di smorzamento che agiscono sui singoli modi della stratigrafia. Questo tipo di smorzamento va ad incidere fortemente sui picchi di amplificazioni, ed in maniera più incisiva a frequenze elevate. Si può infatti notare una forte differenza soprattutto per frequenze superiori ai 10 Hz (frequenza tipicamente alta per i terreni). La differenza sulle frequenze invece è funzione della diversa discretizzazione. Questa infatti genera dei modi fittizi che vanno ad alterare le frequenze naturali del sistema. La differenza non è comunque elevata, e si può quindi pensare che la discretizzazione scelta in RSL sia sufficientemente prossima a quella operata negli esempi dell'articolo.

Il caso di bedrock deformabile presenta le medesime differenze di quello con bedrock rigido, risentendo ancor di più dell'effetto di smorzamento "modale", soprattutto se si considera il fatto che in RSL viene smorzata anche la risposta del bedrock.