



REGIONE SICILIA  
Assessorato regionale dell'energia  
e dei servizi di pubblica utilità  
Dipartimento regionale dell'acqua e dei rifiuti



DIGA GIBBESI

RIVALUTAZIONE SISMICA, STUDIO DELLE PRESSIONI NEUTRE E  
MOTI DI FILTRAZIONE, PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO  
ECONOMICA, DEFINITIVA ED ESECUTIVA, MANUTENZIONE  
STRAORDINARIA STRADA DI COLLEGAMENTO CASA DI GUARDIA  
- POZZO - PARATOIE E RIEFFICIENTAMENTO STRUMENTAZIONE  
DI MONITORAGGIO E CONTROLLO

A RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :

Dott. Ing. Antonino Margagliotta

ASSOCIAZIONE TEMPORANEA DI IMPRESE TRA:

Mandataria

Mandanti

SERING  
INGEGNERIA

AGS  
ADVANCED  
GEOTECHNICAL  
SOLUTIONS

orion  
PROGETTI

TECHNITAL

METROTEST  
Material Energy Test  
Research Organic



GEO R.A.S. s.r.l.



DIREZIONE DI PROGETTO PER L'ATI :

TECHNITAL S.p.A.

Dott. Ing. Simone Venturini

TITOLO ELABORATO:

VERIFICHE SISMICHE  
CORPO DIGA  
RELAZIONE

ELABORATO N° :

II122F-A-SIS-RT-202-00

		ELABORATO		CONTROLLATO		APPROVATO			
SIGLA		G.Modoni		A. Rizzo		S. Venturini			
REVISIONE	N.		DESCRIZIONE				RED.	VER.	APP.
	1	00	Emissione Luglio 2021				G.M.	A.R.	S.V.
	2								
	3								

NOME FILE :



II122F\_A\_SIS\_RT\_202\_00.pdf

DATA :

Luglio 2021

SCALA :

-

 III22F-A-SIS-RT-202-00	<p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</p>	 Pag. 1 di 160
	VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE	



**Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità  
Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti**

***“PROGETTO PER L’AFFIDAMENTO DEI SERVIZI DI INGEGNERIA RELATIVI ALLO  
STUDIO DI RIVALUTAZIONE SISMICA DELLE OPERE STRUTTURALI  
DELL’IMPIANTO, ALLA PROGETTAZIONE ESECUTIVA DELLA MANUTENZIONE  
STRAORDINARIA DELLA STRADA DI COLLEGAMENTO CASA DI GUARDIA – POZZO  
PARATOIE, ALLO STUDIO INTERPRETATIVO E ALLA PROGETTAZIONE ESECUTIVA  
DEL RIEFFICIENTAMENTO DELLA STRUMENTAZIONE DI MONITORAGGIO E  
CONTROLLO”***

***DIGA GIBBESI***



**Servizio A**  
**Rivalutazione della sicurezza sismica dello  
sbarramento in materiale sciolto  
e delle opere accessorie**

**Verifiche Sismiche del Corpo Diga  
Relazione**

 III22F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 1 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	



## Sommario

1	Premessa.....	11
2	Caratteristiche della diga.....	12
3	Il quadro normativo.....	17
3.1	Classificazione della diga e periodo di riferimento per l'azione sismica.....	17
3.2	Stati limite di riferimento e criteri di ammissibilità .....	18
4	Le azioni.....	24
4.1	Il peso proprio del corpo diga.....	24
4.2	La spinta idrostatica.....	24
4.3	La spinta dell'interrimento .....	25
4.4	L'azione sismica.....	25
4.4.1	Definizione dell'azione sismica per lo Stato Limite di Danno (SLD).....	27
4.4.2	Definizione dell'azione sismica per lo Stato Limite di Collasso (SLC).....	43
4.5	Azioni inerziali dell'acqua contenuta nel serbatoio. ....	59
5	Verifiche statiche in condizioni di esercizio .....	61
5.1	Metodologia di analisi .....	62
5.1.1	Metodo di Bishop (1955) .....	64
5.1.2	Metodo di Janbu (1967) .....	65
5.1.3	Superfici di scorrimento.....	67
5.2	Modello geotecnico finalizzato all'analisi statica .....	68
5.3	Risultati delle verifiche in condizioni di esercizio .....	70
6	Verifica sismica – analisi semplificate.....	74
6.1	Verifica con il metodo degli spostamenti di Newmark (1965) .....	74
6.1.1	Modello geotecnico finalizzato all'analisi sismica semplificata.....	75
6.1.2	Calcolo dell'accelerazione critica con il metodo pseudostatico .....	75
6.1.3	Risultati della verifica con il metodo degli spostamenti di Newmark .....	80
7	Verifica sismica – analisi dinamica al passo.....	82
7.1	Il software.....	82
7.2	La discretizzazione geometrica .....	82
7.3	Modello geotecnico finalizzato all'analisi dinamica al passo .....	84

 II122F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 2 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

7.4	Deconvoluzione dell'input sismico .....	88
7.4.1	Deconvoluzione Stato Limite di Danno.....	89
7.4.2	Deconvoluzione Stato Limite di Collasso.....	103
7.5	I modelli costitutivi .....	117
7.6	Inizializzazione dello stato tensionale.....	118
7.7	Analisi dinamica.....	120
7.8	Validazione dinamica del modello numerico .....	122
7.8.1	Validazione basata sull'analisi del periodo proprio di vibrazione.....	122
7.8.2	Validazione basata sulla back-analysis dei segnali sismici deconvoluti alla base del modello 125	
7.9	Risultati delle analisi .....	126
7.9.1	Stato Limite di Esercizio.....	129
7.9.2	Stato Limite Ultimo .....	136
7.9.3	Previsione teorica del comportamento post sismico .....	152
8	Sintesi delle verifiche.....	154
8.1	Verifiche statiche.....	154
8.2	Verifiche sismiche.....	154
8.2.1	Verifiche sismiche semplificate (Newmark).....	155
8.2.2	Verifiche dinamiche .....	156
9	Bibliografia .....	159



 II122F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 3 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

## Indice delle figure

Figura 2-1 Vista satellitare del territorio comunale di Sommatino con indicazione della diga Gibbesi (modificata da Google Earth).....	12
Figura 2-2 Stralcio della Carta Tecnica Regionale con indicazione della diga Gibbesi.....	13
Figura 2-3 Fotografia dell'invaso scattata dalla sponda sinistra.....	13
Figura 2-4 Sezione tipo della diga Gibbesi.....	15
Figura 2-5 Planimetria della diga Gibbesi (progetto esecutivo di adeguamento, documento B 6). ..	16
Figura 3-1 Grado di danneggiamento in funzione della PGA e del rapporto S/H (cedimento in cresta – Altezza dello sbarramento cumulata allo strato deformabile) (Swaigood, 2003). ....	23
Figura 4-1 Sezione di verifica della diga con indicazione della quota di massima regolazione e della spinta idrostatica del bacino. ....	24
Figura 4-2 Diagramma di spettrocompatibilità per lo Stato Limite di Danno. Gli spettri degli accelerogrammi selezionati per la verifica sono evidenziati dai colori, spettro di progetto in nero (target spectrum), valori di ammissibilità per gli spettri in linea tratteggiata. ....	28
Figura 4-3 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #01 (componente orizzontale).....	29
Figura 4-4 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #01 (componente verticale).....	30
Figura 4-5 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #02 (componente orizzontale).....	31
Figura 4-6 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #02 (componente verticale).....	32
Figura 4-7 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #03 (componente orizzontale).....	33
Figura 4-8 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #03 (componente verticale).....	34
Figura 4-9 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #04 (componente orizzontale).....	35
Figura 4-10 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #04 (componente verticale).....	36
Figura 4-11 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #05 (componente orizzontale).....	37
Figura 4-12 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #05 (componente verticale).....	38
Figura 4-13 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #06 (componente orizzontale).....	39
Figura 4-14 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #06 (componente verticale).....	40
Figura 4-15 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #07 (componente orizzontale).....	41
Figura 4-16 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #07 (componente verticale).....	42
Figura 4-17 Intensità di Arias per ciascun input sismico selezionato per la verifica SLD. ....	43
Figura 4-18 Diagramma di spettrocompatibilità per lo Stato Limite di collasso (SLC). Gli spettri degli accelerogrammi selezionati per la verifica sono evidenziati dai colori, spettro di progetto in nero (target spectrum), valori di ammissibilità per gli spettri in linea tratteggiata. ....	44
Figura 4-19 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #01(componente orizzontale).....	45
Figura 4-20 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #01 (componente verticale).....	46
Figura 4-21 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #02 (componente orizzontale).....	47
Figura 4-22 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #02 (componente verticale).....	48
Figura 4-23 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #03 (componente orizzontale).....	49
Figura 4-24 selezionato per la verifica SLC #03 (componente verticale). ....	50
Figura 4-25 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #04 (componente orizzontale).....	51
Figura 4-26 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #04 (componente verticale).....	52


 II122F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 4 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

Figura 4-27 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #05 (componente orizzontale).....	53
Figura 4-28 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #05 (componente verticale).....	54
Figura 4-29 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #06 (componente orizzontale).....	55
Figura 4-30 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #06 (componente verticale).....	56
Figura 4-31 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #07 (componente orizzontale).....	57
Figura 4-32 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #07 (componente verticale).....	58
Figura 4-33 Intensità di Arias per ciascun input sismico selezionato per la verifica SLC. ....	59
Figura 4-34 Sezione di verifica della diga con indicazione delle azioni inerziali dell'acqua contenuta nel bacino. ....	60
Figura 5-1 Illustrazione del metodo dell'equilibrio limite applicato su di una superficie circolare di un pendio naturale (manuale Geostru-Slope).....	62
Figura 5-2 Azioni sul concio i-esimo (manuale Geostru-Slope). ....	63
Figura 5-3 Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Bishop (manuale Geostru-Slope). ....	64
Figura 5-4 Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Janbu e rappresentazione d'insieme dell'ammasso (manuale GeoStru-Slope). ....	66
Figura 5-5 Calcolo del fattore correttivo $f_0$ (manuale GeoStru-Slope).....	66
Figura 5-6 Meccanismo di collasso ricostruito nella diga di San Fernando in California. In alto la sezione tipo della diga, al centro le porzioni della diga dopo la dislocazione, in basso la ricostruzione delle superfici di scorrimento sulla sezione indeformata (Seed et al, 1973). ....	67
Figura 5-7 Superfici mistilinee adottate nella verifica del paramento di monte in condizioni di esercizio.....	68
Figura 5-8 Superfici mistilinee adottate nella verifica del paramento di valle in condizioni di esercizio. ....	68
Figura 5-9 Discretizzazione geometrica della diga implementata per le verifiche con i metodi semplificati.....	69
Figura 5-10 Esito della verifica del paramento di monte in condizioni statiche e bacino alla quota di massimo invaso (metodo di Bishop 1955). ....	70
Figura 5-11 Esito della verifica del paramento di monte in condizioni statiche e bacino alla quota di massima regolazione (metodo di Bishop 1955). ....	71
Figura 5-12 Esito della verifica del paramento di monte in condizioni statiche e di rapido svasso (metodo di Bishop 1955).....	71
Figura 5-13 Esito della verifica del paramento di valle in condizioni statiche e bacino alla quota di massimo invaso (metodo di Bishop 1955). ....	72
Figura 5-14 Esito della verifica del paramento di valle in condizioni statiche e bacino alla quota di massima regolazione (metodo di Bishop 1955). ....	72
Figura 5-15 Esito della verifica del paramento di valle in condizioni statiche e di rapido svasso (metodo di Bishop 1955).....	73
Figura 6-1 Schema di calcolo applicando il metodo di Newmark (manuale GeoStru-Slope). ....	74
Figura 6-2 Rappresentazione schematica della procedura di integrazione dell'equazione differenziale del moto (manuale GeoStru-Slope).....	75
Figura 6-3 Abaco per la determinazione del modulo di rigidezza al taglio. ....	78



	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Pag. 5 di 160</b></p>

Figura 6-4 Numero di cicli necessario all'innesco della liquefazione per terreni incoerenti di differente densità relativa. ....	80
Figura 6-5 Confronto tra gli accelerogrammi di verifica e l'accelerazione critica di Newmark. ....	81
Figura 7-1 Dettaglio della discretizzazione della geometria del corpo diga. ....	83
Figura 7-2 Discretizzazione del dominio geometrico del modello. ....	83
Figura 7-3 curva di decadimento e di damping ottenuta per le marne alterate mediante la relazione di Darendeli (2021). ....	85
Figura 7-4 Curva tensione deformazione ricostruita per le marne alterate. ....	86
Figura 7-5 Confronto tra le curve di decadimento individuate per i materiali in questo studio ed i campi di variazione definiti in letteratura da Seed et al. (1986) e Rollins et al. (1998). ..	87
Figura 7-6 Confronto tra le curve di decadimento individuate per i materiali in questo studio ed i campi di variazione definiti in letteratura da Vucetic and Dobry (1991). ....	87
Figura 7-7 Schema di riferimento per la procedura di deconvoluzione. ....	88
Figura 7-8 Curve di decadimento del modulo di rigidezza e di smorzamento con la deformazione distorsionale adottate per la deconvoluzione delle azioni sismiche (Schnabel, 1973). ..	88
Figura 7-9 Input sismico SLD-01-Sarnano (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	89
Figura 7-9 Input sismico SLD-01-Sarnano (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	90
Figura 7-9 Input sismico SLD-02-Assisi (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	91
Figura 7-9 Input sismico SLD-02-Assisi (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	92
Figura 7-9 Input sismico SLD-03-Monte_Daria (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	93
Figura 7-9 Input sismico SLD-03-Monte_Daria (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	94
Figura 7-9 Input sismico SLD-04-Treia (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	95
Figura 7-9 Input sismico SLD-04-Treia (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	96
Figura 7-9 Input sismico SLD-05-Celano (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	97
Figura 7-9 Input sismico SLD-05-Celano (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	98
Figura 7-9 Input sismico SLD-06-Sant'Agostino (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	99
Figura 7-9 Input sismico SLD-06-Sant'Agostino (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	100
Figura 7-9 Input sismico SLD-07-San_Lorenzo-Pianico (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	101
Figura 7-9 Input sismico SLD-07-San_Lorenzo-Pianico (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico. ....	102





	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Pag. 6 di 160</b></p>

Figura 7-9 Input sismico SLC-01-Amatrice (componente orizzontale) deconvolto alla base del modello numerico.....	103
Figura 7-9 Input sismico SLC-01-Amatrice (componente verticale) deconvolto alla base del modello numerico.....	104
Figura 7-9 Input sismico SLC-02-Norcia_la_Castellina-E (componente orizzontale) deconvolto alla base del modello numerico.....	105
Figura 7-9 Input sismico SLC-02-Norcia_la_Castellina-E (componente verticale) deconvolto alla base del modello numerico.....	106
Figura 7-9 Input sismico SLC-02-Norcia_la_Castellina-N (componente orizzontale) deconvolto alla base del modello numerico.....	107
Figura 7-9 Input sismico SLC-02-Norcia_la_Castellina-N (componente verticale) deconvolto alla base del modello numerico.....	108
Figura 7-9 Input sismico SLC-04-Mascioni-Campotosto-E (componente orizzontale) deconvolto alla base del modello numerico.....	109
Figura 7-9 Input sismico SLC-04-Mascioni-Campotosto-E (componente verticale) deconvolto alla base del modello numerico.....	110
Figura 7-9 Input sismico SLC-05-Norcia-La_Castellina (componente orizzontale) deconvolto alla base del modello numerico.....	111
Figura 7-9 Input sismico SLC-05-Norcia-La_Castellina (componente verticale) deconvolto alla base del modello numerico.....	112
Figura 7-9 Input sismico SLC-06-Mascioni-Campotosto-N (componente orizzontale) deconvolto alla base del modello numerico.....	113
Figura 7-9 Input sismico SLC-06-Mascioni-Campotosto-N (componente verticale) deconvolto alla base del modello numerico.....	114
Figura 7-9 Input sismico SLC-07-Mascioni-Campotosto (componente orizzontale) deconvolto alla base del modello numerico.....	115
Figura 7-9 Input sismico SLC-07-Mascioni-Campotosto (componente verticale) deconvolto alla base del modello numerico.....	116
Figura 7-10 Modello costitutivo di Mohr-Coulomb: a) legame tensioni-deformazioni, b) criterio di rottura nel piano tensione tangenziale - tensione normale.....	117
Figura 7-11 Campo delle tensioni verticali totali nelle formazioni di fondazione (fase pre-costruzione).....	118
Figura 7-12 Campo delle tensioni verticali totali nella diga e nelle formazioni di fondazione.....	119
Figura 7-13 Campo dei cedimenti calcolato nel modello per effetto della costruzione della diga..	119
Figura 7-14 Campo della pressione interstiziale nel modello corrispondente ad un livello dell'invaso pari alla quota di massima regolazione (229.0m s.l.m.m). ....	120
Figura 7-15 Campo della tensione verticale efficace nel modello con un livello dell'invaso pari alla quota di massima regolazione (229.0m s.l.m.m). ....	120
Figura 7-16 Schema illustrativo della condizione al contorno dinamiche di “free-field” e di “quite”.....	121
Figura 7-17 a) Effetto della geometria del canyon sul periodo fondamentale di oscillazione della diga b) fattore di amplificazione del sisma in funzione della frequenza dell'input sismico,	



 II122F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 7 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

dell'altezza della diga e della velocità di propagazione delle onde di taglio (Gazetas & Dakoulas, 1992). .....	123
Figura 7-18 Storie temporali di accelerazione applicate alla base del modello numerico e calcolate in corrispondenza del coronamento della diga. a) simulazione con frequenze pari 2-4-6-8-10Hz; b) simulazione con frequenze dispari 1-3-5-7-9Hz. ....	124
Figura 7-19 Andamento del fattore di amplificazione dell'input sismico in funzione della frequenza del segnale. ....	124
Figura 7-20 Discretizzazione geometrica concepita per la validazione del modello numerico. ....	125
Figura 7-21 Confronto tra l'accelerogramma calcolato numericamente all'affioramento rigido e quello di input della procedura di deconvoluzione. ....	126
Figura 7-22 Posizione dei punti di controllo selezionati per l'analisi dei risultati. ....	126
Figura 7-23 Diagramma riassuntivo della procedura di verifica. ....	128
Figura 7-24 Spostamenti orizzontali residui calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 01-02 per i sette accelerogrammi SLD, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto. ....	131
Figura 7-25 Spostamenti orizzontali residui calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 03-04 per i sette accelerogrammi SLD, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto. ....	132
Figura 7-26 Spostamenti verticali residui calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 05-06 per i sette accelerogrammi SLD, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto. ....	133
Figura 7-27 Schema di calcolo del rapporto S/H (Swaissgood, 2003). ....	134
Figura 7-28 Grado di danneggiamento per lo stato limite di danno secondo l'abaco di Swaisgood (2003). ....	134
Figura 7-29 Valori massimi della deformazione di taglio registrati nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati, sia con invaso alla quota di massima regolazione che invaso vuoto. ....	135
Figura 7-30 Campo della deformazione di taglio nella diga – Verifica allo Stato Limite di Danno – invaso vuoto – input sismico SLD-06-Sant'Agostino. ....	136
Figura 7-31 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 01 e 02 per i sette accelerogrammi SLC, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto. ....	138
Figura 7-32 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 03 e 04 per i sette accelerogrammi SLC, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto. ....	139
Figura 7-33 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 05 e 06 per i sette accelerogrammi SLC, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto. ....	140
Figura 7-34 Grado di danneggiamento per lo stato limite di collasso secondo l'abaco di Swaisgood (2003). ....	141
Figura 7-35 Valori massimi del rapporto di sovrappressione registrati nei contronuclei della diga per i sette input sismici considerati sia con invaso a livello di massima regolazione che invaso vuoto. ....	142





 II122F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 8 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

Figura 7-36 Campo della massima sovrappressione nella diga – Verifica allo Stato Limite di Collasso – livello di massima regolazione – input sismico 01-L’Aquila. ....	143
Figura 7-37 Valori massimi della deformazione di taglio registrati nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati, sia con invaso alla quota di massima regolazione che invaso vuoto.....	144
Figura 7-38 Campo della deformazione distorsionale nella diga – Verifica allo Stato Limite di Collasso – livello di massima regolazione – input sismico 05 – Norcia – La Castellina .....	145
Figura 7-39 Deformazioni distorsionali permanenti calcolate nei filtri per i sette accelerogrammi di verifica con invaso alla quota di massima regolazione e d invaso vuoto.....	146
Figura 7-40 Valore massimo del rapporto tra la pressione neutra e la tensione principale minima calcolata nei filtri per i sette accelerogrammi di verifica ed invaso alla quota di massima regolazione. ....	147
Figura 7-41 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 01 e 02 per invaso vuoto ed accelerogramma SLC-01-Amatrice amplificato di un coefficiente 1.2.....	148
Figura 7-42 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 03 e 04 per invaso vuoto ed accelerogramma SLC-01-Amatrice amplificato di un coefficiente 1.2.....	149
Figura 7-43 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 05 e 06 per invaso vuoto ed accelerogramma SLC-01-Amatrice amplificato di un coefficiente 1.2.....	150
Figura 7-44 Campo della deformazione distorsionale calcolato per l’analisi SLC-01-Amatrice, fattore di amplificazione 1.2 ed invaso vuoto.....	151
Figura 7-45 Campo della deformazione distorsionale nella diga in condizione post sismica indotto dall’input sismico SLC-01-Amatrice con invaso alla quota di massima regolazione e parametri meccanici dei materiali ridotti di un fattore 1.5.....	153

 II122F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 9 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

## Indice delle tabelle

Tabella 3-1 Vita nominale, coefficiente d'uso e periodo di riferimento da adottare per la verifica sismica.....	17
Tabella 3-2 Periodo di riferimento dell'azione sismica per le differenti categorie di dighe. ....	17
Tabella 3-3 Periodi di ritorno dell'azione sismica per i differenti stati limite e categorie di diga. ...	18
Tabella 3-4 Sintesi delle verifiche e dei criteri di ammissibilità adottati nelle verifiche della diga. .	22
Tabella 4-1 Pesi specifici dei materiali che contribuiscono al peso proprio della diga. ....	24
Tabella 4-2 Coordinate geografiche della diga in asse coronamento. ....	25
Tabella 4-3 Parametri di ingresso per la definizione della pericolosità sismica di base.....	25
Tabella 4-4 Parametri descrittivi della pericolosità sismica di base per un periodo di ritorno di 475anni. ....	26
Tabella 4-5 Parametri descrittivi della pericolosità sismica di base ottenuti secondo le NTC 2018. .	26
Tabella 4-6 Risultati della disaggregazione della pericolosità sismica ottenuti applicando le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018. ....	27
Tabella 4-7 Accelerogrammi selezionati per la verifica dinamica allo Stato Limite di Danno (SLD). ....	28
Tabella 4-8 Accelerogrammi selezionati per la verifica dinamica allo Stato Limite di Collasso (SLC). ....	43
Tabella 4-9 Valori dell'accelerazione orizzontale massima attesa al sito e valore dell'azione inerziale dell'acqua contenuta dell'invaso alla base dello sbarramento per lo Stato Limite di Danno e di Collasso. ....	60
Tabella 5-1 Coefficienti parziali per le azioni adottati nelle verifiche in condizioni di esercizio della diga. ....	61
Tabella 5-2 Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno adottati nelle verifiche in condizioni di esercizio della diga. ....	61
Tabella 5-3 Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza adottati nelle verifiche in condizioni di esercizio della diga. ....	62
Tabella 5-4 Tabella riassuntiva delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali (verifiche in condizioni di esercizio) ....	69
Tabella 5-5 Fattori di sicurezza calcolati nelle condizioni di esercizio. Verifica lato monte. ....	70
Tabella 5-6 Fattori di sicurezza calcolati nelle condizioni di esercizio. Verifica lato valle. ....	70
Tabella 6-1 Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito. ....	76
Tabella 6-2 Valori dei coefficienti sismici adottati nelle analisi pseudostatiche. ....	76
Tabella 6-3 Parametri aggiuntivi per il calcolo delle sovrappressioni indotte dall'azione sismica nelle verifiche pseudostatiche. ....	77
Tabella 6-4 Valori dei coefficienti A e B per la stima della deformazione di soglia volumetrica. ...	77
Tabella 6-5 Parametri descrittivi dell'azione sismica per il calcolo della sovrappressione neutra con riferimento ad ognuno dei sette accelerogrammi SLC di progetto. ....	79
Tabella 6-6 Valori dei coefficienti per la stima del numero di cicli equivalenti. ....	79
Tabella 6-7 Valori dell'accelerazione critica di Newmark. ....	80





 III22F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 10 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

Tabella 7-1 Massima dimensione degli elementi della discretizzazione per ciascun materiale. ....	82
Tabella 7-2 Parametri fisici dei materiali adottati per la verifica sismica – analisi dinamica al passo .....	84
Tabella 7-3 Parametri fisici e meccanici dei materiali definiti nella “Studio Geotecnico”. ....	84
Tabella 7-4 Parametri del materiale e del moto sismico adottati per la ricostruzione della curva di decadimento del modulo di rigidezza e di damping per le marne alterate. ....	85
Tabella 7-5 Parametri meccanici dei materiali adottati nelle verifiche sismiche – analisi dinamica al passo. ....	86
Tabella 7-6 Parametri fisici della formazione rigida e parametri di calibrazione del modello MKZ adottati per la deconvoluzione degli accelerogrammi. ....	89
Tabella 7-7 Spostamenti orizzontali residui calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione. ....	129
Tabella 7-8 Spostamenti orizzontali residui calcolati per i sette accelerogrammi con invaso vuoto. ....	129
Tabella 7-9 Spostamenti verticali residui calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione. ....	130
Tabella 7-10 Spostamenti verticali residui calcolati per i sette accelerogrammi con invaso vuoto. ....	130
Tabella 7-12 Valori massimi della deformazione di taglio registrati nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati, sia con invaso alla quota di massima regolazione che invaso vuoto. ....	135
Tabella 7-19 Spostamenti orizzontali calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione. ....	136
Tabella 7-20 Spostamenti orizzontali calcolati per i sette accelerogrammi con invaso vuoto. ....	137
Tabella 7-21 Spostamenti verticali calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione. ....	137
Tabella 7-22 Spostamenti verticali calcolati per i sette accelerogrammi con invaso vuoto. ....	137
Tabella 7-23 Valori massimi del rapporto di sovrappressione registrati nei contronuclei della diga per i sette input sismici considerati sia con invaso a livello di massima regolazione che invaso vuoto. ....	141
Tabella 7-24 Valori massimi della deformazione di taglio registrati nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati, sia con invaso alla quota di massima regolazione che invaso vuoto. ....	143
Tabella 8-1 Esito delle verifiche allo Stato Limite di Esercizio. ....	156
Tabella 8-2 Esito delle verifiche allo Stato Limite Ultimo. ....	158



	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>III22F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Pag. 11 di 160</b></p>

## 1 Premessa

La presente relazione riporta i risultati delle verifiche sismiche effettuate sulla diga di Gibbesi situata nei territori comunali di Naro e Sommatino al limite tra le provincie di Agrigento e di Caltanissetta. Dopo una rassegna delle principali caratteristiche della diga, si illustra il quadro normativo che ha guidato il presente studio fissando, conformemente ad esso, gli stati limite di riferimento ed i criteri di ammissibilità delle verifiche. La caratterizzazione geotecnica del corpo diga e delle formazioni di base è basata sui dati acquisiti mediante le indagini geotecniche effettuate sia sul corpo diga che sui terreni di fondazione, riportati e analizzati nel documento “Relazione geotecnica” allegato al progetto.

Basandosi sulle indicazioni di normativa, sono state quindi quantificate le azioni, statiche e sismiche, imposte nelle verifiche sul corpo del rilevato. In particolare, le azioni sismiche caratteristiche di ciascuno degli stati limite presi a riferimento (SLD Danno e SLC Collasso) sono state valutate nel dominio del tempo selezionando sette eventi dal catalogo dei terremoti aventi coppie Magnitudo - Distanza dalla sorgente sismogenetica congruenti con quelle del sito di interesse.

Essendo la diga classificata come “non strategica”, come indicato dal D.M. 26 giugno 2014 (Paragrafo C.6) è stata omessa la verifica allo Stato Limite di Operatività (SLO).

Essendo l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito per un periodo di ritorno di 475 anni uguale a 0.064g (<0.15g), così come prescritto dal D.M. 26 giugno 2014 [1] (Paragrafo C.7.7.1) non è necessario effettuare lo studio sismo-tettonico del sito.

Così come disposto dalla normativa vigente, sono state dapprima eseguite le analisi di stabilità in condizioni statiche, dopodiché si è proceduto alle verifiche in condizioni dinamiche. Inoltre, sempre in conformità con la normativa, la verifica sismica è stata eseguita inizialmente con il metodo pseudo-statico e con il metodo semplificato degli spostamenti (Newmark, 1965), per poi passare ad un'analisi dinamica completa “al passo”. A valle delle verifiche sismiche, si è proceduto infine ad analizzare il comportamento della diga nelle condizioni post-sismiche.

Le verifiche con il metodo pseudo-statico ed il calcolo degli spostamenti alla Newmark sono state eseguite mediante il software GeoStru-Slope (Versione: 2021.30.6.1458), mentre la verifica dinamica al passo e le verifiche post-sismiche sono state svolte con un codice di calcolo numerico alle differenze finite (FLAC 2D, Itasca, vers. 8.1) che consente di simulare la risposta accoppiata del sistema terreno-acqua interstiziale alle sollecitazioni cicliche e quindi di valutare la risposta tenso-deformativa del rilevato e l'eventuale attingimento delle condizioni limite prefissate. Nella presente relazione si descrivono le principali fasi del calcolo e si riassumono i risultati. In appendice si allegano invece singolarmente i risultati di tutte le simulazioni numeriche eseguite.

## 2 Caratteristiche della diga

La diga Gibbesi è collocata nella valle dell'omonimo torrente in località “Canalotto” (coordinate geografiche 37°18'44.3"N, 13°59'01.5"E) nel territorio comunale di Sommatino in provincia di Caltanissetta ad una distanza di circa 2.5 Km in direzione Sud-Ovest rispetto l'abitato (Figura 2-1 e Figura 2-2).

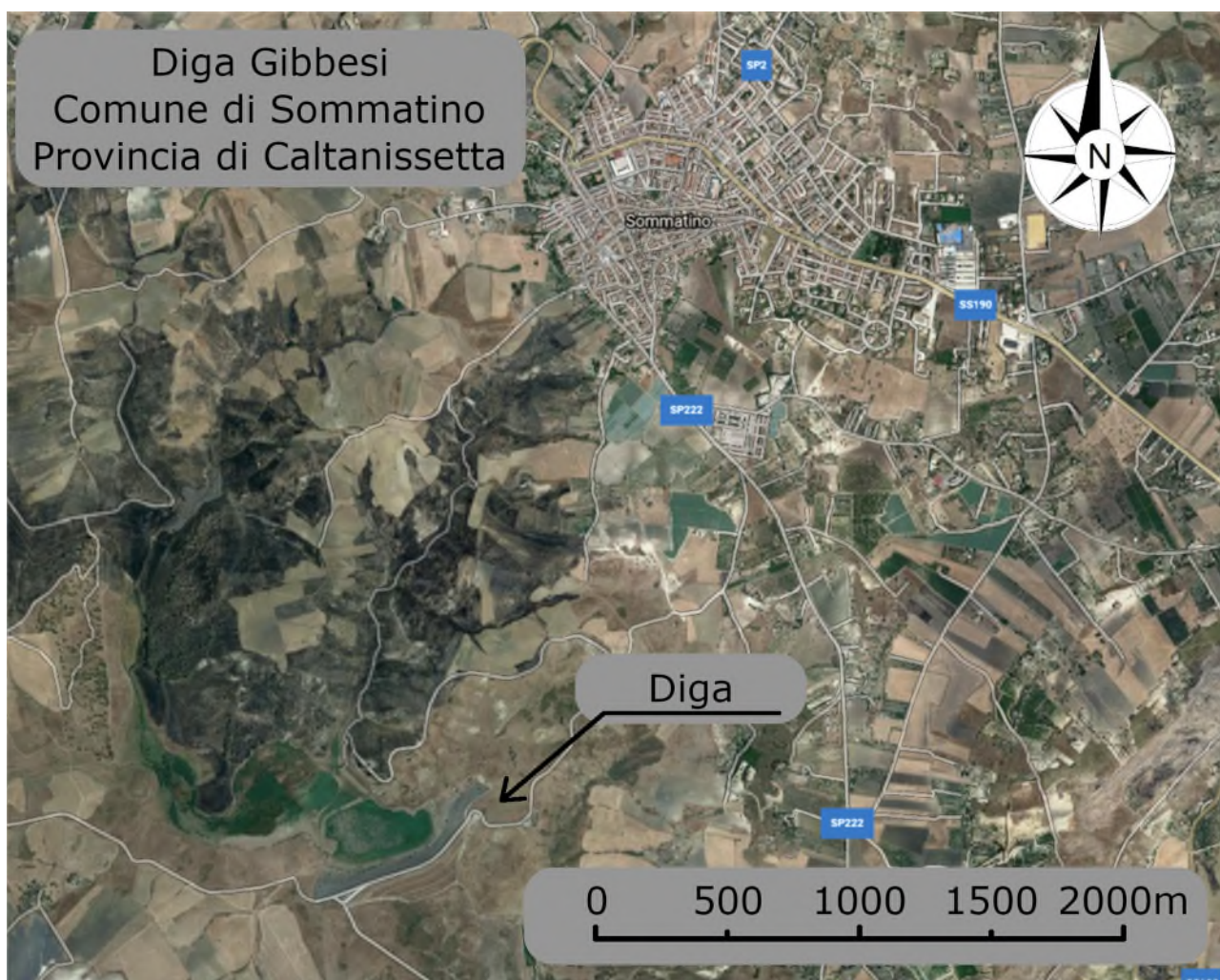


Figura 2-1 Vista satellitare del territorio comunale di Sommatino con indicazione della diga Gibbesi (modificata da Google Earth).

Il bacino imbrifero di riferimento, alla sezione di sbarramento, si estende sui comuni di Naro, Canicattì, Delia e Sommatino, con una estensione complessiva di circa 116 km<sup>2</sup>.

L'invaso artificiale ha una superficie dello specchio liquido a pieno regime di 1.13 Km<sup>2</sup> e una capacità massima di progetto pari a 11.4 milioni di m<sup>3</sup>.

La destinazione della risorsa idrica invasata è per uso irriguo.





□ Fogli C.T.R. 10000

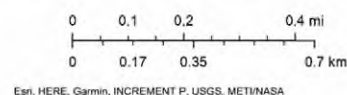


Figura 2-2 Stralcio della Carta Tecnica Regionale con indicazione della diga Gibbesi.





Figura 2-3 Fotografia dell'invaso scattata dalla sponda sinistra.

La diga, realizzata tra il 1978 e il 1992, è del tipo a materiali sciolti con nucleo di tenuta centrale e struttura zonata.

Planimetricamente lo sbarramento ha andamento mistilineo, con uno sviluppo complessivo in testa al coronamento di 607 m.

La sezione trasversale della diga ha forma trapezoidale con larghezza in testa al coronamento di m 9 e alla base di m 276.50. La sommità del rilevato è posta a quota 236 m s.l.m., con altezza totale dello sbarramento di 46 m.

	<p style="text-align: center;"><i>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</i></p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Pag. 14 di 160</b></p>

Il collaudo (ex art. 14 del D.P.R. 1363/59) è ancora oggi in corso e il serbatoio è nella condizione di invaso sperimentale con le relative operazioni avviate il 18/07/2007.

Di seguito si riportano i dati fondamentali della diga e dell'invaso desunti dalla scheda tecnica di sintesi della diga e degli impianti elaborata appositamente per lo studio di rivalutazione sismica (Regione Siciliana, delibera CIPE N°54/2016 – scheda tecnica N°075 Diga Gibbesi)

*Corpo diga:*

- altezza della diga (ai sensi del D.M. n° 44 del 24/03/82) 46.00 m;
- altezza della diga (ai sensi della Legge 584/94) 30.00 m;
- altezza di massima ritenuta 31.50 m;
- quota coronamento 236.00 m s.l.m.;
- franco (ai sensi del D.M. n° 44 del 24/03/82) 4.50 m;
- franco netto (ai sensi del D.M. n° 44 del 24/03/82) 4.01 m;
- sviluppo del coronamento 607.00 m;
- volume della diga 1720000 m<sup>3</sup>;
- grado di sismicità assunto nel progetto  $S = 9$ ;
- classifica ai sensi del D.M. n° 44 del 24/03/82: B-b.

*Dati principali dell'invaso:*

- quota di massimo invaso 231.50 m s.l.m.;
- quota di massima regolazione 229.00 m s.l.m.;
- quota minima di regolazione 219.00 m s.l.m.;
- semionda maggiorata del run-up 0.211m
- superficie dello specchio liquido (quota massimo invaso) 1.29 km<sup>2</sup>;
- volume totale di invaso (ai sensi del D.M. n° 44/82) 14x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>;
- volume di invaso (ai sensi della Legge n° 584/1994) 11.4 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>;
- volume utile di regolazione 7.90x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>;
- volume di laminazione 2.60x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>;
- superficie del bacino imbrifero direttamente sotteso 116 km<sup>2</sup>;
- portata di massima piena di progetto 1400 m<sup>3</sup>/s.

L'opera di sbarramento è costituita da un rilevato a sezione trapezoidale con uno sviluppo mistilineo di circa 607 m in corrispondenza del coronamento.

La diga è a materiali sciolti di tipo zonato con nucleo di tenuta (Figura 2-4).



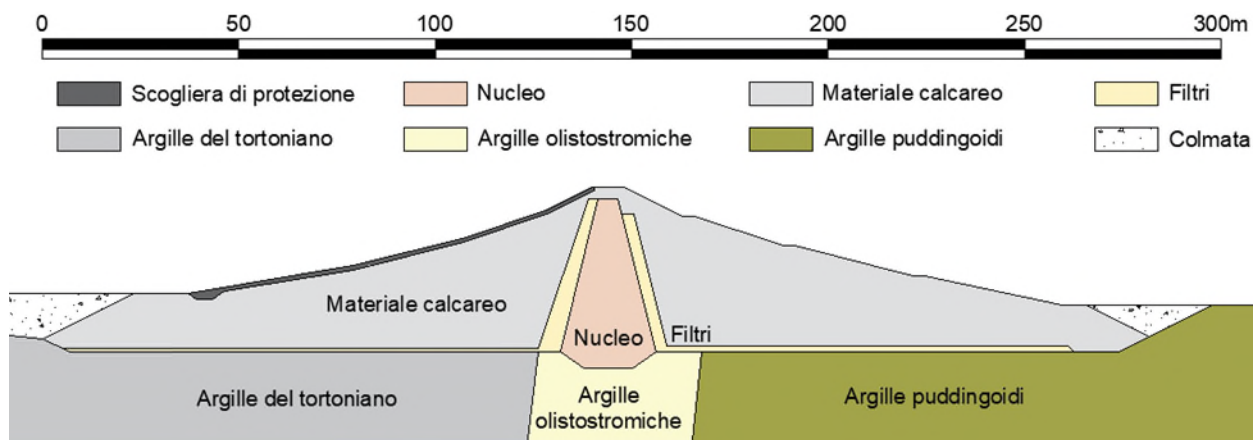


Figura 2-4 Sezione tipo della diga Gibbesi.

La diga ha una larghezza alla base di circa 280 m ed una altezza massima, nella parte centrale, misurata rispetto al taglione di ammorsamento del nucleo nella formazione argillosa di base, pari a circa 46 m. Il coronamento ha una larghezza di 9 m e si colloca a quota 236 m s.l.m.m..

I livelli di ritenuta alla massima regolazione ed alla massima piena sono rispettivamente pari a 229.00 m e 231.50 m s.l.m.m..

Il nucleo è costituito da limo argilloso ed è ammorsato nella formazione di base costituita da materiali argillosi e marnosi mediante un taglione di 4 m di altezza con pendenza, su entrambi i versanti di 1.5/1. I paramenti laterali del nucleo sono sagomati con pendenza 1/4 e la larghezza minima del nucleo, in testa, è di 4.50 m. A ridosso del nucleo sono disposti, verso monte, uno strato di transizione in calcarenite, e verso valle, un filtro a tre strati a granulometria crescente. Sia la transizione che i filtri ricoprono anche la superficie di fondazione.

Il fianco di monte è costituito da materiale calcareo, tout-venant nella parte interna e selezionato verso il paramento. Il paramento è sagomato con pendenza variabile tra 2/1 a 6/1, decrescente dal coronamento alla base. La protezione dal moto ondoso è assicurata da un rivestimento superficiale di spessore 1 m di materiale da scogliera.

Il fianco di valle è costituito da materiale calcarenitico tout-venant nella parte interna, e calcareo tout-venant nella parte più esterna, il tutto protetto da un manto erboso superficiale.

Il paramento è sagomato con pendenza variabile tra 2/1 a 4.7/1, decrescente dal coronamento alla base, ed è interrotto a diverse altezze da banchine orizzontali di larghezza 3m.

In sponda sinistra è ubicato lo scarico di fondo da cui parte la condotta di scarico che si ricongiunge a quella di uno dei due sfioratori a calice posizionati più a valle (Figura 2-5).



### 3 Il quadro normativo

Le verifiche sono state eseguite conformemente ai seguenti decreti:

- [1] Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 26 giugno 2014 “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)”.
- [2] Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17 gennaio 2018 “Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»”.
- [3] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, luglio 2018. Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie. Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18). Rev 1 del giugno 2019.
- [4] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, marzo 2019. Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie. Procedura.

#### 3.1 Classificazione della diga e periodo di riferimento per l'azione sismica

Ai sensi del paragrafo C.7.7.2 - *Periodo di riferimento per l'azione sismica* del DM del 26 giugno del 2014 [1], la Diga Gibbesi è classificabile nella categoria delle “grandi dighe” in quanto supera i 15 metri di altezza e determina un volume di invaso superiore a 1.000.000 di metri cubi. Sempre ai sensi dello stesso DM, l'opera rientra tra le “Dighe rilevanti per le conseguenze di un eventuale collasso” (categoria B).

Inoltre, considerando che alla data della redazione della valutazione di sicurezza l'opera risulta completamente realizzata, la diga rientra nella categoria delle Dighe Esistenti, disciplinata dal paragrafo H.1 del DM 2014. Per quanto precedentemente osservato, il periodo di riferimento per l'azione sismica  $V_R$ , si calcola in funzione della vita nominale  $V_N$  e del coefficiente d'uso  $C_U$ , riportati nella seguente Tabella 3-1:

$$V_R = V_N C_U \quad (3.1)$$

Esso risulta pari a 75 anni (Tabella 3-1), essendo  $V_N=50$  anni e  $C_U=1.5$ .

Tabella 3-1 Vita nominale, coefficiente d'uso e periodo di riferimento da adottare per la verifica sismica.

Dighe:	$V_N$ (anni)	$C_U$	$V_R$ (anni)
strategiche	$\geq 50$	2.0	100
rilevanti		1.5	75

Tabella 3-2 Periodo di riferimento dell'azione sismica per le differenti categorie di dighe.

Dighe:	$V_R$ (anni)
strategiche	100
rilevanti	75
importanza normale	50

Ne consegue che i periodi di ritorno per il computo dell'azione sismica risultino pari (vedere Tabella 3-3) a:  $T_R(\text{SLO})=45$ anni,  $T_R(\text{SLD})=75$ anni,  $T_R(\text{SLV})=710$ anni,  $T_R(\text{SLC})=1460$  anni.



Tabella 3-3 Periodi di ritorno dell'azione sismica per i differenti stati limite e categorie di diga.

Dighe	SLO	SLD	SLV	SLC
	$P_{VR}=81\%$	$P_{VR}=63\%$	$P_{VR}=10\%$	$P_{VR}=5\%$
strategiche	60	100	950	1946
rilevanti	45	75	710	1460
importanza normale	30	50	475	975

### 3.2 Stati limite di riferimento e criteri di ammissibilità

In accordo con il paragrafo C.6 del D.M.26 giugno 2014, la valutazione della sicurezza dei serbatoi deve essere effettuata con riferimento alle seguenti condizioni caratteristiche:

1. normale funzionamento;
2. danni riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua;
3. danni non riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua;
4. danni che determinano il rilascio incontrollato di acqua, o comunque rischio di perdite di vite umane;
5. collasso della struttura.

L'uscita o l'entrata nelle varie condizioni caratteristiche definiscono quattro stati limite:



- lo stato limite SLO corrisponde all'uscita dalla condizione 1;
- lo stato limite SLD corrisponde al passaggio dalla condizione 2 alla condizione 3;
- lo stato limite SLV corrisponde al raggiungimento della condizione 4;
- lo stato limite SLC corrisponde al raggiungimento della condizione 5.

Inoltre, nelle "Istruzioni per l'applicazione della Normativa Tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18)" emanate nel Luglio 2018 dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti Dipartimento per le Infrastrutture, i Sistemi Informativi e Statistici (Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche), si afferma che *"nelle verifiche il concessionario può adottare livelli di sicurezza più stringenti di quelli proposti dalla norma, a condizione che tale scelta non comporti immotivati maggiori oneri economici, ambientali e sociali"*. In particolare, la verifica allo SLV potrà essere omessa se le stesse prestazioni sono garantite con il livello di azione sismica dello SLC. Nel prosieguo si è adottata questa misura, ovvero si valutano le prestazioni indotte dalle azioni sismiche corrispondenti al livello SLC confrontandole con le condizioni limite definite per il livello SLV.

Pertanto, la verifica è stata svolta facendo riferimento alle condizioni di Stato limite Ultimo e di Esercizio assumendo i criteri di ammissibilità delle verifiche di seguito descritti.

- a. Verifica a Stato Limite Ultimo eseguita per un livello di azione sismica di tipo SLC assicurando che non si raggiunga la sopra citata condizione 4, ovvero che non si verifichino danni che determinano il rilascio incontrollato di acqua, o comunque rischio di perdite di vite umane.  
Ai sensi del D.M.26 giugno 2014 si prendono in esame le seguenti condizioni:



	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;">VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</p>	<p style="text-align: right;">Pag. 19 di 160</p>



- instabilità del corpo diga e dei terreni o ammassi rocciosi di imposta;
- instabilità per scorrimento, anche parziale, del corpo diga o meccanismi di rottura locali;
- rottura per erosione interna; fessurazioni nel corpo diga, nei terreni o ammassi rocciosi di fondazione, negli elementi di tenuta o nelle superfici di contatto manufatto-terreno, tali da provocare una filtrazione incontrollata;
- deformazioni del corpo diga e/o dei terreni o ammassi rocciosi di fondazione, tali da provocare danni strutturali allo sbarramento o la tracimazione;
- instabilità dei pendii che possano provocare la tracimazione della diga o danni strutturali;
- rottura o danno degli organi di scarico e in generale delle opere accessorie, che impediscano il deflusso controllato dal serbatoio;
- condizione di piena che porti alla tracimazione del coronamento con conseguenti danni gravi fino alla possibilità di collasso dello sbarramento.

Con riferimento alle dighe in materiale sciolto nel paragrafo E si indica inoltre che sono da considerare i seguenti stati limite ultimi.

- instabilità dei paramenti;
- rottura per liquefazione del corpo diga o dei terreni di fondazione;
- rottura per erosione interna o sifonamento;
- lacerazione dell'eventuale manto o rottura del diaframma di tenuta.

Nelle Istruzioni per l'applicazione della Normativa Tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18) la suddetta condizione si verifica anche se ricorre una o più tra le seguenti condizioni:

- lo sbarramento ha subito danni gravi quali, ad esempio, dislocazioni di conci, crolli che interessano porzioni limitate del corpo diga, generalmente poste nella parte sommitale, apertura di fessure o di giunti costruttivi. A questi danni può essere associata la formazione di vie di fuoriuscita dell'acqua che innescano lo svuotamento, incontrollato ma limitato, del serbatoio. Il verificarsi del processo di filtrazione non deve comunque causare una propagazione del danno che porti, progressivamente, al collasso dell'intera struttura di ritenuta. Lo SLV può essere raggiunto anche in assenza di filtrazione, al verificarsi di spostamenti permanenti del corpo diga che facciano ritenere necessario mantenere il serbatoio vuoto fino a quando non siano effettuati interventi strutturali per il ripristino della capacità di invaso;
  - gli scarichi di superficie o di fondo hanno subito danni tali da metterli fuori servizio. Lo scarico di superficie è in condizioni tali da non poter smaltire in sicurezza la portata di progetto; gli scarichi profondi non sono azionabili. Il serbatoio deve essere svuotato ricorrendo a procedure d'urgenza da valutarsi caso per caso;
  - si sono verificati fenomeni di instabilità delle sponde dell'invaso tali da generare l'innalzamento del livello del serbatoio e la conseguente tracimazione di una diga muraria.
- b. Verifica a Stato Limite di Esercizio eseguita per un livello di azione sismica di tipo SLD assicurando che non si raggiunga la sopra citata condizione 3, ovvero che non si verifichino danni irreparabili, e che non vi sia rilascio incontrollato di acqua.

	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Pag. 20 di 160</b></p>

Ai sensi del D.M.26 giugno 2014 si prendono in esame le seguenti condizioni:

- eccesso di tensioni o deformazioni del corpo diga e/o nei terreni di fondazione;
- danneggiamento degli organi di scarico superficiali o profondi;
- danneggiamento delle opere di derivazione;
- danneggiamento dei sistemi di misura e controllo.

Nelle Istruzioni per l'applicazione della Normativa Tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18) la suddetta condizione si verifica anche se ricorre una o più tra le seguenti condizioni:



- lo sbarramento è al più interessato da danni lievi agli elementi strutturali (p. es. fessure non passanti sui paramenti) e possono essersi registrate anomalie strumentali (p. es. incremento delle filtrazioni, spostamenti permanenti nelle dighe di materiali sciolti) che richiedono l'adozione di procedure di gestione non ordinarie (p. es. riduzione del livello di invaso), ma i livelli di sicurezza nei confronti della funzione di ritenuta sono rimasti inalterati;
- gli scarichi di superficie e di fondo non hanno subito danni tali da compromettere la funzione ad essi assegnata; eventuali danni agli scarichi di superficie non hanno alterato la loro capacità di smaltire la portata di progetto; eventuali danni agli scarichi profondi non ne impediscono l'azionamento, seppur con efficienza ridotta, in modo da permettere lo svuotamento del serbatoio; le apparecchiature di manovra sono funzionanti e azionabili con almeno una fonte di energia;
- le misure di controllo essenziali per la sicurezza possono essere effettuate, eventualmente con strumenti diversi da quelli normalmente adottati (p. es. in modalità manuale anziché automatica);
- non sono mutate le condizioni di stabilità delle sponde, ma possono essersi verificati dissesti locali;
- le opere di derivazione possono essere danneggiate senza che ciò comporti la fuoriuscita dell'acqua di invaso;
- gli impianti di illuminazione e sorveglianza possono essere fuori servizio.

Per ciò che riguarda i criteri di ammissibilità il D.M. 2014 [1] precisa che “L'ammissibilità sarà fissata dal progettista, secondo il tipo di opera nelle differenti situazioni progettuali, in termini di sforzi, spostamenti, gradienti piezometrici, portate filtranti, stato di fessurazione nel corpo diga, nei terreni ed in corrispondenza dei principali contatti tra materiali diversi; saranno considerati altresì i possibili effetti reversibili e irreversibili delle temute anomalie sul funzionamento degli scarichi e dei sistemi di misura e controllo, anche in presenza di frane ed interrimento”.

Riassumendo il quadro precedente, le verifiche agli Stati Limite Ultimi e di Esercizio sono state condotte adottando le sollecitazioni ed i criteri di ammissibilità riassunti nella Tabella 3-4.

La verifica SLU in condizioni di esercizio è stata eseguita accertando che per le condizioni di bacino alla quota di massimo invaso, bacino alla quota di massima regolazione e svaso rapido il fattore di sicurezza calcolato con il metodo dell'equilibrio limite ( $FS = R_D / E_D / \gamma_R$ ) sia maggiore dell'unità.

La stabilità del corpo diga (SLU1) e delle fondazioni (SLU2) sono state valutate in accordo con le prescrizioni dettate al paragrafo 7.11.4 del D.M. 2018 [2] per i fronti di scavo e rilevati. Il paragrafo

 II122F-A-SIS-RT-202-00	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	 Pag. 21 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

recita come segue: “Nelle verifiche di sicurezza si deve controllare che la resistenza del sistema sia maggiore delle azioni (condizione [6.2.1]) impiegando lo stesso approccio di cui al § 6.8.2 per le opere di materiali sciolti e fronti di scavo, ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici (§ 7.11.1) e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a  $\gamma_R = 1.2$ . Si deve inoltre tener conto della presenza di manufatti interagenti con l'opera.” Le verifiche SLU1 ed SLU2 verranno quindi eseguite controllando che sia nel corpo diga che nei terreni di fondazione, per un input sismico amplificato di un fattore 1.2 non si determinino allineamenti dei punti di plasticizzazione lungo superfici continue.

La verifica di continuità del nucleo (SLU3) è stata svolta accertandosi che non si sviluppino superfici continue di plasticizzazione.

La verifica a liquefazione dei materiali del contronucleo (SLU4) è stata effettuata valutando che il rapporto di sovrappressione neutra, dato dal rapporto tra la sovrappressione e la tensione verticale efficace antecedente il sisma, risulti inferiore a 0.9.

La verifica a tracimazione (SLU5) è stata eseguita controllando che la quota della sommità del nucleo, ridotta del cedimento residuo post sisma, risulti superiore alla quota di massima regolazione dell'invaso maggiorata dell'altezza della semionda prodotta dal sisma. Essendo la quota del nucleo pari a 233.0m s.l.m.m. l'ampiezza della semionda maggiorata del run-up pari a 0.211m e la quota di massima regolazione pari a 229.0m s.l.m.m., il valore massimo ammissibile del cedimento del nucleo risulta di 3.789 m.

Infine, per quanto concerne le verifiche degli organi di scarico (SLU6, SLD2), opere di derivazione, sistemi di misura e controllo si è identificato come parametro di controllo il rapporto S/H, prendendo a riferimento il criterio di Swaisgood (2003), dove S rappresenta il cedimento permanente del coronamento successivo al sisma ed H l'altezza della diga maggiorata dello spessore dello strato deformabile di fondazione. Nel caso in esame, considerando lo strato di fondazione indeformabile, questa verifica è stata svolta assumendo cautelativamente H pari alla sola altezza del corpo diga. Il grado di danneggiamento della diga è stato quindi valutato con riferimento al diagramma di Figura 3-1, che riporta il grado di danneggiamento di 69 dighe provenienti da tutto il mondo, in funzione dell'accelerazione al suolo PGA e del rapporto S/H: la verifica a Stati Limite di Danno è stata ritenuta soddisfatta per valori del rapporto S/H minori di 0.5%, valore di soglia che segna il passaggio dalla condizione “danni lievi” alla condizione di “danni moderati”; la verifica a Stati Limite Ultimi è stata ritenuta soddisfatta per valori del rapporto S/H minori di 1%, valore di soglia che segna il passaggio dalla condizione “danni moderati” alla condizione di “danni seri”.

La verifica all'erosione interna SLU7 è stata eseguita controllando che la deformazione distorsionale massima residua del filtro risulti inferiore al 5% ed accertando che il rapporto tra la pressione neutra e la pressione principale minima sia minore dell'unità.

La verifica SLU in condizioni post-sismiche è stata eseguita per ognuno dei quadri tenso-deformativi post sisma calcolati nelle analisi dinamiche al passo. In particolare, si sono ridotti i parametri di resistenza dei materiali, coesione e tangente dell'angolo d'attrito, di un coefficiente  $\gamma = 1.5$  ( $\gamma = \gamma_M \cdot \gamma_R$ ,

N.T.C. 2018 - N.T.D. 2014) e si è verificato che non insorgessero superfici di scorrimento continue, tali da produrre fenomeni di instabilità globale del corpo diga.

Tabella 3-4 Sintesi delle verifiche e dei criteri di ammissibilità adottati nelle verifiche della diga.

STATO LIMITE ULTIMO		
#	Verifica	Condizione di esercizio (statiche) Criterio di ammissibilità
SLU	Instabilità corpo diga	Coefficiente di sicurezza $FS=R_D/E_D>1$

STATO LIMITE ULTIMO		
#	Verifica	Azione sismica SLC ( $T_R=1460$ anni) Criterio di ammissibilità
SLU1	Instabilità corpo diga	Formazione di superfici continue di plasticizzazione/scorrimento per un amplificatore dell'azione sismica pari a 1.2 (**)
SLU2	Instabilità dei terreni di fondazione	Formazione di superfici continue di plasticizzazione/scorrimento per un amplificatore dell'azione sismica pari a 1.2 (**)
SLU3	Fessurazione del nucleo	Assenza di superfici continue di plasticizzazione.
SLU4	Liquefazione	Massimo rapporto di sovrappressioni neutre ( $R_u= \Delta u/\sigma'_v$ ) nei contronuclei $<0.9$
SLU5	Tracimazione	Quota della sommità del nucleo ridotta dell'abbassamento prodotto dal sisma $>$ quota massima regolazione maggiorata della altezza della semionda
SLU6	Rottura organi di scarico	Rapporto $S/H<1\%$ (*)
SLU7	Erosione interna	Deformazione distorsionale massima nel filtro $<5\%$ . Rapporto massimo tra pressione neutra e tensione principale minima nel filtro $<1$ .

STATO LIMITE DI ESERCIZIO		
#	Verifica	Azione sismica SLD ( $T_R=75$ anni) Criterio di ammissibilità
SLD1	Dissesti locali	Assenza di superfici di plasticizzazione/scorrimento locali
SLD2	Danneggiamento organi di scarico, opere di derivazione, sistemi di misura e controllo	Rapporto $S/H$ (*) $<0.5\%$

(\*) La verifica al danneggiamento degli organi di scarico è effettuata adottando il criterio suggerito da Swaisgood (2003) riassunto nella Figura 3-1.

(\*\*) La verifica di instabilità del corpo diga e dei terreni di fondazione è effettuata in accordo al paragrafo 7.11.4 del D.M. 2018 [2]

STATO LIMITE ULTIMO		
#	Verifica	Condizione post-sismica Criterio di ammissibilità
SLU	Instabilità corpo diga	Assenza di superfici continue di scorrimento





## DIGA GIBBESI

### RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE



II122F-A-SIS-RT-202-00

VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE

Pag. 23 di 160

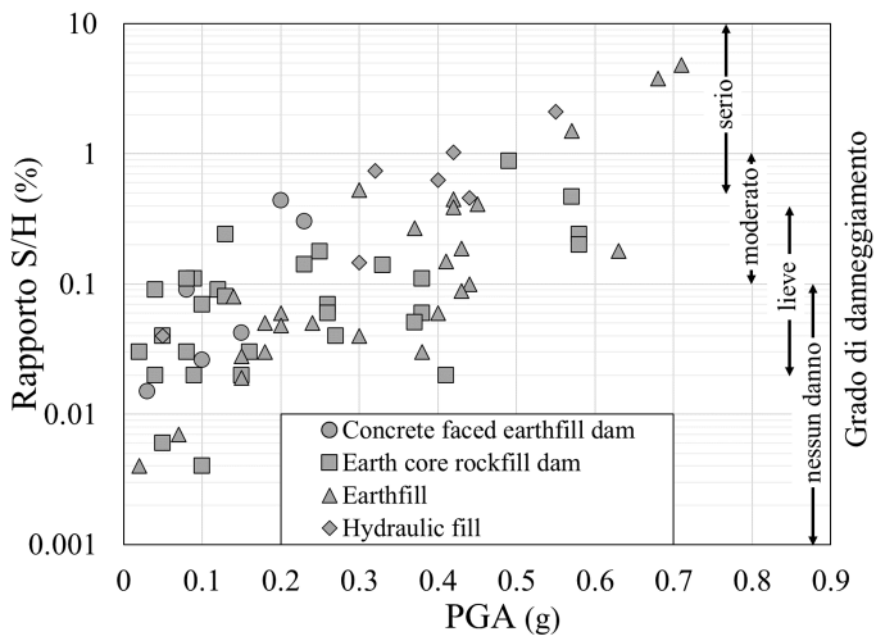


Figura 3-1 Grado di danneggiamento in funzione della PGA e del rapporto S/H (cedimento in cresta – Altezza dello sbarramento cumulata allo strato deformabile) (Swaigood, 2003).

## 4 Le azioni

Le azioni considerate nella verifica, riassunte nei seguenti paragrafi, sono state valutate seguendo le indicazioni del Capitolo C.7 del DM 2014 [1].

### 4.1 Il peso proprio del corpo diga

Le azioni da peso proprio sono tenute in conto nell'analisi definendo all'interno del software le densità dei materiali. I valori dei pesi unitari dei materiali in condizioni naturali e asciutti sono sinteticamente richiamati nella seguente tabella (per ulteriori dettagli si rimanda alla relazione geotecnica).

Tabella 4-1 Pesì specifici dei materiali che contribuiscono al peso proprio della diga.

Materiale	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
Scogliera	20.0	18.9
Contronuclei	20.0	18.9
Filtri	20.0	18.9
Nucleo	20.5	16.7
Colmate	16.0	12.2
Argille del tortoniano	19.8	15.6
Argille olistostromiche	18.8	14.8
Argille puddingoidi	19.7	16.3

### 4.2 La spinta idrostatica

La spinta dell'invaso sul paramento di monte è stata calcolata con riferimento alla quota di massima regolazione di 229.0m s.l.m.m (Figura 4-1), oppure alla quota di massimo invaso di 231.5m s.l.m.m. in accordo con la particolare verifica in esame. Tale azione è stata considerata agente sul paramento secondo con una distribuzione pari a zero in corrispondenza del pelo libero e linearmente crescente con il tirante idrico secondo un coefficiente angolare pari al peso specifico dell'acqua (9.81kN/m<sup>3</sup>).

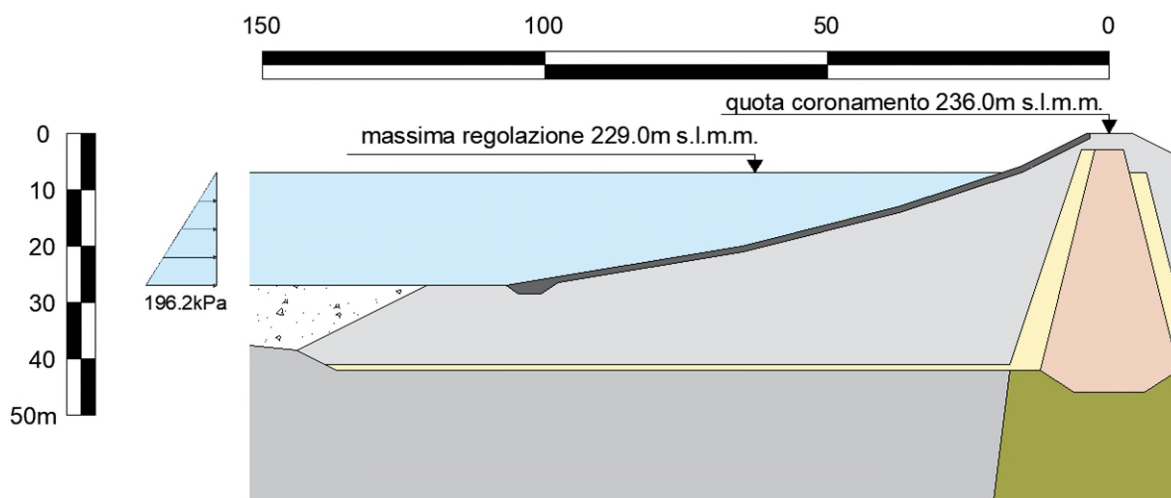


Figura 4-1 Sezione di verifica della diga con indicazione della quota di massima regolazione e della spinta idrostatica del bacino.

### 4.3 La spinta dell'interrimento

Essendo l'interrimento assente non è stata prevista nel modello nessuna spinta addizionale.

### 4.4 L'azione sismica

Allo scopo di definire la pericolosità sismica di base è stato necessario individuare le coordinate geografiche della diga (Tabella 4-2), classe d'uso, vita nominale ( $V_N$ ) e coefficiente d'uso, così come specificato dalle NTC 2018 [2].

Tabella 4-2 Coordinate geografiche della diga in asse coronamento.

	Latitudine	Longitudine
Gradi, minuti, secondi	37°18'36" N	13°58'48" E
Gradi decimali	37.31	13.98

Non essendoci particolari prescrizioni regionali e ricadendo l'opera nella categoria delle “grandi dighe” (dighe che superano i 15 metri di altezza o che determinano un volume di invaso superiore a 1.000.000 di metri cubi, D.M. 26 giugno 2014), la particolare classe d'uso è la Cl. III (NTC, 2018, paragrafo 2.4.2).

Così come prescritto dalle NTC 2018 (paragrafo 2.4.1) ed ulteriormente richiamato nel DM 26 giugno 2014 nel Capitolo H (tabella H1), trattandosi di uno sbarramento classificato come “rilevante” si è fatto riferimento ad una vita nominale di 50 anni ed un coefficiente d'uso  $C_U=1.50$ .

Si definisce quindi il periodo di riferimento dell'azione sismica secondo la relazione 2.4.1 delle NTC 2018.

$$V_R = V_N C_U = 50 \cdot 1.5 = 75 \text{ anni} \quad (4.1)$$

La probabilità di superamento dell'azione sismica di progetto nel periodo di riferimento dipende dal particolare stato limite analizzato e, come specificato dalle NTC 2018 (paragrafo 3.2.1, tabella 3.2.1), risulta pari all'81% per lo stato limite di operatività (SLO), 63% per lo stato limite di danno (SLD), 10% per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) ed al 5% per lo stato limite di collasso (SLC).

Si definisce per gli stati limite considerati il periodo di ritorno dell'azione sismica ( $T_R$ ) secondo la relazione 3.2.0 delle NTC 2018 di seguito riportata.

$$T_R = -C_U V_N / \ln(1 - P_{VR}) \quad (4.2)$$

In Tabella 4-3 si riprendono i parametri di ingresso per la definizione della pericolosità sismica di base.

Tabella 4-3 Parametri di ingresso per la definizione della pericolosità sismica di base.

Stato limite	$V_N$ (anni)	$C_U$	$V_R$ (anni)	$P_{VR}$ (%)	$T_R$ (anni)
SLO	$\geq 50$	1.5	100	81	45
SLD	$\geq 50$	1.5	100	63	75
SLV	$\geq 50$	1.5	100	10	712
SLC	$\geq 50$	1.5	100	5	1460

Con riferimento agli allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 17 gennaio 2018, è stata definita la pericolosità sismica di base per un periodo di riferimento di 475 anni (Tabella 4-4) in termini di accelerazione orizzontale massima al sito ( $a_g$ ), valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale ( $F_0$ ) e valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione ( $T^*_C$ ). Essendo l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito per un periodo di ritorno di 475 anni uguale a 0.064g (<0.15g), così come prescritto dal D.M. 26 giugno 2014, non è stato necessario lo studio sismo-tettonico del sito.

Si precisa che il suddetto valore di 475 anni corrisponde al periodo di ritorno  $T_R$  dell'azione sismica per lo stato limite di salvaguardia della vita (probabilità di superamento  $P_{VR}=10\%$ ) di costruzioni con livelli di prestazione ordinari (categoria 2 – vita nominale  $V_N=50$ anni) e classe d'uso II (Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.)

Tabella 4-4 Parametri descrittivi della pericolosità sismica di base per un periodo di ritorno di 475anni.

$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_C$ (s)
475	0.064	2.489	0.240

In Tabella 4-5 si riportano i parametri descrittivi della pericolosità sismica di base ( $a_g$ : accelerazione orizzontale massima al sito,  $F_0$ : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale,  $T^*_C$ : valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione) così come definiti dalla NTC2018.

Tabella 4-5 Parametri descrittivi della pericolosità sismica di base ottenuti secondo le NTC 2018.

NTC 2018				
Stato limite	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_C$ (s)
SLO	45	0.028	2.493	0.236
SLD	75	0.034	2.513	0.282
SLV	712	0.074	2.660	0.487
SLC	1460	0.095	2.722	0.544

Come accennato in precedenza, allo scopo di selezionare gli accelerogrammi per l'analisi dinamica al passo, per ognuno degli stati limite considerati è stata eseguita un'operazione di disaggregazione della pericolosità sismica del sito al fine di identificare le coppie magnitudo-distanza che maggiormente contribuiscono alla definizione della pericolosità sismica. Si ricorda (così come precisato al Paragrafo 3.2) che le verifiche SLV sono state eseguite considerando il livello di azione sismica dello SLC, mentre le verifiche per le verifiche SLE si è fatto riferimento allo stato limite di danno SLD.

Per questa operazione si è fatto riferimento alle mappe interattive di pericolosità sismica "Essel" (<http://essel-gis.mi.ingv.it/>) sviluppate dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.



Di seguito, in Tabella 4-6 si riportano le coppie magnitudo-distanza derivanti dall'applicazione delle NTC 2018. Si riportano in particolare i range di variazione delle coppie magnitudo-distanza che contribuiscono alla pericolosità sismica per aliquote maggiori dell'1%.

Tabella 4-6 Risultati della disaggregazione della pericolosità sismica ottenuti applicando le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

NTC 2018		
Stato limite	Magnitudo	Distanza (km)
SLO	4.0÷6.5	0÷120
SLD	4.0÷6.5	0÷110
SLV	4.5÷7.5	0÷110
SLC	5.0÷7.5	0÷110

Dal database europeo dei terremoti “European Strong Motion Database (Luzi et al., 2016)” e dall'archivio italiano delle forme d'onda accelerometriche (Luzi *et al.*, 2019) sono stati estratti per ciascuno stato limite (SLD, SLC) sette accelerogrammi orizzontali spettro-compatibili insieme con i corrispondenti accelerogrammi verticali. In particolare, la compatibilità con lo spettro di risposta di riferimento è stata valutata per la componente orizzontale in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del 5%. Così come prescritto dalla normativa, [1] [3], l'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10% e uno scarto in eccesso superiore al 30%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro di riferimento, in alcun punto dell'intervallo dei periodi propri di vibrazione di interesse per l'opera in esame (0.15÷2.0s secondo le indicazioni delle NTC 2018) per i diversi stati limite.

Tale operazione è stata eseguita mediante la piattaforma REXELWEB sviluppata dal gruppo “Itaca” (INGV, 2020).

Gli accelerogrammi orizzontali e verticali così selezionati, sono stati successivamente scalati in modo da portare il valore della PGA a quelli attesi al sito per il particolare stato limite analizzato.

#### 4.4.1 Definizione dell'azione sismica per lo Stato Limite di Danno (SLD)

In congruenza con la procedura illustrata, per lo stato limite di danno sono stati selezionati gli accelerogrammi elencati in Tabella 4-7 insieme ai parametri descrittivi più significativi tra cui l'accelerazione massima attesa al sito in direzione orizzontale e verticale ( $PGA_o$ ,  $PGA_v$ ) ed i fattori di scala adottati in direzione orizzontale e verticale ( $SF_o$ ,  $SF_v$ ).

Tabella 4-7 Accelerogrammi selezionati per la verifica dinamica allo Stato Limite di Danno (SLD).

ID	Evento - Stazione	ID evento	C	Data	Magnitudo MI	PGA <sub>0</sub> (m/s <sup>2</sup> )	SF <sub>0</sub>	PGA <sub>v</sub> (m/s <sup>2</sup> )	SF <sub>v</sub>
01	Italia centrale – Sarnano	IT.SNO.00.HG.EMSC-20161030_0000029	E	30/10/2016	6.1	0.895	0.37	0.6755	0.12
02	Italia centrale – Castelnuovo, Assisi	IT.CSA.00.HG.EMSC-20161030_0000029	E	30/10/2016	6.1	0.75	0.44	0.248	0.33
03	Italia centrale – Monte Daria	IV.MDAR.00.HN.EMSC-20161026_0000095	E	26/10/2016	5.9	1.169	0.28	0.619	0.13
04	Italia centrale – Treia	IT.TRE1.00.HN.EMSC-20161030_0000029	N	30/10/2016	6.1	0.581	0.56	0.542	0.15
05	L'Aquila – Celano	IT.CLN.00.HN.IT-2009-0009	N	06/04/2009	5.9	0.885	0.37	0.439	0.18
06	Emilia 2nd Shock – Sant'Agostino	IT.SAG0.00.HN.IT-2012-0011	N	29/05/2012	5.8	0.664	0.49	0.655	0.12
07	Italia Centrale – San Lorenzo a Pinaco	3A.MZ27.00.HN.EMSC-20161026_0000095	E	26/10/2016	5.9	0.549	0.60	0.247	0.33

Si riportano di seguito in Figura 4-2 gli spettri degli accelerogrammi spettro-compatibili selezionati con riferimento allo stato limite di danno (SLD).

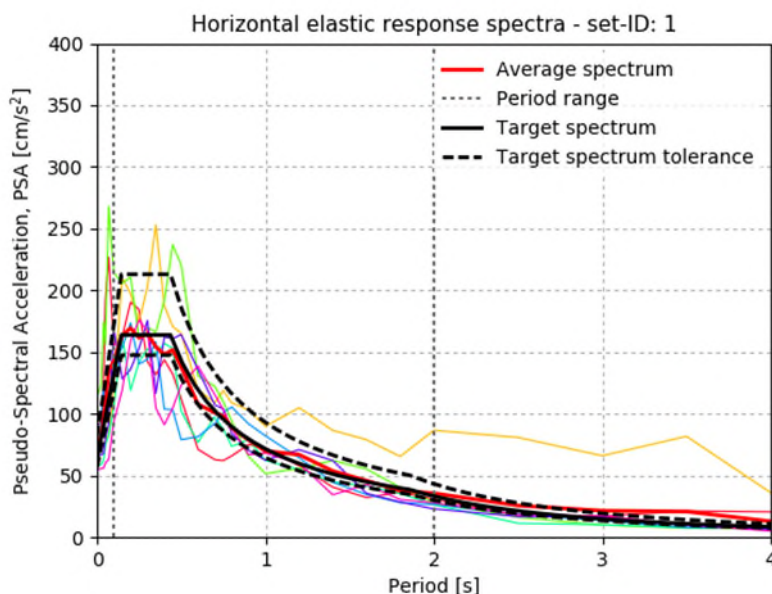


Figura 4-2 Diagramma di spettrocompatibilità per lo Stato Limite di Danno. Gli spettri degli accelerogrammi selezionati per la verifica sono evidenziati dai colori, spettro di progetto in nero (target spectrum), valori di ammissibilità per gli spettri in linea tratteggiata.

Ognuno degli accelerogrammi selezionati è stato corretto per la “baseline” in modo che la storia temporale dello spostamento ottenuta per doppia integrazione dell’accelerogramma attinga un valore nullo al termine della registrazione.

Nelle figure seguenti si propongono gli accelerogrammi selezionati e le loro rispettive componenti verticali. In particolare, in ogni figura si mostra: a) accelerogramma naturale registrato, così come fornito dal database sismico, b) accelerogramma scalato per la PGA stimata al sito, c) velocigramma, d) storia temporale dello spostamento, e) Intensità di Arias, f) spettro in ampiezza, g) spettro di risposta.

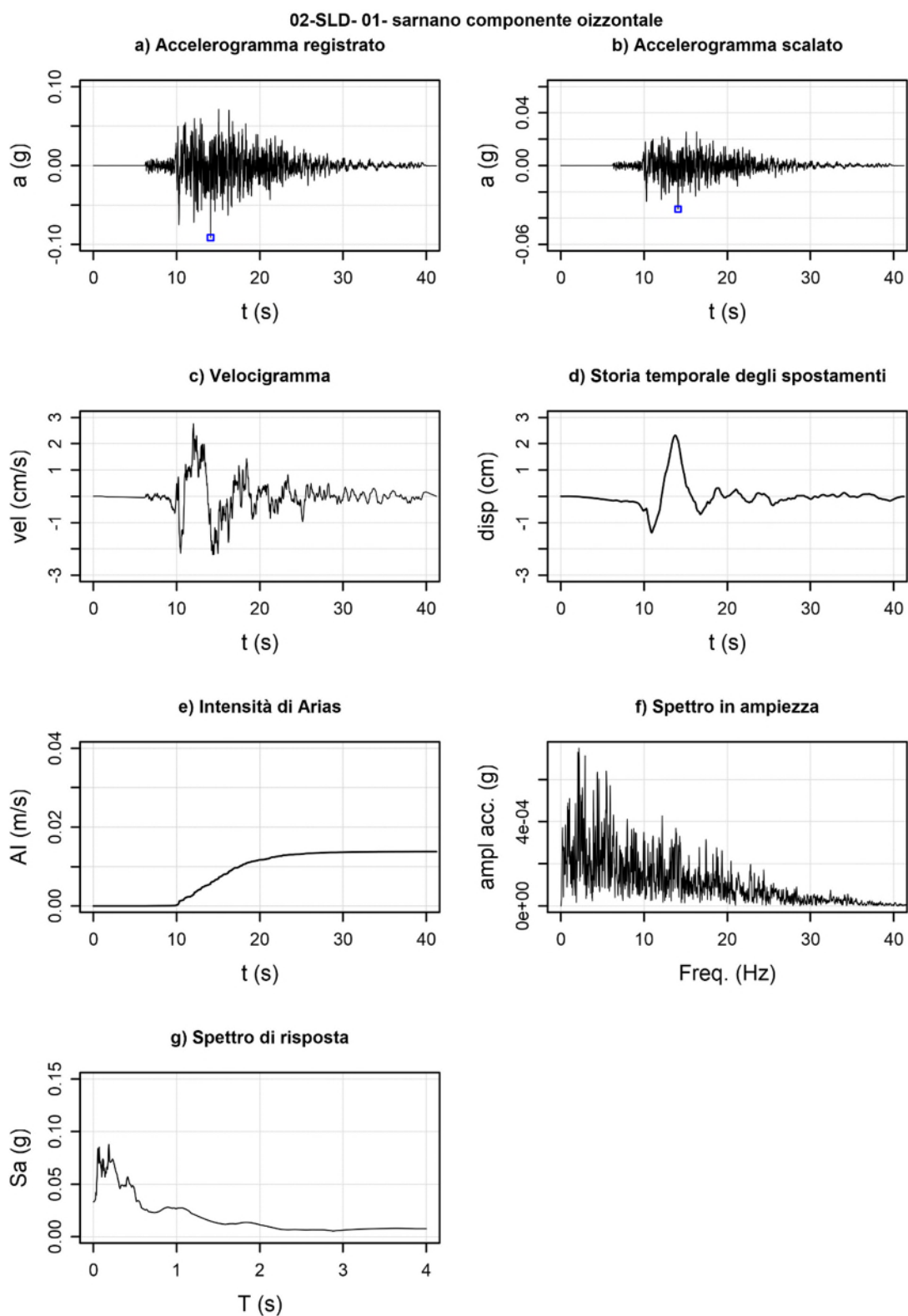


Figura 4-3 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #01 (componente orizzontale).

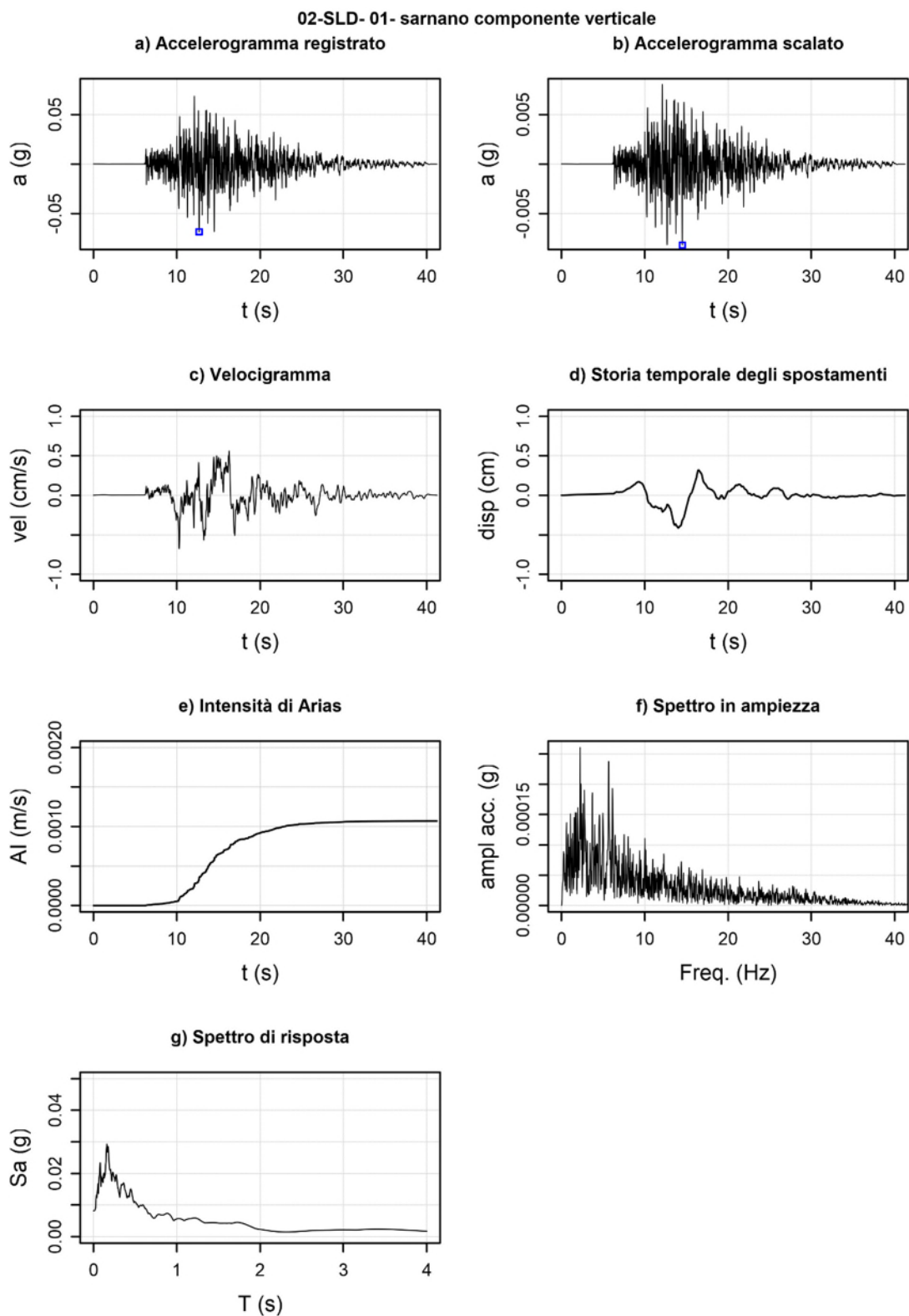


Figura 4-4 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #01 (componente verticale).



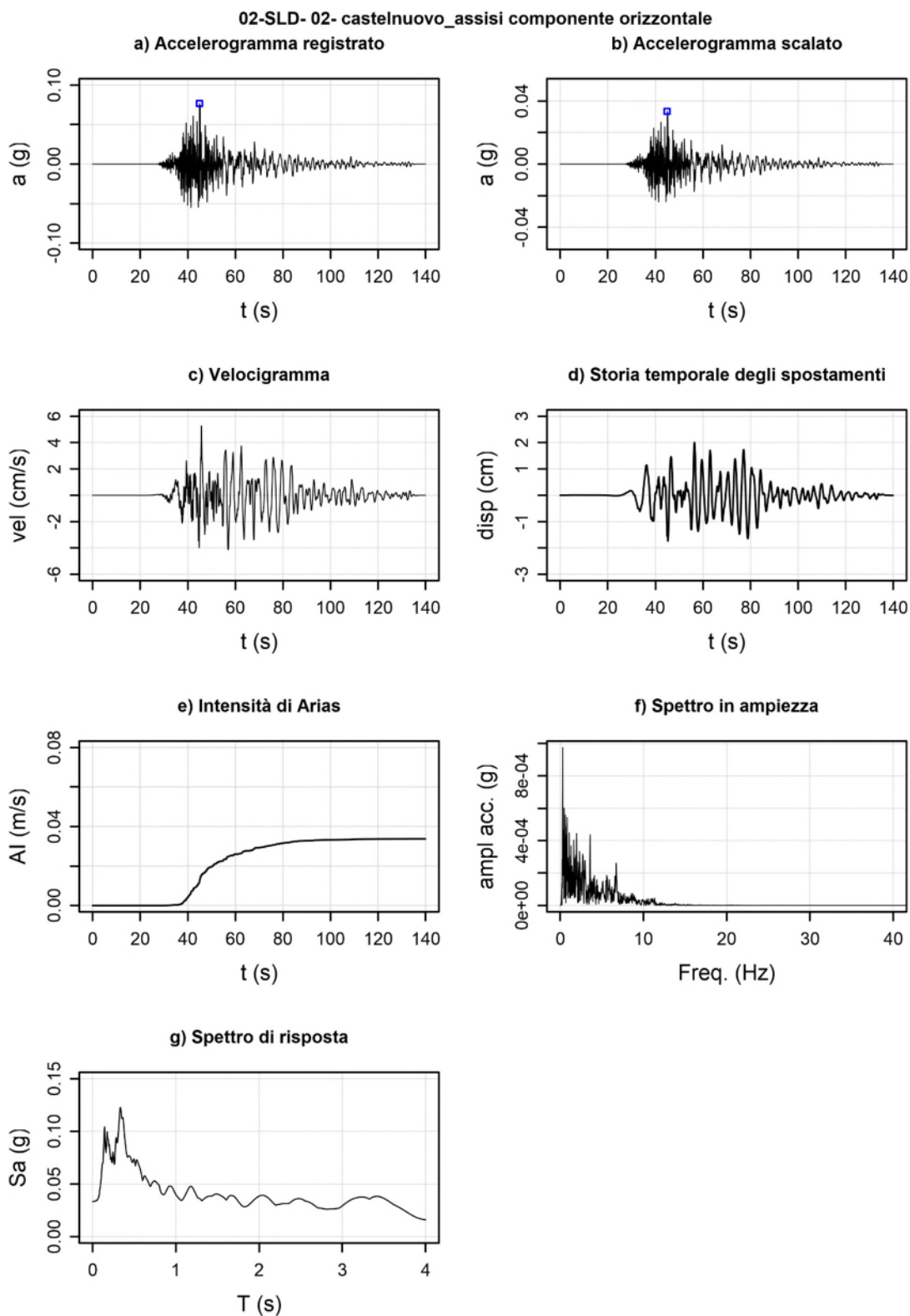


Figura 4-5 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #02 (componente orizzontale).

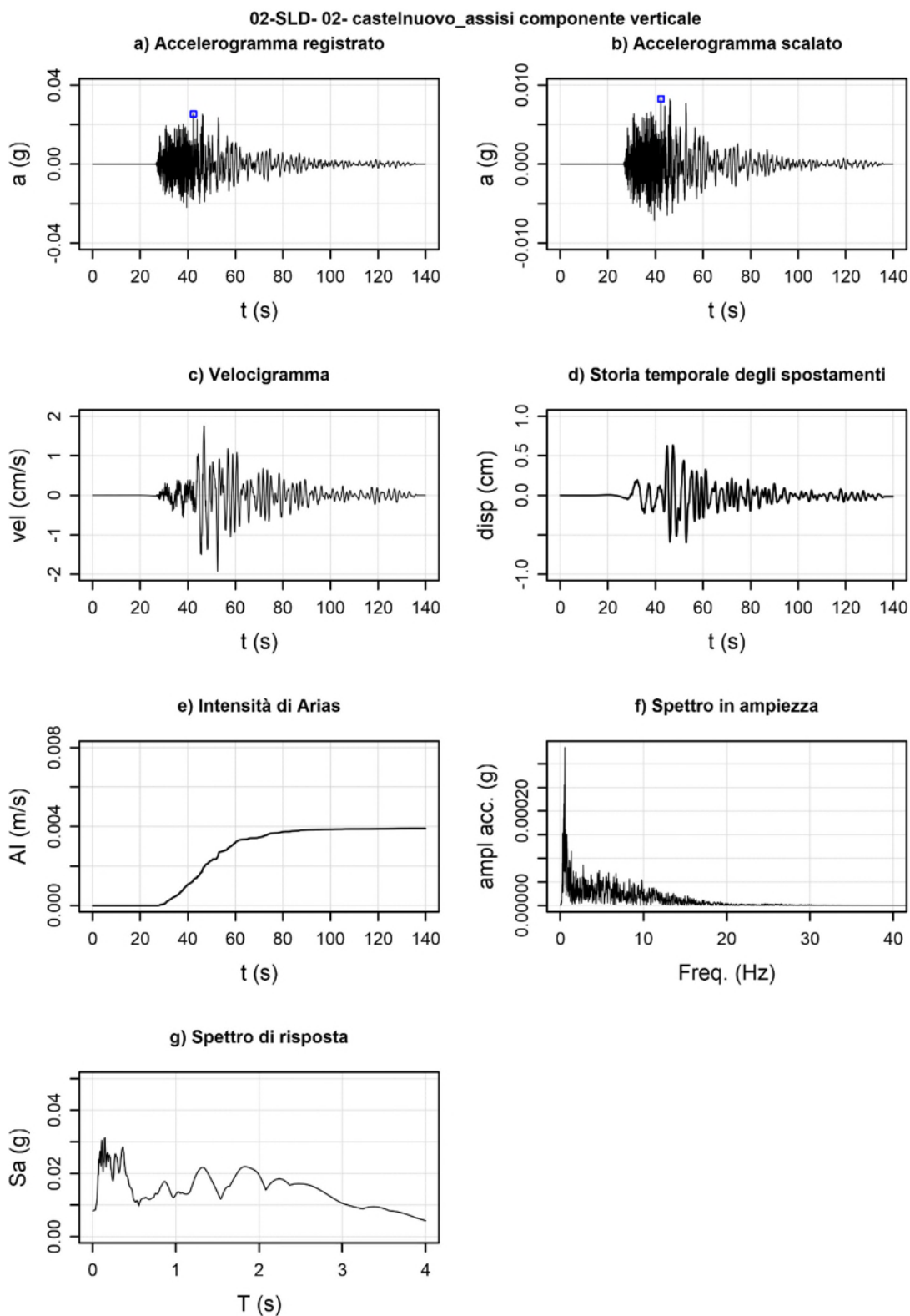


Figura 4-6 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #02 (componente verticale).

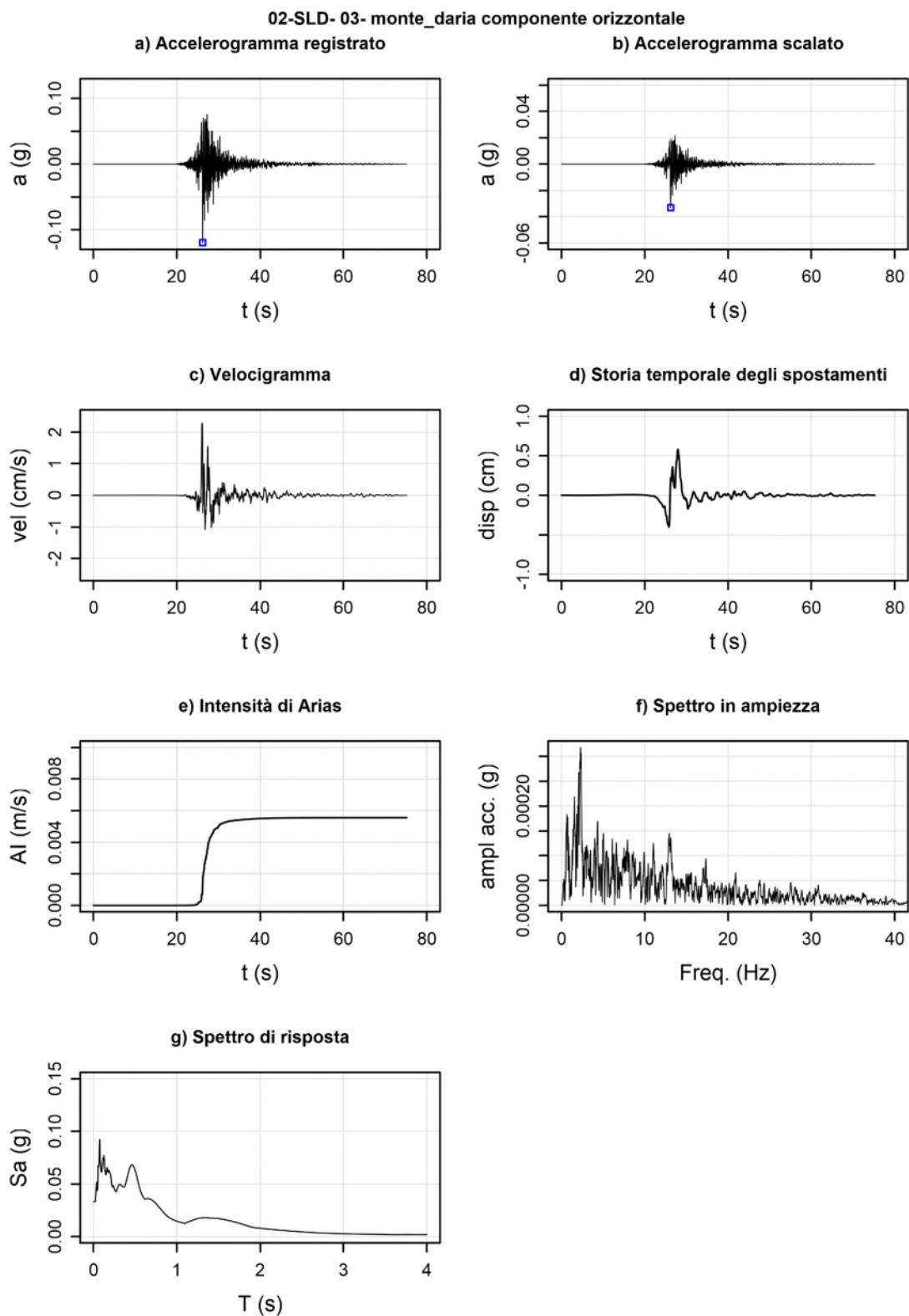


Figura 4-7 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #03 (componente orizzontale).



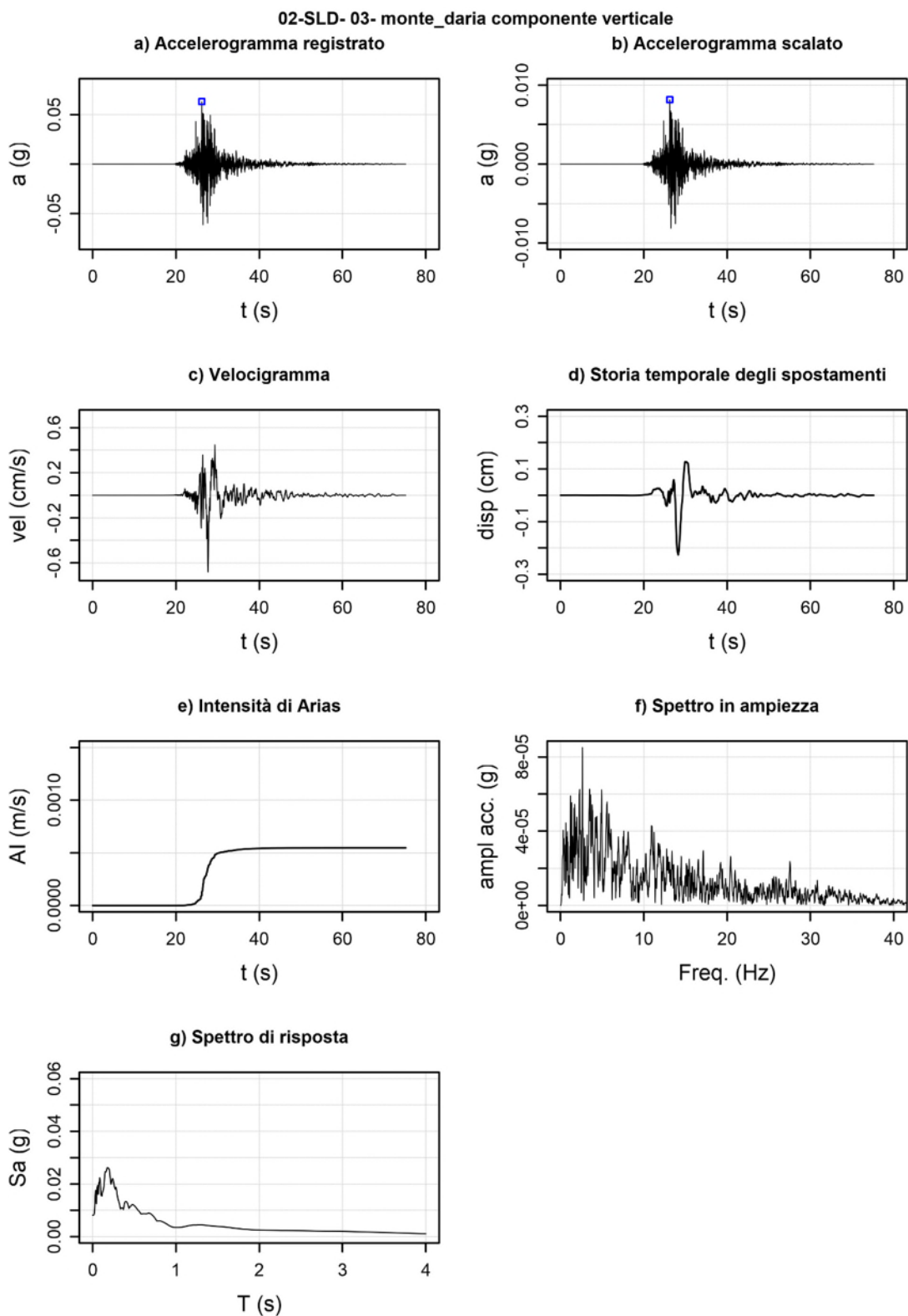


Figura 4-8 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #03 (componente verticale).

02-SLD- 04- treia componente orizzontale

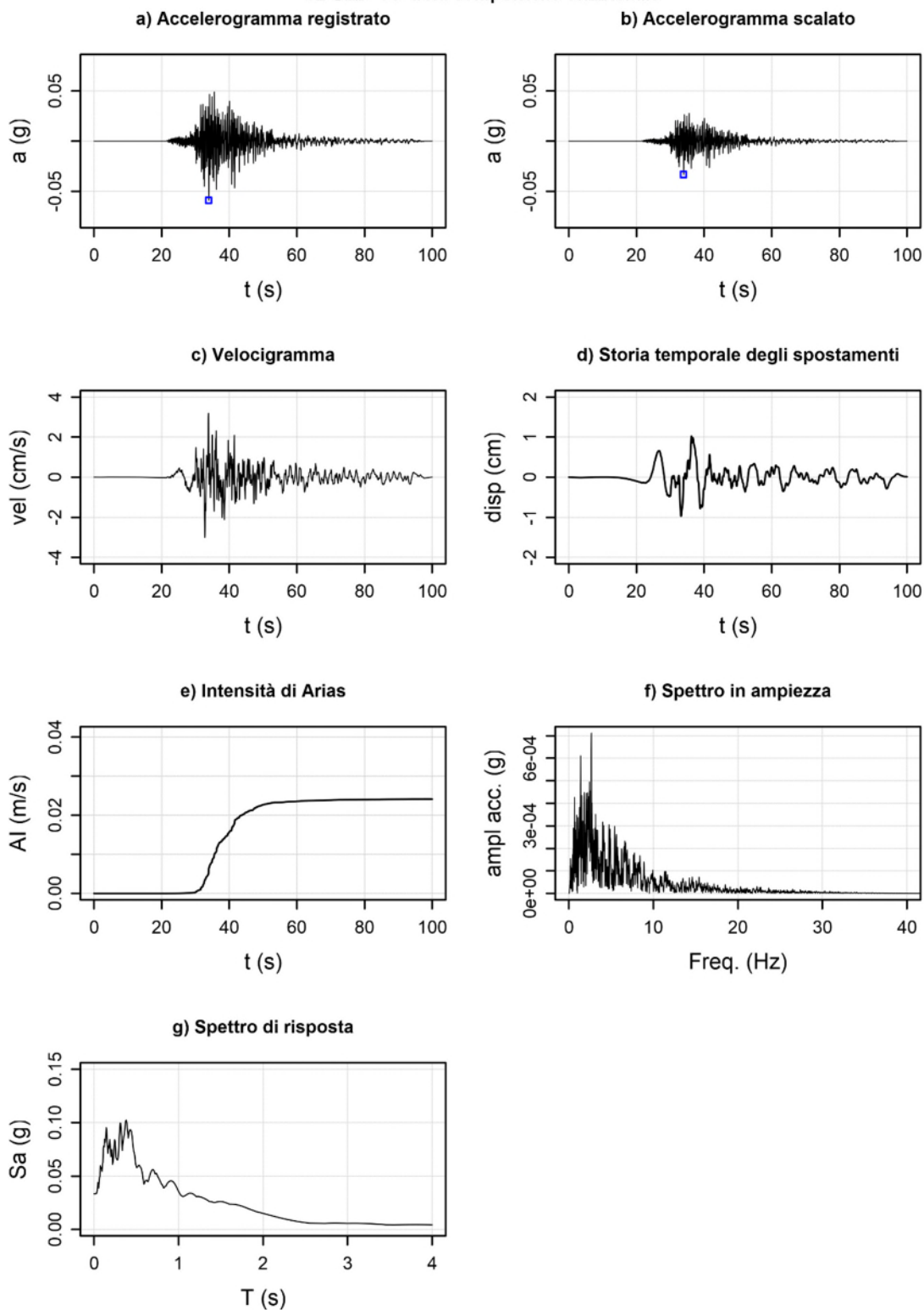


Figura 4-9 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #04 (componente orizzontale).

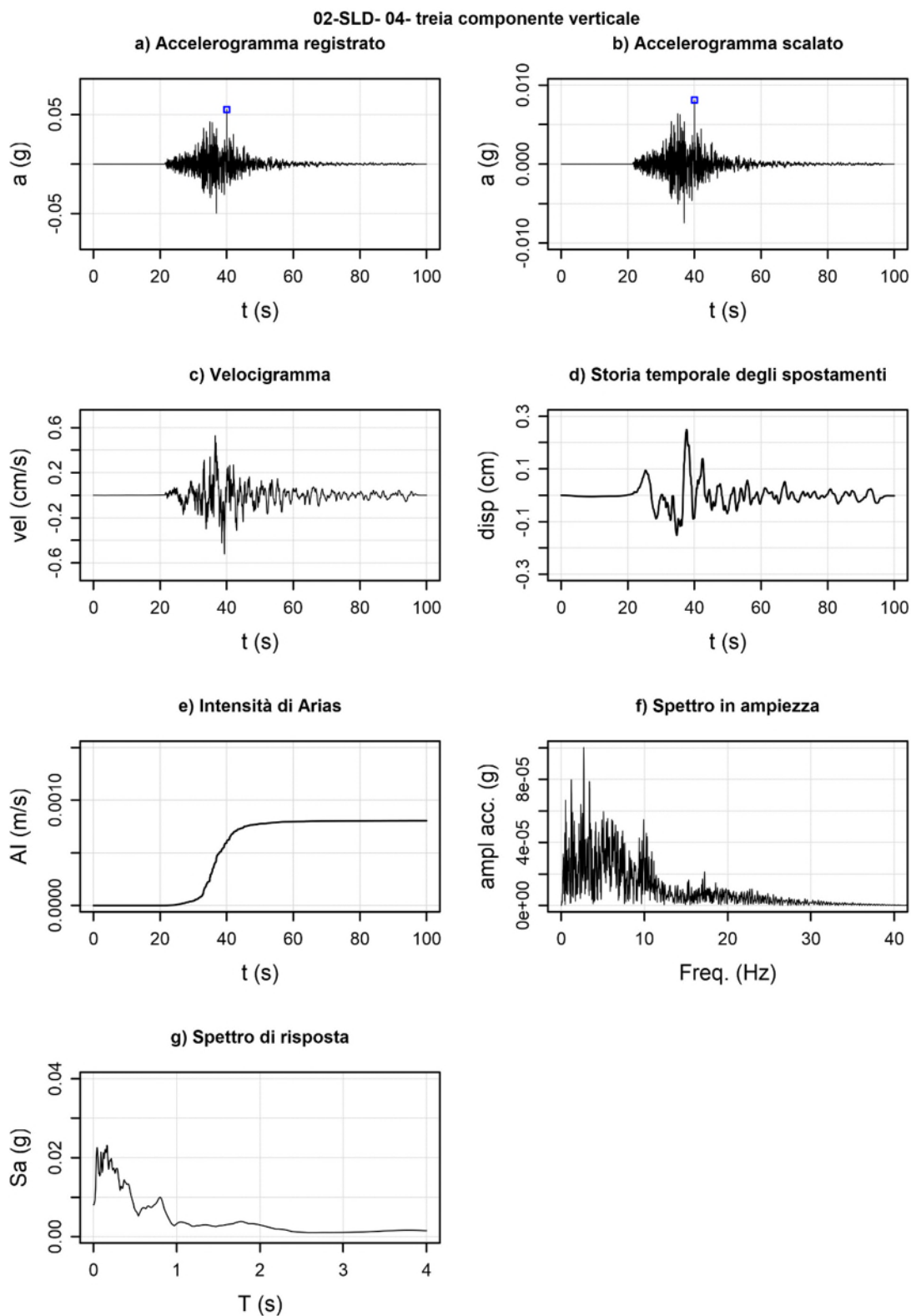


Figura 4-10 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #04 (componente verticale).

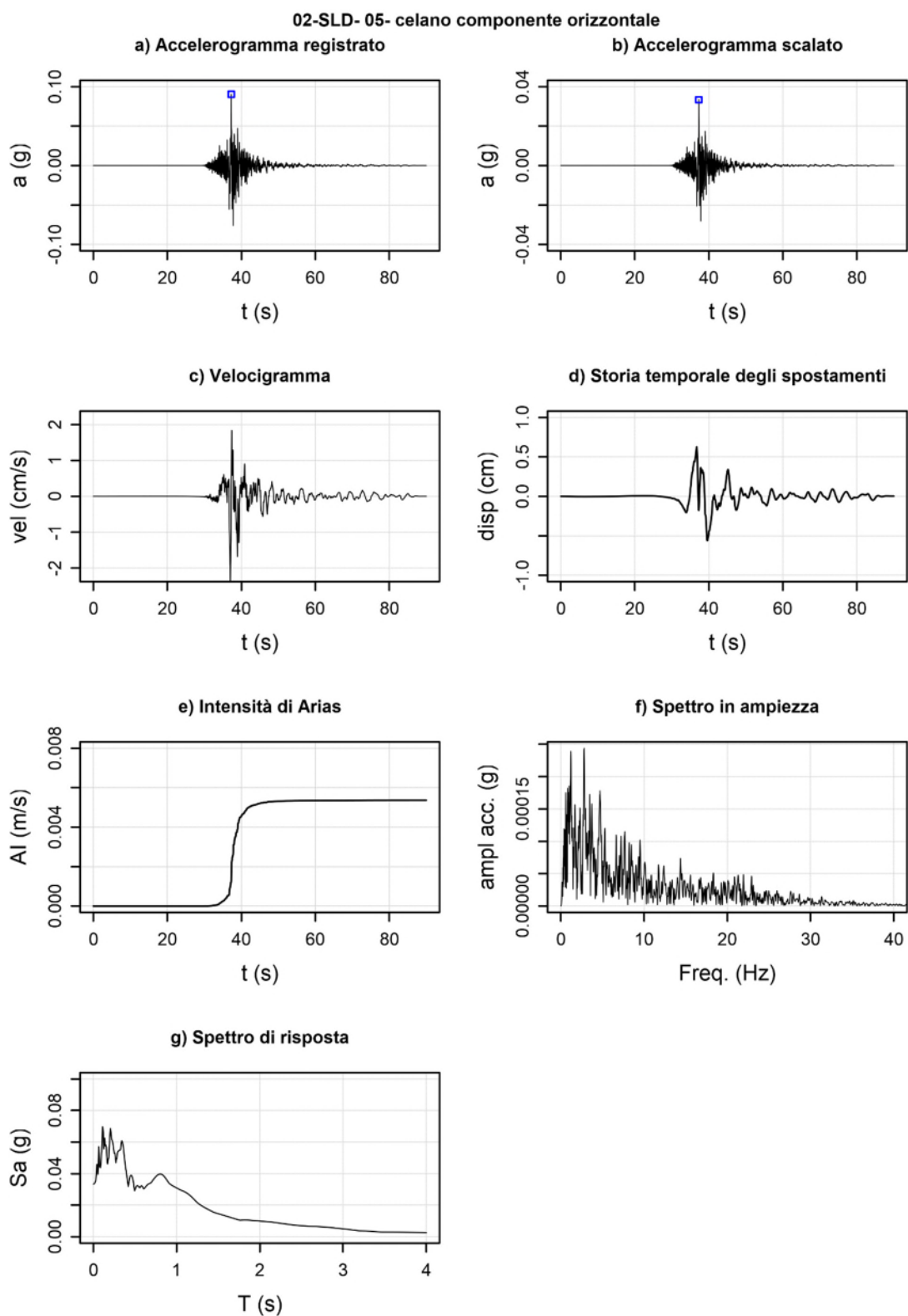


Figura 4-11 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #05 (componente orizzontale).



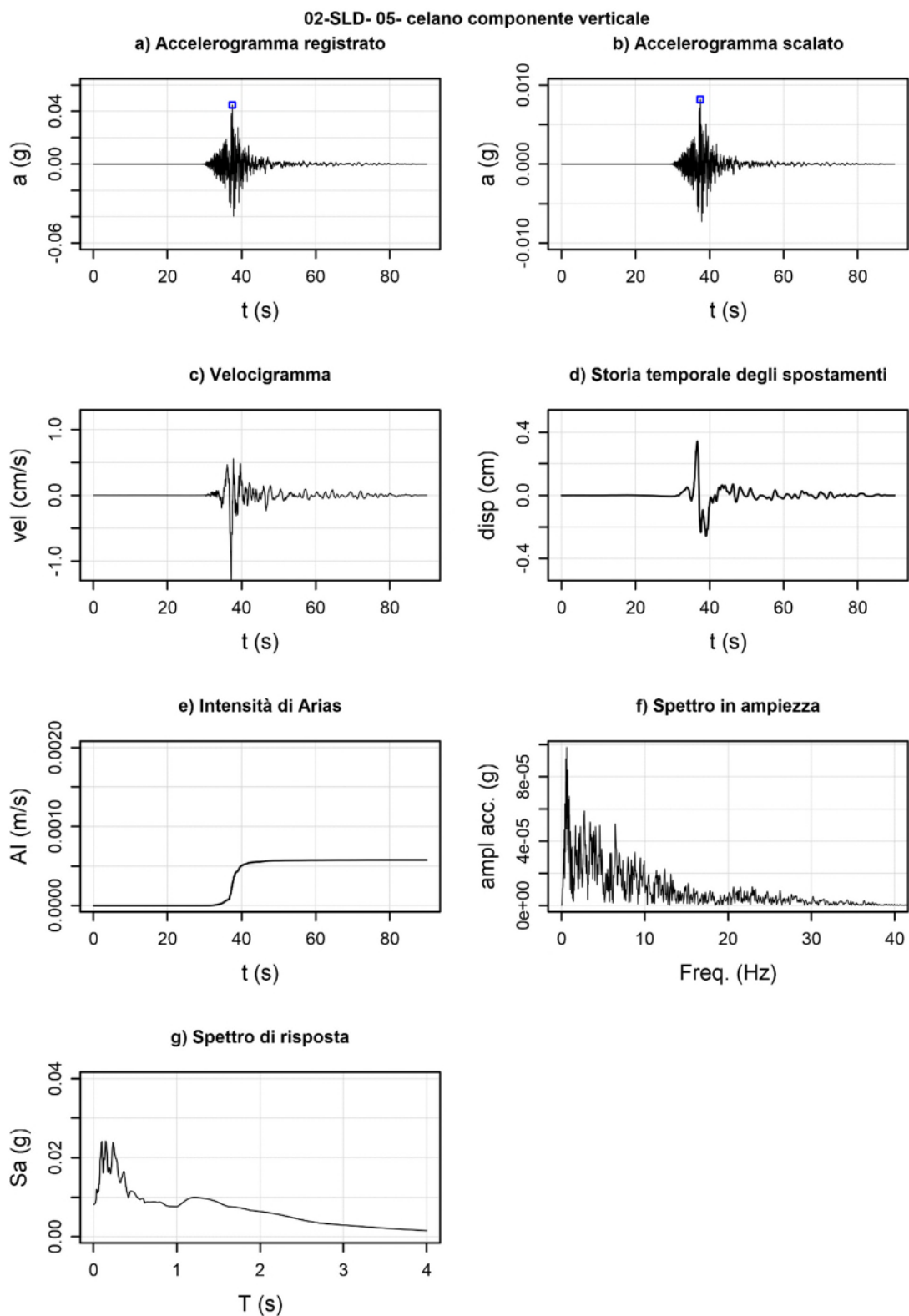


Figura 4-12 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #05 (componente verticale).

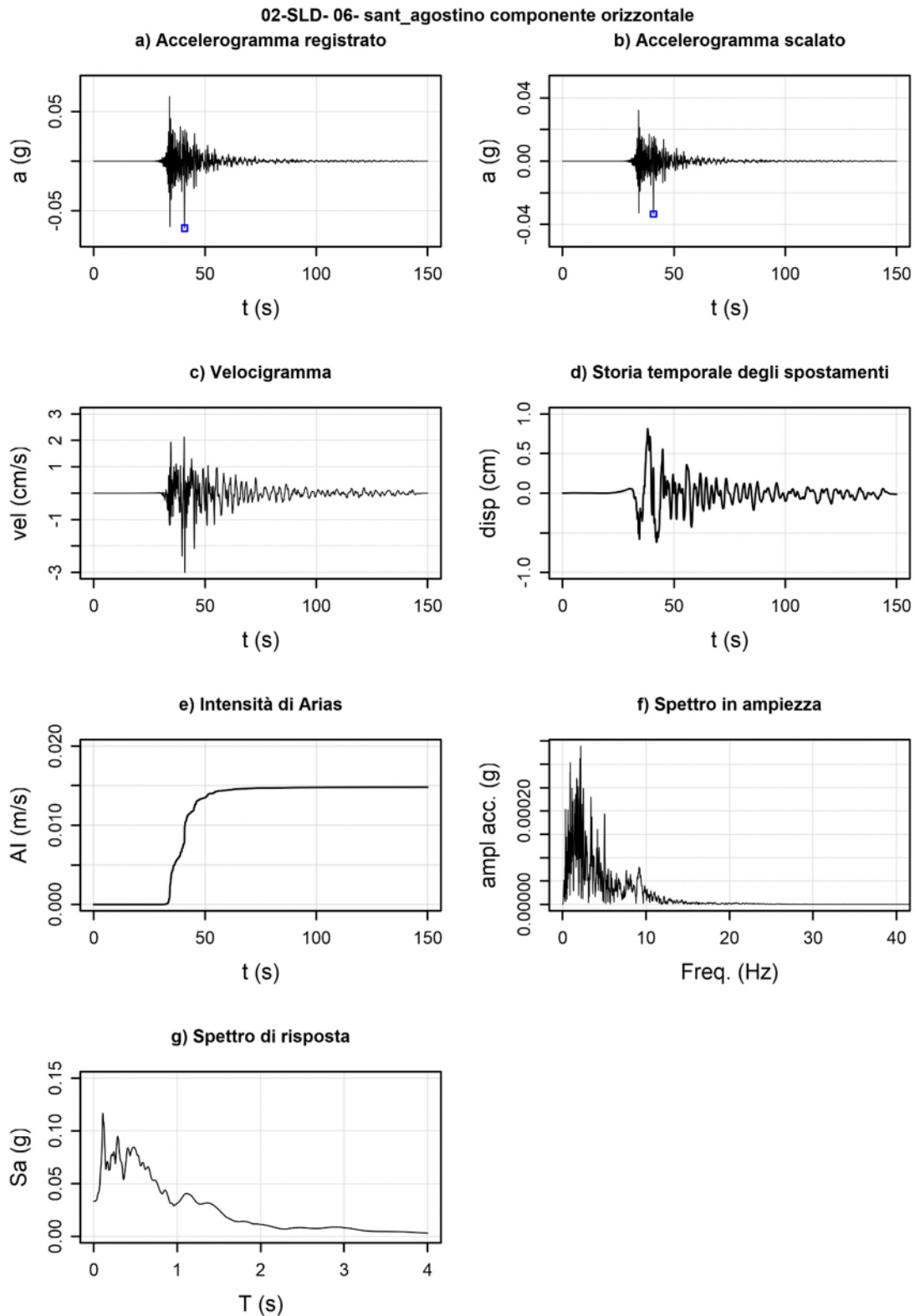


Figura 4-13 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #06 (componente orizzontale).

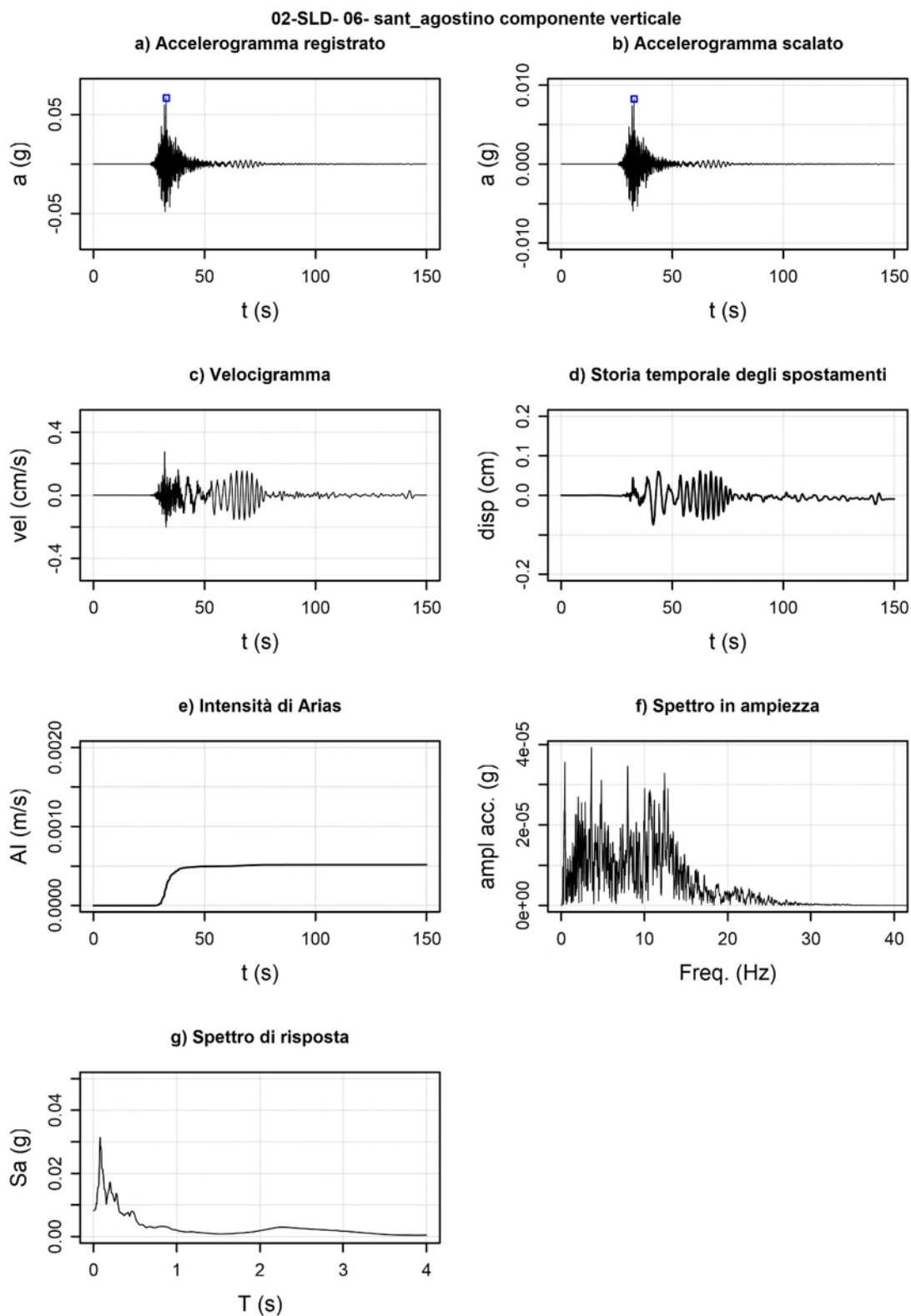


Figura 4-14 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #06 (componente verticale).

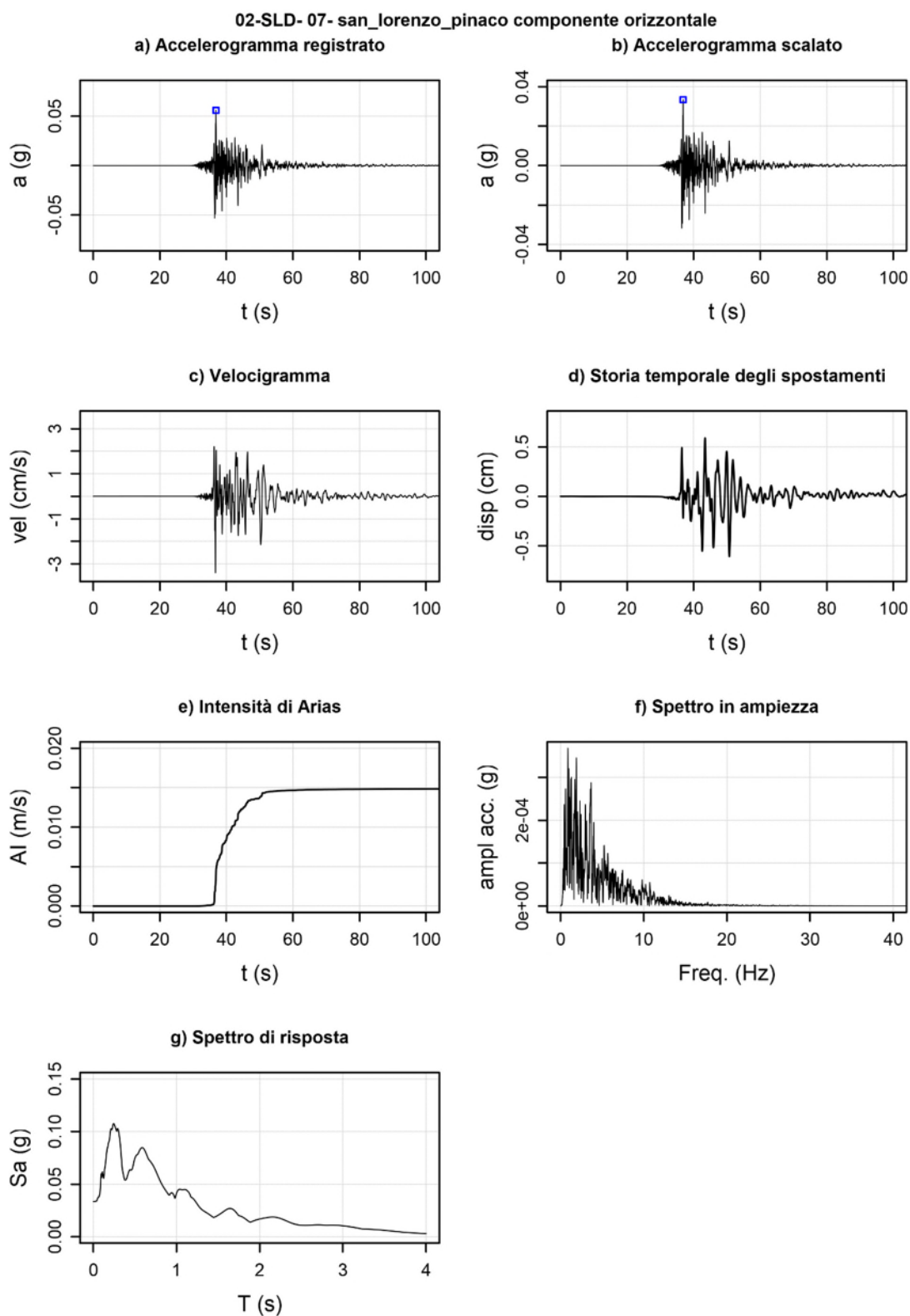


Figura 4-15 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #07 (componente orizzontale).



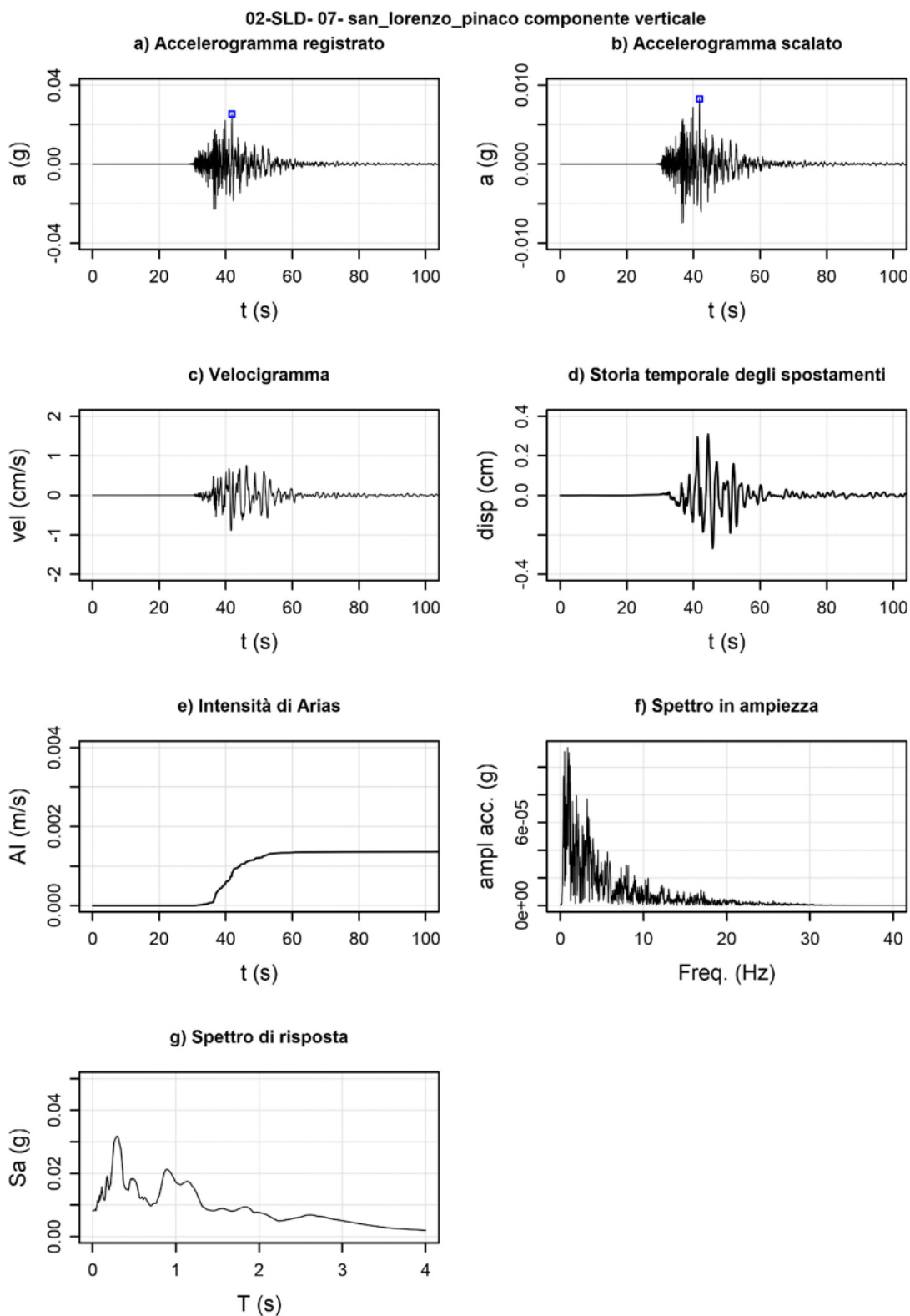


Figura 4-16 Accelerogramma selezionato per la verifica SLD #07 (componente verticale).

Si riporta in Figura 4-17 per ciascun input sismico selezionato l'intensità di Arias definita come:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^\infty [a(t)]^2 dt \quad (4.3)$$

con: a(t): accelerazione, g: accelerazione di gravità.

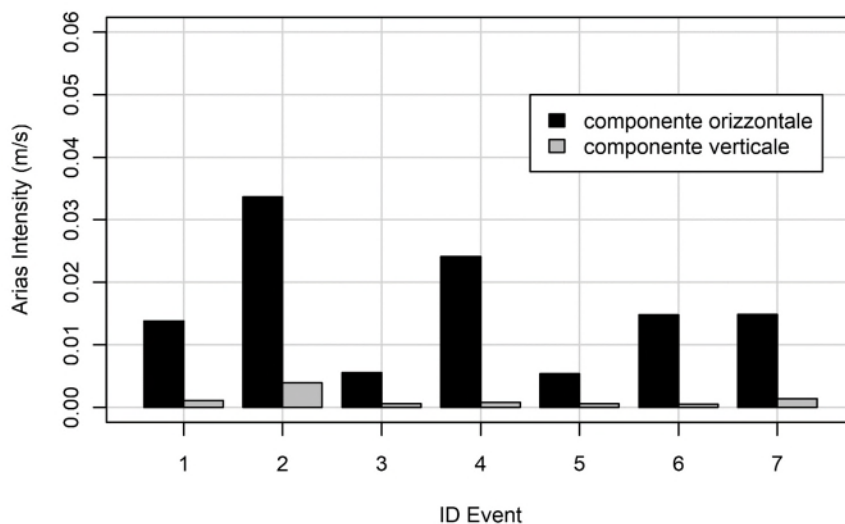


Figura 4-17 Intensità di Arias per ciascun input sismico selezionato per la verifica SLD.

#### 4.4.2 Definizione dell'azione sismica per lo Stato Limite di Collasso (SLC)

In congruenza con la procedura sopra illustrata, per lo stato limite di collasso (SLC) sono stati selezionati gli accelerogrammi elencati in Tabella 4-8 insieme ai parametri descrittivi più significativi tra cui l'accelerazione massima attesa al sito in direzione orizzontale e verticale ( $PGA_o$ ,  $PGA_v$ ) ed i fattori di scala adottati in direzione orizzontale e verticale ( $SF_o$ ,  $SF_v$ ).

Tabella 4-8 Accelerogrammi selezionati per la verifica dinamica allo Stato Limite di Collasso (SLC).

ID	Nome evento	ID evento	C	Data	Magnitudo Ml	$PGA_o$ (m/s <sup>2</sup> )	$SF_o$	$PGA_v$ (m/s <sup>2</sup> )	$SF_v$
01	Italia centrale - Amatrice	IT.CSA.00.HG.EMSC-20161030_0000029	E	30/10/2016	6.1	0.75	1.21	0.25	1.50
02	Italia centrale - Norcia - La Castellina_E	IT.NOR.00.HG.EMSC-20161026_0000095	E	26/10/2016	5.9	2.11	0.43	1.03	0.36
03	Italia centrale - Norcia - La Castellina_N	IT.NOR.00.HG.EMSC-20161026_0000095	N	26/10/2016	5.9	1.18	0.77	1.03	0.36
04	Italia centrale - Mascioni - Campotosto_E	IT.MSC.00.HG.EMSC-20161030_0000029	E	30/10/2016	6.1	0.92	0.99	0.49	0.76
05	Italia centrale - Norcia - La Castellina	IT.NOR.00.HG.EMSC-20161026_0000077	E	26/10/2016	5.4	1.57	0.58	0.98	0.38
06	Italia centrale - Mascioni - Campotosto_N	IT.MSC.00.HG.EMSC-20161030_0000029	N	30/10/2016	6.1	0.91	0.99	0.49	0.76
07	Italia centrale - Mascioni - Campotosto	IT.MSC.00.HG.EMSC-20160824_0000006	E	24/08/2016	6.0	1.04	0.87	0.72	0.52

Si riportano di seguito in Figura 4-18 gli accelerogrammi orizzontali spettro-compatibili selezionati con riferimento allo stato limite di collasso (SLC).

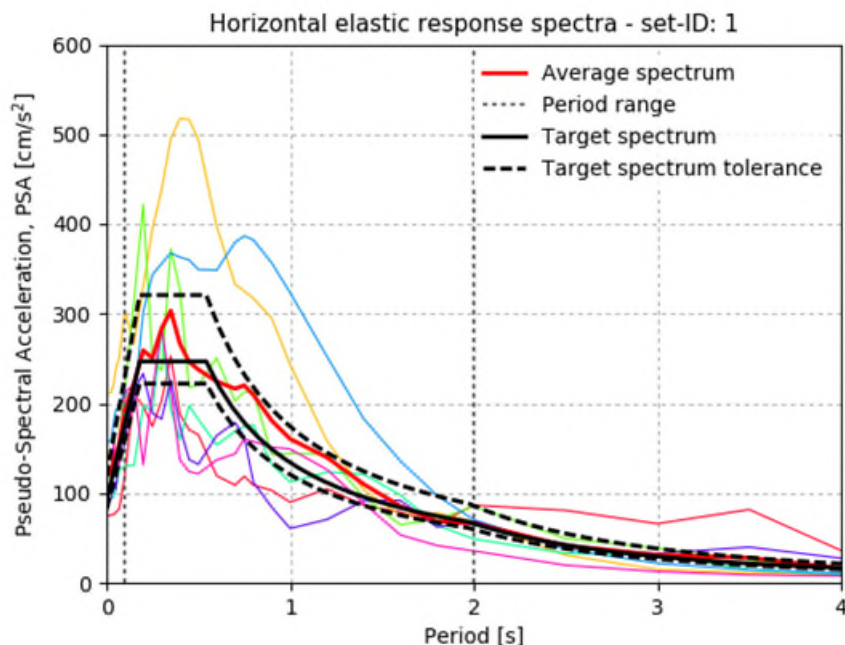


Figura 4-18 Diagramma di spettrocompatibilità per lo Stato Limite di collasso (SLC). Gli spettri degli accelerogrammi selezionati per la verifica sono evidenziati dai colori, spettro di progetto in nero (target spectrum), valori di ammissibilità per gli spettri in linea tratteggiata.

Ognuno dei velocigrammi è stato quindi corretto per la “baseline” in modo che la storia temporale dello spostamento ottenuta per doppia integrazione dell’accelerogramma attinga un valore nullo al termine della registrazione.

Nelle figure seguenti si propongono gli accelerogrammi selezionati e le loro rispettive componenti verticali. In particolare, in ogni figura si mostra: a) accelerogramma naturale registrato, così come fornito dal database sismico, b) accelerogramma scalato per la PGA stimata al sito, c) velocigramma, d) storia temporale dello spostamento, e) Intensità di Arias, f) spettro in ampiezza, g) spettro di risposta.

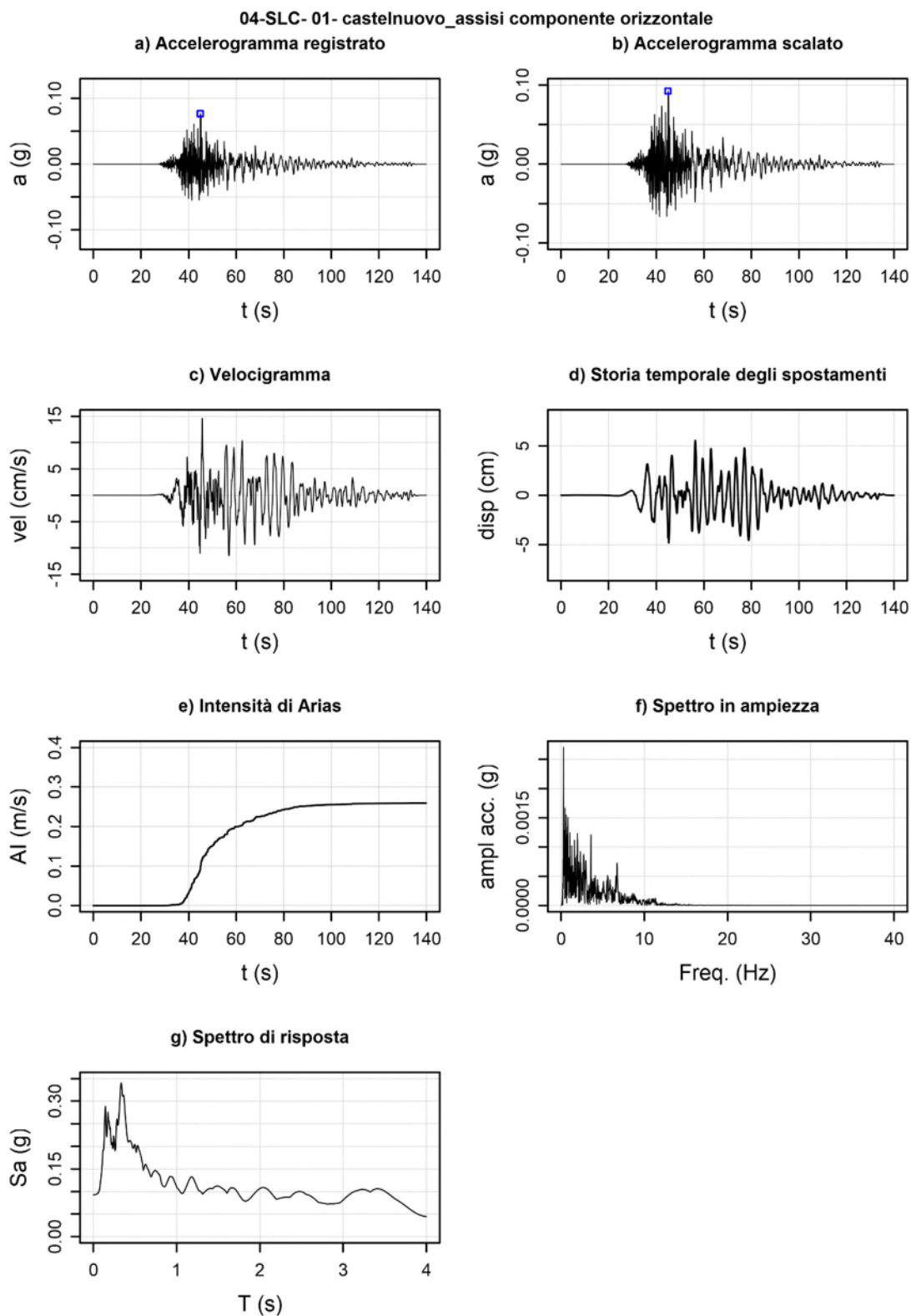


Figura 4-19 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #01(componente orizzontale).



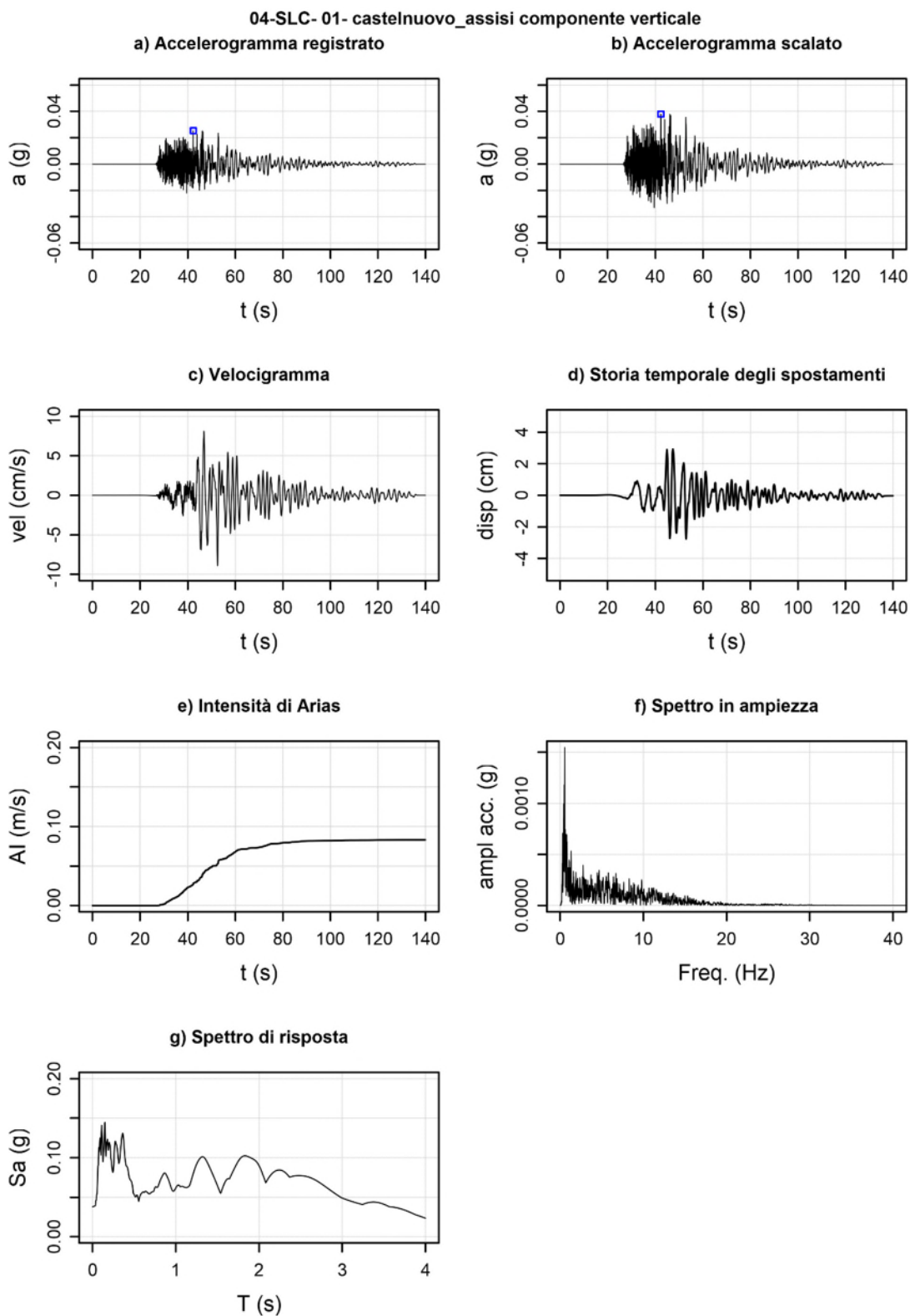


Figura 4-20 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #01 (componente verticale).

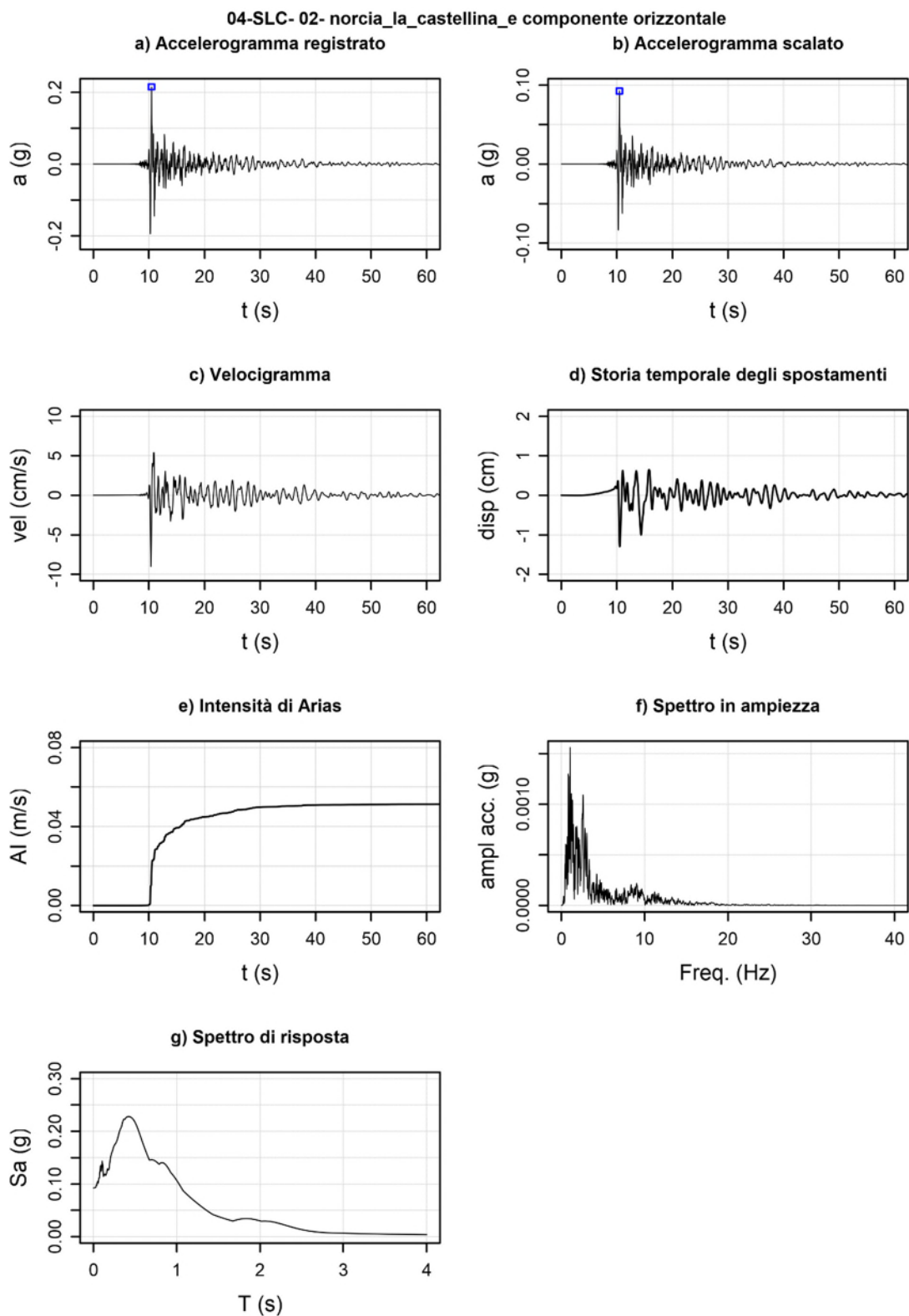


Figura 4-21 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #02 (componente orizzontale).

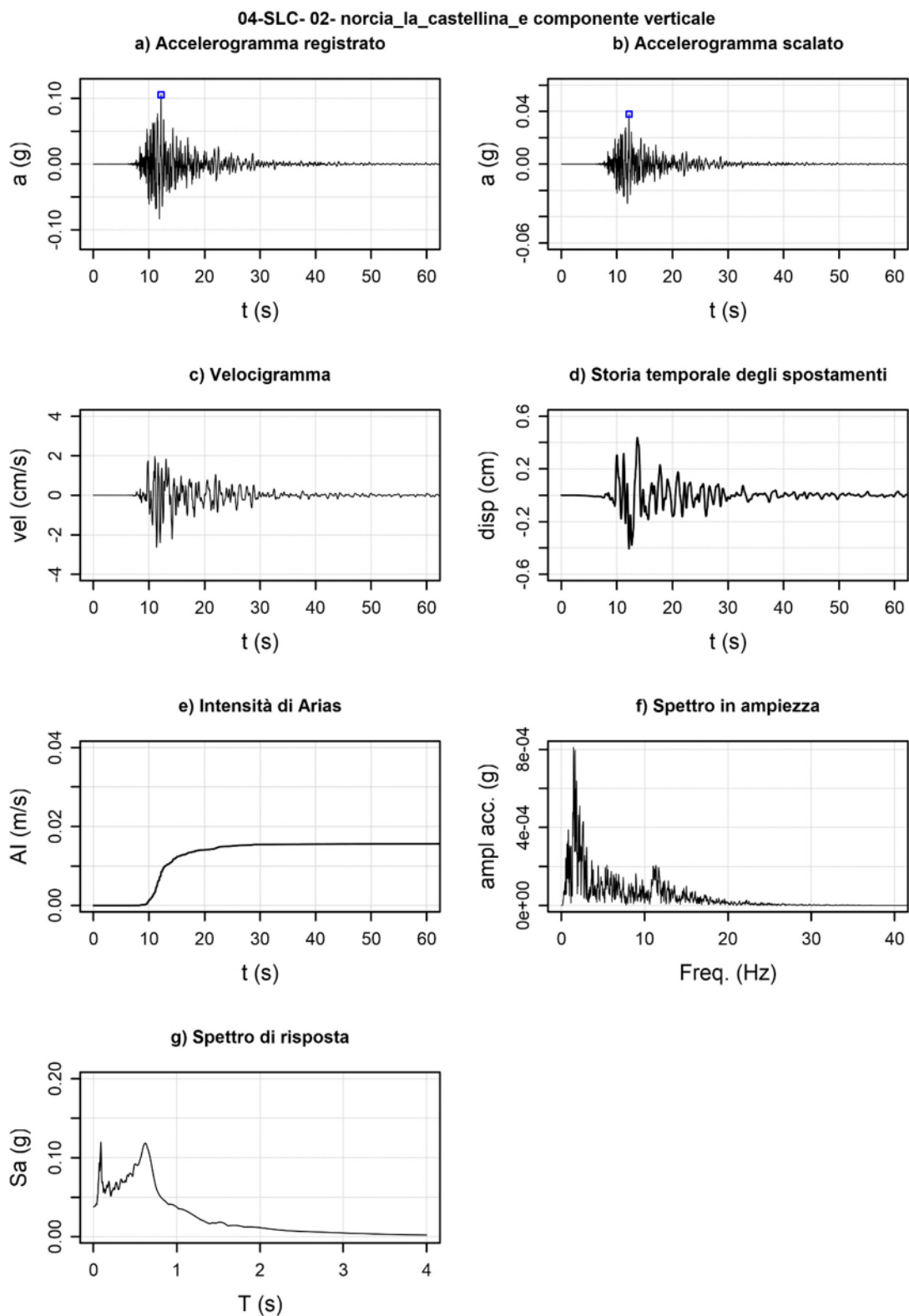


Figura 4-22 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #02 (componente verticale).

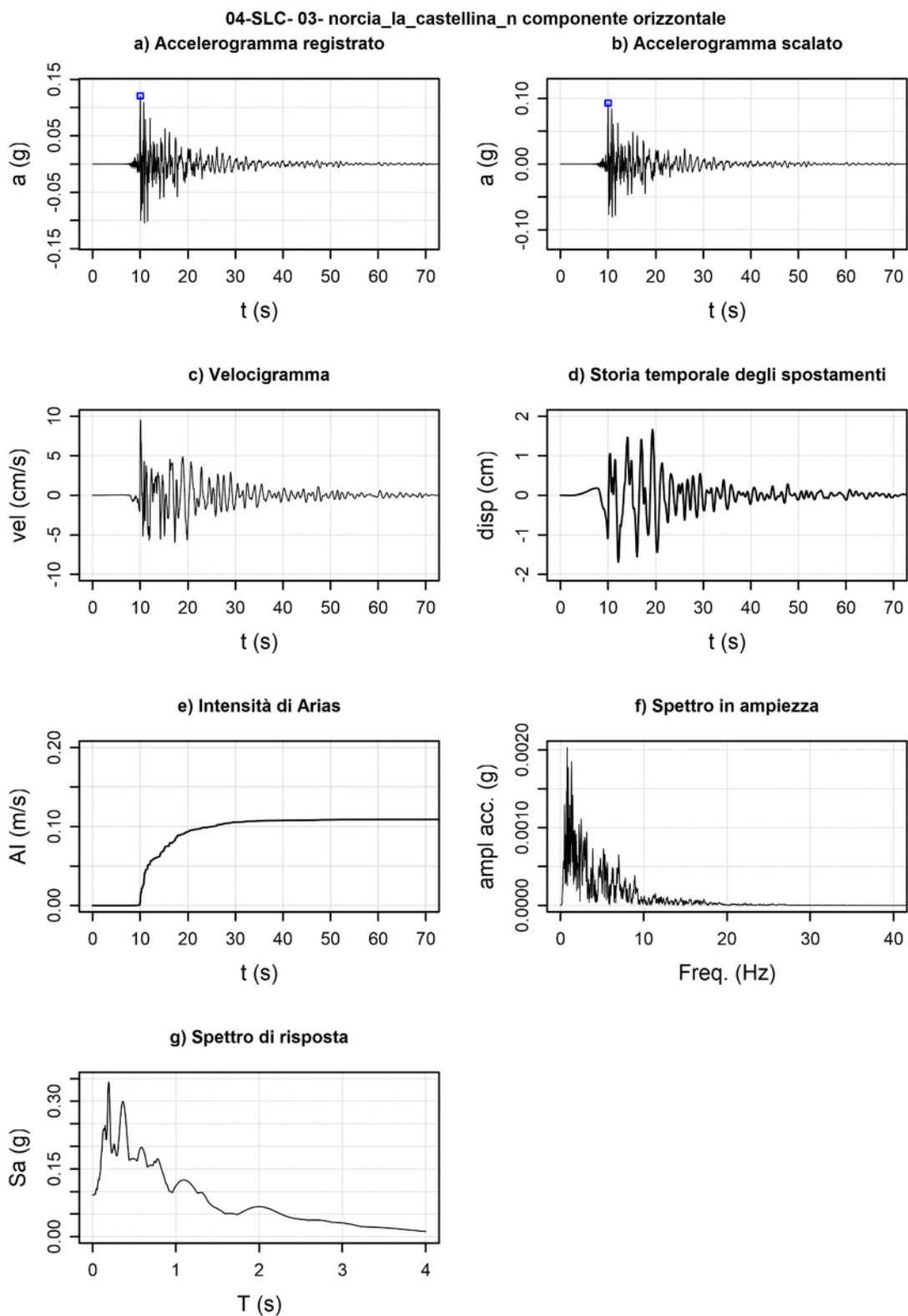


Figura 4-23 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #03 (componente orizzontale).



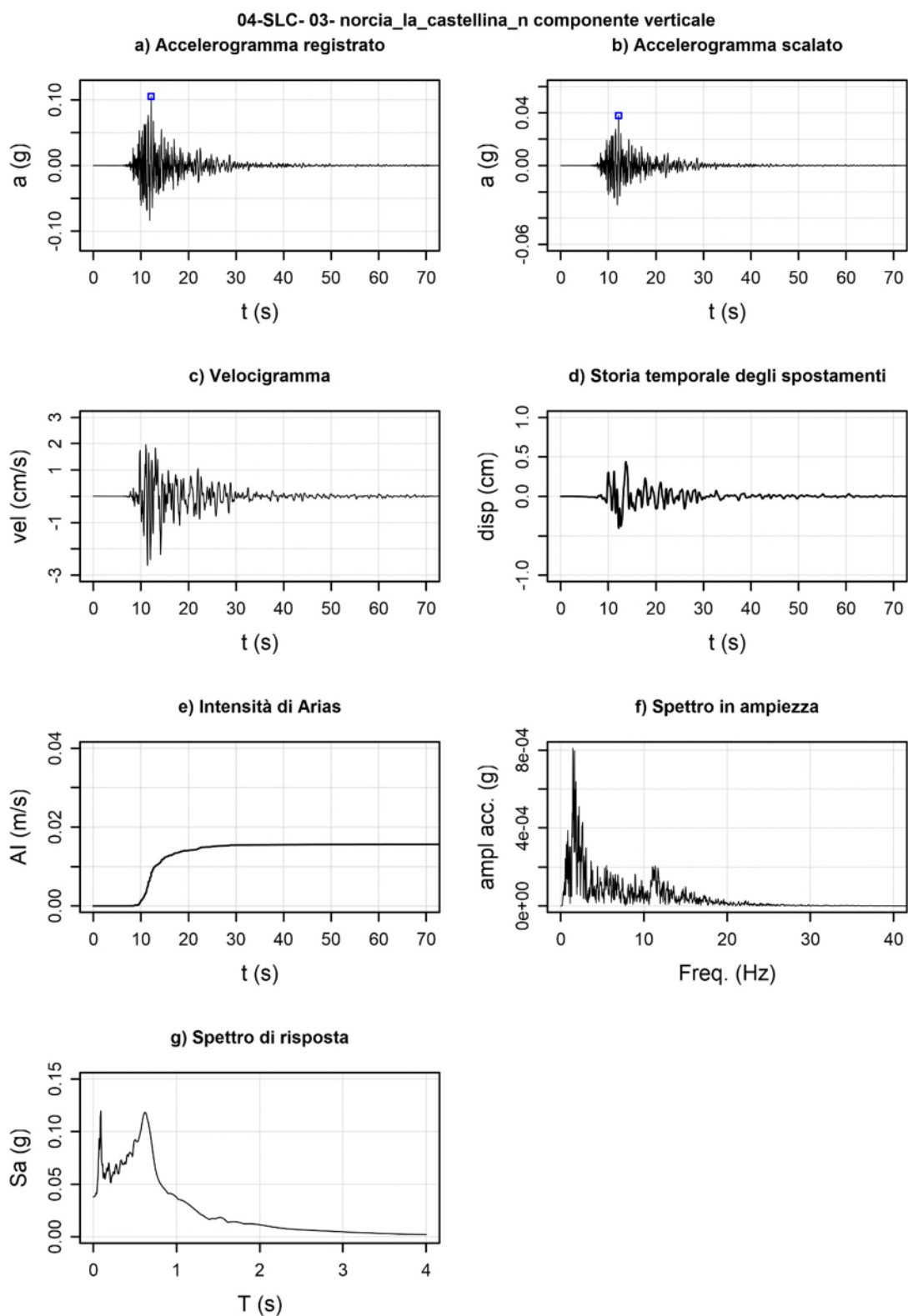


Figura 4-24 selezionato per la verifica SLC #03 (componente verticale).

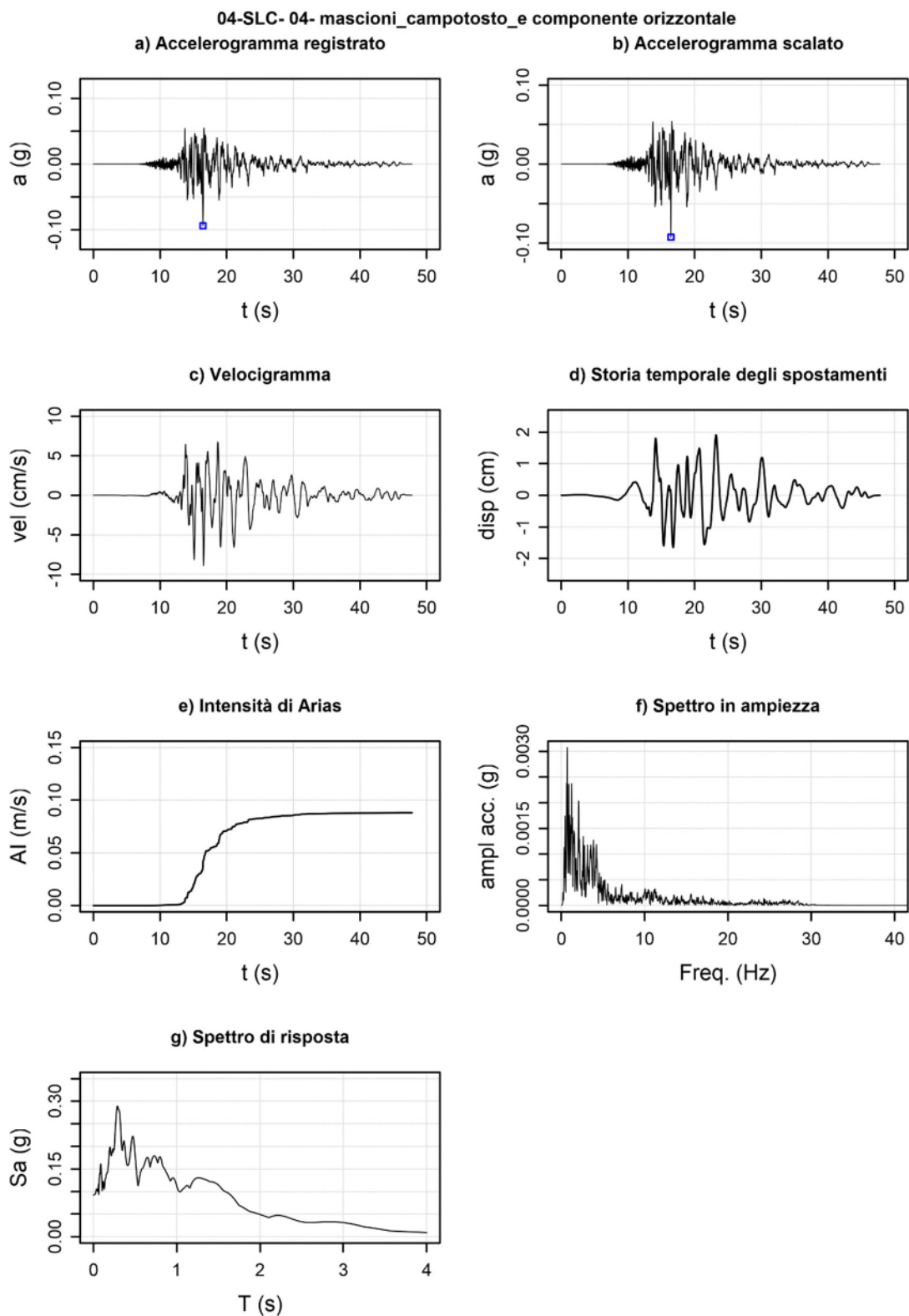


Figura 4-25 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #04 (componente orizzontale).

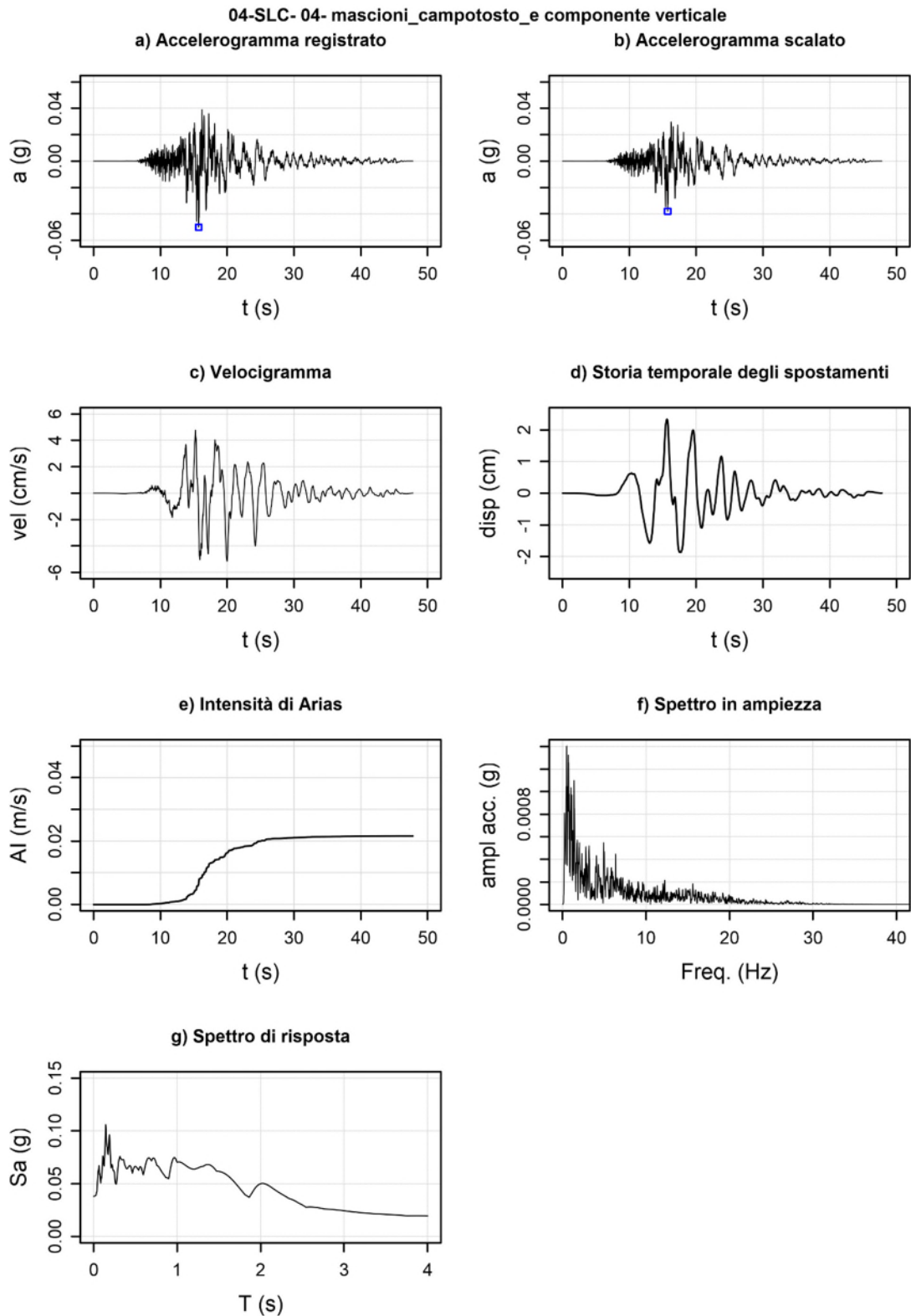


Figura 4-26 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #04 (componente verticale).

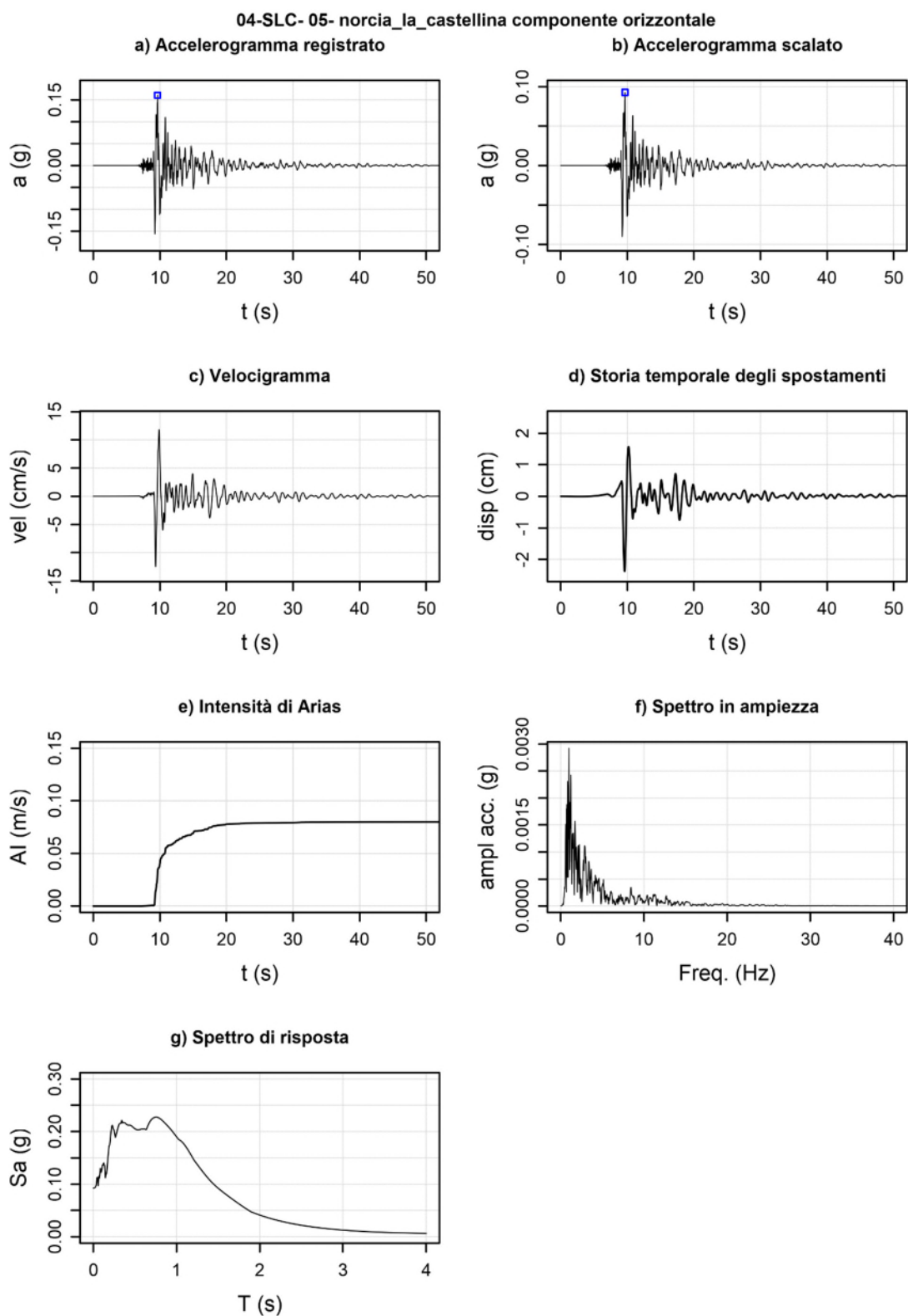


Figura 4-27 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #05 (componente orizzontale).



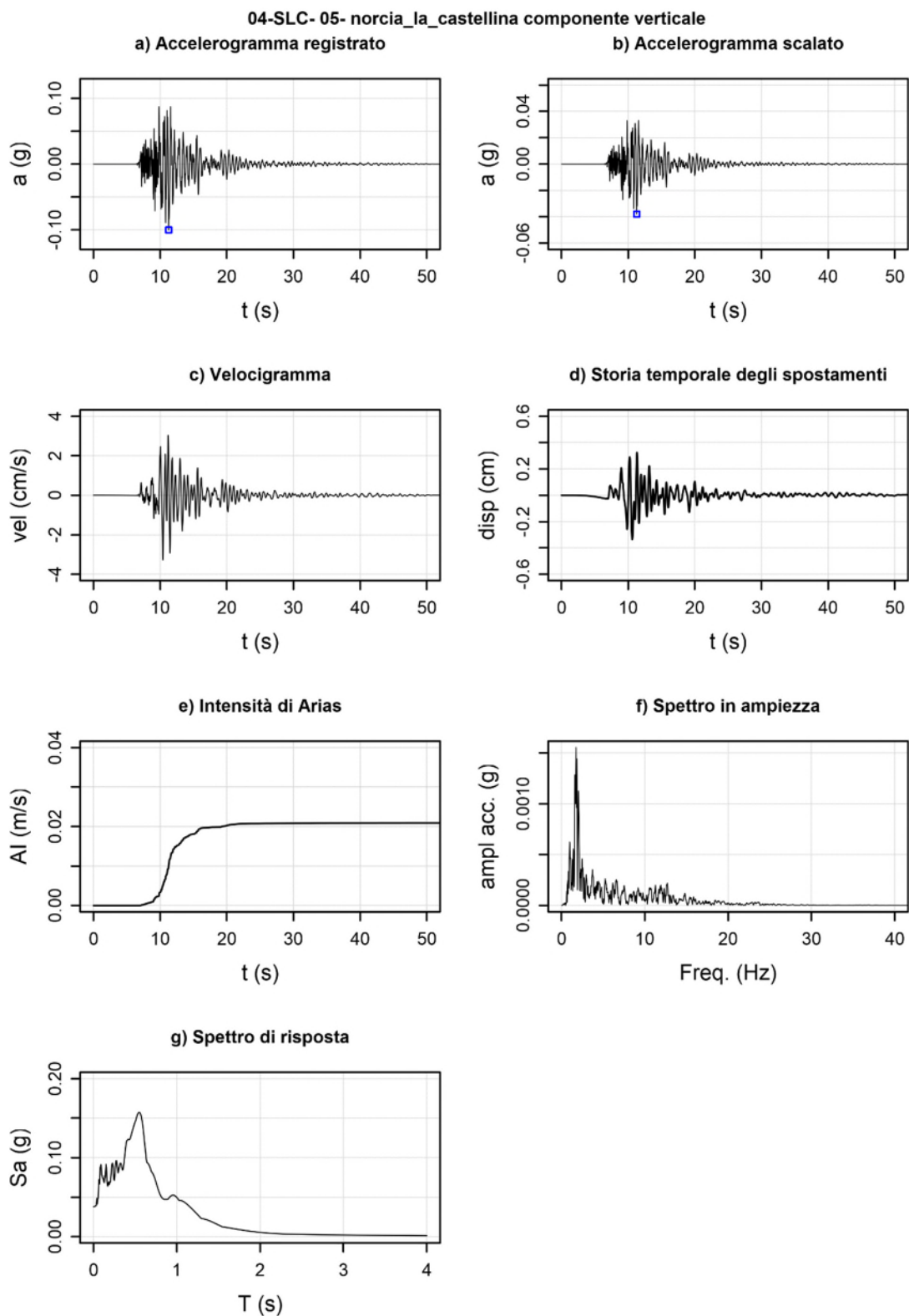


Figura 4-28 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #05 (componente verticale).

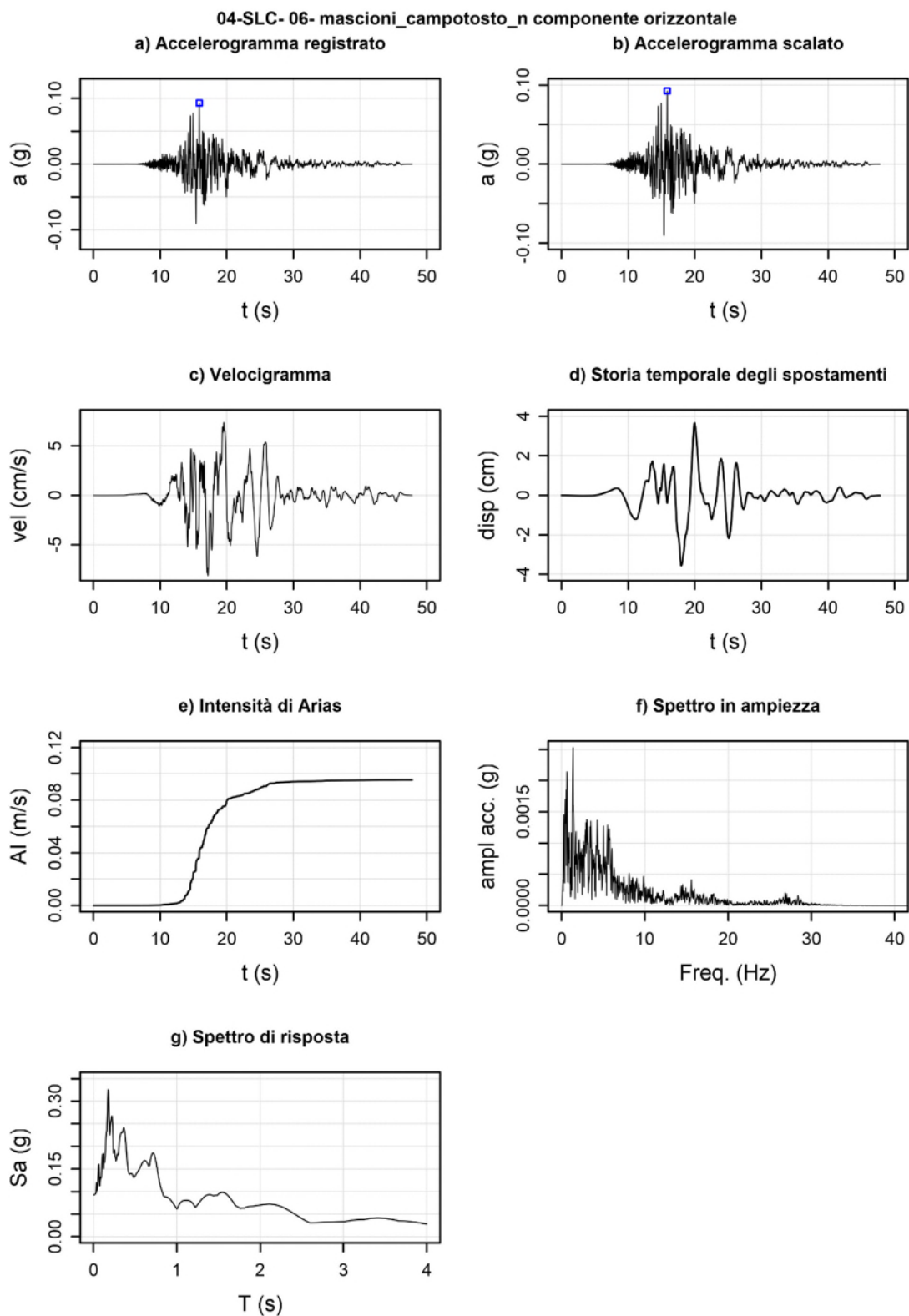


Figura 4-29 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #06 (componente orizzontale).

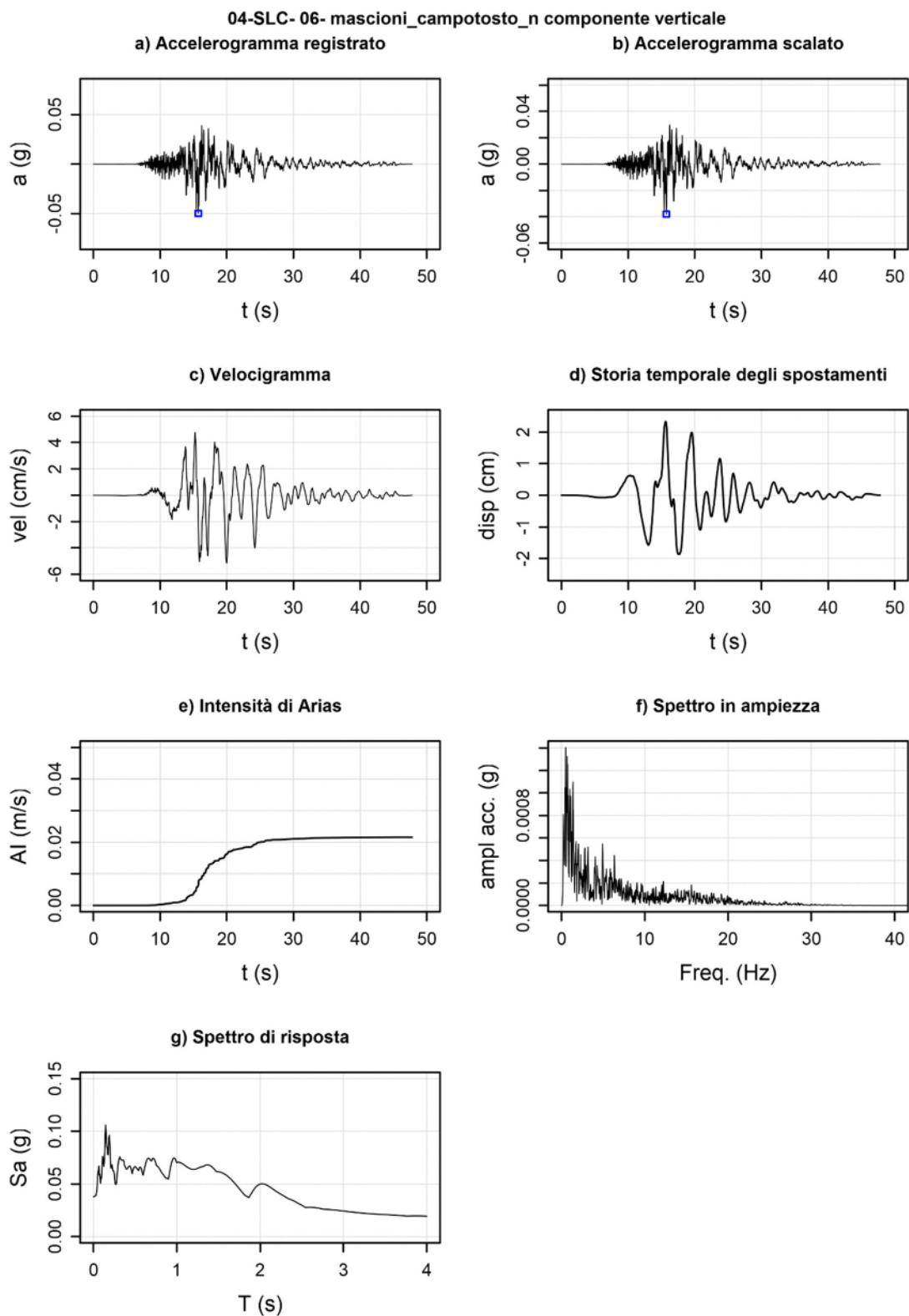


Figura 4-30 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #06 (componente verticale).

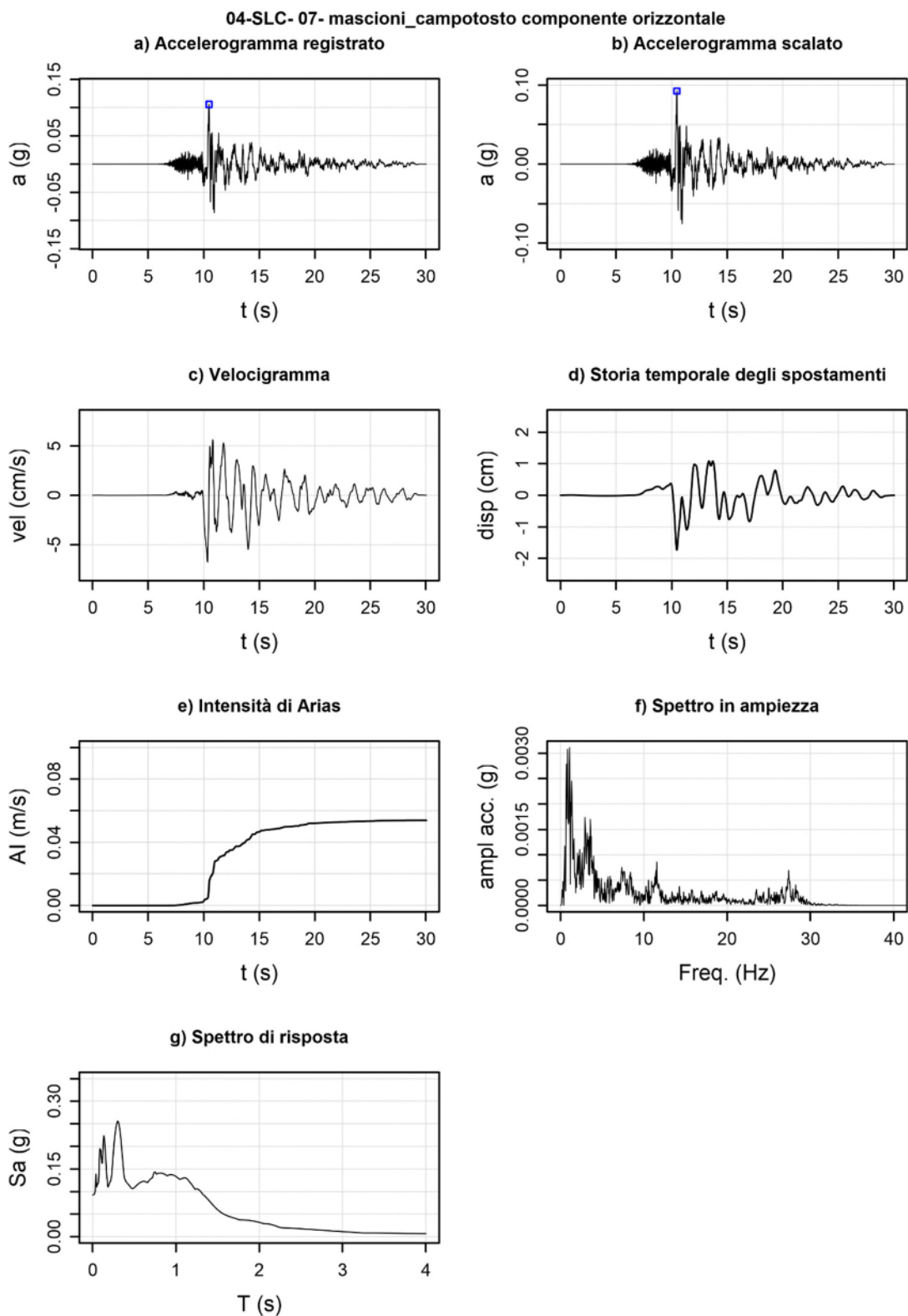


Figura 4-31 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #07 (componente orizzontale).



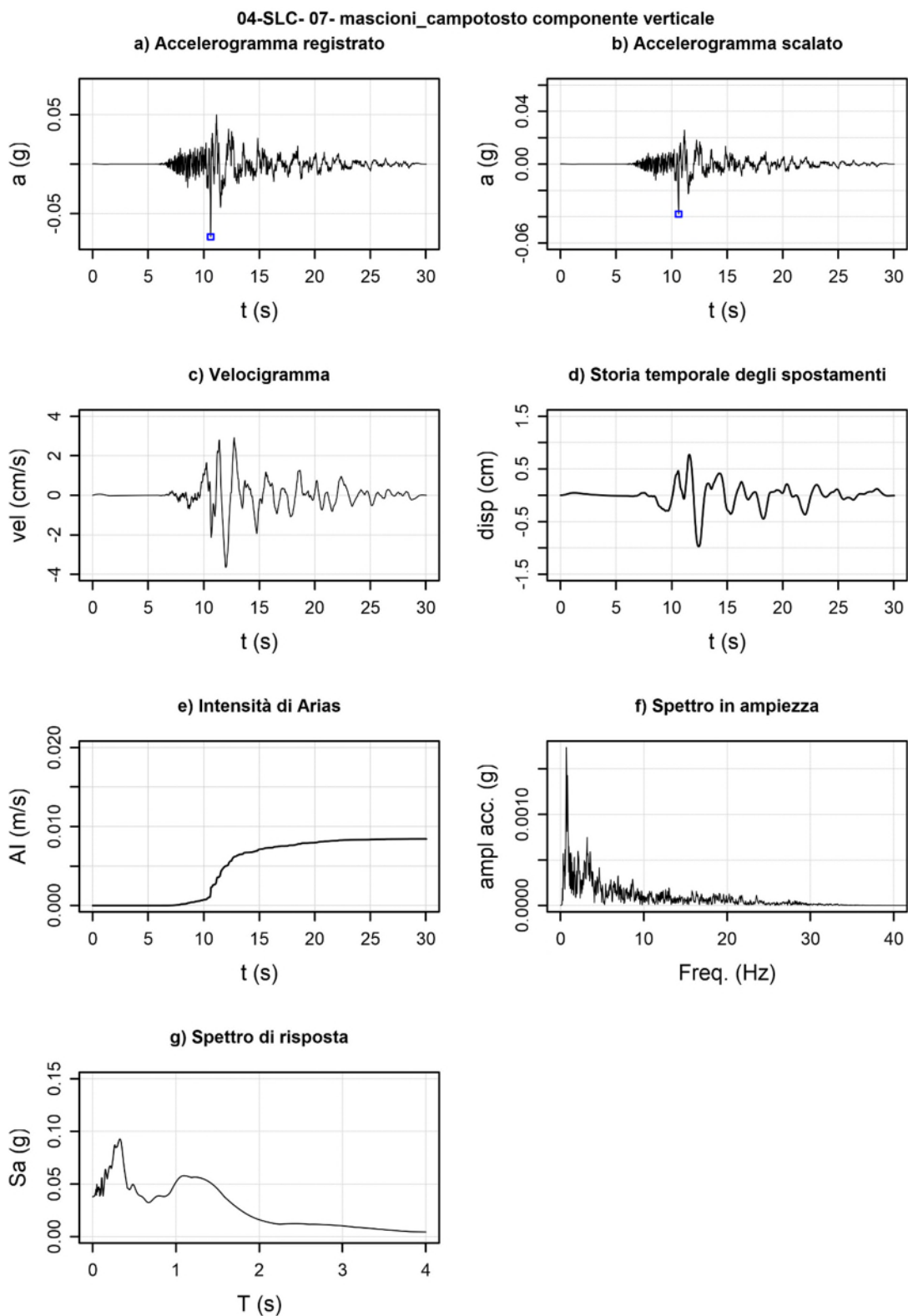


Figura 4-32 Accelerogramma selezionato per la verifica SLC #07 (componente verticale).

Si riporta in Figura 4-33 per ciascun input sismico selezionato l'intensità di Arias.

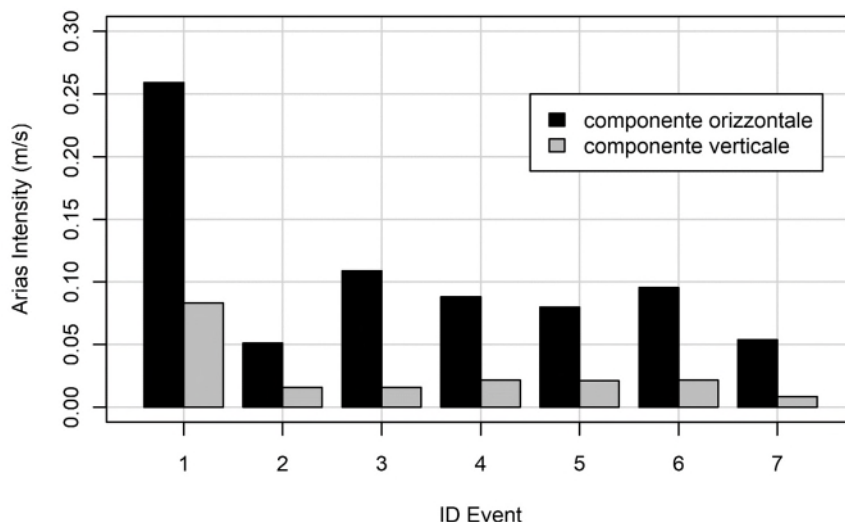


Figura 4-33 Intensità di Arias per ciascun input sismico selezionato per la verifica SLC.

#### 4.5 Azioni inerziali dell'acqua contenuta nel serbatoio.

L'azione inerziale dell'acqua contenuta nel serbatoio è stata valutata mediante la relazione fornita dal DM 2014:

$$p = a \rho c y_0 \quad (4.4)$$

con:

a: accelerazione orizzontale massima al sito;

$\rho$ : massa per unità di volume dell'acqua;

$y_0$ : differenza tra la quota dell'acqua presente nella combinazione sismica e la quota del punto più depresso dell'alveo naturale al piede del paramento;

$$c = \frac{c_m}{2} \left[ \frac{y}{y_0} \left( 2 - \frac{y}{y_0} \right) + \sqrt{\frac{y}{y_0} \left( 2 - \frac{y}{y_0} \right)} \right] \quad (4.5)$$

y: differenza tra la quota dell'acqua presente nella combinazione sismica e la quota del punto generico del paramento a cui è associata la pressione p;

Essendo l'inclinazione del paramento di monte rispetto alla verticale sempre maggiore di 60°, così come prescritto dal DM 2014, si è considerato  $c_m=0.3$ .

Dati i valori dell'accelerazione orizzontale massima al sito per i due stati limite SLD ed SLC richiamati in Tabella 4-9 e le quote di massima regolazione (229.0m.s.l.m.m) e del punto più depresso dell'alveo naturale (209.0m.s.l.m.m.) si riportano in Figura 4-34 gli andamenti delle azioni inerziali dell'acqua contenuta nel bacino per lo Stato Limite di Danno e di Collasso. I valori massimi di tali andamenti, 2.0kPa per lo Stato Limite di Danno e 5.6kPa per lo Stato Limite di Collasso vengono attinti alla base dell'invaso.

Tabella 4-9 Valori dell'accelerazione orizzontale massima attesa al sito e valore dell'azione inerziale dell'acqua contenuta dell'invaso alla base dello sbarramento per lo Stato Limite di Danno e di Collasso.

	SLD	SLC
$a_g$ (m/s <sup>2</sup> )	0.034	0.095
$p_{base}$ (kPa)	2.0	5.6

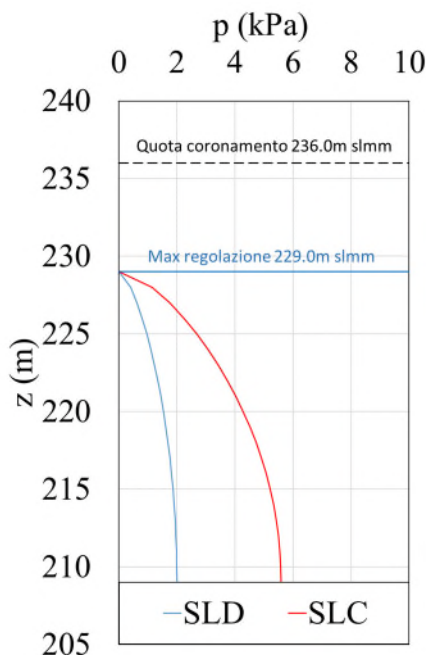


Figura 4-34 Sezione di verifica della diga con indicazione delle azioni inerziali dell'acqua contenuta nel bacino.

Con riguardo al livello dell'invaso da considerare nella verifica, le istruzioni per la verifica rilasciate dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti [3] prescrivono che "Per ciascuno stato limite andranno in ogni caso considerate le situazioni di serbatoio pieno (livello di invaso alla massima regolazione) e serbatoio vuoto". Viste tali prescrizioni, le verifiche sismiche sia allo Stato Limite Ultimo sia allo Stato Limite di Danno sono state eseguite con riferimento alla condizione di invaso al livello di massima regolazione (229.0m s.l.m.m.) e di invaso vuoto e per ognuna di queste due condizioni sono state esaminati sette differenti azioni sismiche selezionate in accordo con il D.M.26 giugno 2014 [1] (vedasi paragrafo 4.4) rappresentate da accelerogrammi registrati, rappresentativi della sismicità del sito.

## 5 Verifiche statiche in condizioni di esercizio

Così come previsto nelle “Istruzioni per l’applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18)” [3] al paragrafo III.1.1 e successivamente ribadito nel paragrafo III.1.4.a “Preliminarmente alla valutazione di sicurezza è necessario esaminare il comportamento dello sbarramento durante l’esercizio, evidenziando eventuali insufficienze originarie legate a carenze progettuali o realizzative, o criticità successivamente intervenute”.

Tale verifica è stata eseguita in osservanza delle prescrizioni specificate nel paragrafo 6.8 delle “Norme tecniche per le costruzioni” [2] e del paragrafo E.5.1 delle “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)” [1].

Le verifiche di sicurezza sono state condotte verificando che sia rispettata la condizione [6.2.1] delle NTC 2018 per cui il valore di progetto dell’azione deve risultare minore, o al più uguale, al valore di progetto della resistenza ( $E_d \leq R_d$ ). Nel caso in questione, per tutte le possibili superfici di scivolamento possibili all’interno del sistema diga-terreni di fondazione, si è considerata come azione di verifica la tensione di taglio agente e come resistenza di verifica la resistenza al taglio disponibile.

Così come prescritto nel paragrafo 6.8.2 delle NTC 2018 e dal paragrafo E.5.1 delle “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta”, le verifiche sono state effettuate secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell’Approccio 1.

In particolare, per ciò che riguarda i coefficienti parziali da applicare ai carichi ed ai parametri geotecnici dei terreni sono stati adottati i valori riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II delle NTC 2018, mentre come coefficienti parziali per le verifiche  $\gamma_R$  sono stati adottati i valori prescritti dalle “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta”. Uno specchio riassuntivo dei coefficienti adottati è riportato in Tabella 5-1, Tabella 5-2 e Tabella 5-3.

Tabella 5-1 Coefficienti parziali per le azioni adottati nelle verifiche in condizioni di esercizio della diga.

	Coefficiente parziale $\gamma_F$	Effetto	A2
Carichi permanenti $G_1$	$\gamma_{G1}$	Favorevole	1.0
		Sfavorevole	1.0
Carichi permanenti $G_2$	$\gamma_{G2}$	Favorevole	0.8
		Sfavorevole	1.3
Carichi variabili $Q$	$\gamma_{Qi}$	Favorevole	0.0
		Sfavorevole	1.3

Tabella 5-2 Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno adottati nelle verifiche in condizioni di esercizio della diga.

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	M2
Tangente dell’angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1.25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_c$	1.25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1.4
Peso dell’unità di volume	$\gamma_v$	$\gamma_\gamma$	1.0



Tabella 5-3 Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza adottati nelle verifiche in condizioni di esercizio della diga.

Condizione di verifica	R2
Rapido svasso	1.1
Serbatoio pieno	1.2

## 5.1 Metodologia di analisi

Le verifiche sono state condotte nelle condizioni di bacino alla quota di massimo invaso, invaso alla quota di massima regolazione e di rapido svasso adottando il software Geostru Slope che implementa il metodo dell'equilibrio limite secondo le schematizzazioni di Bishop (1955) per le superfici di scorrimento circolari ed il metodo di Jambu (1967) per le superfici di scorrimento di forma qualsiasi.

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dalla diga e da una superficie di scorrimento di forma circolare o mistilinea (Figura 5-1), da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni da taglio ( $\tau$ ) e confrontate con la resistenza disponibile ( $\tau_f$ ), valutata secondo il criterio di rottura di Coulomb, il rapporto tra queste due quantità (Equazione 6.1) rappresenta il fattore di sicurezza (FS) lungo la specifica superficie analizzata.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (5.1)$$

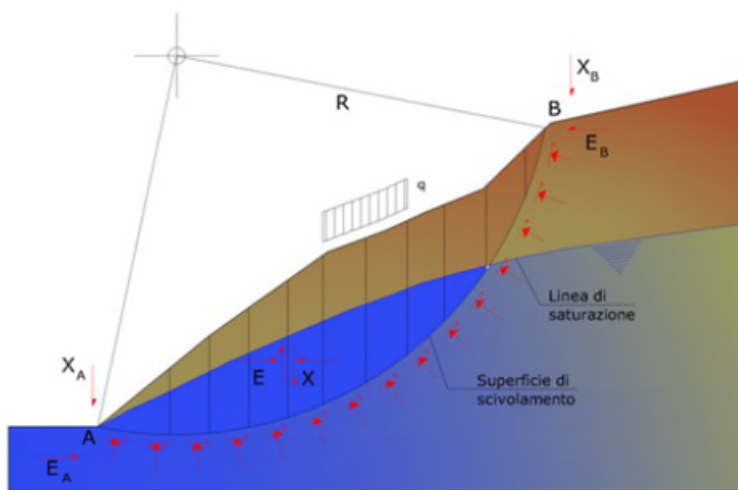




Figura 5-1 Illustrazione del metodo dell'equilibrio limite applicato su di una superficie circolare di un pendio naturale (manuale Geostru-Slope).

Detto  $n$  il numero di conci in cui è suddivisa la massa interessata dallo scivolamento, il problema presenta le seguenti incognite:

- $n$  valori delle forze normali  $N_i$  agenti sulla base di ciascun concio;
- $n$  valori delle forze di taglio alla base del concio  $T_i$ ;
- $(n-1)$  forze normali  $E_i$  agenti sull'interfaccia dei conci;
- $(n-1)$  forze tangenziali  $X_i$  agenti sull'interfaccia dei conci;
- $n$  valori della coordinata "a" che individua il punto di applicazione delle  $E_i$ ;



	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;">VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</p>	<p style="text-align: right;">Pag. 64 di 160</p>

Il software di calcolo computa il coefficiente di sicurezza della diga come il coefficiente di sicurezza minimo tra quelli calcolati con riferimento alle possibili superfici di scorrimento.

#### 5.1.1 Metodo di Bishop (1955)

Con il metodo di Bishop (1955), a differenza di altri metodi semplificati (e.g. Fellenius, 1927) non viene trascurato nessun contributo di forze agenti sui conci.

Le equazioni usate per risolvere il problema sono:

$$\sum F_v = 0 \quad (5.3)$$

$$\sum M_0 = 0 \quad (5.4)$$

$$FS = \frac{\sum \{c_i b_i + (W_i - u_i b_i + \Delta X_i) \tan \varphi_i\} \frac{\sec \alpha_i}{1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \varphi_i}{FS}}}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (5.5)$$

I valori di FS e di  $\Delta X$  per ogni elemento che soddisfano questa equazione danno una soluzione rigorosa al problema. Come prima approssimazione conviene porre  $\Delta X = 0$  ed iterare per il calcolo del fattore di sicurezza, tale procedimento è noto come metodo di Bishop ordinario, gli errori commessi rispetto al metodo completo sono di circa 1 %.

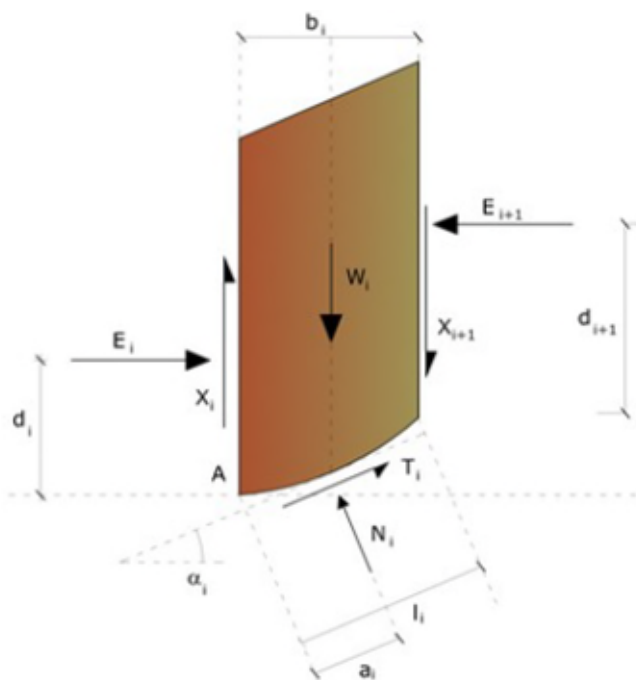




Figura 5-3 Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Bishop (manuale Geostru-Slope).

 III22F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 65 di 160
	VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE	

### 5.1.2 Metodo di Janbu (1967)

Il metodo di Janbu rappresenta l'estensione del metodo di Bishop a superfici di scorrimento di forma qualsiasi.

Quando vengono trattate superfici di scorrimento di forma qualsiasi il braccio delle forze cambia (nel caso delle superfici circolari resta costante e pari al raggio) a tal motivo risulta più conveniente valutare l'equazione del momento rispetto allo spigolo di ogni blocco.

Con il metodo di Janbu si tiene conto delle forze di interazione tra i conci ipotizzando che agiscano lungo una linea di spinta prefissata. La soluzione si ottiene per successive iterazioni.

Facendo riferimento allo schema illustrato in Figura 5-4, le assunzioni che stanno alla base del procedimento proposto da Janbu (1973) sono le seguenti:

- si suppone nota la linea di azione delle forze  $E$  che si scambiano i vari conci;
- la risultante  $N_i$  agisce nel punto in cui la retta di azione di  $(W_i + q b_i + P)$  intercetta la base del concio.

Le incognite del problema nel caso più generale sono:  $E$ ,  $X$ ,  $N_i$ ,  $T_i$ .

L'equilibrio alla *traslazione verticale* di un concio può esprimersi nella forma:

$$N_i \cos \alpha + T_i \sin \alpha = W_i + P + q b_i + \Delta T \quad (5.6)$$

L'equilibrio alla *traslazione orizzontale* di un concio può esprimersi nella forma:

$$\Delta E + T_i \cos \alpha = Q + N_i \sin \alpha \quad (5.7)$$

La combinazione di tali equazioni con l'equazione dell'equilibrio globale permettono di calcolare, per ogni superficie ipotizzata, il valore del coefficiente di sicurezza  $FS$ , procedendo per successive iterazioni:

$$FS = \frac{f_0 \sum \{c_i b_i + (W_i - u_i b_i + \Delta X_i) \tan \varphi_i\} \frac{FS}{\cos^2 \alpha_i (1 + \tan \alpha_i \tan \varphi_i)}}{\sum W_i \tan \alpha_i} \quad (5.8)$$



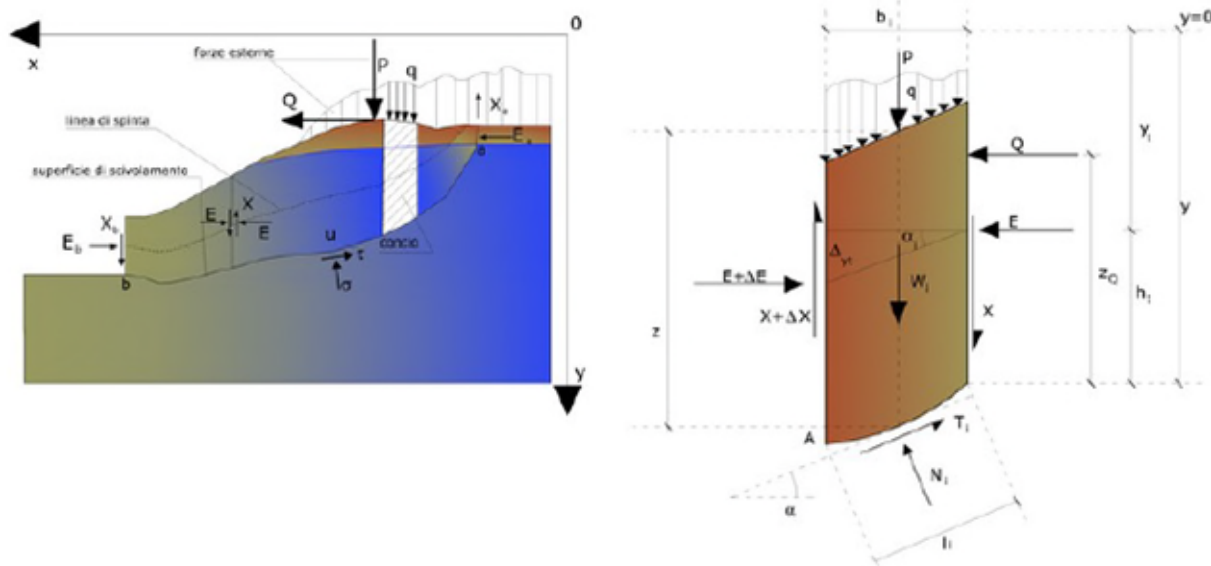


Figura 5-4 Azioni sul concio  $i$ -esimo secondo le ipotesi di Janbu e rappresentazione d'insieme dell'ammasso (manuale GeoStru-Slope).

Assumendo  $\Delta X_i = 0$  si ottiene il metodo ordinario.

Il confronto tra i valori di FS relativi a successive iterazioni serve, infine, a stabilire la precisione raggiunta. A tal proposito Janbu propone una correzione del fattore di sicurezza ottenuto con il metodo ordinario secondo la seguente equazione:

$$FS_{\text{corretto}} = f_0 FS \quad (5.9)$$

dove  $f_0$ , fattore di correzione empirico, dipende dalla forma della superficie di scivolamento e dai parametri geotecnici.

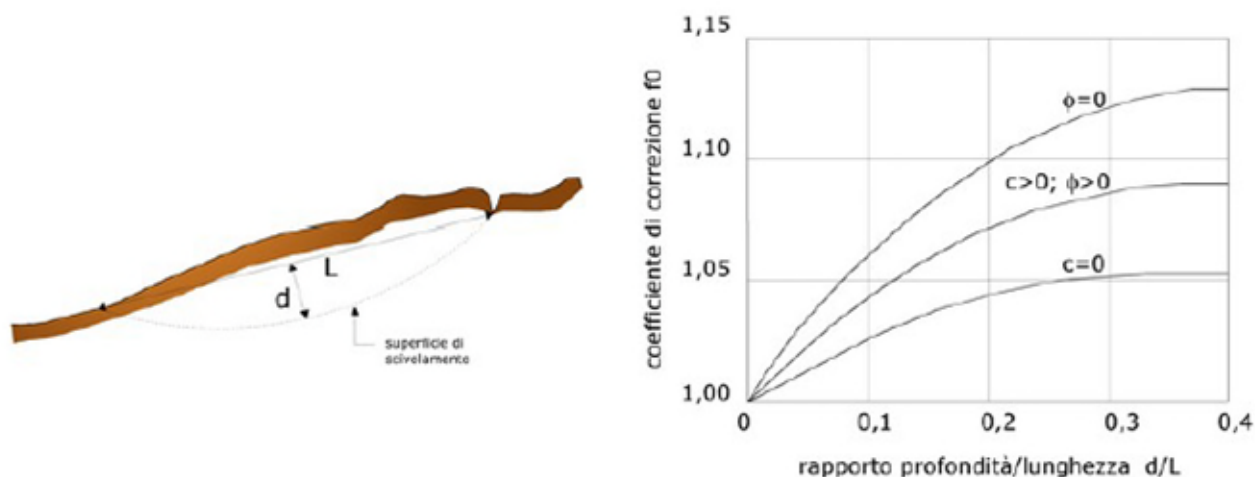


Figura 5-5 Calcolo del fattore correttivo  $f_0$  (manuale GeoStru-Slope).

### 5.1.3 Superfici di scorrimento

Così come prescritto al Paragrafo V.2.5 delle “Istruzioni per l’applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18)” [3], “Per le dighe zonate, le superfici di scivolamento critiche sono generalmente di forma mistilinea, in quanto il sistema nel suo complesso è fortemente disomogeneo (nucleo, filtri, transizione, fondazione). È necessario, pertanto, che le analisi vengano effettuate sia con superfici circolari che con superfici mistilinee”.

Le verifiche sono state dunque eseguite considerando sia superfici di scorrimento di forma circolare, assegnando una maglia di centri e consentendo al software di ricercare tra le possibili superfici centrate sulla maglia quella corrispondente al minimo fattore di sicurezza, che considerando superfici mistilinee. Con riferimento a quest’ultima tipologia, l’analisi di casi studio di letteratura (si riporta a titolo di esempio in Figura 5-6 il meccanismo di collasso ricostruito per la Lower San Fernando dam in California) ha mostrato che nelle dighe zonate in terra, le possibili superfici di scorrimento mistilinee di collasso tendono generalmente a percorrere la fondazione dello sbarramento per poi risalire il nucleo di ritenuta in direzione sub verticale.

Nell’analisi condotta sono state quindi considerate tre superfici di scorrimento mistilinee così come descritte in Figura 5-7 nei colori rosso, verde e blu.

La verifica è stata inoltre eseguita considerando sia superfici di scivolamento che si sviluppano sul paramento di monte che di valle.

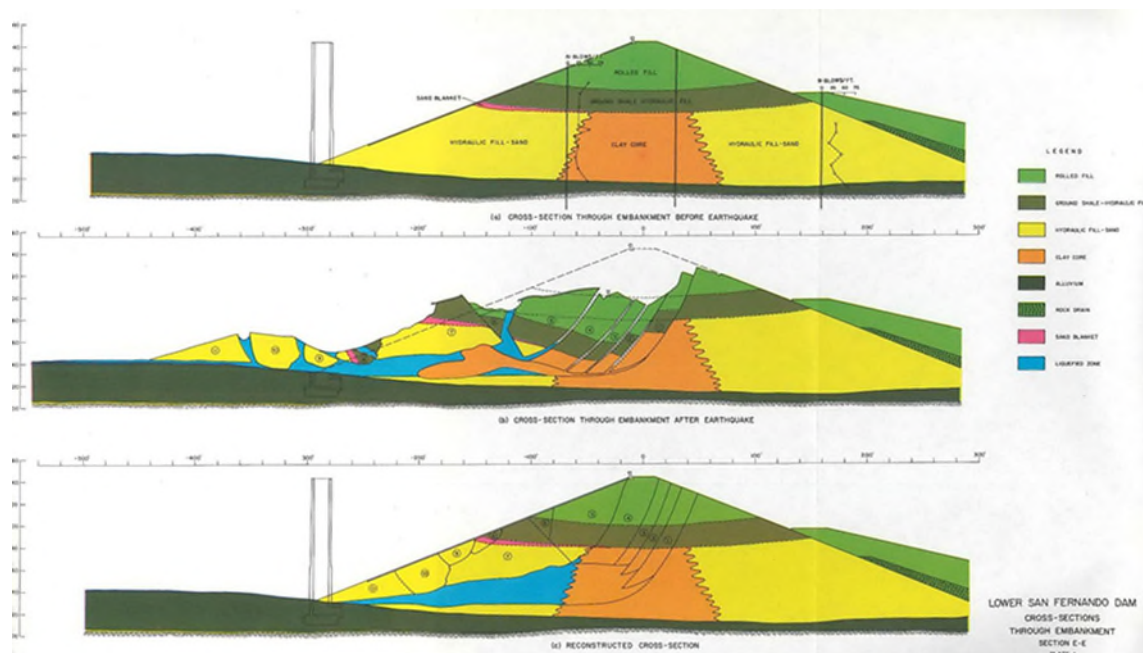


Figura 5-6 Meccanismo di collasso ricostruito nella diga di San Fernando in California. In alto la sezione tipo della diga, al centro le porzioni della diga dopo la dislocazione, in basso la ricostruzione delle superfici di scorrimento sulla sezione indeformata (Seed et al, 1973).

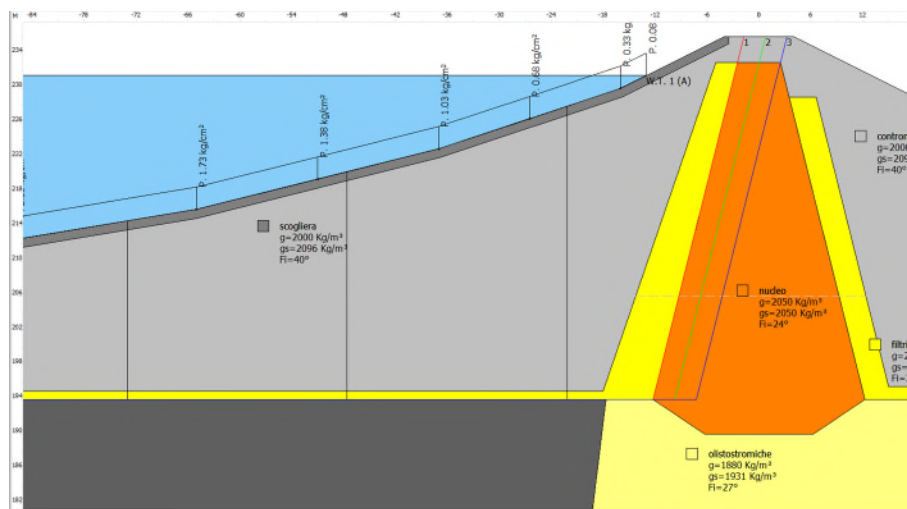


Figura 5-7 Superfici mistilinee adottate nella verifica del paramento di monte in condizioni di esercizio.

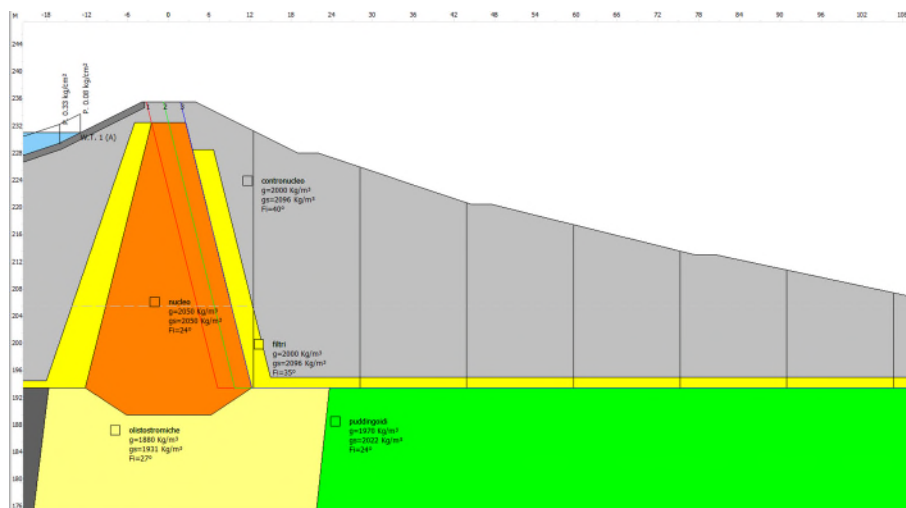


Figura 5-8 Superfici mistilinee adottate nella verifica del paramento di valle in condizioni di esercizio.

## 5.2 Modello geotecnico finalizzato all'analisi statica

Sulla base dei documenti progettuali, dei disegni di consistenza, delle immagini satellitari disponibili sulla piattaforma Google Earth e sui rilievi effettuati in situ sono state ricostituite la planimetria e le sezioni longitudinale e trasversale dello sbarramento.

Poiché lo sbarramento presenta una geometria regolare in direzione longitudinale si è scelto di eseguire la verifica sulla sezione trasversale mediana della diga (Figura 5-9).

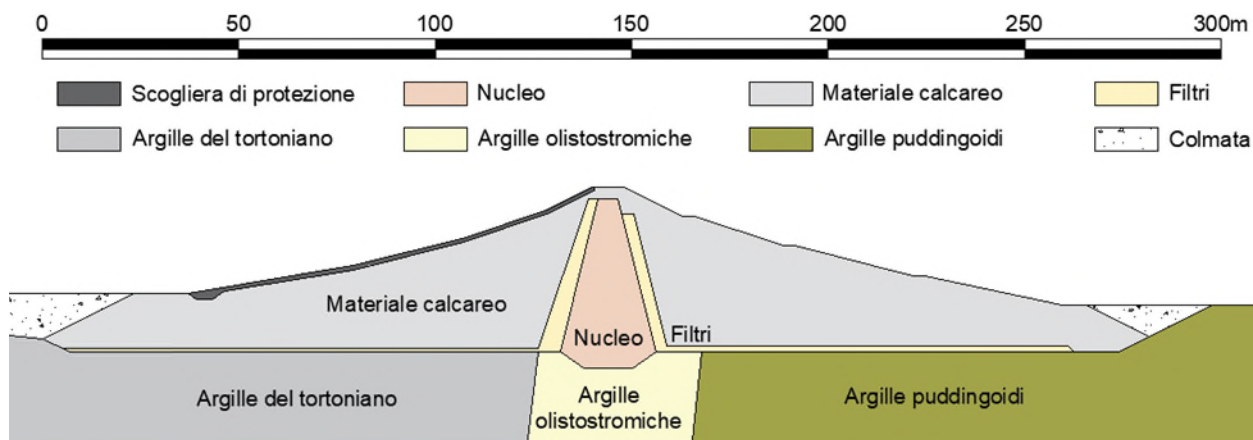


Figura 5-9 Discretizzazione geometrica della diga implementata per le verifiche con i metodi semplificati.

I parametri meccanici (caratteristici) per ciascuno dei materiali considerati nella modellazione sono riportati in Tabella 5-4. A tali valori sono stati applicati i coefficienti riduttivi prescritti dalla normativa richiamati nel Paragrafo 5.

Tabella 5-4 Tabella riassuntiva delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali (verifiche in condizioni di esercizio)

Materiali	$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)
Scogliera	20.00	20.96	10	40
Contronuclei	20.00	20.96	10	45
Filtri	20.00	20.96	10	35
Nucleo	20.50	20.23	33	24
Colmate	16.00	19.00	10	10
Argille del tortoniano	19.80	19.72	31	23
Argille olistostromiche	18.80	19.31	17	27
Argille puddingoidi	19.70	20.22	23	24

Con:  $\gamma_{\text{nat}}$ : densità naturale;  $\gamma_{\text{sat}}$ : densità satura;  $\phi$ : angolo d'attrito; c': coesione.

Le azioni dovute alla presenza dell'invaso, e del rinterro sono state introdotte come carichi distribuiti sul paramento di monte mentre il regime delle pressioni interstiziali è stato introdotto in coerenza con il livello d'invaso analizzato.

Nelle verifiche eseguite con superfici di scorrimento mistilinee è stato adottato un parametro  $f_0$  di Jambu pari a 1.07 corrispondente ad un materiale dotato di angolo d'attrito e coesione ed un rapporto geometrico medio  $d/l$  pari a 0.24 (vedi Figura 5-5).



### 5.3 Risultati delle verifiche in condizioni di esercizio

In questo paragrafo si mostrano i risultati delle verifiche di stabilità in condizioni di esercizio. In particolare, si riassumono in Tabella 5-5 i valori dei fattori di sicurezza calcolati secondo le teorie adottate. Tali fattori di sicurezza vanno intesi come rapporto tra resistenza (ottenuta scalando la resistenza di calcolo con il coefficiente  $\gamma_R$ ) e azione di progetto così come definiti dalle NTC 2018 (Paragrafo 2.3) e richiamato nel paragrafo 4 della presente relazione.

Tabella 5-5 Fattori di sicurezza calcolati nelle condizioni di esercizio. Verifica lato monte.

Condizione di esercizio	Superfici circolari Bishop (1955)	Superfici mistilinee Jambu (1967)
Massimo invaso (231.5 m.s.l.m.m.)	2.55	7.23 (superficie 1)
Massima regolazione (229.0m.s.l.m.m.)	2.55	7.23 (superficie 1)
Rapido svaso	2.07	4.07 (superficie 1)

Tabella 5-6 Fattori di sicurezza calcolati nelle condizioni di esercizio. Verifica lato valle.

Condizione di esercizio	Superfici circolari Bishop (1955)	Superfici mistilinee Jambu (1967)
Massimo invaso (231.5 m.s.l.m.m.)	2.54	$\geq 20.00$ (superficie 1)
Massima regolazione (229.0m.s.l.m.m.)	2.54	$\geq 20.00$ (superficie 1)
Rapido svaso	2.77	$\geq 20.00$ (superficie 1)

Le superfici di scorrimento critiche (corrispondenti al minimo fattore di sicurezza) sono invece riportate per ognuna delle tre condizioni di esercizio in Figura 5-10, Figura 5-11 e Figura 5-12.

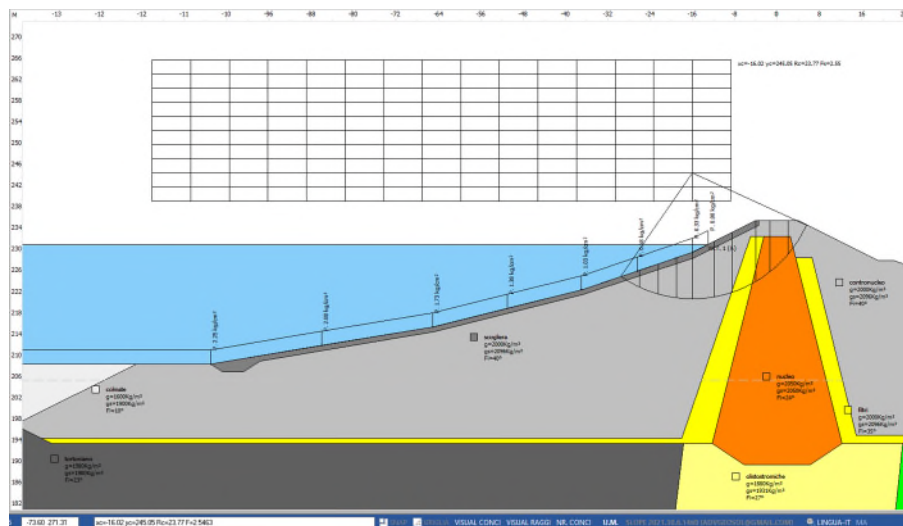


Figura 5-10 Esito della verifica del paramento di monte in condizioni statiche e bacino alla quota di massimo invaso (metodo di Bishop 1955).

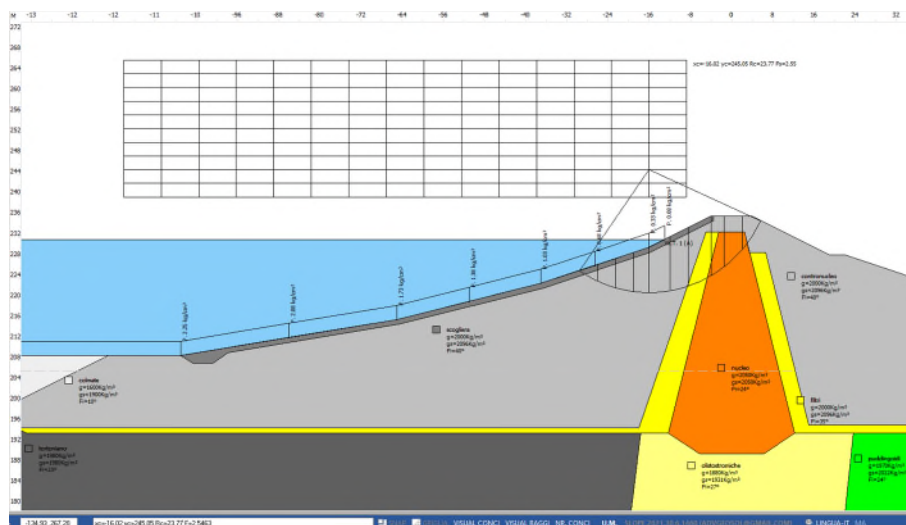


Figura 5-11 Esito della verifica del paramento di monte in condizioni statiche e bacino alla quota di massima regolazione (metodo di Bishop 1955).

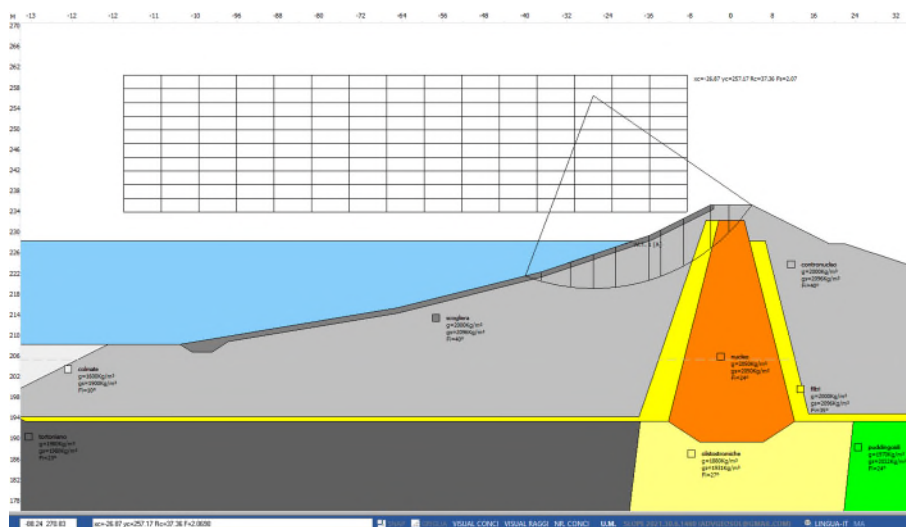


Figura 5-12 Esito della verifica del paramento di monte in condizioni statiche e di rapido svasso (metodo di Bishop 1955).

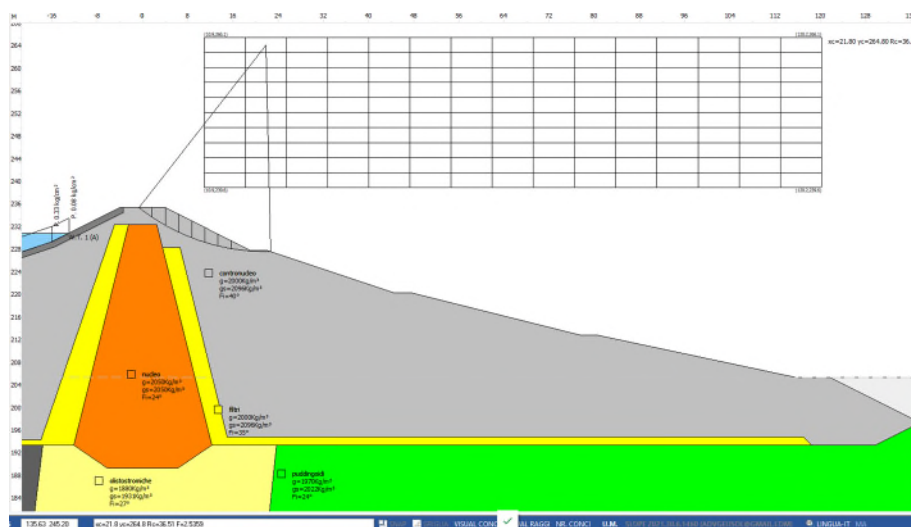


Figura 5-13 Esito della verifica del paramento di valle in condizioni statiche e bacino alla quota di massimo invaso (metodo di Bishop 1955).

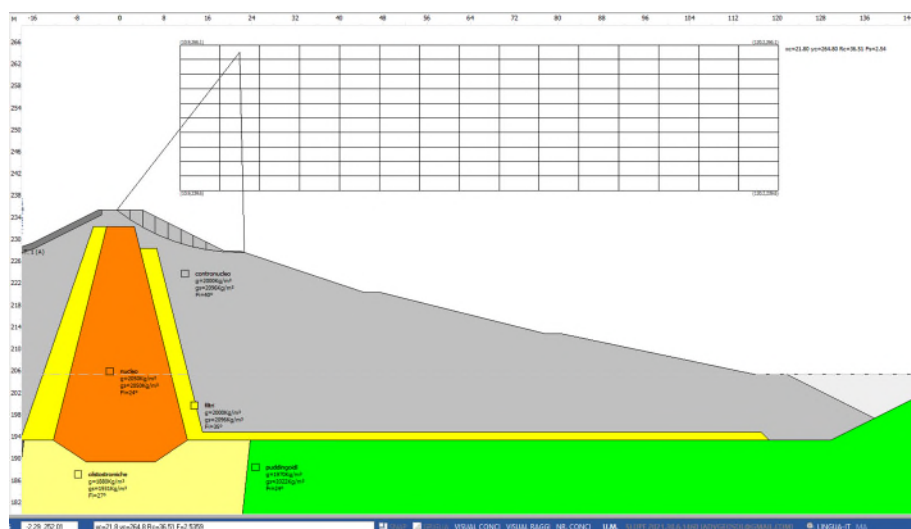


Figura 5-14 Esito della verifica del paramento di valle in condizioni statiche e bacino alla quota di massima regolazione (metodo di Bishop 1955).

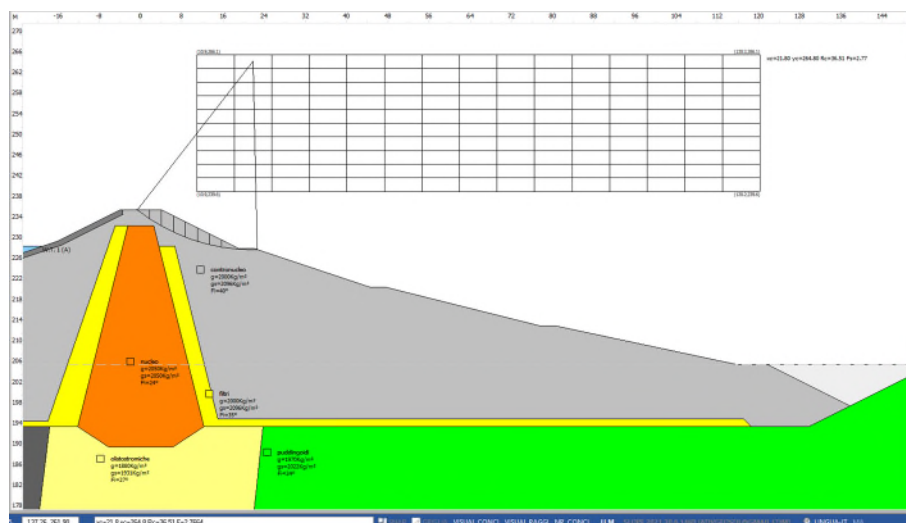


Figura 5-15 Esito della verifica del paramento di valle in condizioni statiche e di rapido svasso (metodo di Bishop 1955).

In conclusione, essendo il fattore di sicurezza significativamente maggiore dell'unità per tutte le condizioni di servizio analizzate la verifica di stabilità della diga in condizioni statiche è da considerarsi soddisfatta.

## 6 Verifica sismica – analisi semplificate

Così come riportato nel Paragrafo E6 della “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)” [1] e dei paragrafi III.1.8 e V.2.1 delle “Istruzioni per l’applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18)” [3], risulta utile procedere alla verifica della diga adottando sia un metodo di calcolo semplificato (metodo degli spostamenti alla Newmark) che un’analisi dinamica completa al passo per poi procedere ad un confronto tra i risultati ottenuti.

Così come per le verifiche in condizioni di esercizio, per le verifiche con i metodi semplificati è stato adottato il software GeoStru-Slope.

### 6.1 Verifica con il metodo degli spostamenti di Newmark (1965)

Secondo il metodo di Newmark la massa di terreno compresa tra la superficie di scorrimento e la superficie topografica, è schematizzata come un blocco rigido (Figura 6-1), soggetto alla forza peso ed alla relativa forza d’inerzia, variabile in modulo, che ne determina lo scorrimento ogni qualvolta viene superato il valore di soglia (coefficiente critico  $a_c$ ) corrispondente alla situazione di equilibrio limite. Il valore del coefficiente critico viene quindi determinato dalla relazione che esprime il FS (fattore di sicurezza), ricercando quel valore di  $a_c$  corrispondente alla condizione  $FS = 1$ .

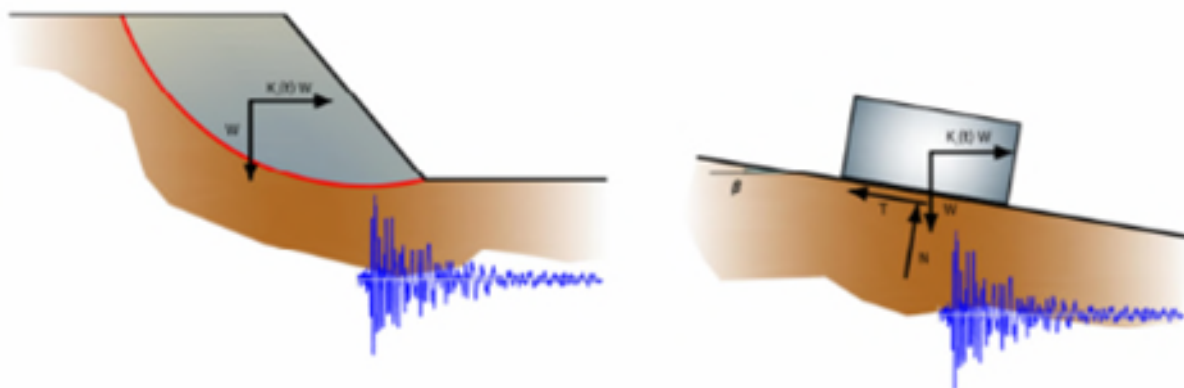


Figura 6-1 Schema di calcolo applicando il metodo di Newmark (manuale GeoStru-Slope).

Individuata la superficie di scorrimento critica e noto l’accelerogramma di progetto si procede all’integrazione dell’equazione differenziale del moto negli intervalli di tempo in cui l’accelerazione del blocco risulta superiore al valore di soglia e comunque in tutti quegli intervalli in cui la velocità relativa risulta maggiore di zero (Figura 6-2).



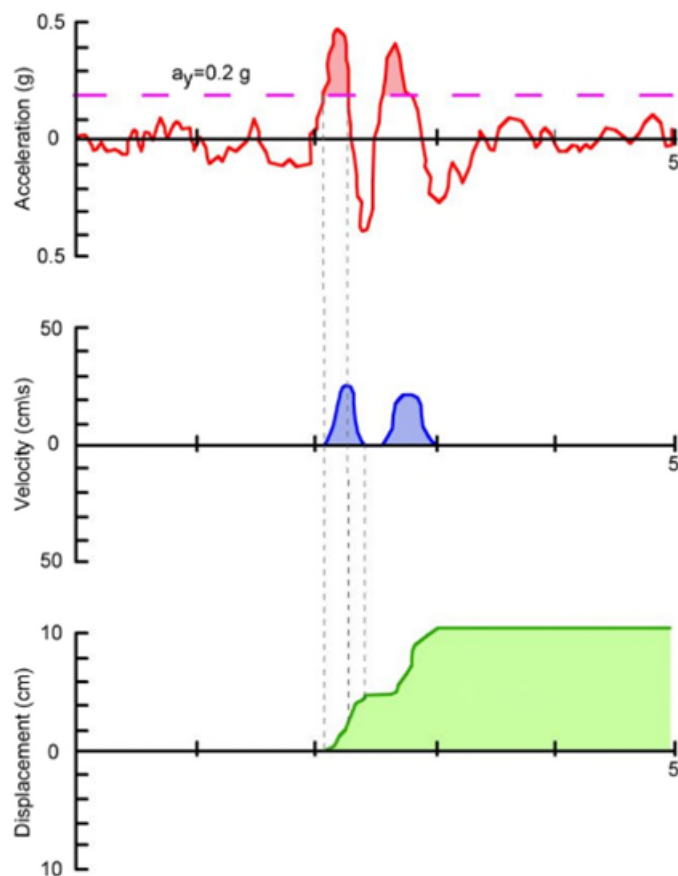


Figura 6-2 Rappresentazione schematica della procedura di integrazione dell'equazione differenziale del moto (manuale GeoStru-Slope).

Il risultato fornito dal metodo è lo spostamento totale conseguente all'evento sismico. Tale valore corrisponde dalla somma degli spostamenti parziali ottenuti nei vari intervalli di integrazione.

#### 6.1.1 Modello geotecnico finalizzato all'analisi sismica semplificata

La geometria del modello, le caratteristiche dei materiali e le azioni sono le medesime adottate per le verifiche in condizioni di esercizio e descritte nel Paragrafo 5.2.

Si precisa che la verifica è stata eseguita con invaso alla quota di massima regolazione ed in condizione di invaso vuoto, così come prescritto al Paragrafo III.5.2 delle "Istruzioni per l'applicazione della normativa" [3].

#### 6.1.2 Calcolo dell'accelerazione critica con il metodo pseudostatico

Così come riportato nel Paragrafo 7.11.3.5.2 "Metodi di analisi" delle NTC 2018 [1]: Nei metodi pseudostatici l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso  $W$  del volume di terreno potenzialmente instabile. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza. Nelle

verifiche allo stato limite ultimo, in mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come  $F_h = k_h \cdot W$  ed  $F_v = k_v \cdot W$ , con  $k_h$  e  $k_v$  rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale:

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g} \quad (6.1)$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h \quad (6.2)$$

Dove:

$\beta_s$ : coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

$a_{max}$ : accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

$g$  = accelerazione di gravità.

I valori di  $\beta_s$  sono riportati nella Tabella 6-1 al variare della categoria di sottosuolo e dell'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

Tabella 6-1 Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

Accelerazione	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0.2 < a_g (g) \leq 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < a_g (g) \leq 0.2$	0.27	0.24
$a_g (g) \leq 0.1$	0.20	0.20

Essendo l'azione sismica per le verifiche allo Stato Limite di Collasso (SLC) caratterizzata da un valore di accelerazione massima attesa al sito  $a_{max}=0.095g$  ed essendo la formazione di base classificata come suolo di categoria A si è considerato un valore del coefficiente di riduzione  $\beta_s=0.20$ . Di seguito si riportano in Tabella 6-2 i valori di  $k_h$  e  $k_v$  adottati nelle analisi:

Tabella 6-2 Valori dei coefficienti sismici adottati nelle analisi pseudostatiche.

$k_h$	$K_v$
$\pm 0.019$	$\pm 0.010$

Il Paragrafo 7.11.3.5.2 delle NTC 2018 recita inoltre: *La condizione di stato limite deve essere valutata con riferimento ai valori caratteristici dei parametri geotecnici e riferita alla superficie di scorrimento critica, caratterizzata dal minore margine di sicurezza. L'adeguatezza del margine di sicurezza nei confronti della stabilità del pendio deve essere valutata e motivata dal progettista.*

Così come per le verifiche in condizioni di esercizio, le verifiche sismiche con il metodo pseudo-statico sono state eseguite con il software Geostru-Slope mediante il metodo dell'analisi limite dei conci secondo le formulazioni di Bishop (1955) con riferimento alle superfici di scorrimento circolari ed il metodo di Jambu (1967) per le superfici di scorrimento di forma qualsiasi.

Si precisa che la verifica è stata eseguita con invaso alla quota di massima regolazione ed in condizione di invaso vuoto, così come prescritto al Paragrafo III.5.2 delle "Istruzioni per l'applicazione della normativa" [3]. Inoltre, la procedura di verifica è stata eseguita con il coefficiente sismico verticale  $k_v$  agente sia verso il basso che verso l'alto.

#### 6.1.2.1 Sovrapressioni neutre indotte dal sisma

Il Paragrafo 7.11.3.5.2 delle NTC 2018 richiama inoltre che: *In terreni saturi e in siti con accelerazione orizzontale massima attesa  $a_{max} > 0.15g$ , nell'analisi statica delle condizioni successive al sisma si deve tenere conto della possibile riduzione della resistenza al taglio per incremento delle pressioni interstiziali o per decadimento delle caratteristiche di resistenza indotti dalle azioni sismiche.*

A tale proposito le sovrapressioni del fluido interstiziale nei materiali sono state calcolate avvalendosi di relazioni empiriche di letteratura implementate all'interno del software Geostru-Slope. Si riportano nei paragrafi successivi le relazioni adottate nel software per i terreni coesivi (nucleo) ed incoerenti (contronuclei).

Si riportano invece in Tabella 6-3, i soli parametri fisici e meccanici aggiuntivi dei materiali utilizzati per il calcolo delle sovrapressioni neutre indotte dall'azione sismica.

Tabella 6-3 Parametri aggiuntivi per il calcolo delle sovrapressioni indotte dall'azione sismica nelle verifiche pseudostatiche.

Materiale	$G_0$ (Mpa)	$D_r$ (%)	$N_L$	$I_p$	OCR
Scogliera	3058.68	90			
Contronuclei	3058.68	90	7		
Filtri	3058.68	85	7		
Nucleo	882.50			0.30	1.8
Colmate	644.17	85	7		
Argille del tortoniano	1590.21			0.53	1.6
Argille olistostromiche	1508.66			0.68	4.0
Argille puddingoidi	1661.57			0.55	1.6

##### 6.1.2.1.1 Terreni coesivi

Nei terreni coesivi, l'incremento di pressione interstiziale  $\Delta u$ , ad una data profondità viene stimato mediante la seguente relazione empirica (Matsui et al., 1980):

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_0} = \beta \left[ \log \left( \frac{\gamma_{c,max}}{\gamma_v} \right) \right] \quad (6.3)$$

Dove  $\sigma'_0$  è il valore iniziale della pressione media efficace alla profondità considerata,  $\gamma_{c,max}$  è la deformazione di taglio massima raggiunta durante il sisma e  $b=0.45$  è un coefficiente sperimentale. La deformazione di soglia volumetrica  $\gamma_v$  viene valutata mediante la relazione:



$$\gamma_v = A(OCR - 1) + B \quad (6.4)$$

Nella quale OCR è il grado di sovraconsolidazione, A e B sono coefficienti sperimentali che possono essere ricavati in funzione dell'indice di plasticità (Tabella 6-4).

Tabella 6-4 Valori dei coefficienti A e B per la stima della deformazione di soglia volumetrica.

IP (%)	A	B
20	$0.4 \cdot 10^{-3}$	$0.6 \cdot 10^{-3}$
40	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
55	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$

Il valore di  $\gamma_{c,max}$  relativo alla profondità considerata viene determinato mediante la relazione:

 II122F-A-SIS-RT-202-00	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	 Pag. 78 di 160
	VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE	

$$\gamma_{c,max} = \frac{\tau_{max}}{G} \quad (6.5)$$

$\tau_{max}$  viene posto:

$$\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \sigma_v r_d \quad (6.6)$$

Dove  $a_{max}$  è l'accelerazione di picco al piano campagna sulla verticale relativa al punto considerato;  $g$  è l'accelerazione di gravità;  $\sigma_v$  è la tensione verticale totale;  $r_d$  è un coefficiente riduttivo che tiene conto dell'azione sismica alla profondità di interesse che porta in conto la deformabilità del sottosuolo. Il coefficiente  $r_d$  viene valutato con la seguente espressione:

$$r_d = 1 - 0.015 \cdot z \quad (6.7)$$

Il modulo di taglio  $G$  è determinato dalla curva  $(G-\gamma)$  di seguito riportata in funzione dell'indice di plasticità  $I_p$ .

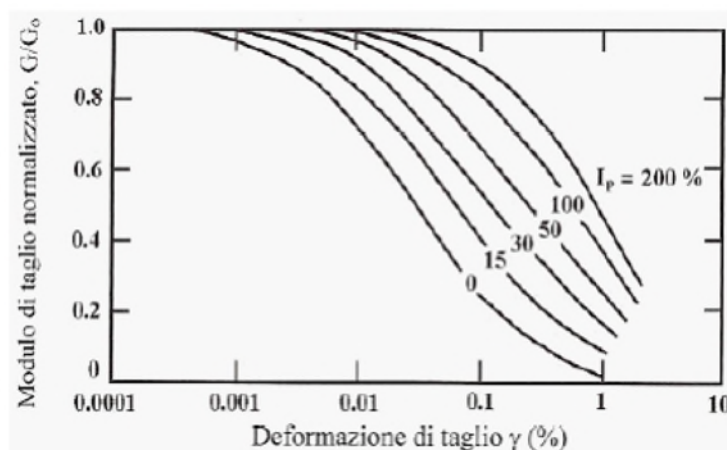


Figura 6-3 Abaco per la determinazione del modulo di rigidezza al taglio.

Il modulo  $G_0$  può essere ricavato correlandolo con la velocità delle onde S dello strato:

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (6.8)$$

Dove  $\rho$  è la densità di massa del terreno e  $V_s$  è la velocità di propagazione delle onde di taglio nel materiale.

#### 6.1.2.1.2 Terreni incoerenti

Nei terreni incoerenti, l'incremento di pressione interstiziale generato dalla sollecitazione sismica viene stimato mediante la seguente relazione empirica proposta da Seed & Booker (1997):

$$\frac{\Delta u_N}{\sigma'_{0}} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[ \left( \frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{a}} \right] \quad (6.9)$$

Dove  $\Delta u_N$  è l'incremento di pressione interstiziale dopo  $N$  cicli di carico,  $\sigma'_{0}$  è il valore iniziale della pressione media efficace alla profondità considerata,  $N$  è il numero di cicli di carico di ampiezza costante equivalente al sisma ed  $N_L$  è il numero di cicli di carico necessari per produrre la liquefazione

nel terreno. La costante sperimentale  $a$  può essere valutata mediante la relazione proposta da Fardis & Veneziano (1981) in funzione della densità relativa  $D_r$ :

$$a = 0.96 \cdot D_r^{0.93} \cdot \varepsilon_\theta \quad (6.10)$$

Il termine  $\varepsilon_\theta$  ha valore unitario. Per determinare il numero di cicli  $N$  che compare nella relazione precedente è necessario approssimare la storia deformativi di taglio irregolare indotta dal terremoto con una sollecitazione ciclica equivalente di ampiezza costante ( $\tau_{eq}$ ) e numero di cicli equivalente ( $N_{eq}$ ). Nel software viene adottata la procedura proposta da Biondi et al. (2004):

$$\tau_{eq} = 0.65 \tau_{max} \quad (6.11)$$

$$N_{eq} = e^{(\alpha + \beta \cdot \ln(a_{max}) + \gamma \cdot \ln(I_a) + \delta \cdot \ln(n_0) + \varepsilon \cdot \ln(T_D))} \quad (6.12)$$

Dove  $\tau_{max}$  rappresenta la sollecitazione di taglio massima indotta dal terremoto alla profondità considerata,  $I_a$  è l'intensità di Arias (m/s),  $n_0$  è la frequenza dei passaggi per l'asse dei tempi dell'accelerogramma (s<sup>-1</sup>) e  $T_D$  è la durata dell'accelerogramma come definita da Trifunac e Brady.

L'intensità di Arias è definita mediante la seguente relazione:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^\infty [a(t)]^2 dt \quad (6.13)$$

Si riportano in Tabella 6-5 i valori di  $I_a$ ,  $n_0$  e  $T_D$  relativi ai sette accelerogrammi di calcolo:

Tabella 6-5 Parametri descrittivi dell'azione sismica per il calcolo della sovrappressione neutra con riferimento ad ognuno dei sette accelerogrammi SLC di progetto.

Accelerogramma	$I_a$ (m/s)	$n_0$ (Hz)	$T_D$ (s)
01-Castelnuovo-Assisi	0.136	0.007	48.3
02-Norcia-La_castellina-E	0.019	0.014	19.8
03-Norcia-La_Castellina-N	0.047	0.014	19.4
04-Mascioni-Campotosto-E	0.045	0.021	14.1
05-Norcia-La_castellina	0.037	0.019	9.4
06- Mascioni-Campotosto-N	0.049	0.021	12.6
07- Mascioni-Campotosto	0.0277	0.033	9.2

I coefficienti  $\alpha$  -  $\beta$  -  $\gamma$  -  $\delta$  -  $\varepsilon$  assumono i seguenti valori:

Tabella 6-6 Valori dei coefficienti per la stima del numero di cicli equivalenti.

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\varepsilon$
-1.629	-2.493	1.239	0.854	-0.307

Il numero di cicli necessari per indurre la liquefazione è determinato per mezzo dell'abaco proposto di De Alba et al. (1976) e di seguito riportato. Si definisce cyclic stress ratio (CSR) il rapporto tra lo sforzo di taglio ciclico  $\tau_{eq}$  e la tensione verticale efficace  $\sigma'_v$ .



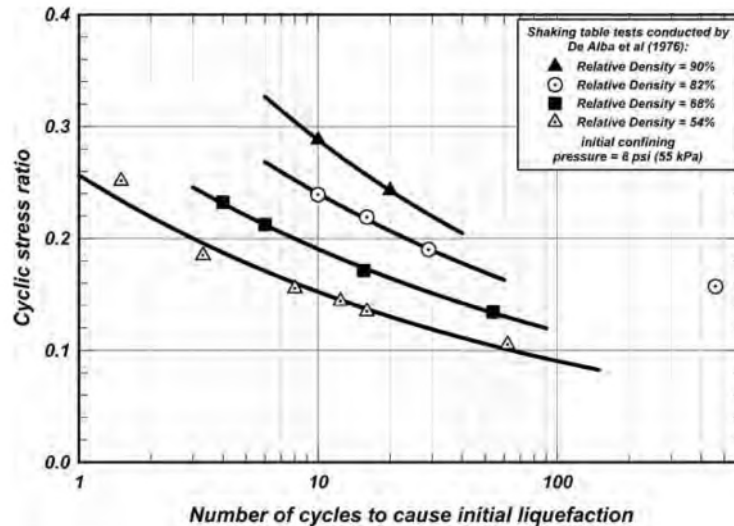


Figura 6-4 Numero di cicli necessario all'insorgere della liquefazione per terreni incoerenti di differente densità relativa.

### 6.1.3 Risultati della verifica con il metodo degli spostamenti di Newmark

Così come descritto nel precedente Paragrafo 6.1, l'applicazione del metodo di Newmark presuppone il calcolo di un'accelerazione critica che se superata innesca il moto del pendio sulla superficie di scorrimento più sfavorita. Per tale analisi sono stati posti unitari sia i coefficienti parziali amplificativi delle azioni che riduttivi dei parametri meccanici dei materiali, così come prescritto nel Paragrafo 7.11.3.5.2 delle NTC 2018 [1] "L'applicazione del metodo richiede la valutazione dell'accelerazione critica, che deve essere valutata con i valori caratteristici dei parametri di resistenza, e dell'azione sismica di progetto".

Si riportano in Tabella 6-7 i valori di accelerazione critica calcolati sia per la condizione di invaso alla quota di massima regolazione che nella condizione di invaso vuoto.

Tabella 6-7 Valori dell'accelerazione critica di Newmark.

Livello dell'invaso	$a_c$ (g)	
	Monte	Valle
Massima regolazione (229.0m.s.l.m.m.)	>0.5	>0.5
Invaso vuoto	0.486	>0.5

Per l'applicazione del metodo di Newmark si è considerato quindi un'accelerazione critica  $a_c=0.486g$ .

Essendo il valore dell'accelerazione critica calcolata maggiore del valore di picco dell'accelerazione attesa al sito  $PGA=0.095g$  (vedi Paragrafo 4.4) il metodo di Newmark restituisce un valore nullo dello spostamento ad indicare che l'azione sismica di progetto non produce delle superfici continue di plasticizzazione che inneschino fenomeni di instabilità nel corpo diga. Tale effetto è illustrato in Figura 6-5 dove si riportano gli accelerogrammi di verifica ed il valore critico dell'accelerazione.

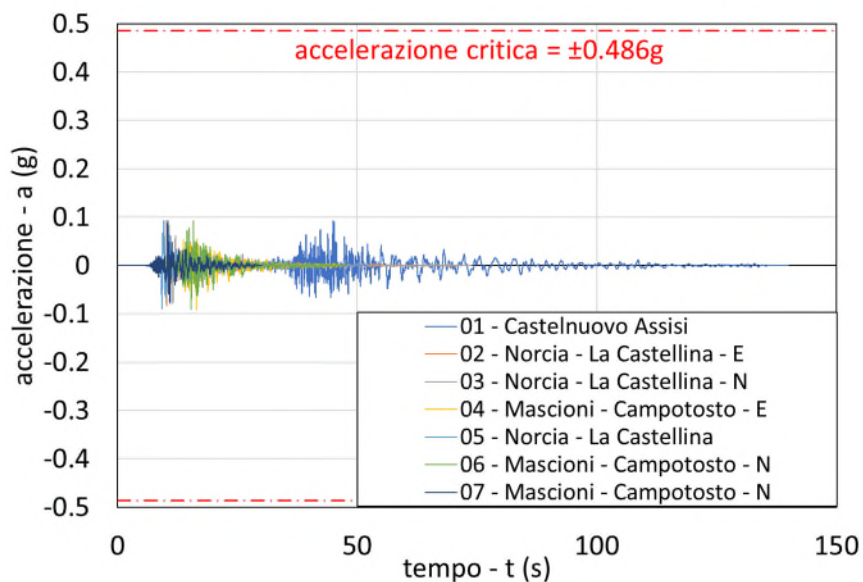


Figura 6-5 Confronto tra gli accelerogrammi di verifica e l'accelerazione critica di Newmark.

## 7 Verifica sismica – analisi dinamica al passo

### 7.1 Il software

Le verifiche sono state eseguite mediante modellazione numerica alle differenze finite con l'ausilio del software commerciale Itasca Flac v.8.1.

Si precisa che nelle figure di seguito proposte e raffiguranti i campi delle grandezze più significative ai fini dell'analisi, le unità di misura sono quelle del Sistema Internazionale (chilogrammo, metro, secondo).

### 7.2 La discretizzazione geometrica

Così come già riportato Paragrafo 5.2 relativo alle verifiche in condizioni di esercizio, poiché lo sbarramento presenta una geometria regolare in direzione longitudinale si è scelto di eseguire la verifica sulla sezione trasversale mediana della diga (Figura 4-1).

La geometria è stata numericamente discretizzata in elementi quadrangolari di dimensioni idonee alla corretta simulazione dei fenomeni di propagazione e riflessione delle onde sismiche. A tale proposito la massima dimensione di ogni elemento deve essere al massimo pari ad un ottavo (Kuhleimyer and Lysmer, 1973), un quinto (Lysmer *et al.*, 1975) della più piccola lunghezza d'onda considerata nelle analisi.

$$\Delta l = \frac{\lambda}{5 \div 8} = \frac{V_s}{(5 \div 8) f} \quad (7.1)$$

dove  $\lambda$ : lunghezza d'onda associata alla frequenza più elevata che contiene un'aliquota di energia significativa,  $V_s$ : velocità di propagazione delle onde di taglio nel materiale,  $f$ : valore di soglia della frequenza da modellare.

Di seguito si riportano i valori della massima dimensione degli elementi per ciascun materiale considerato nell'analisi. A tal proposito, non disponendo della velocità di propagazione delle onde di taglio nei filtri si è considerato a vantaggio di sicurezza il valore di velocità del contronucleo.

Tabella 7-1 Massima dimensione degli elementi della discretizzazione per ciascun materiale.

Materiale	$V_s$ (m/s)	$\Delta l$ (m)	$f_{MAX}$ (Hz)	f
Scogliera	1260	5.25	30	8
Contronuclei	1260	5.25		
Filtri	1260	5.25		
Nucleo	720	3.00		
Colmate	720	3.00		
Argille del tortoniano	1000	4.17		
Argille olistostromiche	1000	4.17		
Argille puddingoidi	1000	4.17		

con  $V_s$ : velocità di propagazione delle onde di taglio,  $\Delta l_{MAX}$ : dimensione massima ammissibile degli elementi per ciascun materiale,  $\Delta l$ : dimensione massima degli elementi per ciascun materiale, frequenza massima,  $f$ : fattore di calcolo adottato.

In Figura 7-1.a e Figura 7-2.b si riportano due schermate acquisite dal software di calcolo che riportano la discretizzazione della geometria. La prima figura descrive più in dettaglio la discretizzazione del corpo diga, mentre la seconda mostra il modello numerico completo. In particolare, il modello si estende in orizzontale per una distanza pari all'ingombro trasversale dello sbarramento per ognuno dei due lati ed in verticale sino ad una profondità pari al doppio dell'altezza della diga. Quest'ultima assunzione trova giustificazione nel fatto che la formazione marnosa e calcarenitica di base essendo caratterizzate da una velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s \geq 800 \text{ m/s}$  rappresentano di fatto la formazione rigida (bedrock).

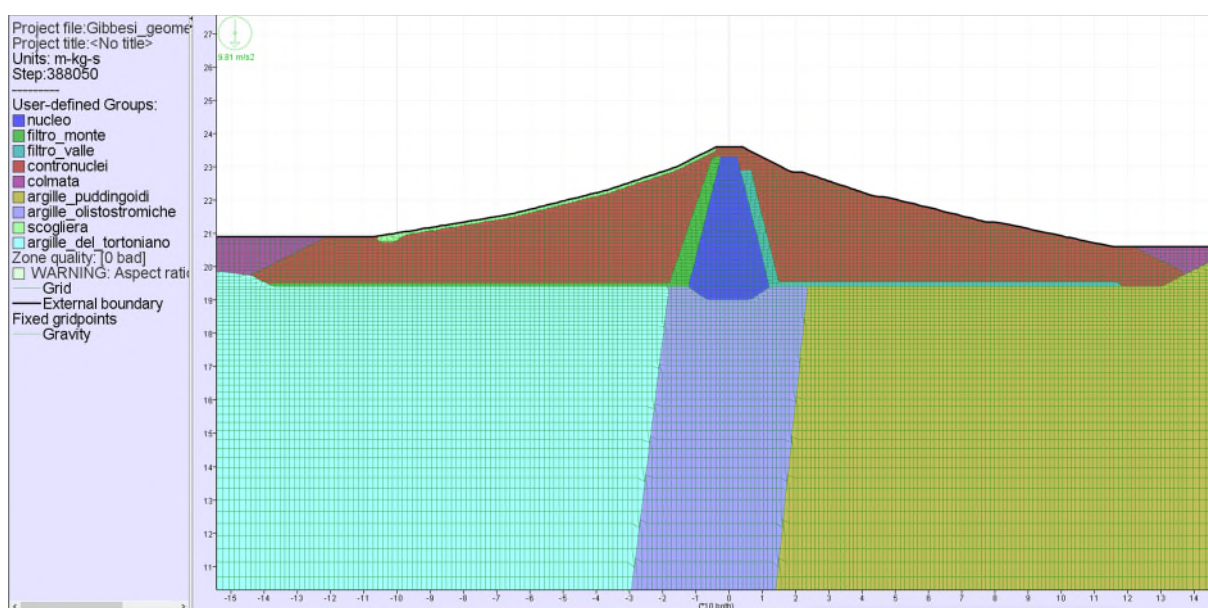


Figura 7-1 Dettaglio della discretizzazione della geometria del corpo diga.

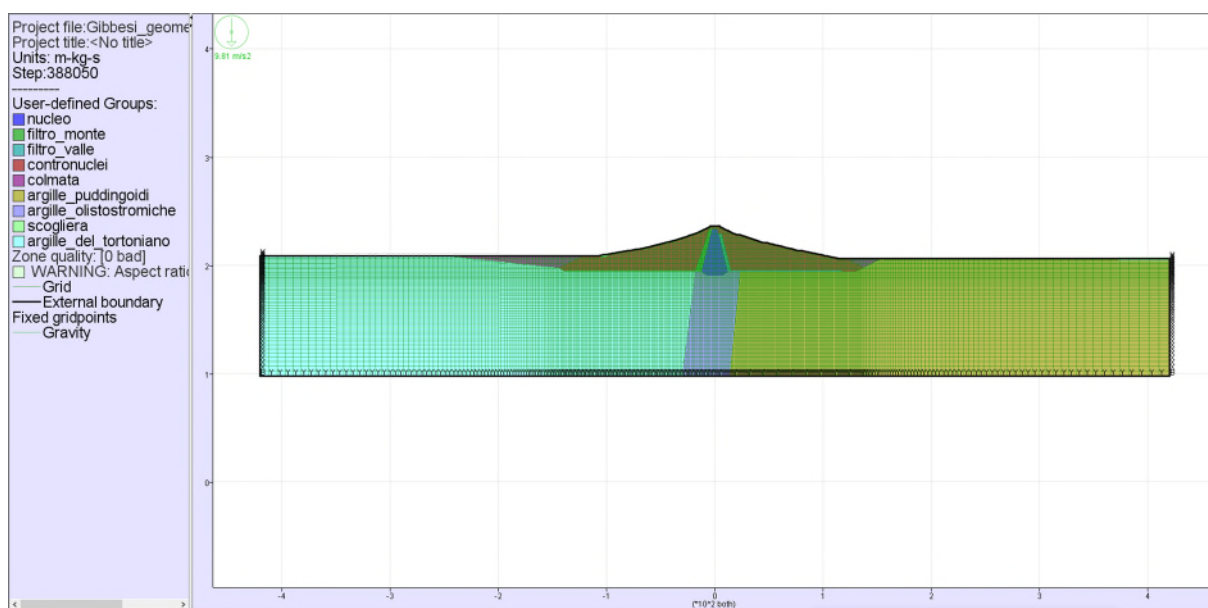


Figura 7-2 Discretizzazione del dominio geometrico del modello.



### 7.3 Modello geotecnico finalizzato all'analisi dinamica al passo

Il presente capitolo descrive il modello geotecnico adottato per la verifica sismica della diga.

Nella tabella di seguito si riassumono i parametri fisici dei materiali ricavati dall'analisi delle prove di laboratorio eseguite:

Tabella 7-2 Parametri fisici dei materiali adottati per la verifica sismica – analisi dinamica al passo

Materiale	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	n	k (cm/s)	w	wp	wl	Ip	Ic	Vs
Scogliera	20.0	18.9	0.21	1	/	/	/	/	/	/
Contronuclei	20.0	18.9	0.21	5 10 <sup>-4</sup>	/	/	/	/	/	1260
Filtri	20.0	18.9	0.21	5 10 <sup>-3</sup>	/	/	/	/	/	/
Nucleo	20.5	16.7	0.36	8 10 <sup>-9</sup>	0.18	0.16	0.46	0.3	0.93	720
Colmate	16.0	12.2	0.54	5 10 <sup>-4</sup>	/	/	/	/	/	/
Argille del tortoniano	19.8	15.6	0.42	5 10 <sup>-9</sup>	0.23	0.23	0.76	0.53	1	1000
Argille olistostromiche	18.8	14.8	0.46	5 10 <sup>-9</sup>	0.25	0.26	0.94	0.68	1.01	1000
Argille puddingoidi	19.7	16.3	0.4	5 10 <sup>-9</sup>	0.23	0.21	0.76	0.55	0.96	1000

Con  $\gamma_{nat}$ : peso specifico naturale,  $\gamma_d$ : peso specifico asciutto, n: porosità, k: permeabilità, w: contenuto d'acqua, wp: limite plastico, wl: limite liquido, Ip: indice di plasticità, Ic: indice di consistenza e Vs: velocità di propagazione delle onde di taglio.

Di seguito si propone invece la tabella riassuntiva dei parametri meccanici caratteristici dei materiali.

Tabella 7-3 Parametri fisici e meccanici dei materiali definiti nella "Studio Geotecnico".

Materiale	c (kPa)	$\phi$ (°)	G (MPa)	K (MPa)
Scogliera	10	40	96	207
Contronuclei	10	45	138	300
Filtri	10	35	154	334
Nucleo	33	24	193	418
Colmate	10	10	308	668
Argille del tortoniano	31	23	308	668
Argille olistostromiche	17	27	196	424
Argille puddingoidi	23	24	183	398

Con c: coesione,  $\phi$ : angolo d'attrito, G: modulo di rigidezza a taglio, K: modulo di rigidezza volumetrico.

Data la granulometria grossolana del materiale componente i rinfianchi e l'elevata consistenza dei terreni di fondazione, non è stato possibile effettuare un campionamento indisturbato dei materiali tale da eseguire prove di laboratorio per la caratterizzazione dei parametri meccanici strettamente necessari alle verifiche sismiche.

Per ottemperare a questa situazione indesiderata, ma comunque condivisa da una significativa parte delle dighe in terra italiane si è proceduto seguendo la seguente procedura

- Sulla base delle proprietà dei materiali (indice di plasticità  $I_p$ , grado di sovraconsolidazione OCR, coefficiente di spinta a riposo  $K_0$ ) e dei parametri caratteristici dell'azione sismica (numero di cicli N e frequenza f) sono state ricavate le curve di decadimento del modulo di rigidezza al taglio  $G/G_0$  (con G modulo di rigidezza al taglio e  $G_0$  modulo di rigidezza al taglio iniziale del materiale) e di damping in funzione della deformazione angolare  $\gamma$  mediante la relazione proposta da Darendeli (2001).
- Data la curva di decadimento del modulo di rigidezza al taglio  $G/G_0$ , il valore del modulo di rigidezza al taglio iniziale di ogni materiale dedotto dalle prove soniche down-hole eseguite in-



situ ed i parametri di resistenza  $C'$  e  $\phi'$  dedotti dalle prove meccaniche eseguite (nell'ambito del presente studio e dello studio progettuale) sono state ricavate le curve tensione deformazione dei singoli materiali.

- c) Per ogni materiale è stato ricavato il modulo di rigidezza al taglio come il modulo di rigidezza secante corrispondente al 50% della resistenza.
- d) Dato il modulo di rigidezza al taglio ed un coefficiente di Poisson  $\nu=0.3$  tipico dei terreni in oggetto e comunque tipicamente poco variabile nei i terreni naturali è stato ricavato il modulo di rigidezza volumetrico di ogni materiale.

La sopra descritta procedura viene descritta di seguito nel dettaglio con riferimento alle argille del tortoniano.

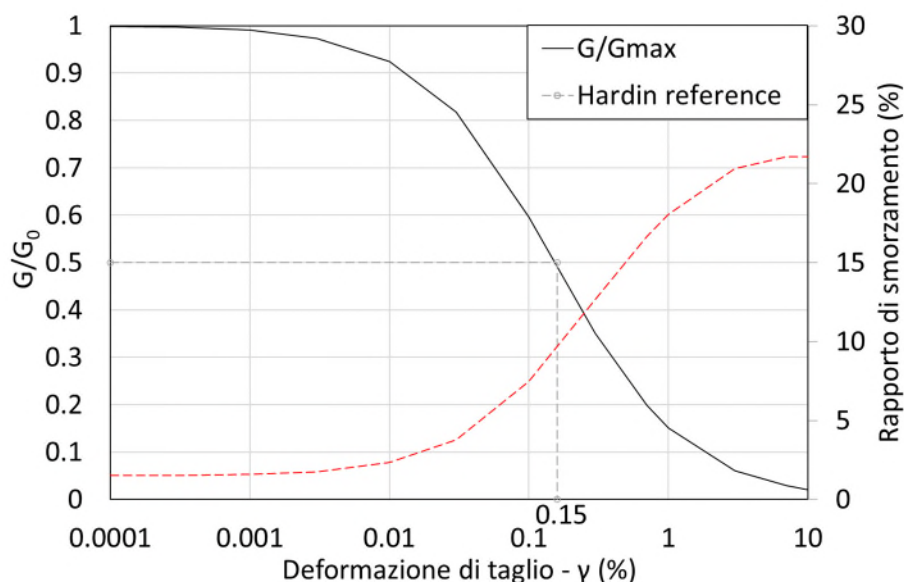
Nella tabella seguente si riportano i parametri fisici e meccanici delle argille del tortoniano e del moto sismico adottati per la ricostruzione della curva di decadimento del modulo di rigidezza e di damping.

*Tabella 7-4 Parametri del materiale e del moto sismico adottati per la ricostruzione della curva di decadimento del modulo di rigidezza e di damping per le marne alterate.*

Materiale	$I_p$	OCR	$\phi$ (°)	$K_0$	N	f (Hz)
Marne alterate	0.53	2	23	0.61	10	5

Con  $I_p$ : indice di plasticità, OCR: grado di sovraconsolidazione,  $\phi$ : angolo d'attrito,  $K_0$  coefficiente di spinta laterale a riposo, N: numero di cicli equivalenti del sisma, f: frequenza fondamentale del moto sismico.

Sulla base dei parametri sopra esposti, la relazione di Darendeli (2021) restituisce le curve riportate di seguito.



*Figura 7-3 curva di decadimento e di damping ottenuta per le marne alterate mediante la relazione di Darendeli (2021).*

Dato il valore della rigidezza a taglio iniziale del materiale  $G_0=1590\text{MPa}$ , un angolo d'attrito  $\phi'=23^\circ$  ed una coesione  $c'=31\text{kPa}$ , la curva di decadimento restituisce l'andamento tensione deformazione riportato in Figura 7-4. Sulla base di quest'ultima si definisce un valore del modulo di rigidezza al taglio  $G=308\text{MPa}$  e quindi adottando un valore del coefficiente di Poisson  $\nu=0.3$  un modulo di rigidezza volumetrico  $K=668\text{MPa}$ .

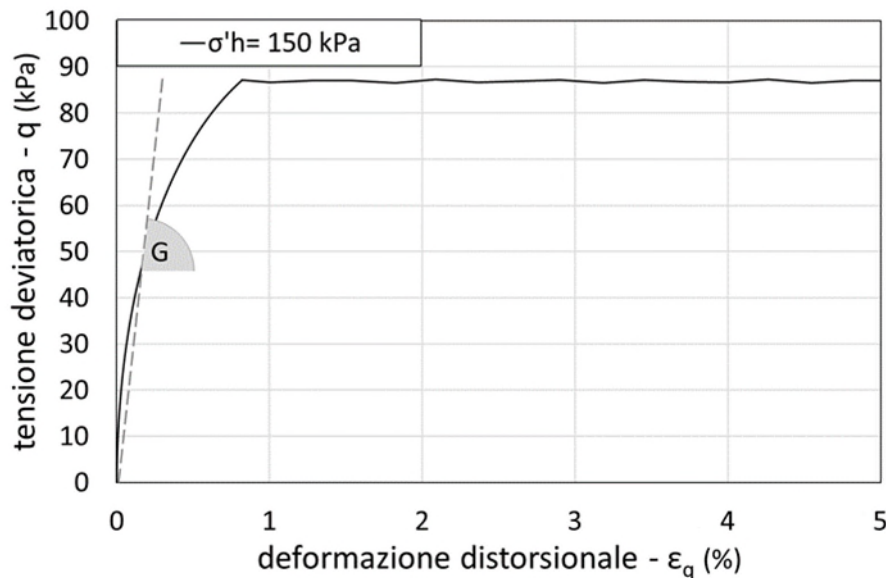


Figura 7-4 Curva tensione deformazione ricostruita per le marne alterate.

Nella tabella seguente si riportano i parametri meccanici dedotti per tutti i materiali secondo la procedura esposta.

Tabella 7-5 Parametri meccanici dei materiali adottati nelle verifiche sismiche – analisi dinamica al passo.

Materiale	$\varphi$ (°)	c (kPa)	OCR	$V_s$ (m/s)	$G_0$ (Mpa)	G (Mpa)	K (Mpa)
Scogliera	40	10	1	1260	3059	96	207
Contronuclei	45	10	1	1260	3059	138	300
Filtri	35	10	1	1260	3059	154	334
Nucleo	24	33	2	720	882	193	418
Colmate	10	10	1	720	644	308	668
Argille del tortoniano	23	31	2	1000	1590	308	668
Argille olistostromiche	27	17	3	1000	1509	196	424
Argille puddingoidi	24	23	2	1000	1662	183	398

In Figura 7-5 le curve di decadimento del modulo di rigidezza e di damping individuate in questo studio per i vari materiali vengono confrontati con i campi di variabilità letteratura da Seed et al. (1986) e Rollins et al. (1998). Il confronto prova l'attendibilità delle correlazioni individuate.

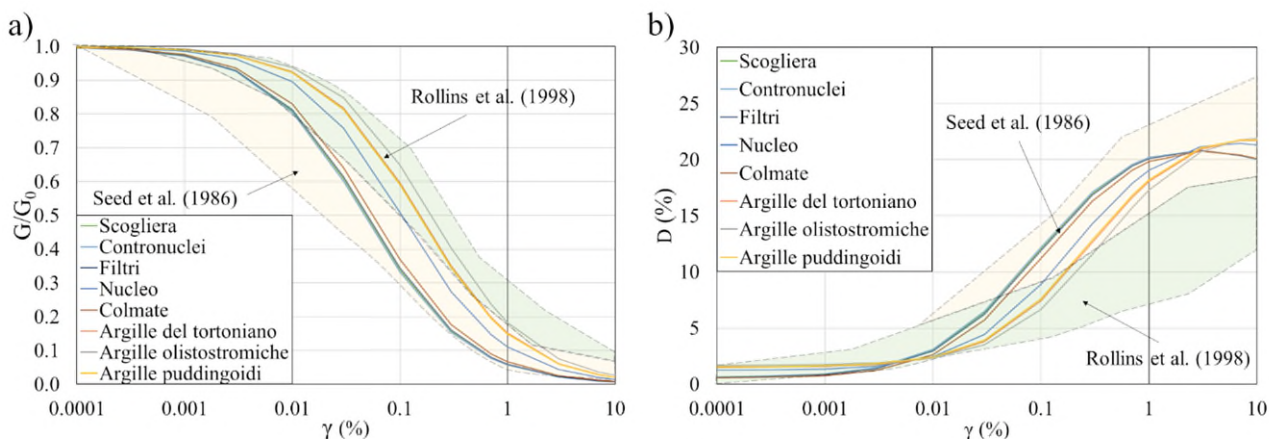


Figura 7-5 Confronto tra le curve di decadimento individuate per i materiali in questo studio ed i campi di variazione definiti in letteratura da Seed et al. (1986) e Rollins et al. (1998).

Figura 7-6 riporta inoltre il confronto tra le curve di decadimento del modulo di rigidità e di damping individuate in questo studio e quelle proposte da Vucetic and Dobry (1991) al variare dell'indice di plasticità  $I_p$  dei materiali. Si nota come le curve adottate nella presente analisi per i vari materiali, caratterizzati da  $20 < I_p < 39\%$  ricadano nell'intervallo di plasticità compreso tra 15 e 50% individuato dagli autori a conferma dell'attendibilità della calibrazione dei modelli.

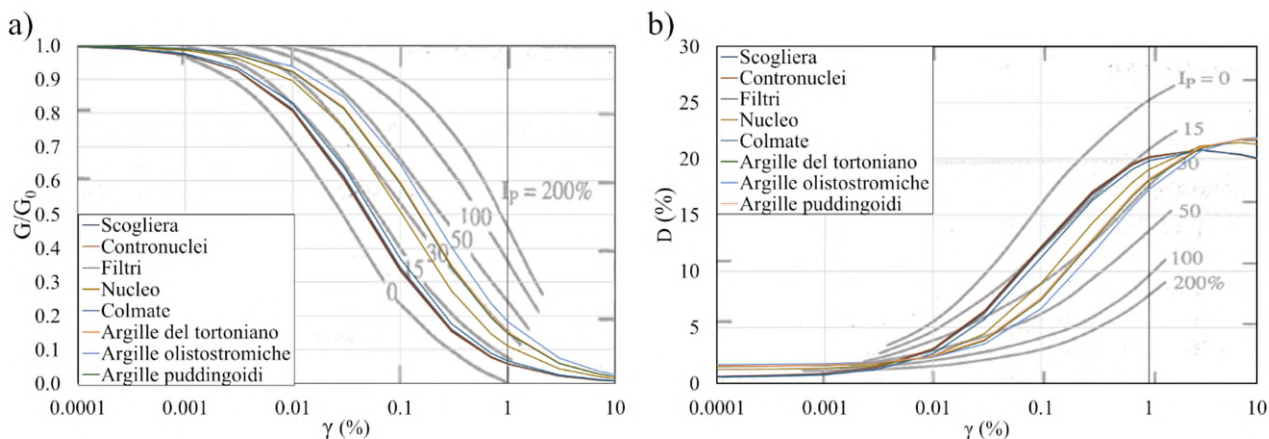


Figura 7-6 Confronto tra le curve di decadimento individuate per i materiali in questo studio ed i campi di variazione definiti in letteratura da Vucetic and Dobry (1991).

Al fine di ottenere un modello della diga che sia numericamente gestibile, ma al contempo accurato, la sezione di verifica è stata semplificata come illustrato nei punti di seguito riportati:

- gli elementi influenti ai fini della verifica (parapetti, cordoli in calcestruzzo, etc.) non sono stati considerati nel modello;
- la pavimentazione stradale del coronamento è stata introdotta come un carico uniformemente distribuito pari al peso proprio della stessa per il suo spessore.
- la galleria di drenaggio non è stata introdotta nel modello essendo gli elementi strutturali soggetti ad una verifica specifica;

## 7.4 Deconvoluzione dell'input sismico

Al fine di introdurre alla base del modello numerico (corrispondente alla formazione rigida di base) un input sismico che sia congruente con gli accelerogrammi di progetto previsti su affioramento rigido, gli accelerogrammi definiti nei Paragrafi 4.4.1 e 4.4.2, rispettivamente per lo stato limite di danno e collasso, sono stati sottoposti ad una procedura di deconvoluzione monodimensionale lineare equivalente adoperando il software Deepsoil v7.

Con riferimento allo schema riportato in Figura 7-7 gli accelerogrammi di progetto sono stati quindi deconvolti alla base del modello (circa 108m dal piano di fondazione della diga, vedi Paragrafo 7.2).

Come sopra accennato è stato adoperato il software Deepsoil (Hashash and Park 2001, 2002; Park and Hashash 2004) nella sua versione v7. Il programma implementa un modello MDOF lumped mass utilizzando un modello costitutivo del terreno non lineare di tipo MKZ modificato (per ulteriori approfondimenti far riferimento a Hashash et al. 2017).

Data l'impossibilità di ottenere campioni indisturbati della formazione rigida di base su cui eseguire un'ideale caratterizzazione geotecnica sono stati adottati parametri costitutivi di letteratura ed in particolare le curve di decadimento del modulo di rigidezza e di damping proposte da Schnabel (1973). I parametri adottati per la deconvoluzione sono riassunti in Tabella 7-6.

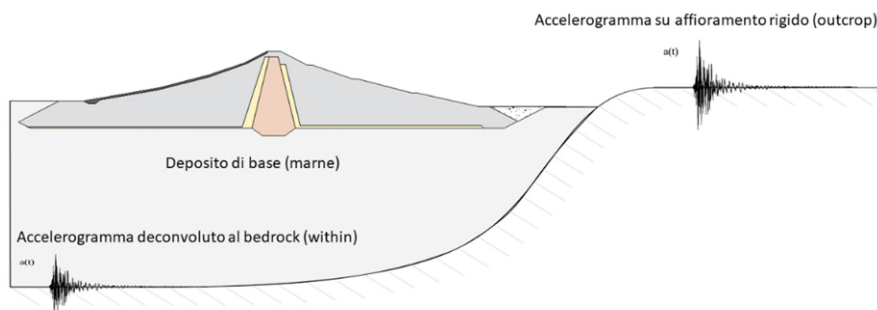


Figura 7-7 Schema di riferimento per la procedura di deconvoluzione.

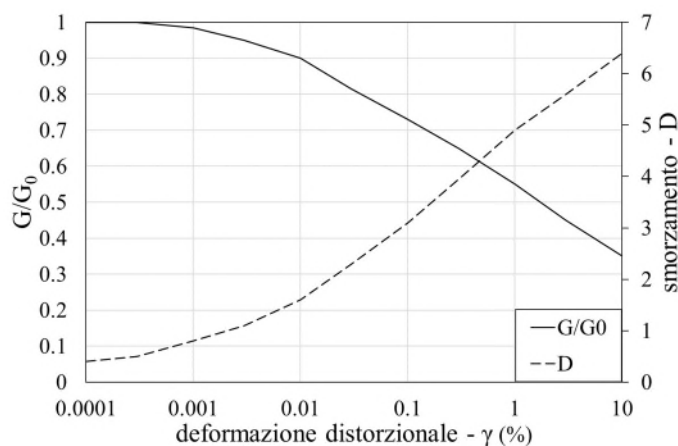


Figura 7-8 Curve di decadimento del modulo di rigidezza e di smorzamento con la deformazione distorsionale adottate per la deconvoluzione delle azioni sismiche (Schnabel, 1973).



Tabella 7-6 Parametri fisici della formazione rigida e parametri di calibrazione del modello MKZ adottati per la deconvoluzione degli accelerogrammi.

H (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$D_{min}$ (%)	$\gamma_{ref}$ (%)	$\sigma_{ref}$ (MPa)	$\beta$	s	b	d
92	19	960	0.256	0.292	0.18	0.495	0.45	0	0

Con H: spessore dello strato;  $\gamma$ : peso specifico;  $V_s$ : velocità di propagazione delle onde di taglio,  $D_{min}$ ,  $\gamma_{ref}$ ,  $\sigma_{ref}$ ,  $\beta$ , s b d: parametri di calibrazione del modello MKZ.

Nelle figure successive si propongono tutti i segnali sismici identificati per la verifica deconvoluti alla base del modello numerico.

#### 7.4.1 Deconvoluzione Stato Limite di Danno

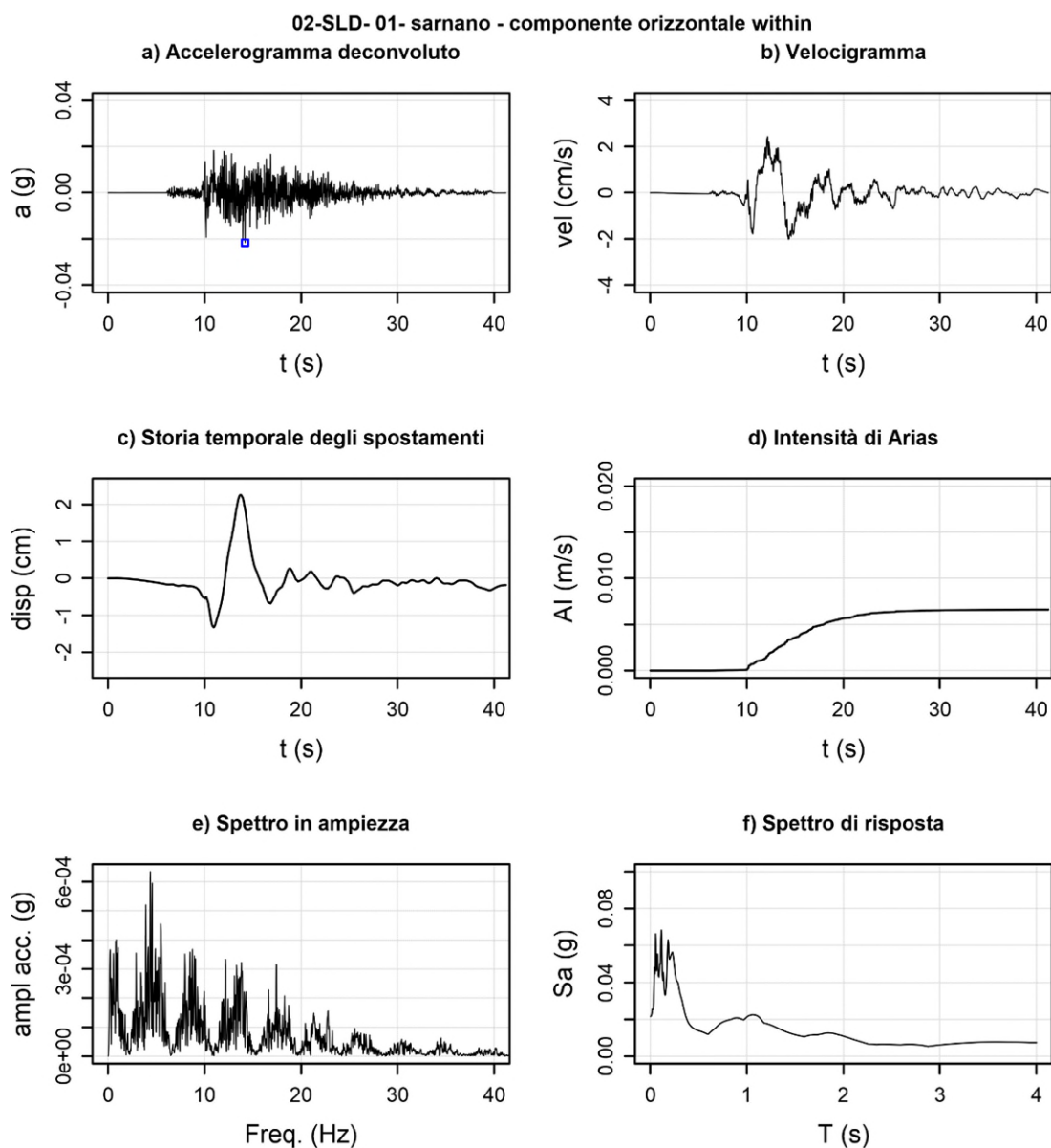


Figura 7-9 Input sismico SLD-01-Sarnano (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.



**02-SLD- 01- sarnano - componente verticale within**

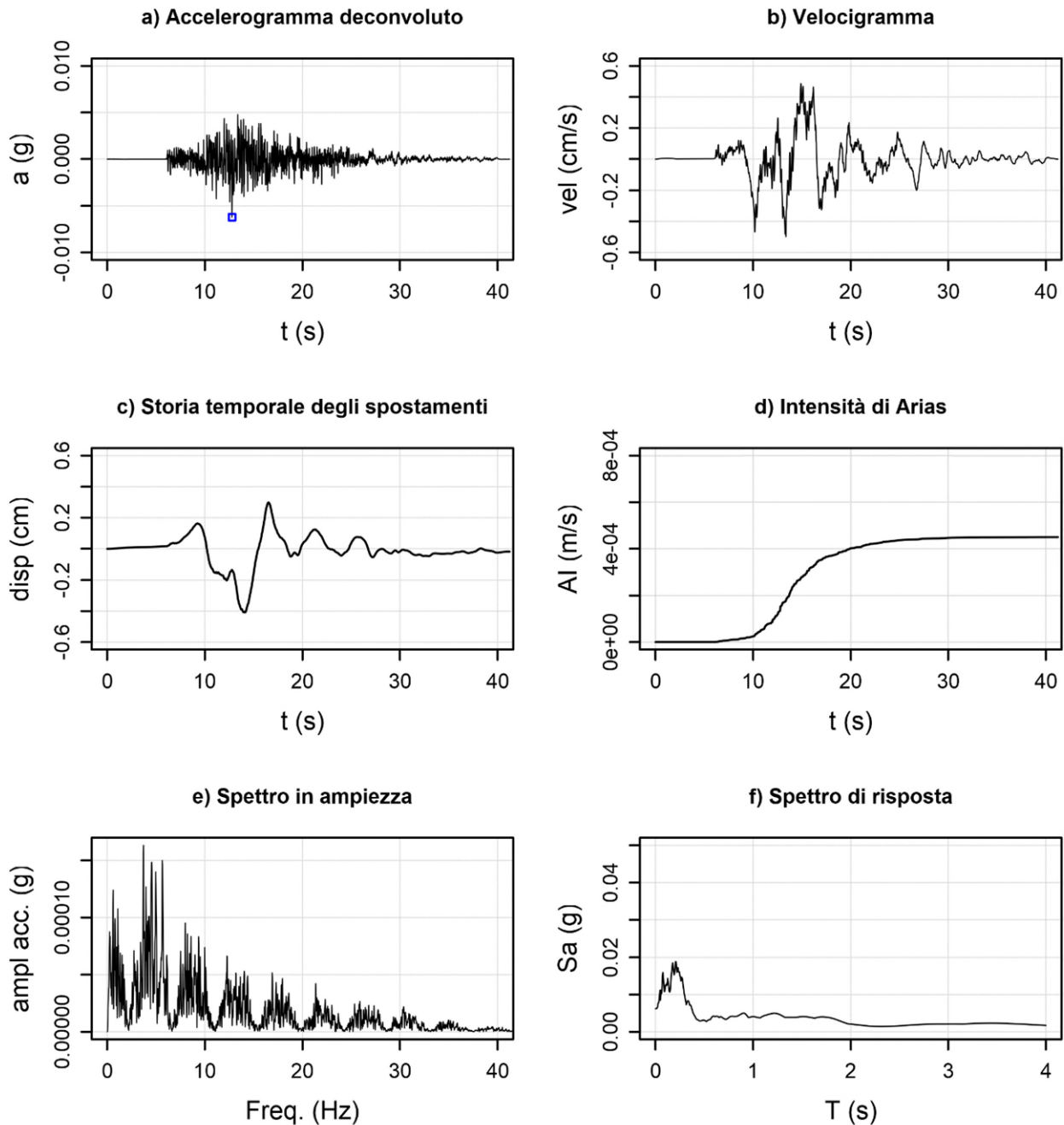


Figura 7-10 Input sismico SLD-01-Sarnano (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 02- castelnuovo\_assisi - componente orizzontale within**

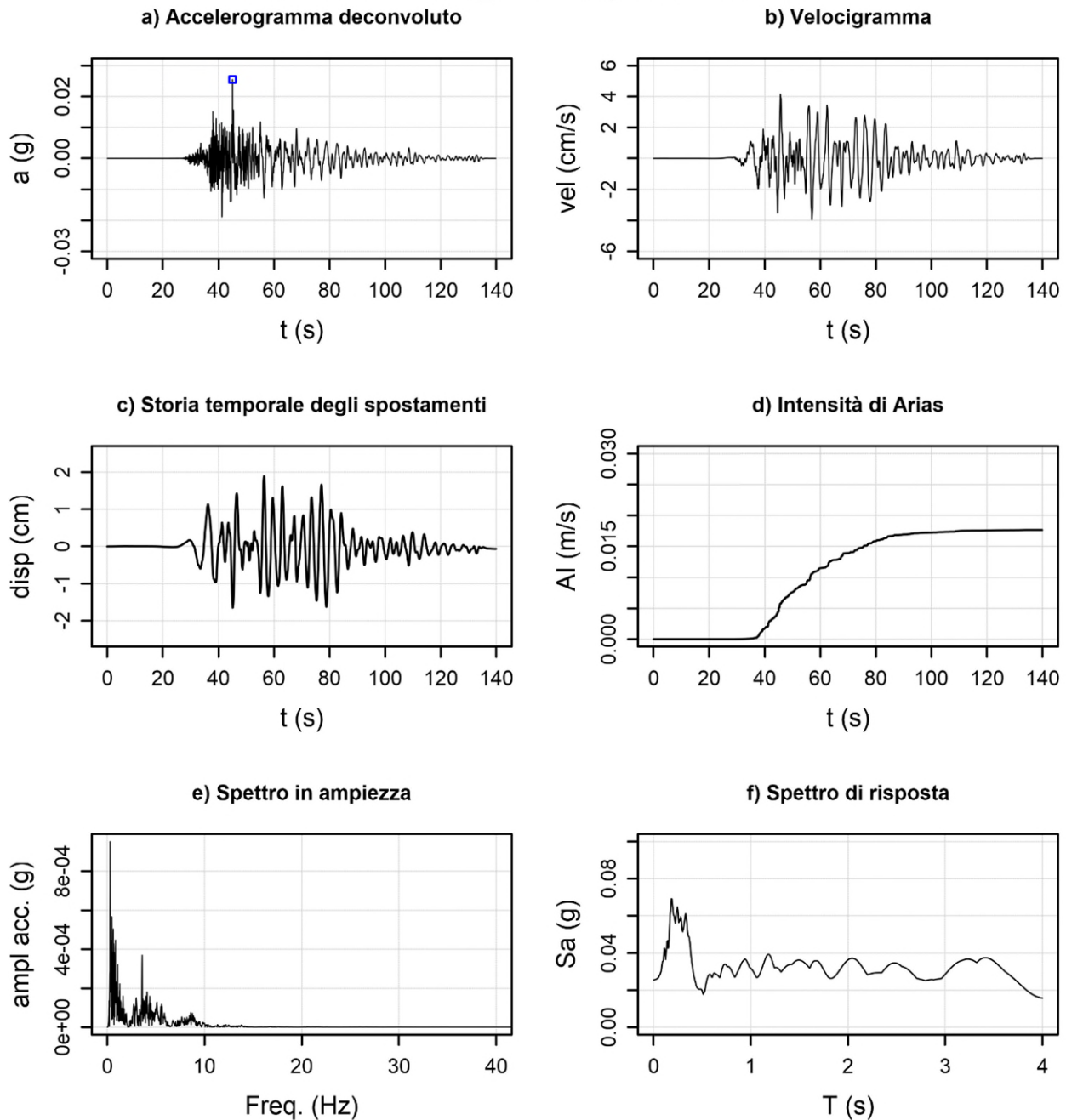


Figura 7-11 Input sismico SLD-02-Assisi (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 02- castelnuovo\_assisi - componente verticale within**

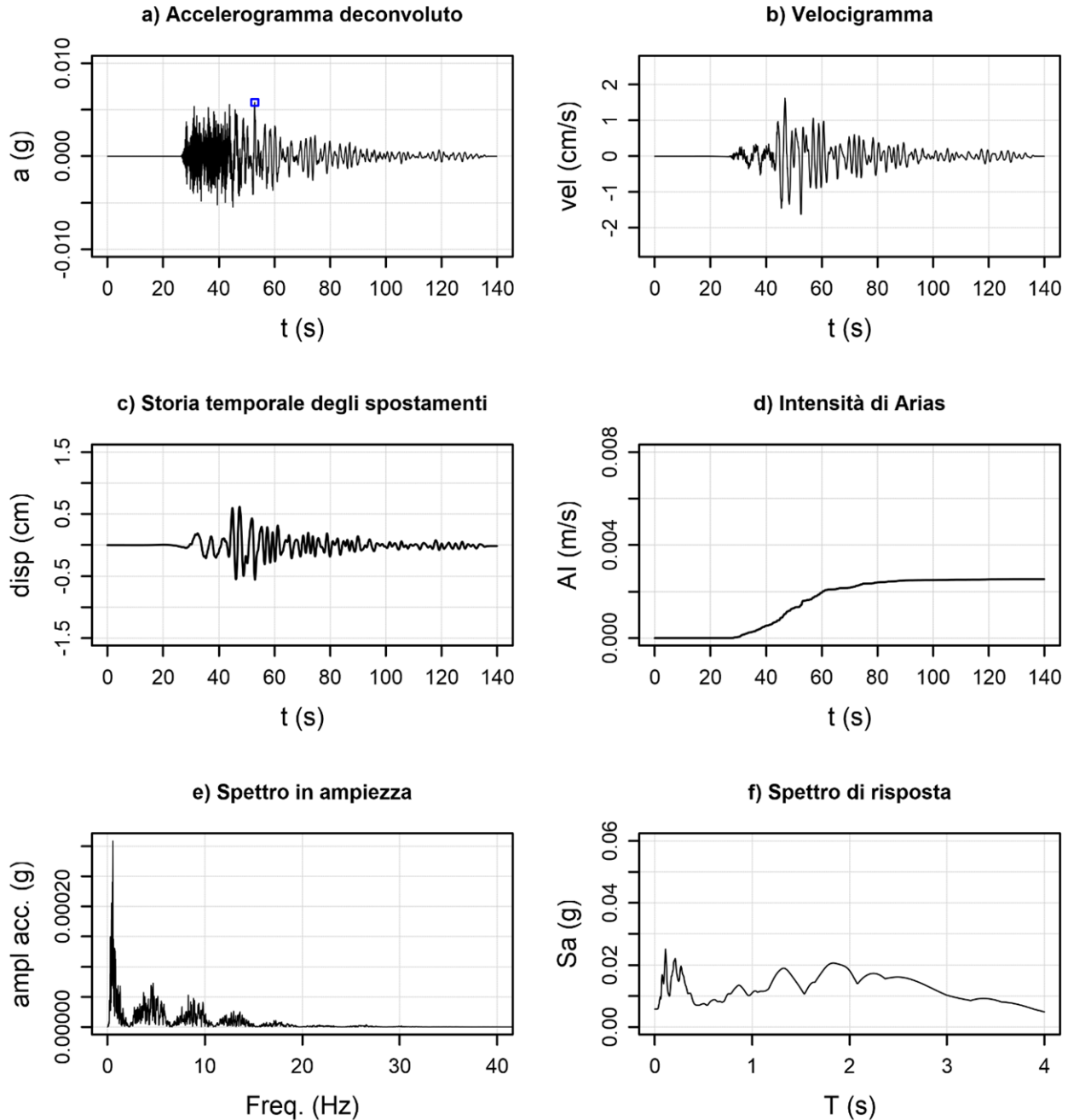
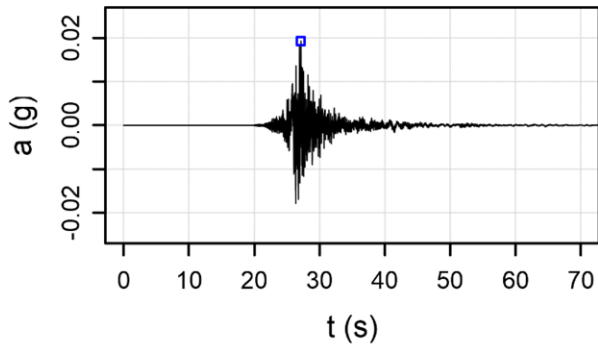


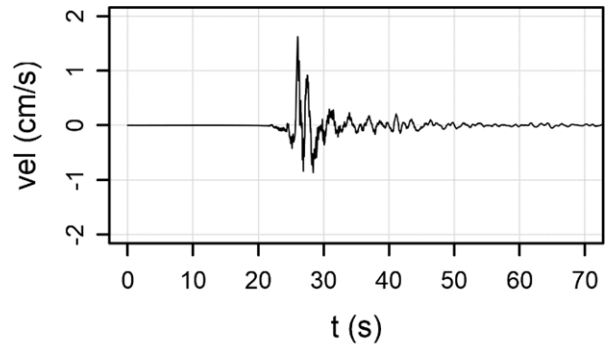
Figura 7-12 Input sismico SLD-02-Assisi (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 03- monte\_daria - componente orizzontale within**

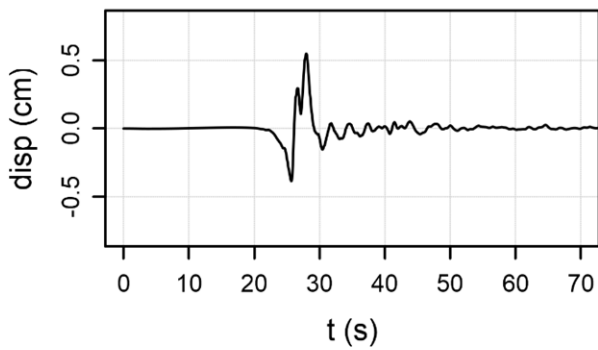
**a) Accelerogramma deconvoluto**



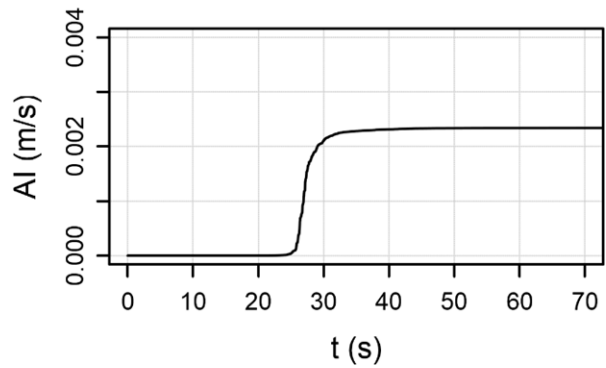
**b) Velocigramma**



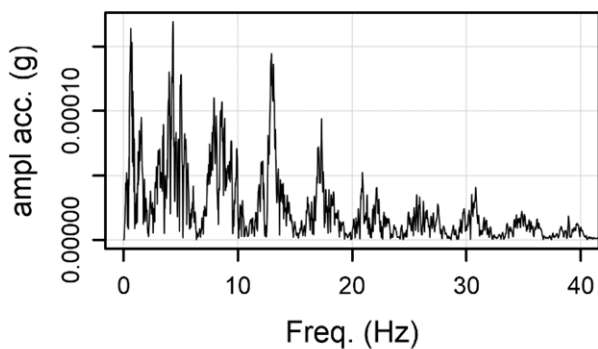
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

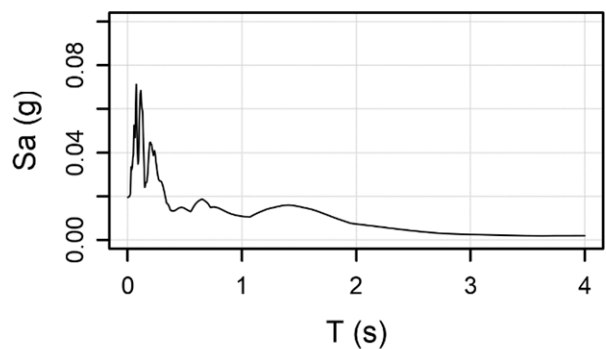


Figura 7-13 Input sismico SLD-03-Monte\_Daria (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 03- monte\_daria - componente verticale within**

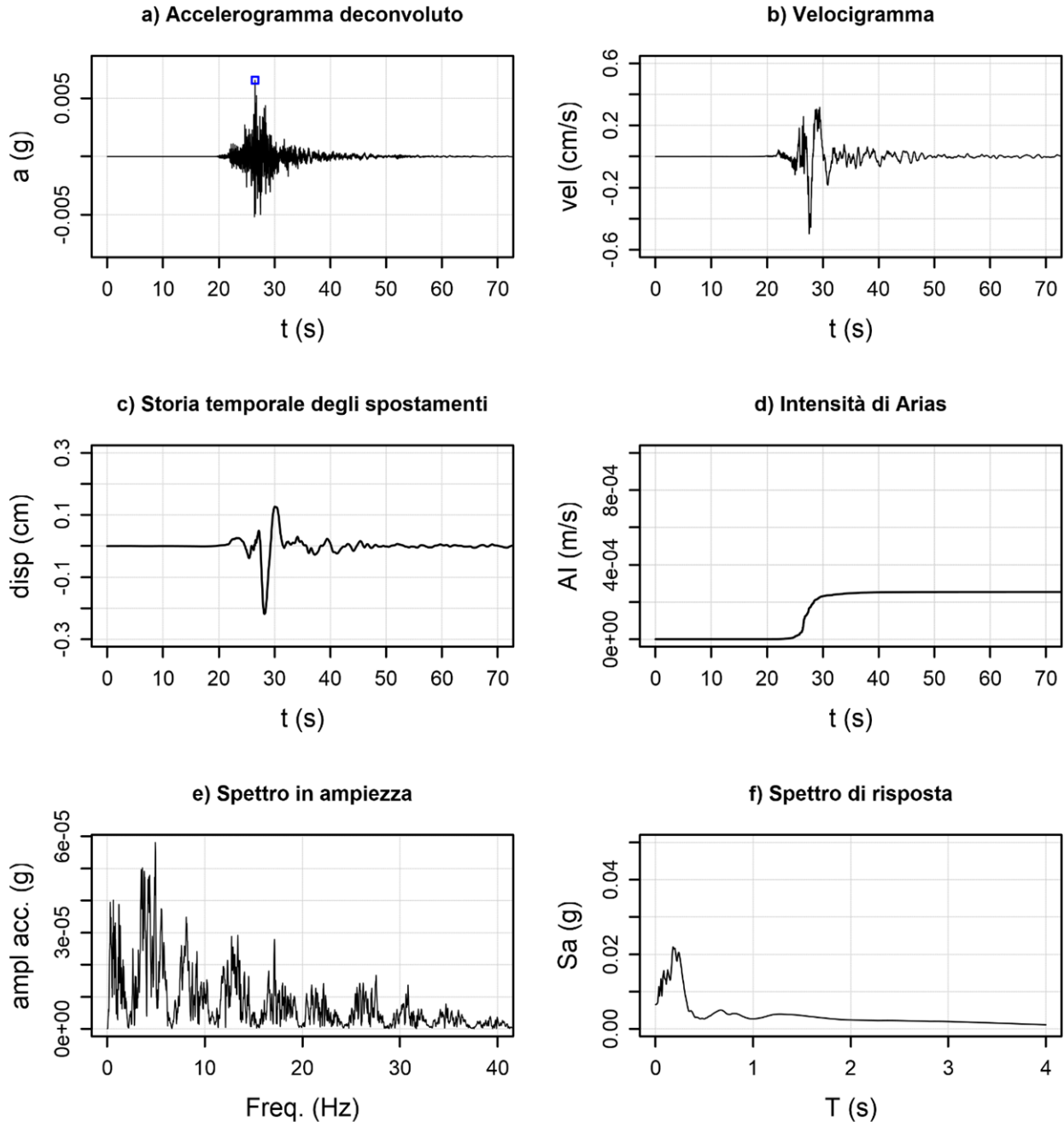


Figura 7-14 Input sismico SLD-03-Monte\_Daria (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.



**02-SLD- 04- treia - componente orizzontale within**

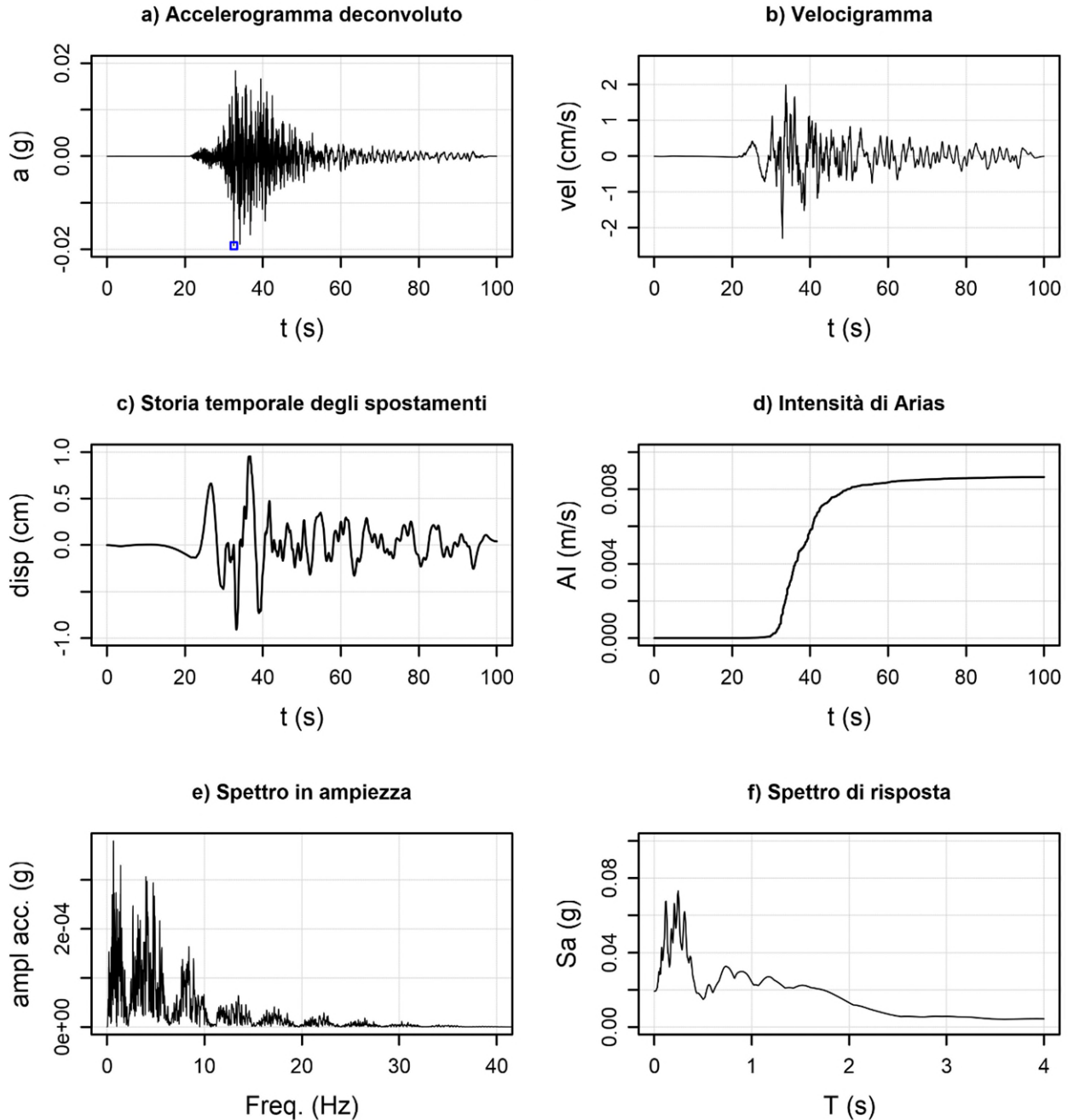


Figura 7-15 Input sismico SLD-04-Treia (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 04- treia - componente verticale within**

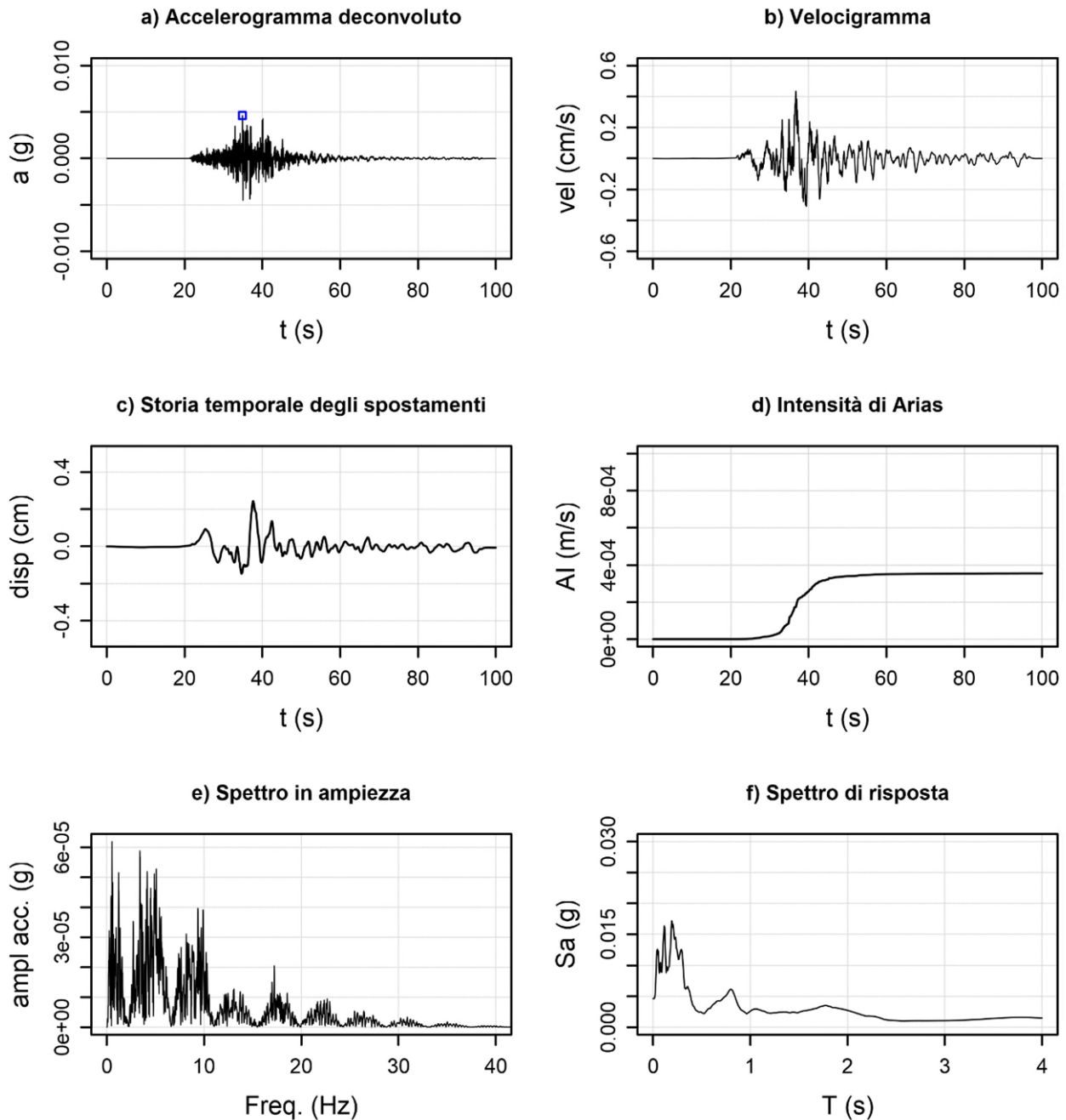


Figura 7-16 Input sismico SLD-04-Treia (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 05- celano - componente orizzontale within**

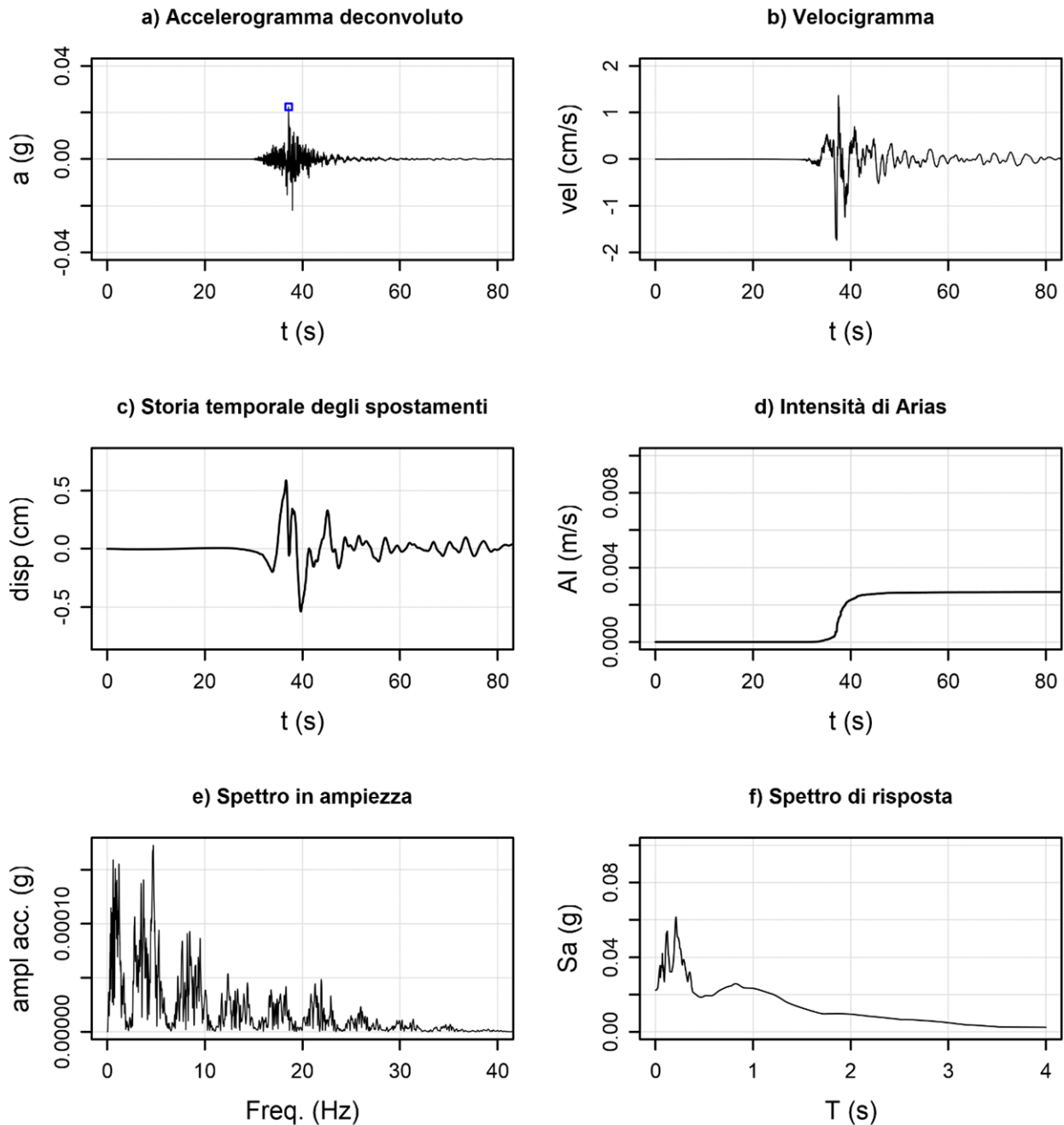


Figura 7-17 Input sismico SLD-05-Celano (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 05- celano - componente verticale within**

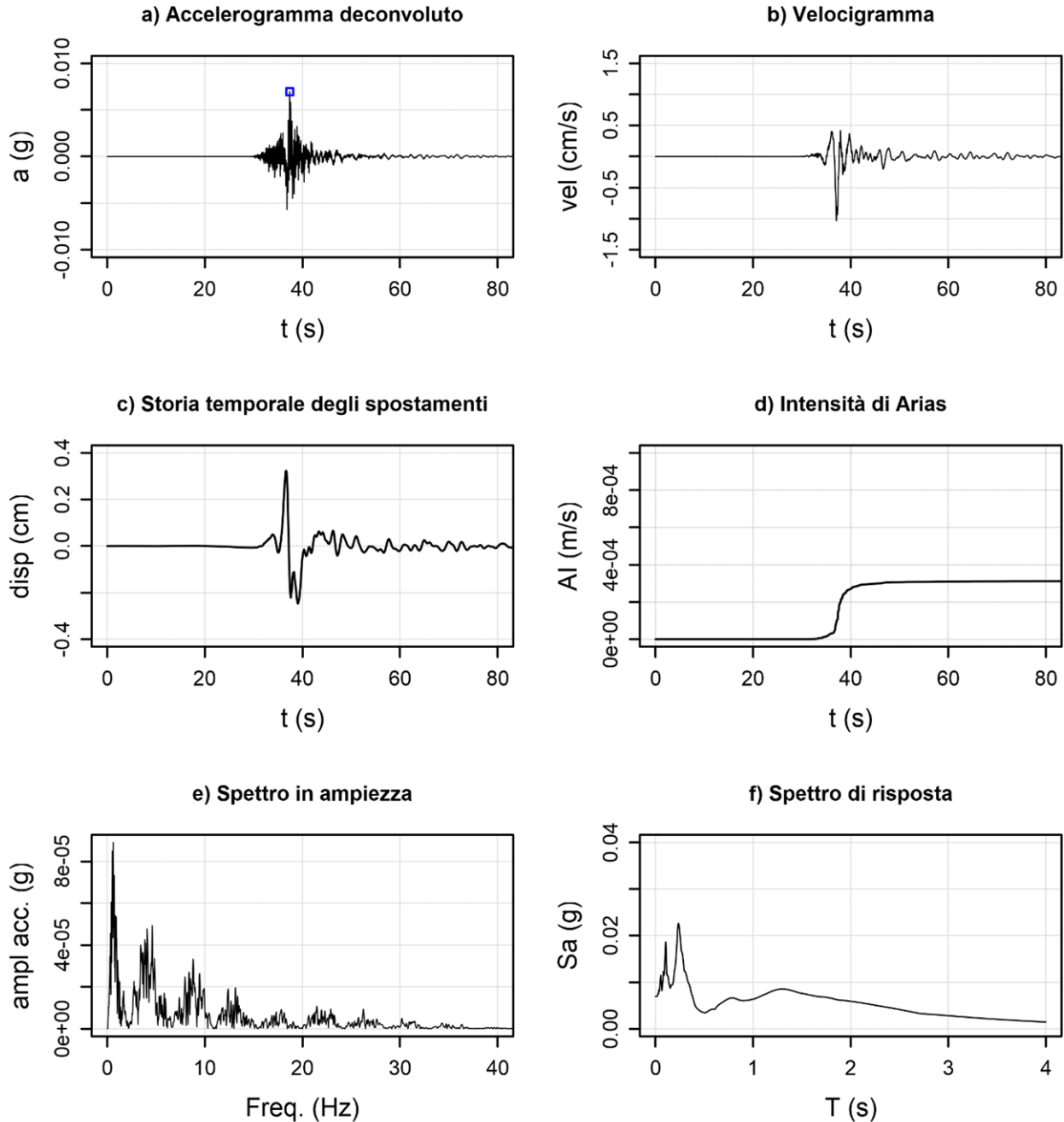
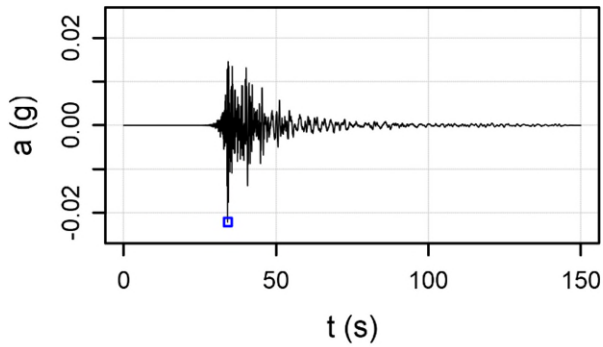


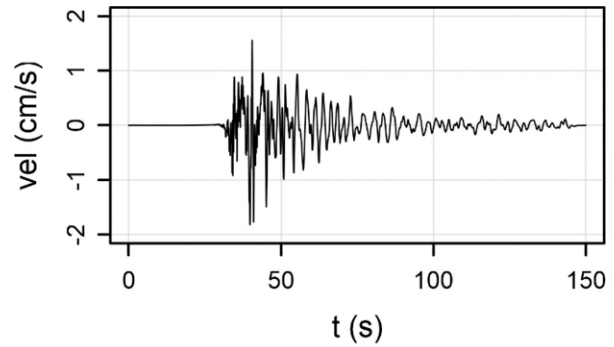
Figura 7-18 Input sismico SLD-05-Celano (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 06- sant\_agostino - componente orizzontale within**

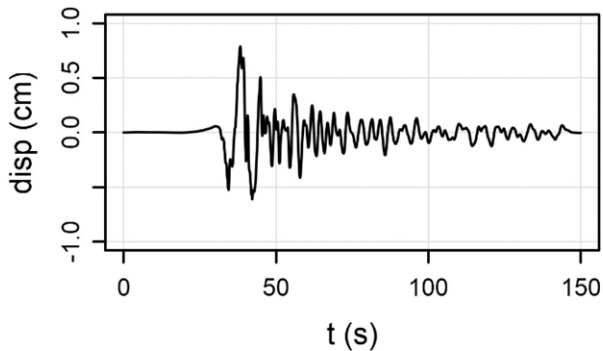
**a) Accelerogramma deconvoluto**



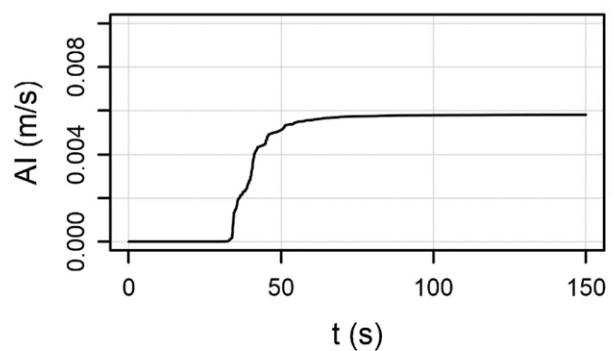
**b) Velocigramma**



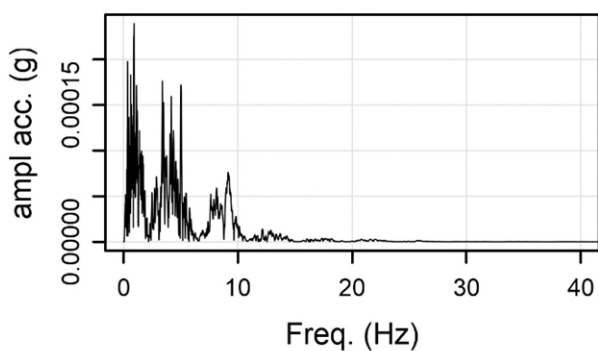
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

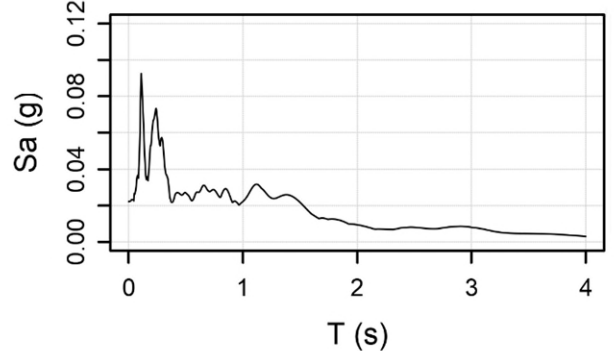


Figura 7-19 Input sismico SLD-06-Sant'Agostino (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.



**02-SLD- 06- sant\_agostino - componente verticale within**

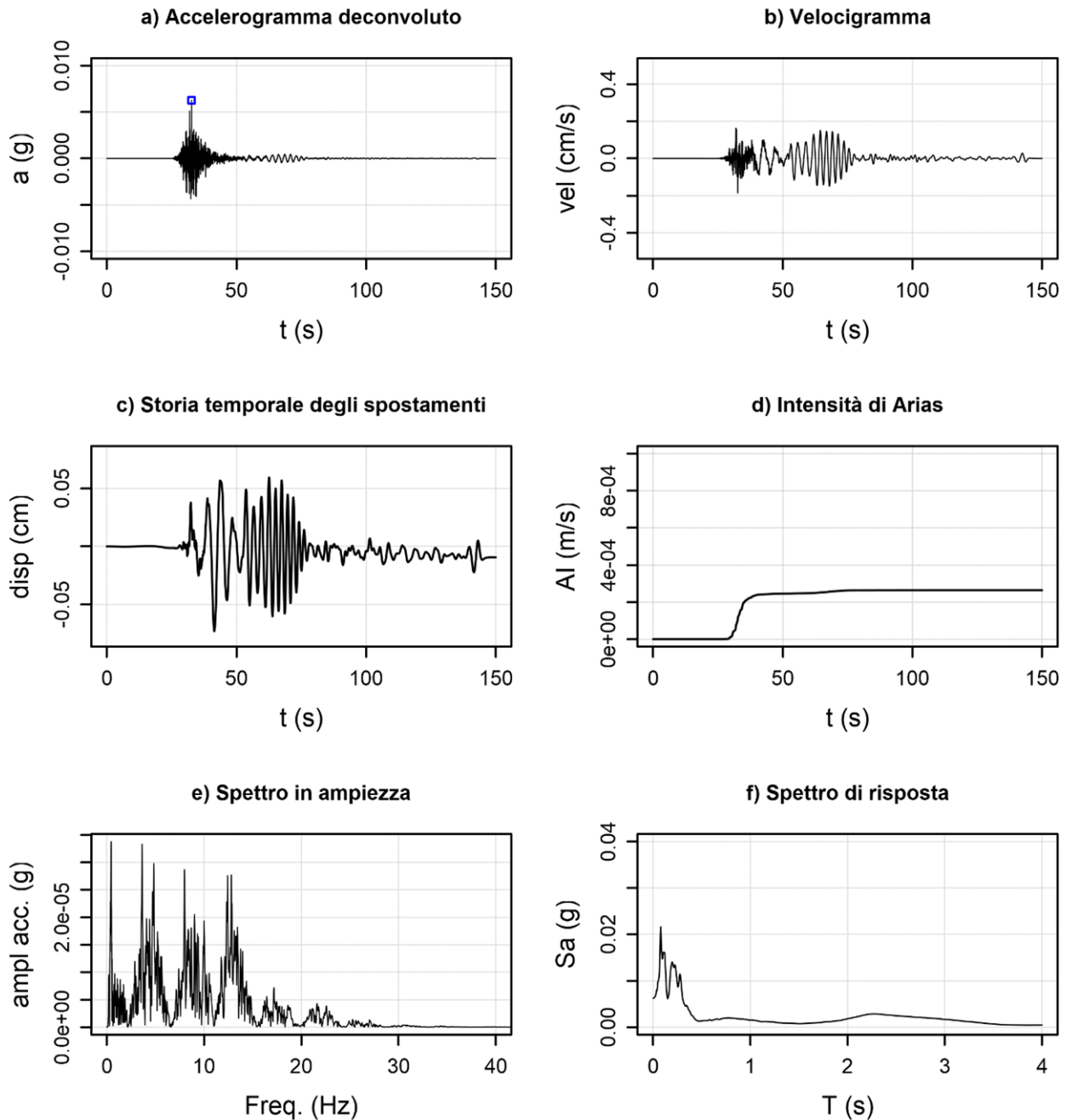
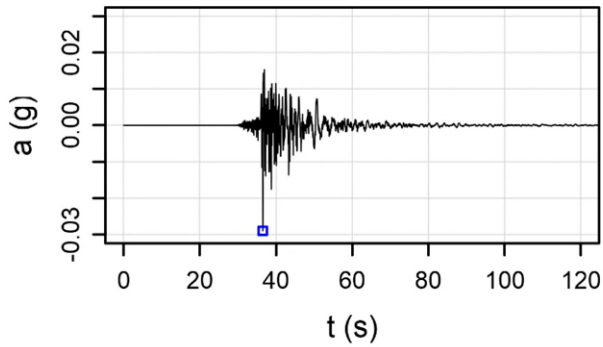


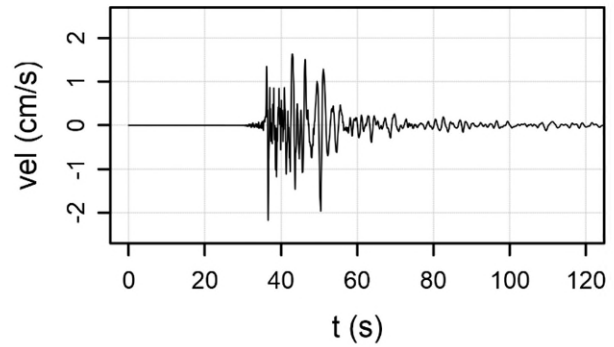
Figura 7-20 Input sismico SLD-06-Sant'Agostino (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 07- san\_lorenzo\_pinaco - componente orizzontale within**

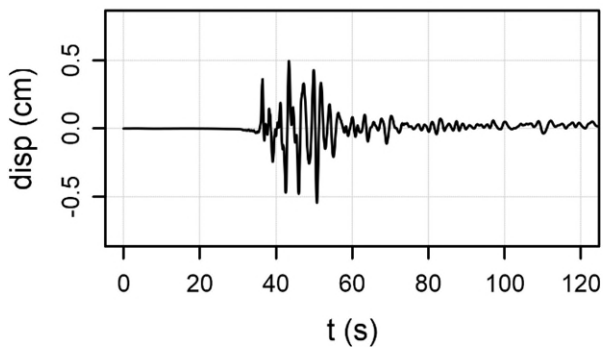
**a) Accelerogramma deconvoluto**



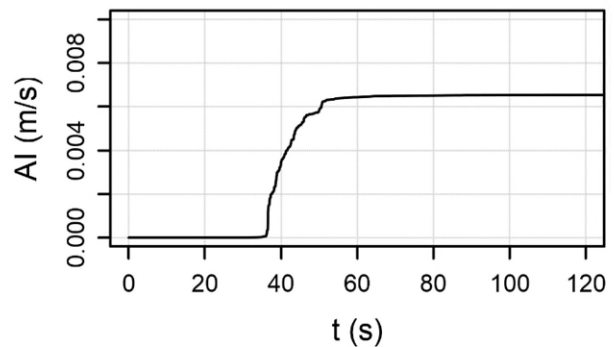
**b) Velocigramma**



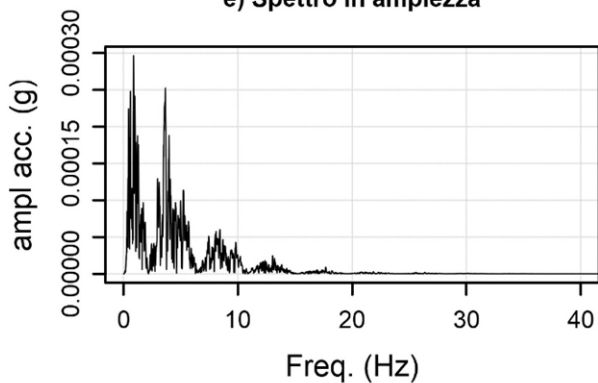
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

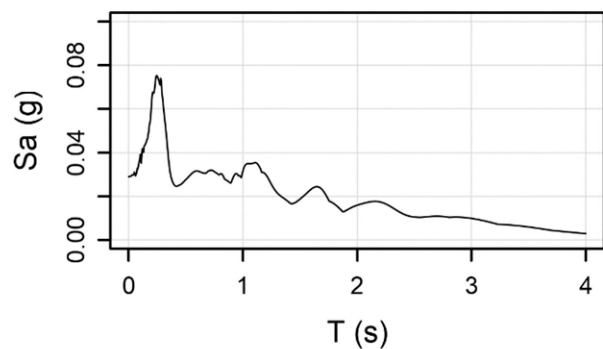


Figura 7-21 Input sismico SLD-07-San\_Lorenzo-Pianico (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**02-SLD- 07- san\_lorenzo\_pinaco - componente verticale within**

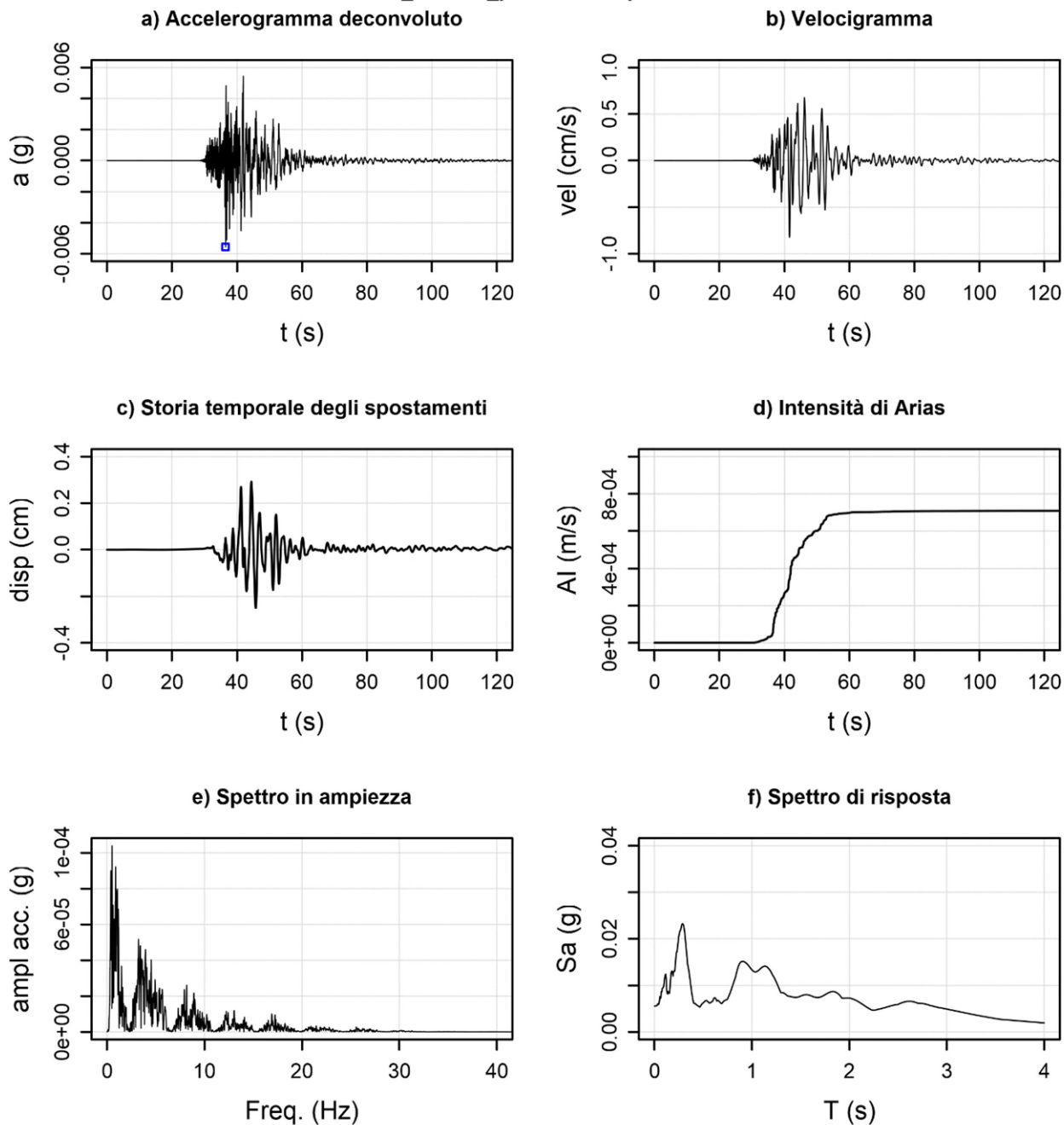


Figura 7-22 Input sismico SLD-07-San\_Lorenzo-Pianico (componente verticale) deconvolto alla base del modello numerico.

#### 7.4.2 Deconvoluzione Stato Limite di Collasso

##### 04-SLC- 01- castelnuovo\_assisi - componente orizzontale within

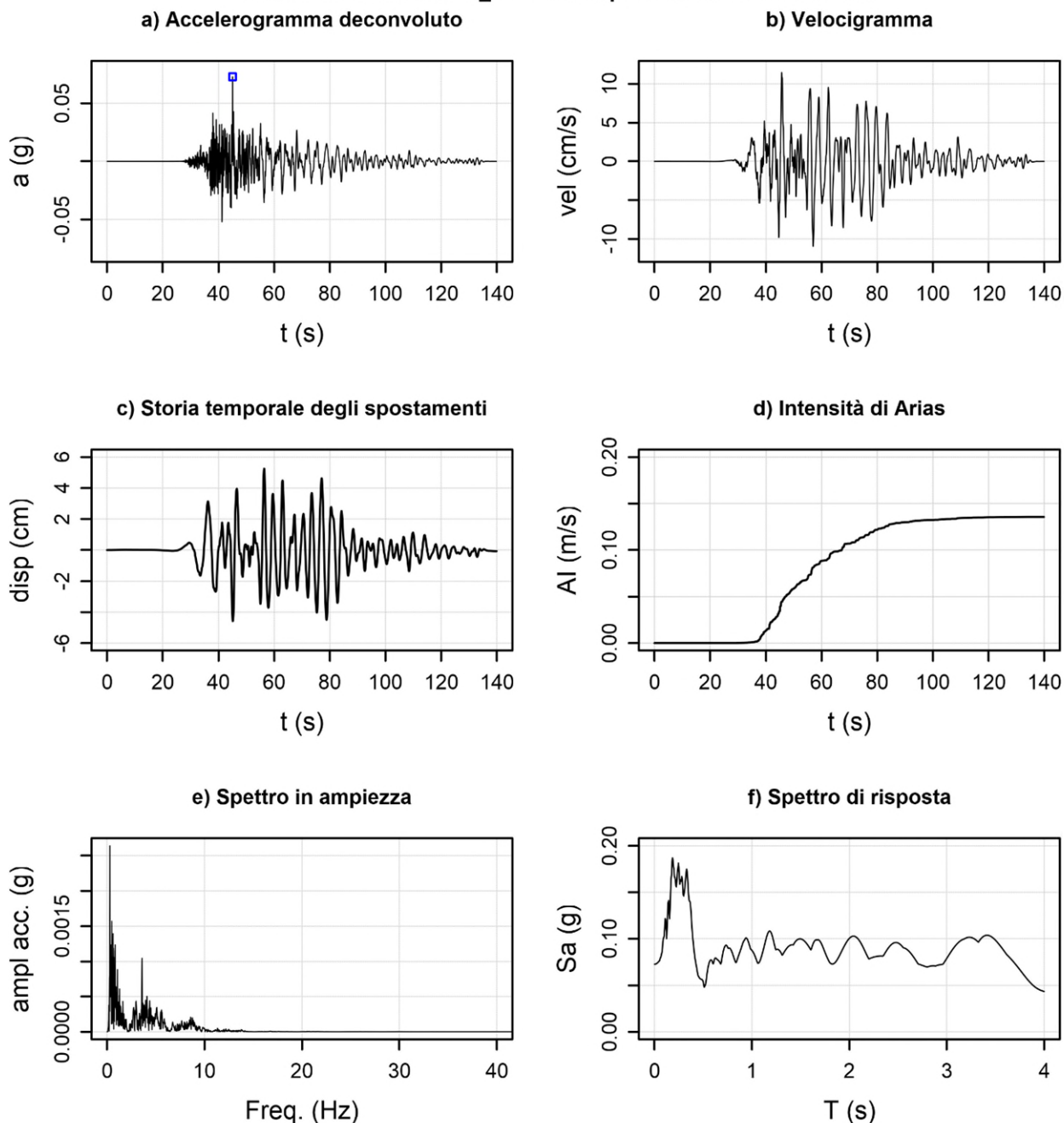
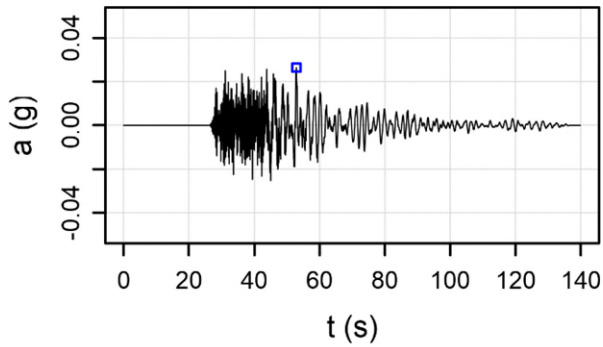


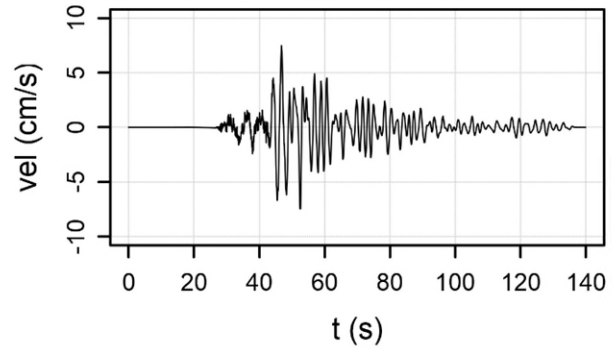
Figura 7-23 Input sismico SLC-01-Amatrice (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 01- castelnuovo\_assisi - componente verticale within**

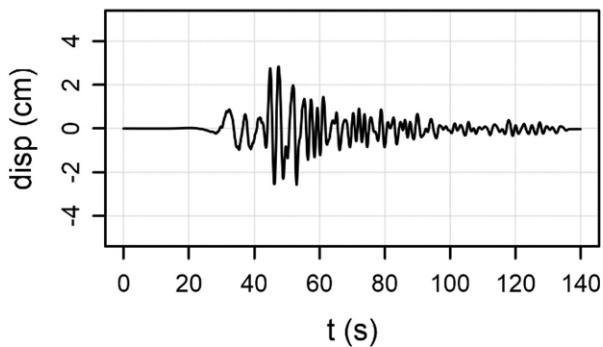
**a) Accelerogramma deconvoluto**



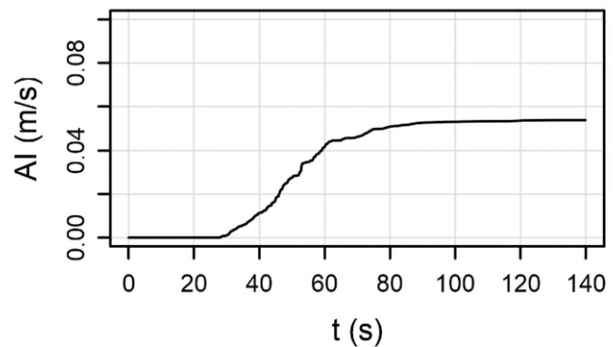
**b) Velocigramma**



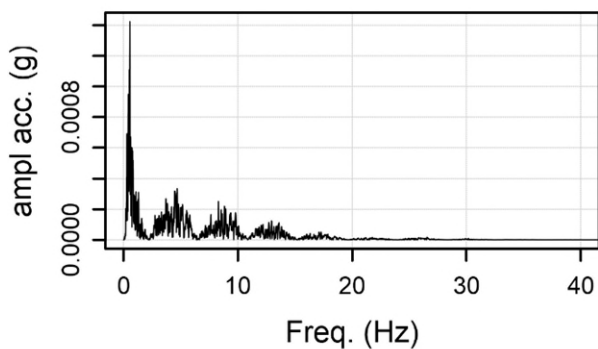
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

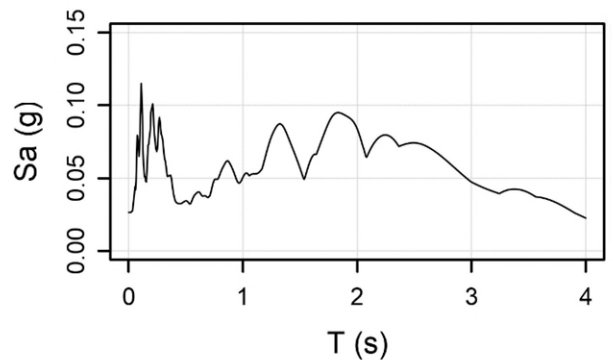
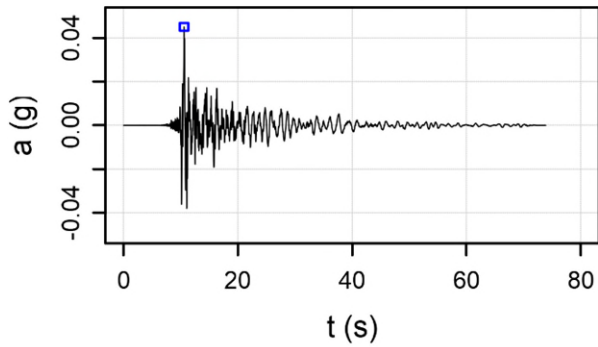


Figura 7-24 Input sismico SLC-01-Amatrice (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

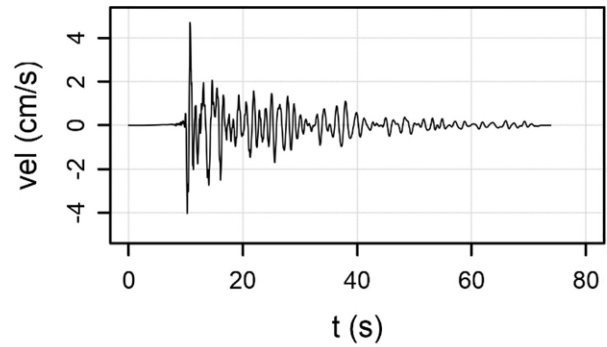


**04-SLC- 02- norcia\_la\_castellina\_e - componente orizzontale within**

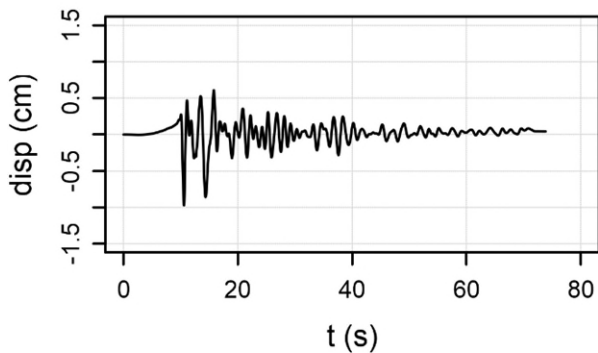
**a) Accelerogramma deconvoluto**



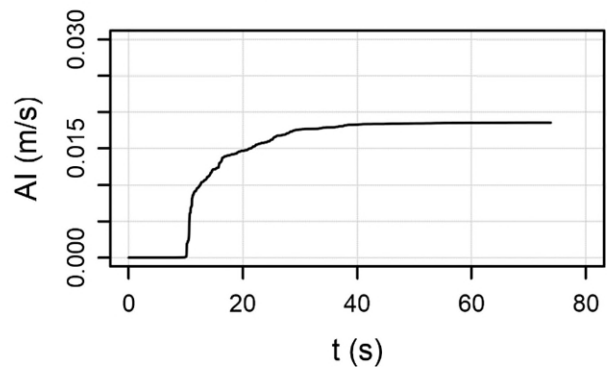
**b) Velocigramma**



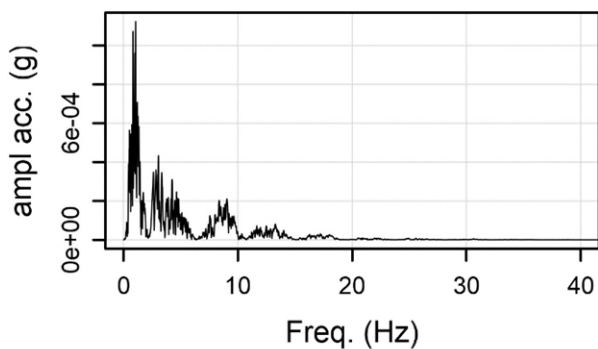
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

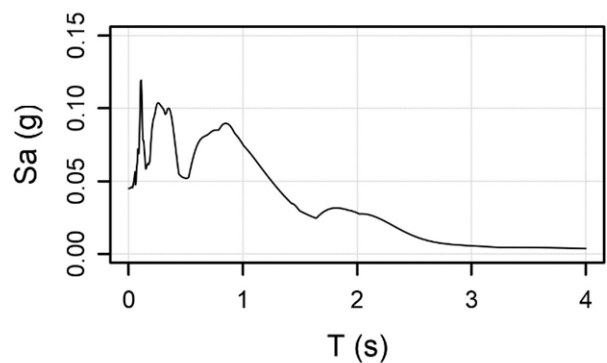
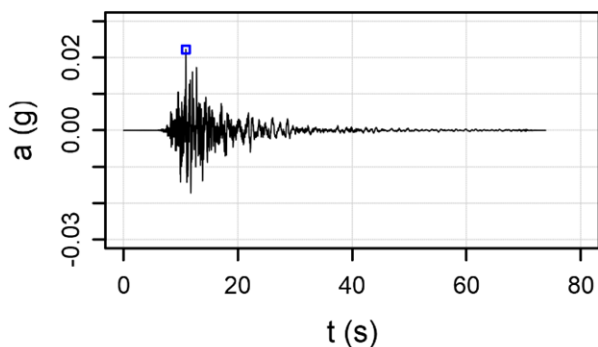


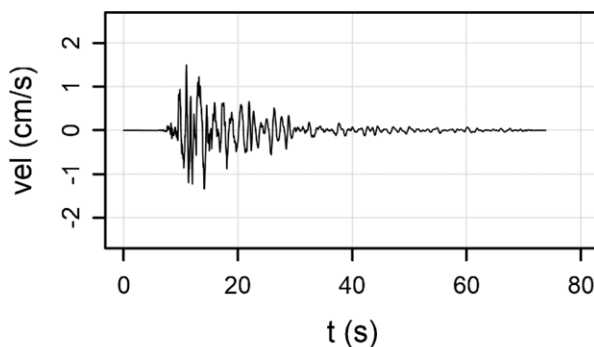
Figura 7-25 Input sismico SLC-02-Norcia\_la\_Castellina-E (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 02- norcia\_la\_castellina\_e - componente verticale within**

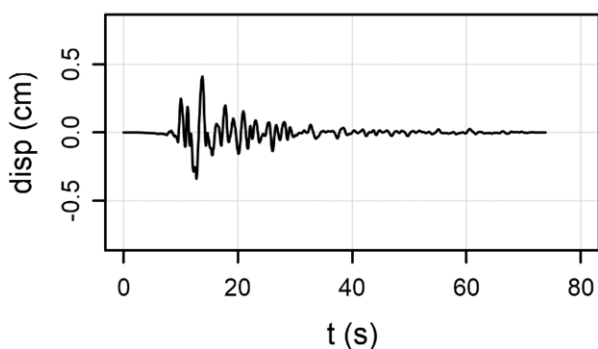
**a) Accelerogramma deconvoluto**



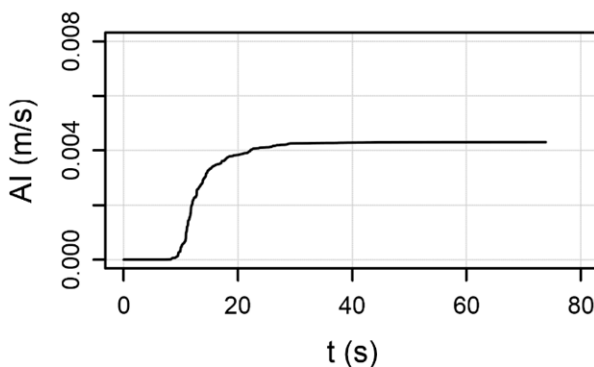
**b) Velocigramma**



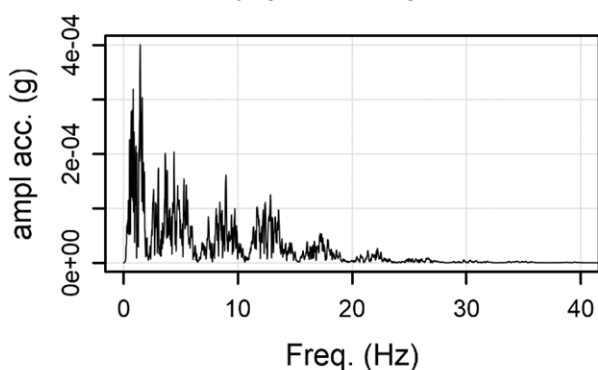
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

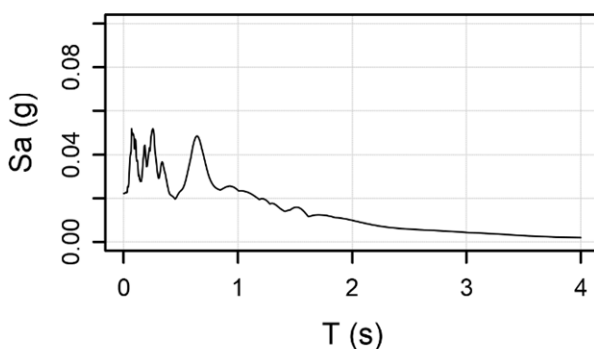
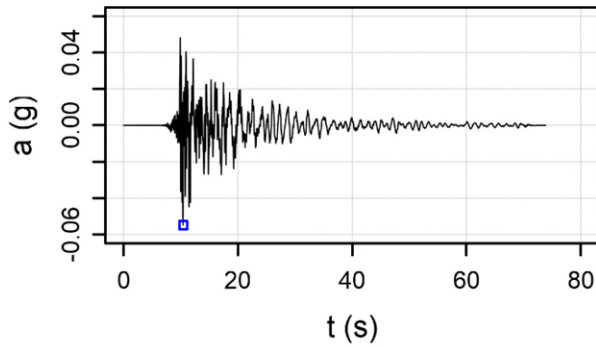


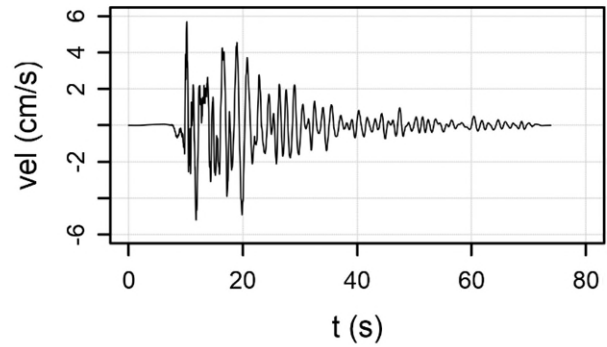
Figura 7-26 Input sismico SLC-02-Norcia\_la\_Castellina-E (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 03- norcia\_la\_castellina\_n - componente orizzontale within**

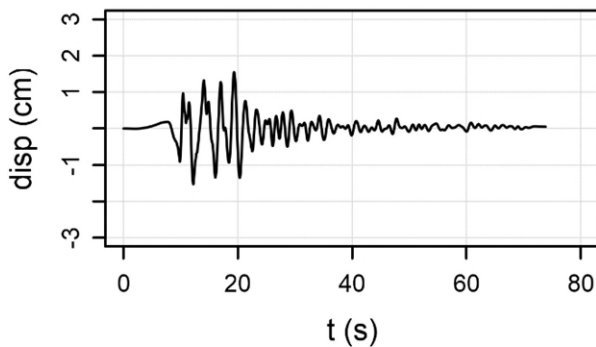
**a) Accelerogramma deconvoluto**



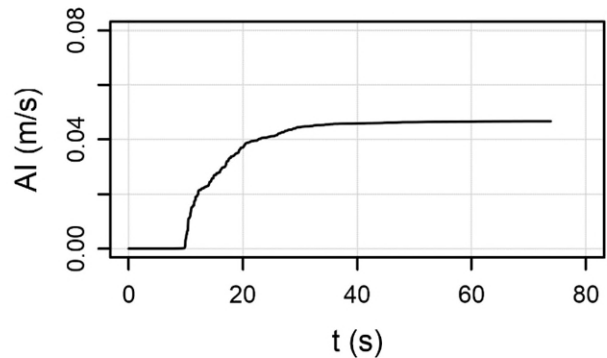
**b) Velocigramma**



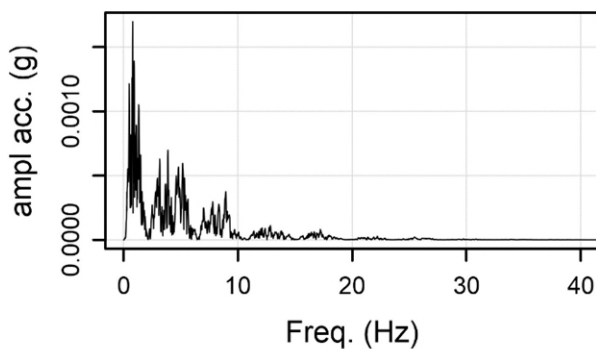
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

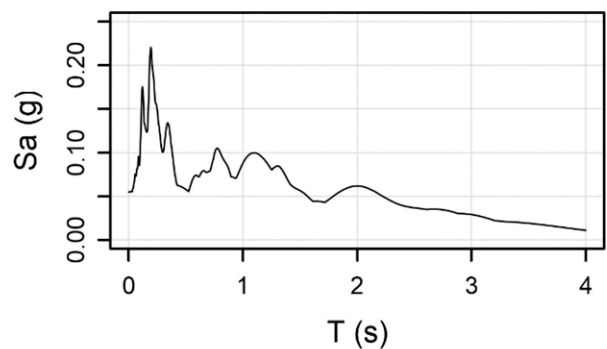
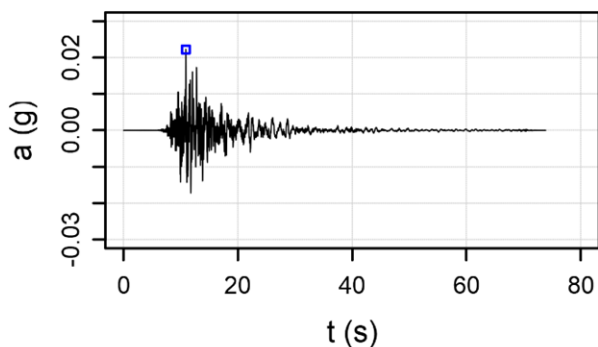


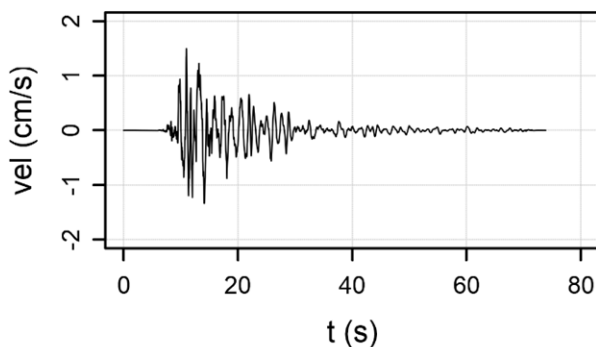
Figura 7-27 Input sismico SLC-02-Norcia\_la\_Castellina-N (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 03- norcia\_la\_castellina\_n - componente verticale within**

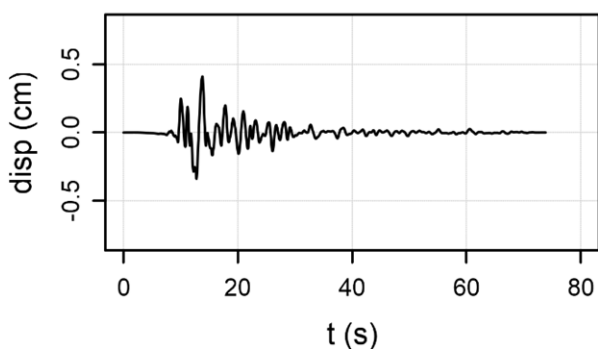
**a) Accelerogramma deconvoluto**



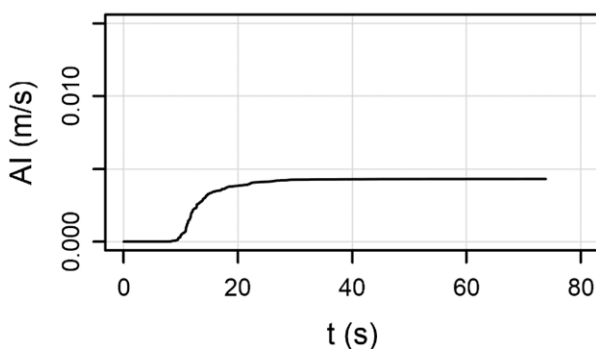
**b) Velocigramma**



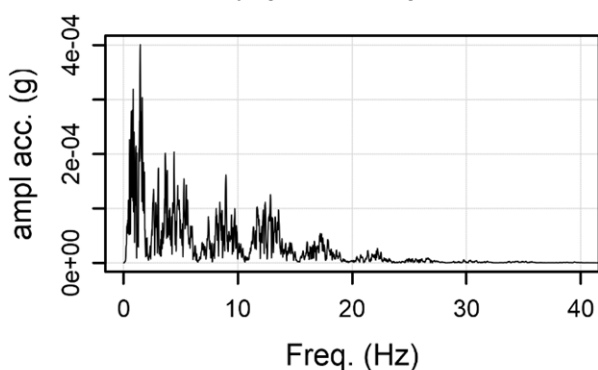
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

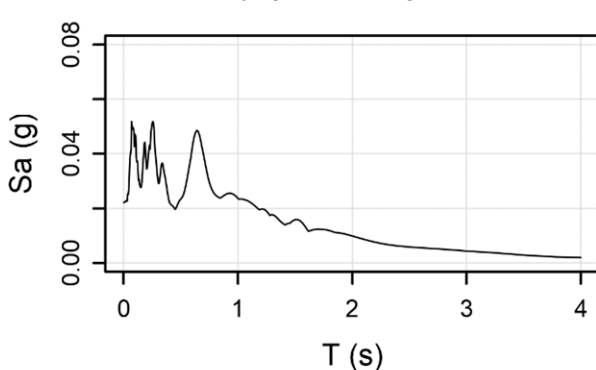
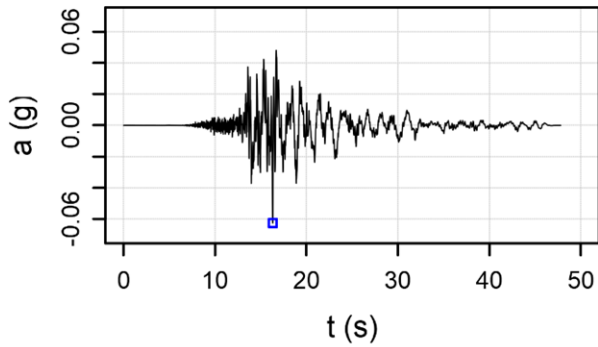


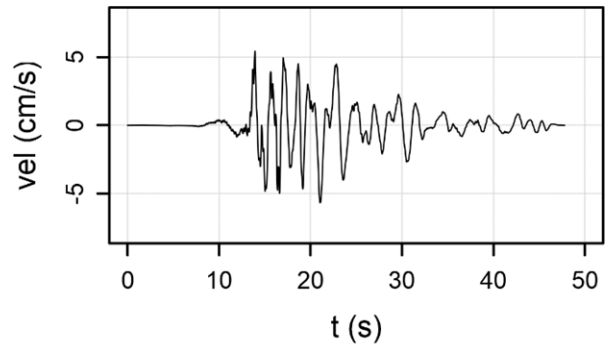
Figura 7-28 Input sismico SLC-02-Norcia\_la\_Castellina-N (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 04- mascioni\_campotosto\_e - componente orizzontale within**

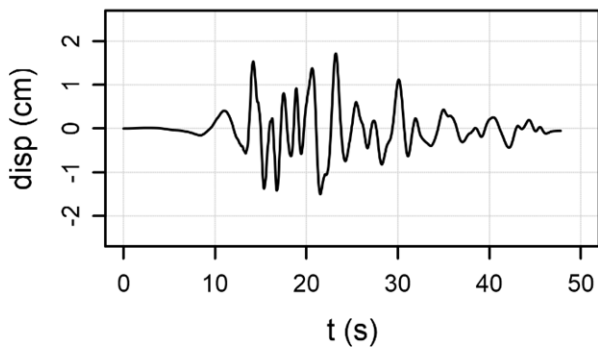
**a) Accelerogramma deconvoluto**



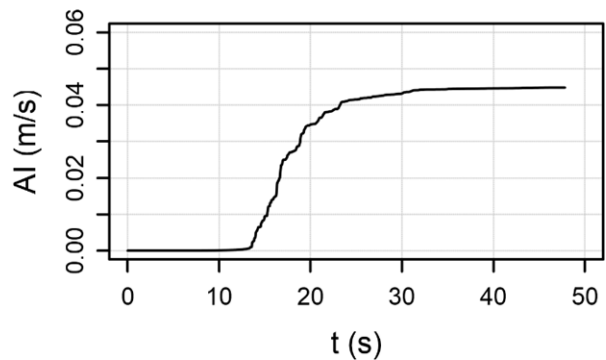
**b) Velocigramma**



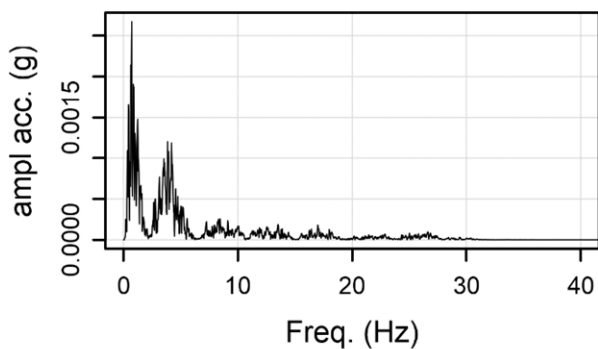
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

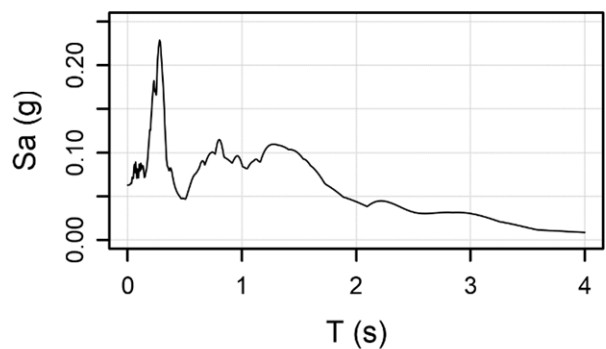
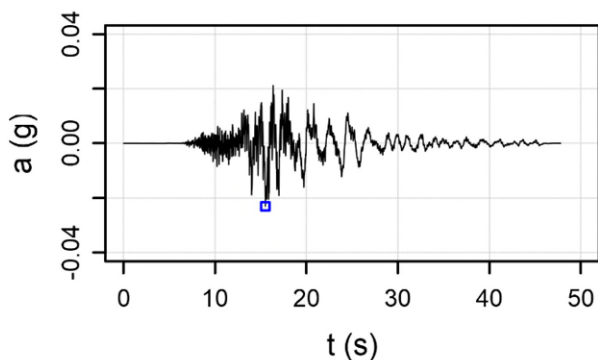


Figura 7-29 Input sismico SLC-04-Mascioni-Campotosto-E (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

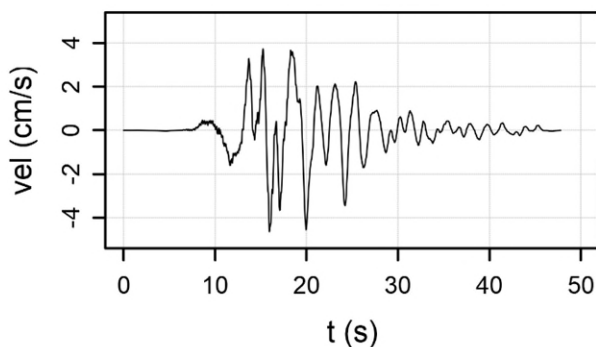


**04-SLC- 04- mascioni\_campotosto\_e - componente verticale within**

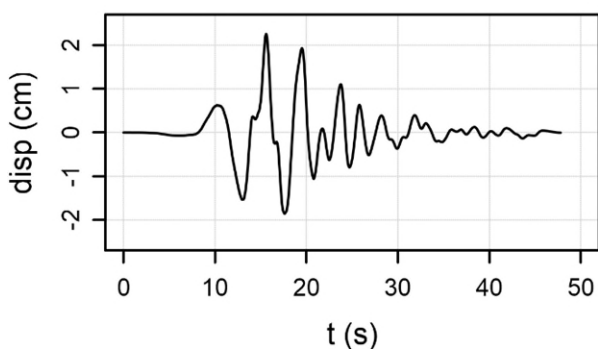
**a) Accelerogramma deconvoluto**



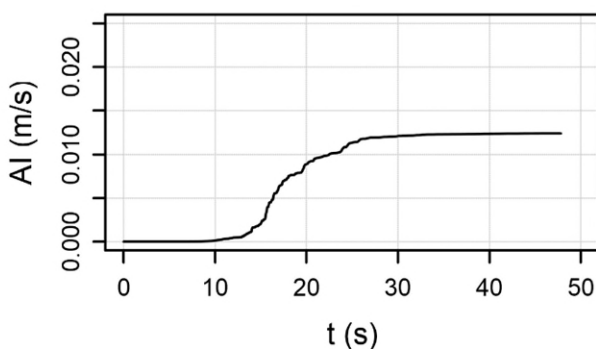
**b) Velocigramma**



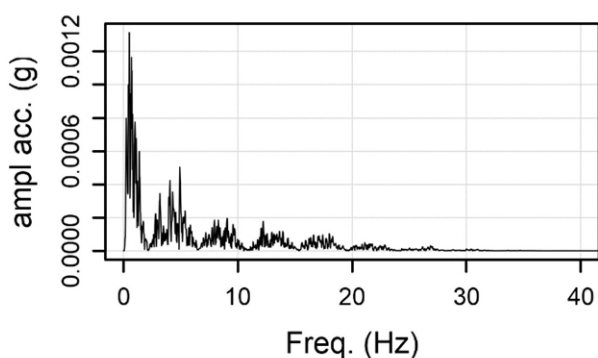
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

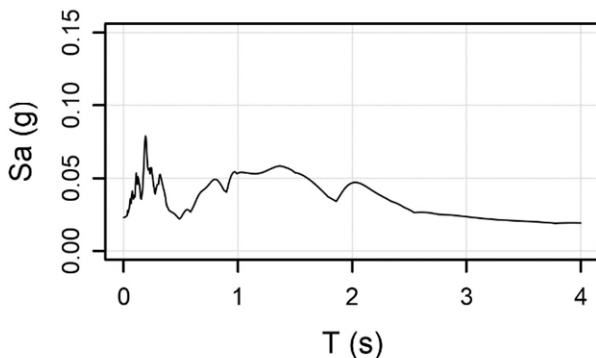
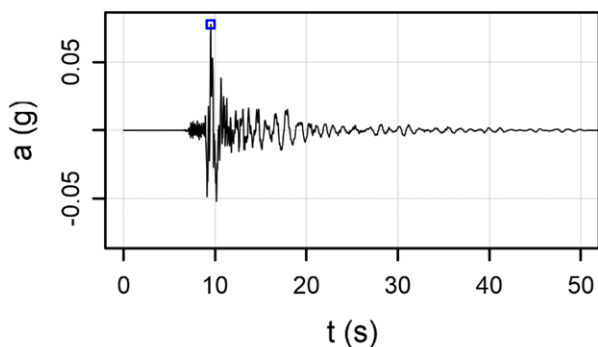


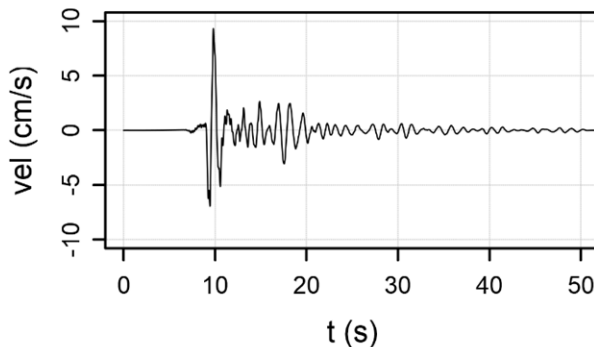
Figura 7-30 Input sismico SLC-04-Mascioni-Campotosto-E (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 05- norcia\_la\_castellina - componente orizzontale within**

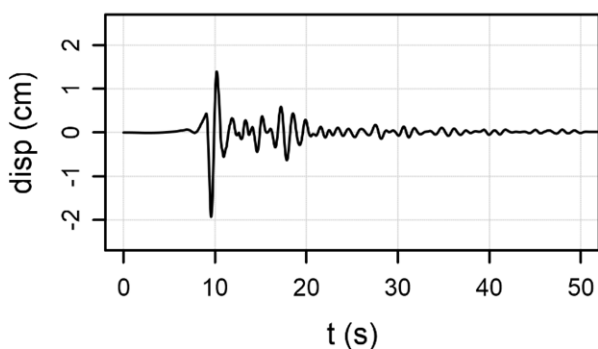
**a) Accelerogramma deconvoluto**



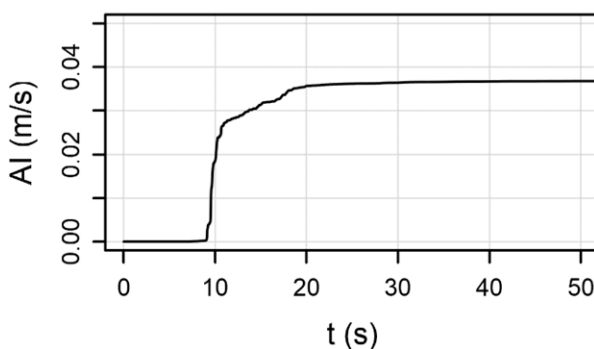
**b) Velocigramma**



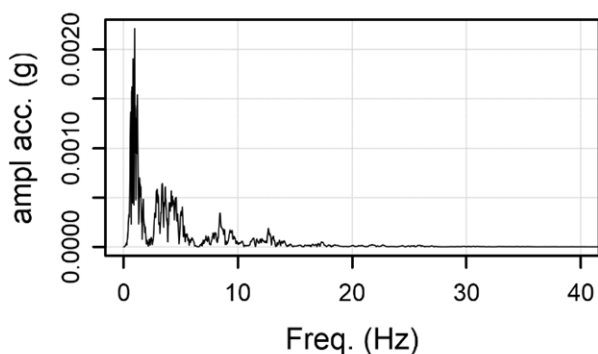
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

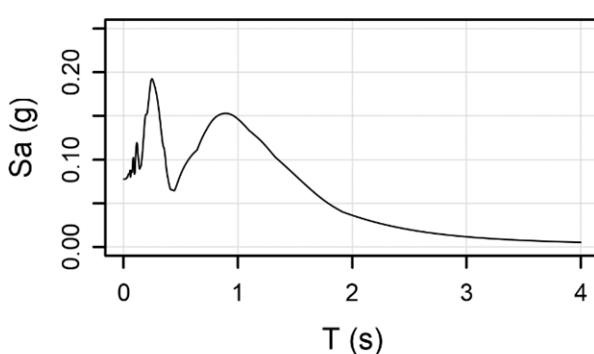
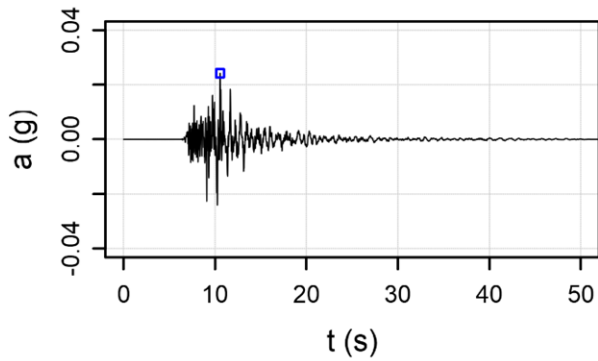


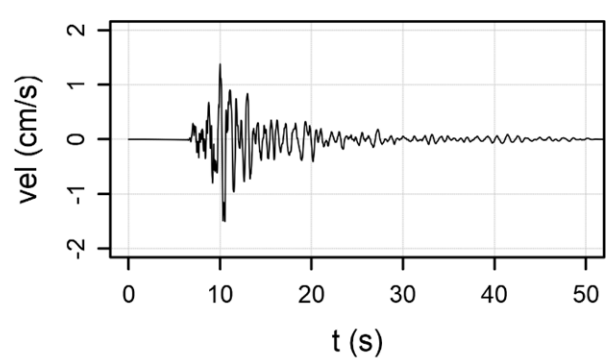
Figura 7-31 Input sismico SLC-05-Norcia-La\_Castellina (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 05- norcia\_la\_castellina - componente verticale within**

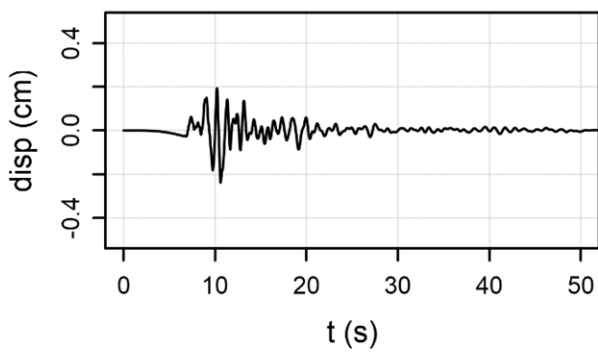
**a) Accelerogramma deconvoluto**



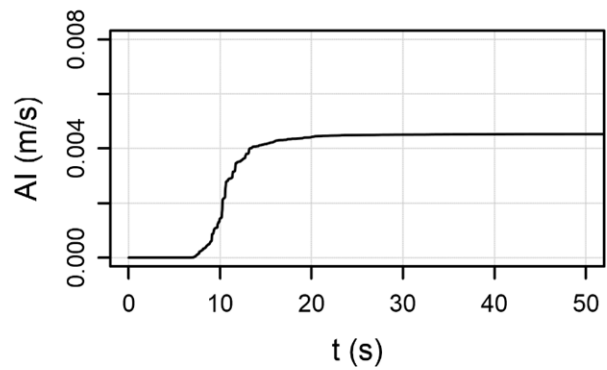
**b) Velocigramma**



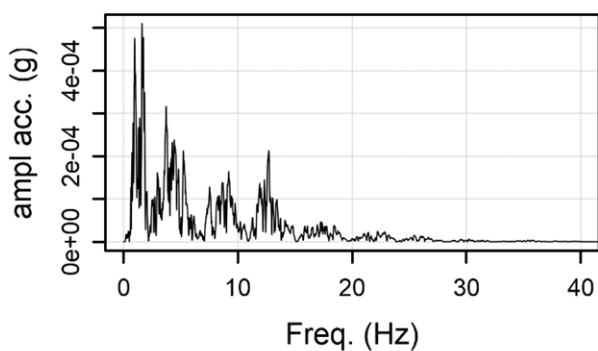
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

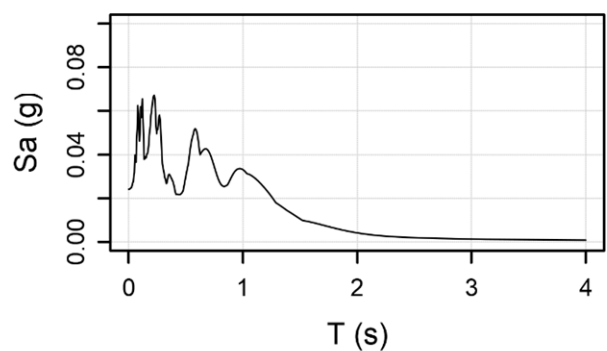
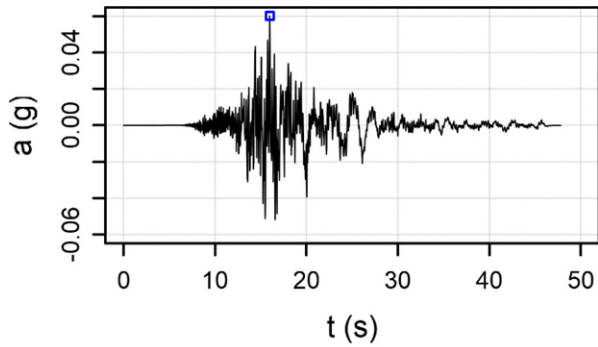


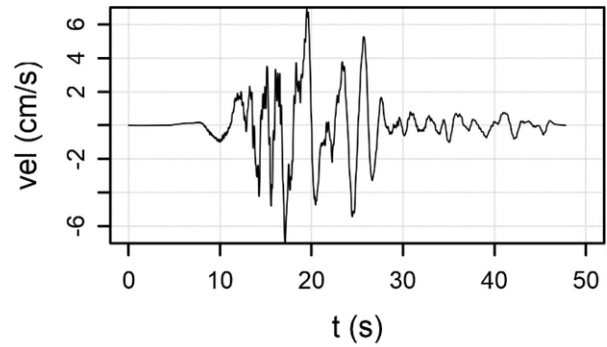
Figura 7-32 Input sismico SLC-05-Norcia-La\_Castellina (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 06- mascioni\_campotosto\_n - componente orizzontale within**

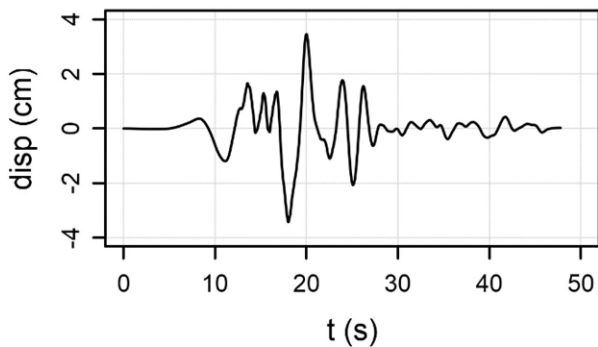
**a) Accelerogramma deconvoluto**



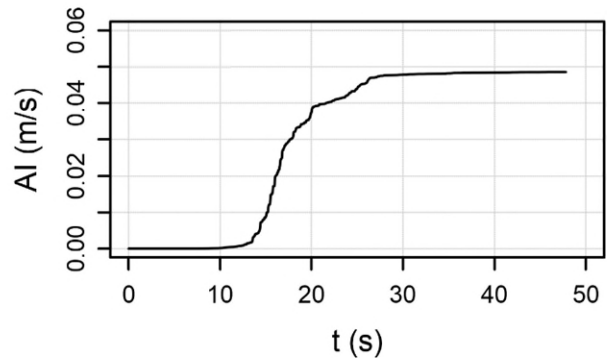
**b) Velocigramma**



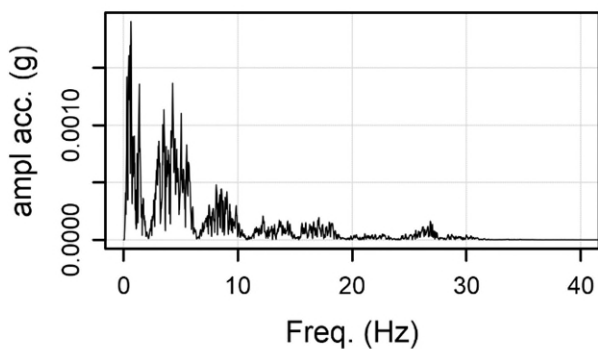
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

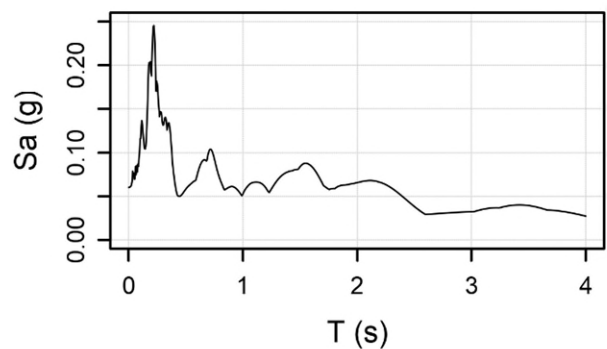
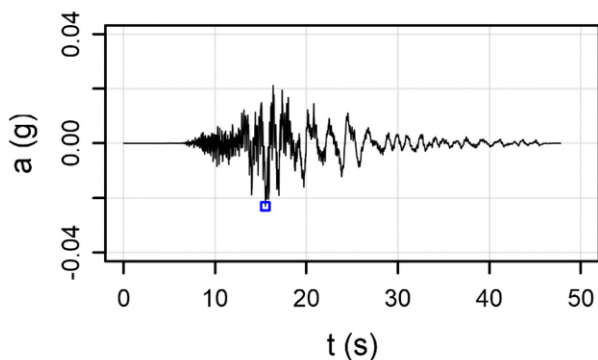


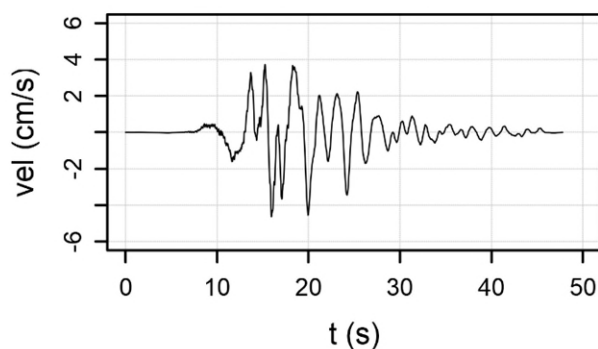
Figura 7-33 Input sismico SLC-06-Mascioni-Campotosto-N (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 06- mascioni\_campotosto\_n - componente verticale within**

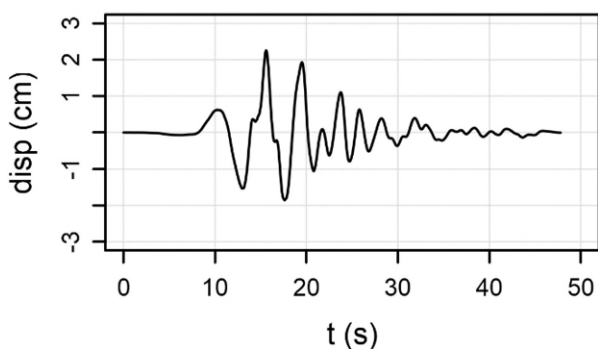
**a) Accelerogramma deconvoluto**



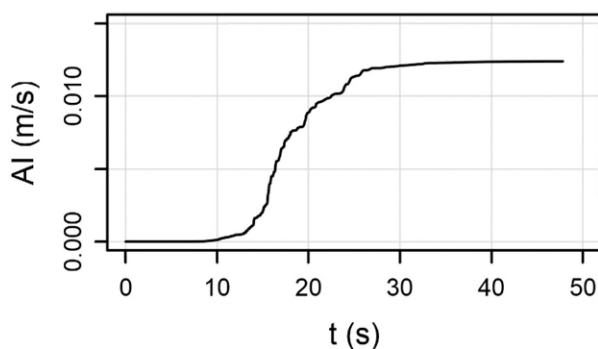
**b) Velocigramma**



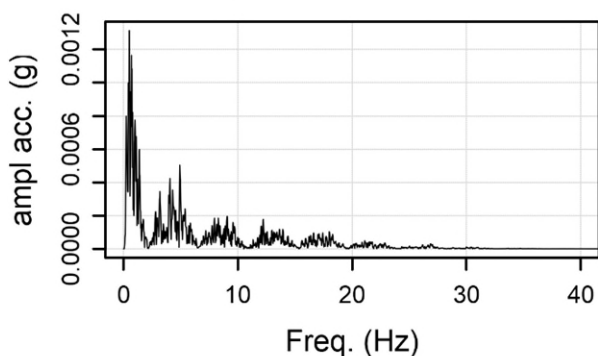
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

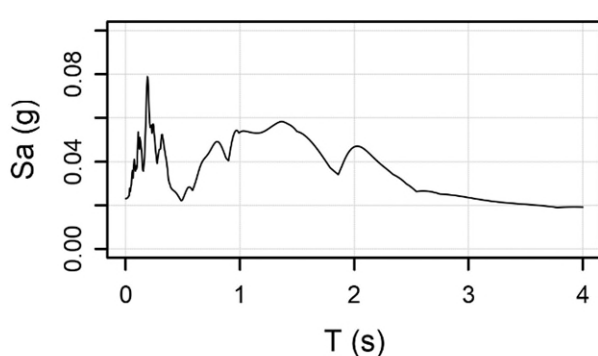
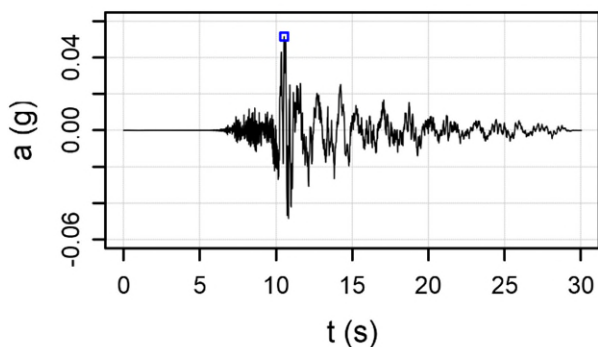


Figura 7-34 Input sismico SLC-06-Mascioni-Campotosto-N (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

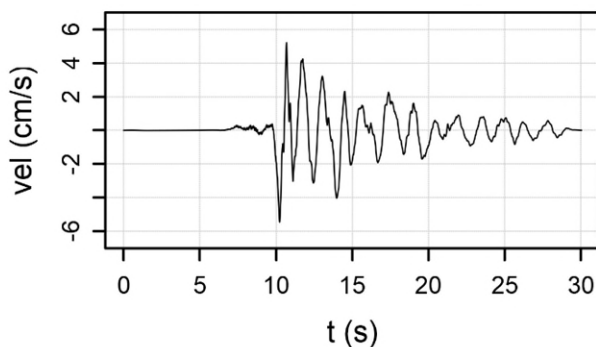


**04-SLC- 07- mascioni\_campotosto - componente orizzontale within**

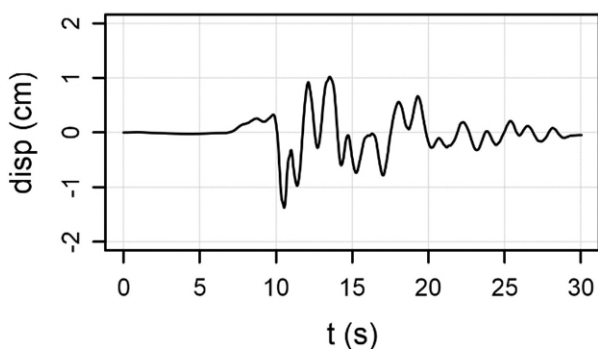
**a) Accelerogramma deconvoluto**



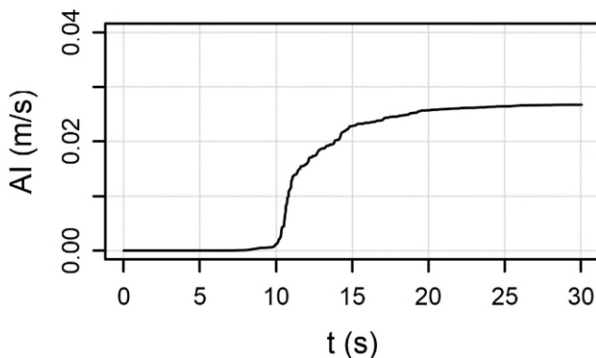
**b) Velocigramma**



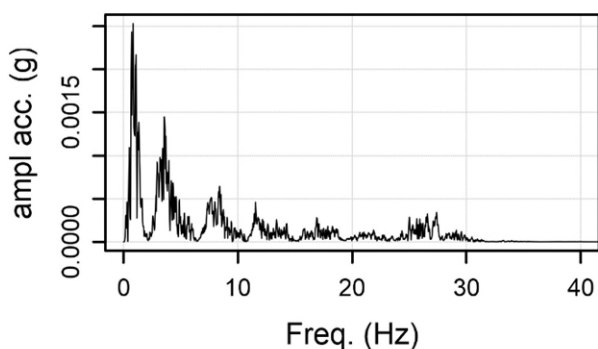
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

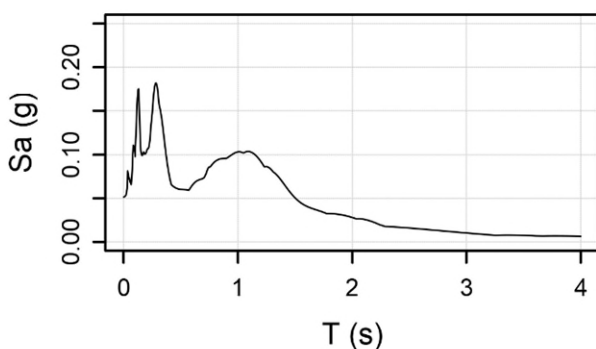
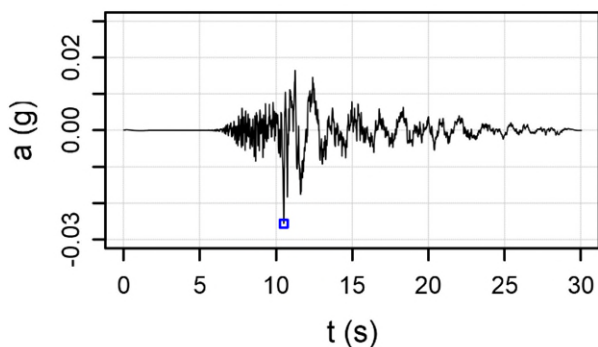


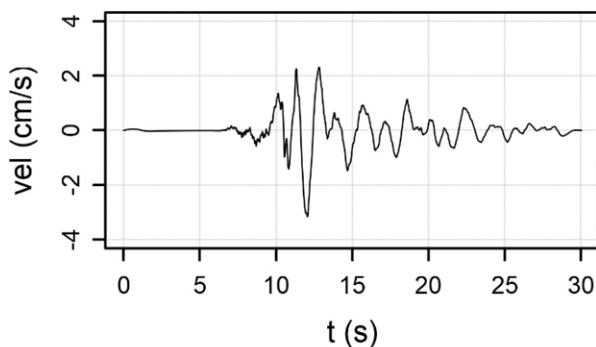
Figura 7-35 Input sismico SLC-07-Mascioni-Campotosto (componente orizzontale) deconvoluto alla base del modello numerico.

**04-SLC- 07- mascioni\_campotosto - componente verticale within**

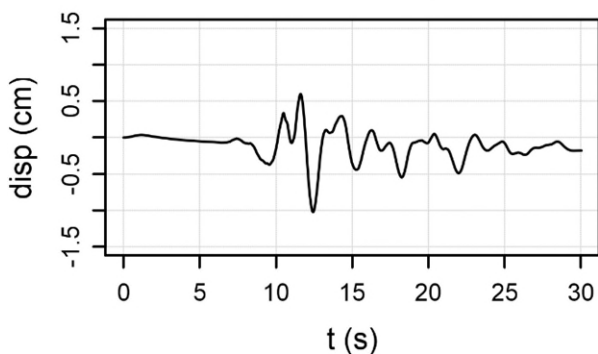
**a) Accelerogramma deconvoluto**



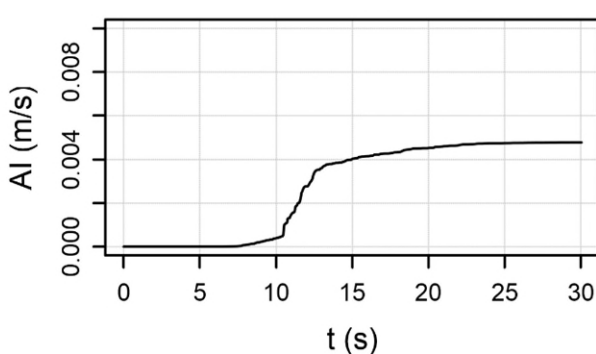
**b) Velocigramma**



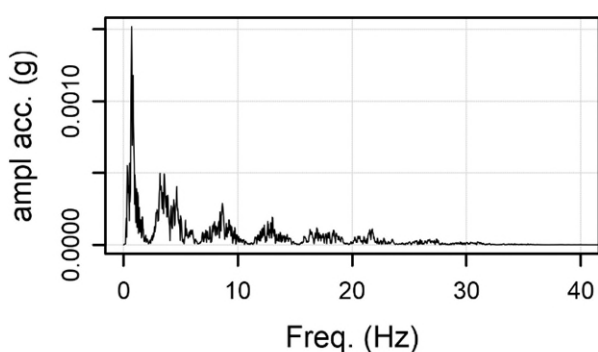
**c) Storia temporale degli spostamenti**



**d) Intensità di Arias**



**e) Spettro in ampiezza**



**f) Spettro di risposta**

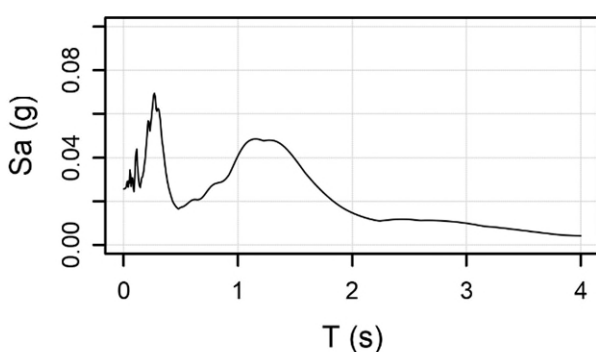


Figura 7-36 Input sismico SLC-07-Mascioni-Campotosto (componente verticale) deconvoluto alla base del modello numerico.

## 7.5 I modelli costitutivi

Il comportamento meccanico dei materiali costituenti la diga è stato simulato combinando un modello costitutivo elastico-perfettamente plastico alla Mohr Coulomb in fase statica, ed un modello isteretico basato su funzioni di decadimento del modulo di rigidezza e di crescita del fattore di smorzamento al variare della deformazione in fase dinamica.

Tali modelli rappresentano un giusto compromesso tra accuratezza nella modellazione della risposta meccanica dei terreni ed onere computazionale.

Il modello costitutivo di Mohr-Coulomb è un modello elastico - perfettamente plastico, per cui la risposta del materiale si mantiene elastica sino al raggiungimento della superficie di snervamento dopodiché sopraggiunge la rottura perfetta. Il modello è caratterizzato da cinque parametri: “G” modulo di rigidezza al taglio, “K” modulo di rigidezza volumetrico, “φ” angolo di attrito, “c” coesione.

Le relazioni che legano gli incrementi di deformazione elastica in funzione degli incrementi tensionali sono riportati in Equazione 8.2 dove “p” rappresenta l’invariante di tensione sferica efficace e “q” l’invariante di tensione deviatorica.

$$\begin{pmatrix} \delta \varepsilon_p \\ \delta \varepsilon_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/K & 0 \\ 0 & 1/3G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

La rottura è invece regolata dalla ben nota relazione in Equazione 8.3 anche riportata in Figura 7-37 nel piano di Mohr dove σ è la tensione normale e τ quella di taglio.

$$\tau_f = c + \sigma \tan(\varphi) \quad (7.3)$$

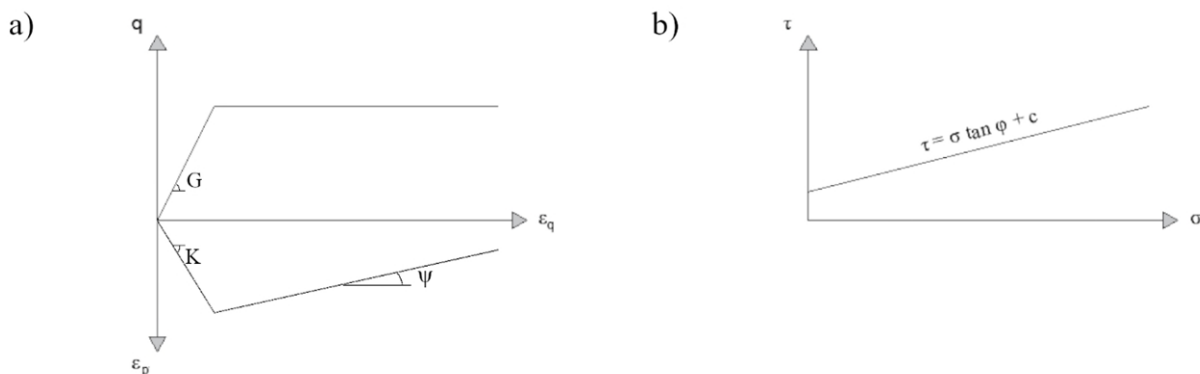


Figura 7-37 Modello costitutivo di Mohr-Coulomb: a) legame tensioni-deformazioni, b) criterio di rottura nel piano tensione tangenziale - tensione normale.

Per la fase dinamica delle simulazioni, allo scopo di simulare correttamente il comportamento dei materiali a partire da piccoli livelli di deformazione, il modello prevede l’assegnazione di moduli di rigidezza a piccoli livelli di deformazione  $G_0$  e delle funzioni di decadimento. Il modulo  $G_0$  è stato assegnato sulla base delle prove dinamiche in situ.

Il decadimento è stato assegnato secondo la formulazione di Hardin and Drnevic (1972) di seguito riportata:

$$M_s = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_{ref}}} \quad (7.4)$$

con  $M_s$ : modulo di rigidezza al taglio secante,  $\gamma$ : deformazione di taglio,  $\gamma_s$ : deformazione di taglio in corrispondenza del 50% del decadimento del modulo di rigidezza.

I parametri di calibrazione dei modelli sono riportati al Paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

## 7.6 Inizializzazione dello stato tensionale

L'inizializzazione dello stato tensionale nel modello è stata eseguita in fasi consecutive. Inizialmente è stata inizializzato lo stato tensionale nelle formazioni di base senza quindi considerare la presenza della diga. In Figura 7-38 si mostra il campo delle tensioni verticali calcolato.

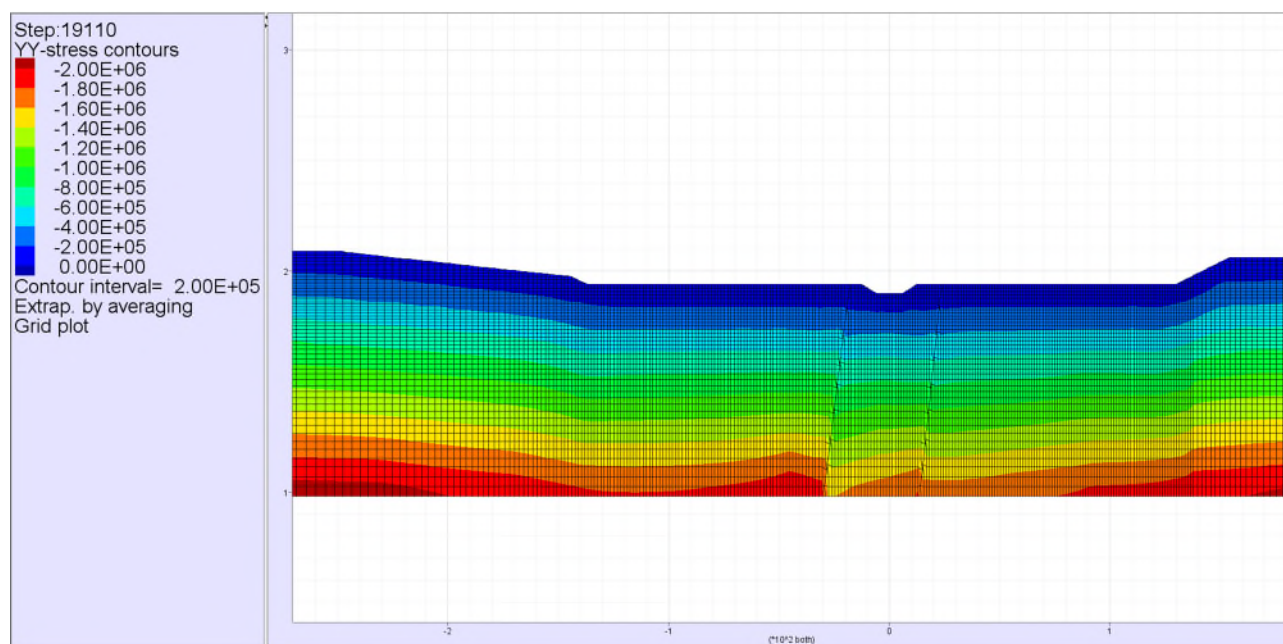


Figura 7-38 Campo delle tensioni verticali totali nelle formazioni di fondazione (fase pre-costruzione).

Successivamente è stata simulata la costruzione della diga ed è stato calcolato il corrispondente stato tensionale. In Figura 7-39 si riporta il campo delle tensioni verticali calcolato, mentre in Figura 7-40 si riporta il corrispondente campo dei cedimenti. Si riscontra un cedimento calcolato in corrispondenza del coronamento di 17.0cm. Tale valore risulta del tutto compatibile con la tipologia di opera e di terreni di fondazione.



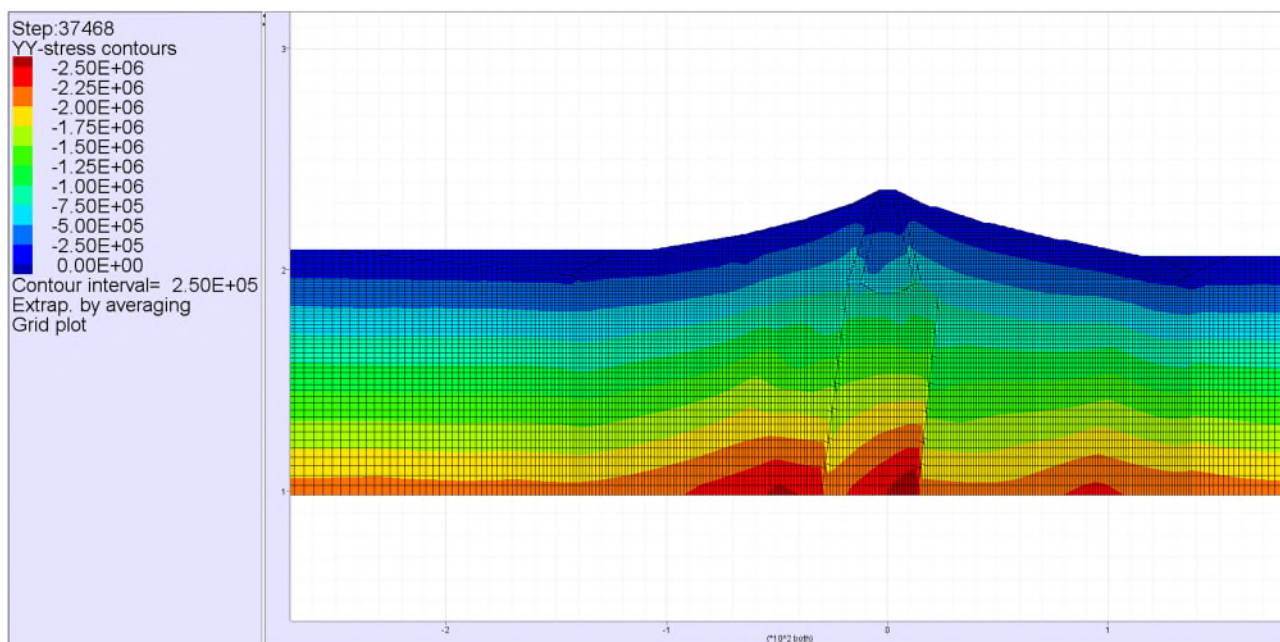


Figura 7-39 Campo delle tensioni verticali totali nella diga e nelle formazioni di fondazione.

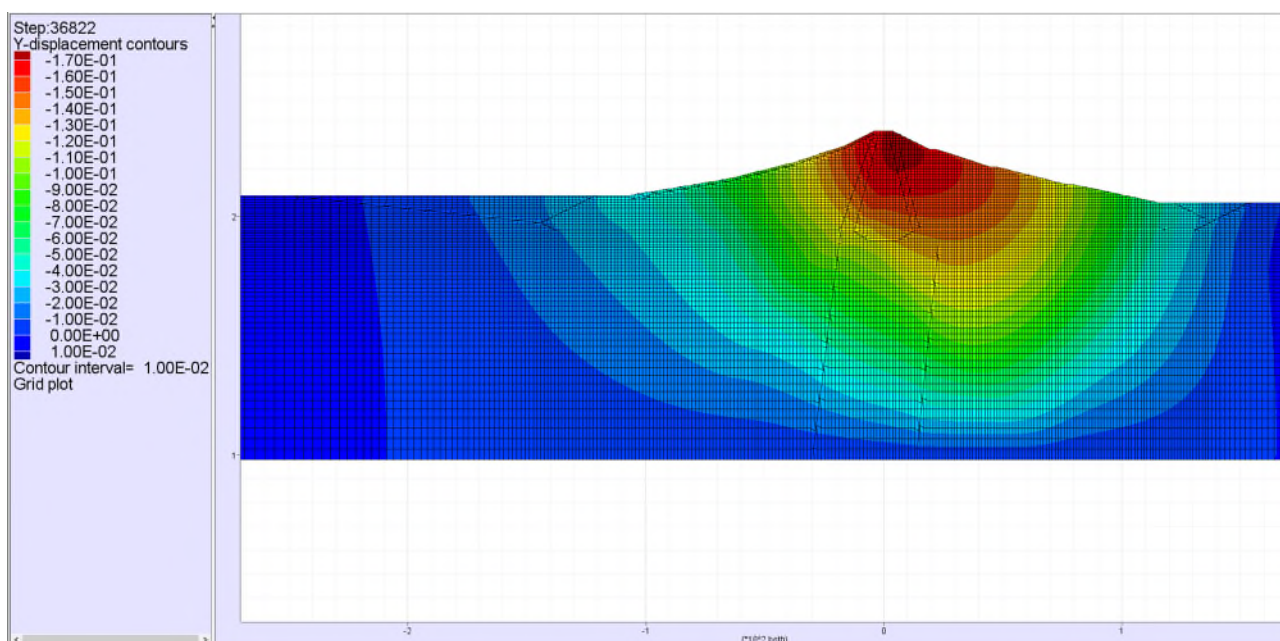


Figura 7-40 Campo dei cedimenti calcolato nel modello per effetto della costruzione della diga.

Successivamente è stata introdotta la presenza dell'invaso ad un livello corrispondente alla quota di massima regolazione (229.0m s.l.m.m). In Figura 7-41 si riporta il campo della pressione neutra calcolato risolvendo il problema della filtrazione, mentre in Figura 7-42 si riporta il campo della tensione verticale efficace calcolato sottraendo al campo della tensione verticale totale quello della pressione neutra.



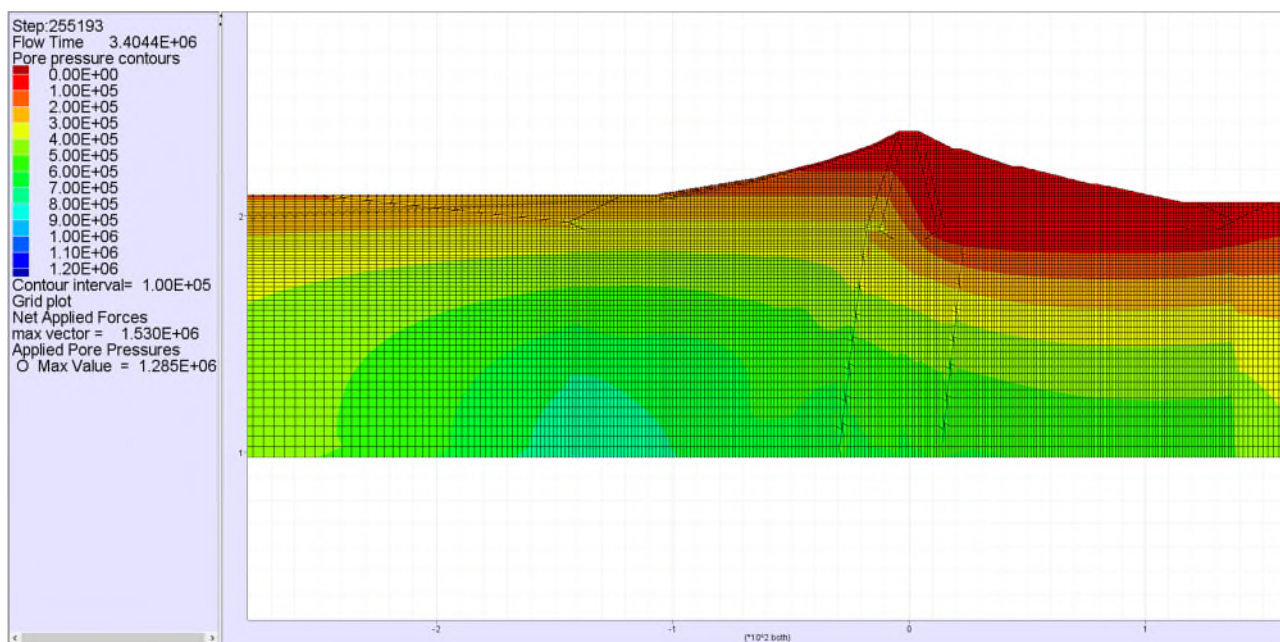


Figura 7-41 Campo della pressione interstiziale nel modello corrispondente ad un livello dell'invaso pari alla quota di massima regolazione (229.0m s.l.m.m).

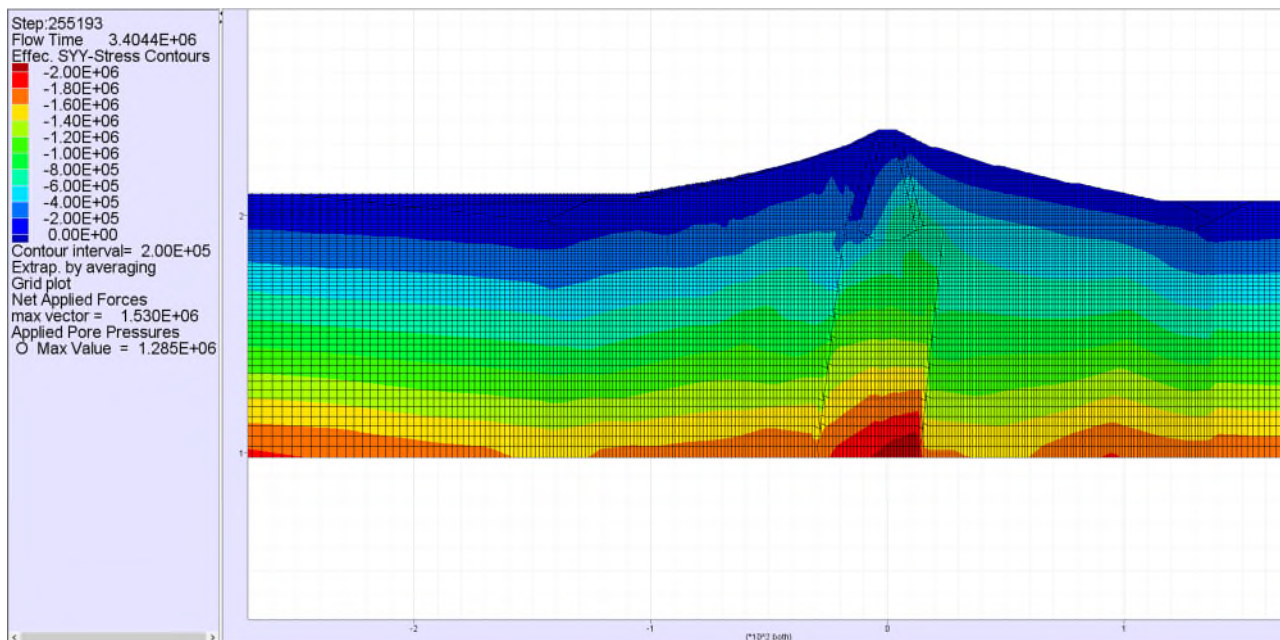




Figura 7-42 Campo della tensione verticale efficace nel modello con un livello dell'invaso pari alla quota di massima regolazione (229.0m s.l.m.m).

## 7.7 Analisi dinamica

Al fine di eseguire le simulazioni dinamiche previste dalla verifica i modelli costitutivi dei materiali sono stati aggiornati con l'introduzione delle leggi di decadimento del modulo di rigidezza riportate

	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;">VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</p>	<p style="text-align: right;">Pag. 121 di 160</p>

nel Paragrafo 7.3 e di uno smorzamento alla Rayleigh dello 0.2% sulla frequenza centrale dell'input sismico considerato al fine di smorzare il contenuto energetico corrispondente ad alte frequenze.

Le condizioni al contorno del problema sono state quindi variate per simulare correttamente i fenomeni di propagazione e riflessione delle onde sismiche introducendo una condizione di “free-field” sul contorno del modello numerico per simulare correttamente il movimento che si avrebbe in condizioni di campo libero e condizioni di “quiet” (smorzamento viscoso) alla base per minimizzare i fenomeni di riflessione (Figura 7-43).

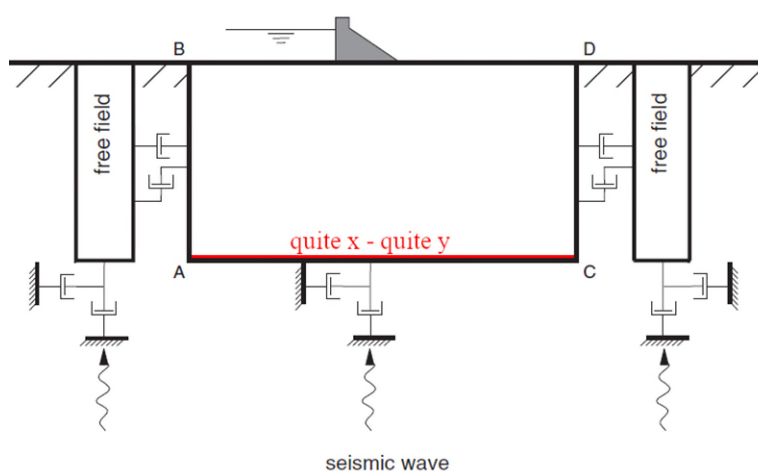


Figura 7-43 Schema illustrativo della condizione al contorno dinamiche di “free-field” e di “quite”.



L'input sismico è stato applicato in termini di storie temporali di tensione allo scopo di non pregiudicare la corretta simulazione della propagazione-riflessione delle onde sismiche. A tal fine gli accelerogrammi sono stati dapprima integrati nel tempo per ottenere le storie temporali di velocità delle due direzioni, dopodiché la componente orizzontale e verticale della velocità sono state trasformate rispettivamente in storie temporali di tensioni di taglio e di tensione normali secondo le relazioni di seguito proposte:

$$\tau_{xy}(t) = -f_x V_s \rho_{sat} v_x(t) \quad (7.5)$$

$$\sigma_y(t) = -f_y V_p \rho_{sat} v_y(t) \quad (7.6)$$

con  $f_x$  ed  $f_y$ : fattori di calibrazione,  $V_s$ : velocità di propagazione delle onde di taglio,  $V_p$ : velocità di propagazione delle onde di compressione,  $\rho_{sat}$ : densità dell'unità di volume satura,  $v_x(t)$ : velocigramma in direzione orizzontale,  $v_y(t)$ : velocigramma in direzione verticale.

I fattori di calibrazione  $f_x=1.2$  ed  $f_y=1.2$  sono stati determinati eseguendo analisi preliminari alla ricerca dei valori che meglio riproducono numericamente i velocigrammi imposti. Al termine della fase dinamica è stato re-inizializzato il regime di pressioni interstiziali derivante dall'analisi di filtrazione in condizioni statiche in modo da tenere in conto eventuali fenomeni di consolidazione innescati nel nucleo della diga.

 II122F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 122 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

Così come specificato nel Paragrafo 3.2, sono state eseguite per ciascuno dei due stati limite analizzati (SLD e SLC) 14 analisi numeriche, applicando le sette azioni sismiche sia in condizione di invaso al livello di massima regolazione che in condizione di invaso vuoto per un totale di 42 analisi numeriche.

## 7.8 Validazione dinamica del modello numerico

Al Paragrafo III.4.7 delle Istruzioni alla verifica [3] si legge: *Nel caso in cui si adotti un modello di calcolo che simuli la propagazione delle onde sismiche nella roccia di fondazione (c.d. fondazione con massa), è necessario effettuare analisi di validazione della soluzione numerica.*

La capacità del modello numerico di replicare il comportamento dinamico del corpo diga e dei terreni di fondazione è stata quindi validata con riferimento a due test.

Il primo test consiste nel confrontare il periodo proprio di vibrazione della diga stimato mediante prove in situ con quello restituito dal modello. Il secondo test consiste nel controllare che l'apparato numerico elaborato in FLAC 2D, dato uno dei sette accelerogrammi deconvoluti alla base del modello, sia capace di restituire il corrispondente segnale sismico di calcolo su affioramento rigido (dato di ingresso della deconvoluzione eseguita con l'approccio monodimensionale lineare equivalente, vedi Paragrafo 7.4).

Si precisa che non è stato possibile validare il modello sulle misure di cedimento della diga poiché non sono disponibili misure assestometriche eseguite durante la costruzione e durante gli invasi sperimentali. Tuttavia, al termine della fase di inizializzazione delle tensioni descritta al Paragrafo 7.6 il modello restituisce un cedimento del coronamento di 17cm, un valore in linea con le caratteristiche dell'opera e dei terreni di fondazione.

### 7.8.1 Validazione basata sull'analisi del periodo proprio di vibrazione

La capacità del modello numerico di replicare il comportamento dinamico del corpo diga e dei terreni di fondazione è stata validata confrontando la frequenza propria di vibrazione restituita dal modello numerico con quella stimata secondo la procedura proposta da Gazetas & Dakoulas (1992).

Secondo i due autori (Gazetas & Dakoulas, 1992), la frequenza propria di vibrazione della diga è può essere stimata per mezzo delle relazioni riportate negli abachi di Figura 7-44.



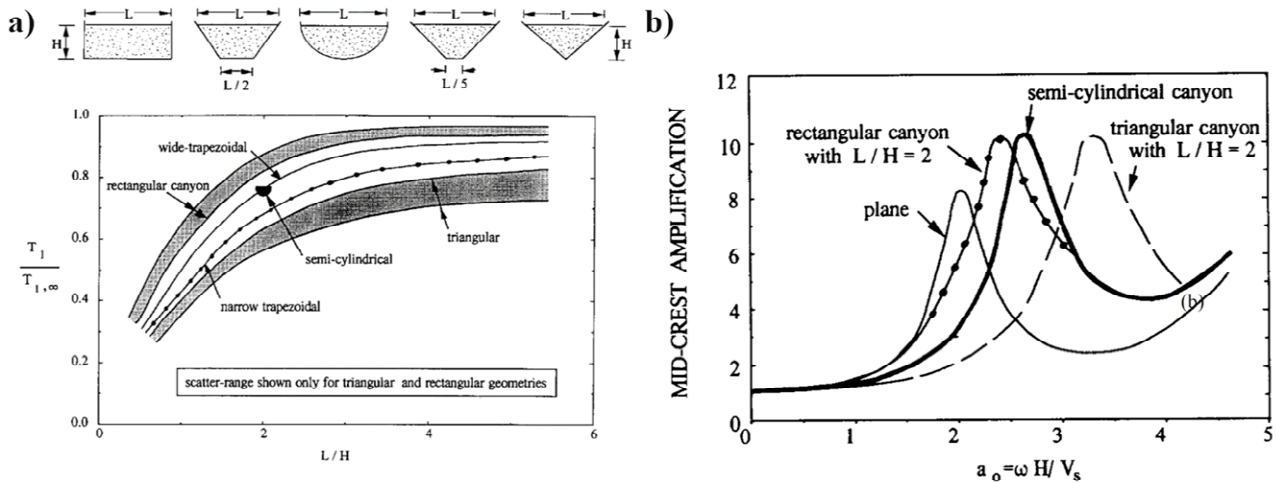


Figura 7-44 a) Effetto della geometria del canyon sul periodo fondamentale di oscillazione della diga b) fattore di amplificazione del sisma in funzione della frequenza dell'input sismico, dell'altezza della diga e della velocità di propagazione delle onde di taglio (Gazetas & Dakoulas, 1992).

Considerata un'altezza della diga  $H=46.0\text{m}$ , una larghezza alla base del canyon di circa  $215\text{m}$  ed una larghezza in sommità del canyon di  $L=607\text{m}$ , gli autori classificano la gola come di sezione trapezoidale ampia.

Dalla Figura 7-44.a, considerando un rapporto  $L/H$  pari a  $13.2$  si deduce un fattore correttivo del periodo proprio di vibrazione della diga dovuto all'effetto canyon pari a  $0.9$ . Dalla Figura 7-44.b si ottiene un valore del coefficiente  $a_0$  (Equazione 8.9) pari a circa  $2.65$ .

$$a_0 = \omega H / V_s \quad (7.7)$$

Con  $\omega$ : pulsazione,  $H$ : altezza della diga;  $V_s$ : velocità di propagazione delle onde di taglio nella diga.

Considerando la velocità di propagazione delle onde di taglio nel corpo diga di  $720\text{m/s}$  si ottiene un periodo proprio di vibrazione di  $0.19\text{s}$  che, corretto per effetto canyon diviene  $0.17\text{s}$  (corrispondente ad una frequenza di  $5.8\text{Hz}$ ).

Allo scopo di determinare numericamente la frequenza propria di vibrazione della diga, dopo aver inizializzato lo stato tensionale (così come descritto nel paragrafo 8.6), alla base del modello è stata applicata una storia temporale di accelerazione di tipo sinusoidale con ampiezza costante e frequenza crescente ogni cinque secondi. L'ampiezza dell'input sismico ( $A=\pm 0.0001\text{g}$ ) è stata scelta in modo da non attivare il decadimento del modulo di rigidezza dei materiali, mentre la frequenza è stata fatta variare tra  $1$  e  $10\text{Hz}$ .

$$a_{input} = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (7.8)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (7.9)$$

con  $A$ : ampiezza del segnale;  $\omega$ : pulsazione;  $t$ : tempo;  $\varphi$ : sfasamento;  $f$ : frequenza.

Si riporta in Figura 7-45.a la storia temporale dell'accelerazione applicata alla base del modello ed in Figura 7-45.b l'accelerazione calcolata in corrispondenza del coronamento della diga.

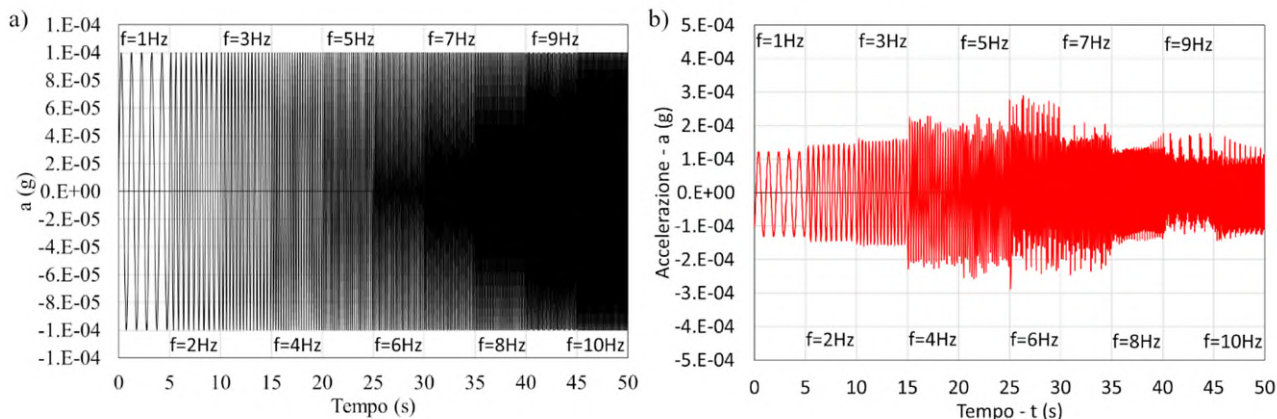


Figura 7-45 Storie temporali di accelerazione applicate alla base del modello numerico e calcolate in corrispondenza del coronamento della diga. a) simulazione con frequenze pari 2-4-6-8-10Hz; b) simulazione con frequenze dispari 1-3-5-7-9Hz.

Di seguito, in Figura 7-46 si riporta l'andamento del fattore di amplificazione del sisma (calcolato come rapporto tra accelerazione media registrata al coronamento ed accelerazione imposta alla base) per ogni frequenza investigata.

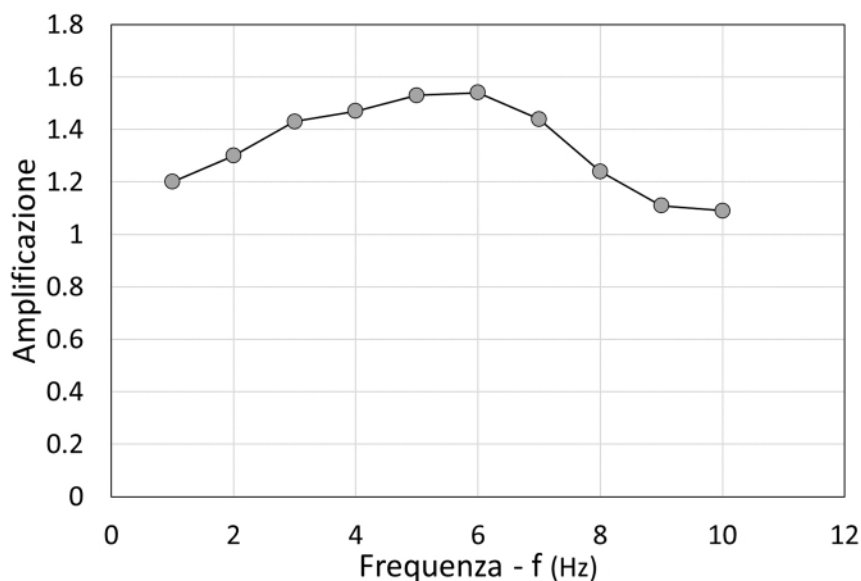


Figura 7-46 Andamento del fattore di amplificazione dell'input sismico in funzione della frequenza del segnale.

L'analisi della Figura 7-46 mostra come il modello numerico restituisca una frequenza propria di vibrazione della diga compresa tra 5 e 7Hz, quindi in accordo con il valore di 5.8Hz restituito da Gazetas & Dakoulas (1992).

Tali risultati confermano quindi che il modello numerico implementato simula in maniera adeguata il comportamento dinamico del corpo diga.



### 7.8.2 Validazione basata sulla back-analysis dei segnali sismici deconvoluti alla base del modello

Una seconda validazione dinamica del modello numerico è stata eseguita simulando nell'analisi 2D un affioramento rigido orizzontale a valle della diga (Figura 7-47) e confrontando che l'accelerogramma calcolato in questa posizione dal modello FLAC con quello assegnato come input alla procedura di deconvoluzione monodimensionale lineare equivalente (vedi Paragrafo 7.4).

Per la modellazione della diga sono stati adottati i medesimi modelli costitutivi e parametri fisici e meccanici utilizzati per la verifica dinamica (Paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), mentre la formazione delle argille puddingoidi è stata sostituita con lo strato rigido affiorante modellato con un modello isteretico caratterizzato dai parametri fisici, meccanici e di decadimento adottati per la deconvoluzione monodimensionale lineare equivalente (Paragrafo 7.4, Figura 7-8, Tabella 7-6).

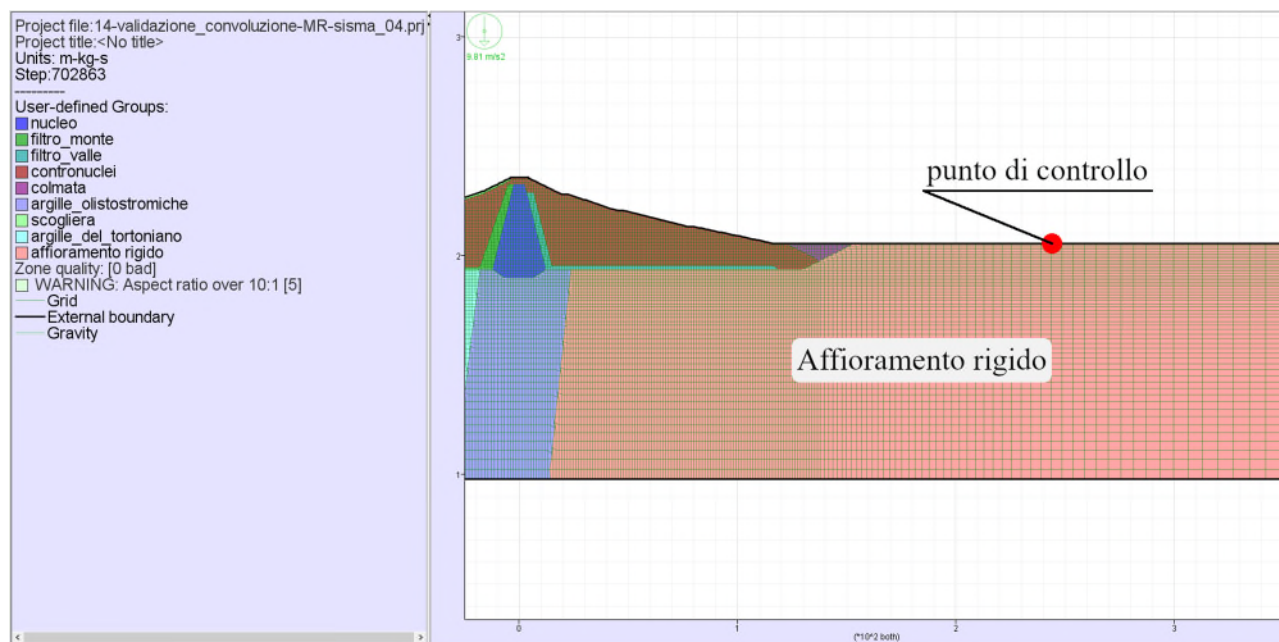


Figura 7-47 Discretizzazione geometrica concepita per la validazione del modello numerico.

La validazione è stata eseguita con riferimento all'accelerogramma 04-Mascioni Campotosto-E. In Figura 7-48 si confronta l'accelerogramma calcolato in corrispondenza dell'affioramento rigido (in nero) con quello di input della procedura di deconvoluzione (in rosso). Si nota come il segnale calcolato, riesca a cogliere il valore di accelerazione massima di riferimento ( $PGA=0.95g$ ) a conferma di un'adeguata capacità di simulazione dei fenomeni di propagazione delle onde sismiche.

In conclusione, il modello numerico bidimensionale elaborato restituisce risultati in buon accordo con quelli derivanti dall'analisi monodimensionale lineare equivalente eseguita in precedenza.

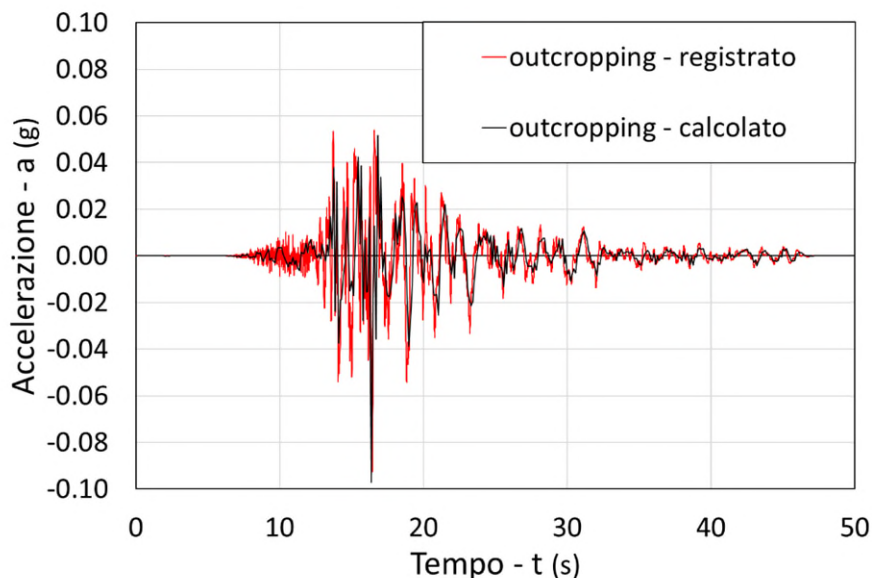


Figura 7-48 Confronto tra l'accelerogramma calcolato numericamente all'affioramento rigido e quello di input della procedura di deconvoluzione.

## 7.9 Risultati delle analisi

In questo paragrafo si riportano per ciascuno dei due stati limite analizzati i risultati delle analisi numeriche in termini di storie temporali degli spostamenti orizzontali e verticali calcolati in 6 punti di controllo situati nei punti più rappresentativi dell'opera di sbarramento (Figura 7-49) ed in termini di campi bidimensionali deformazione.

Sezione di verifica

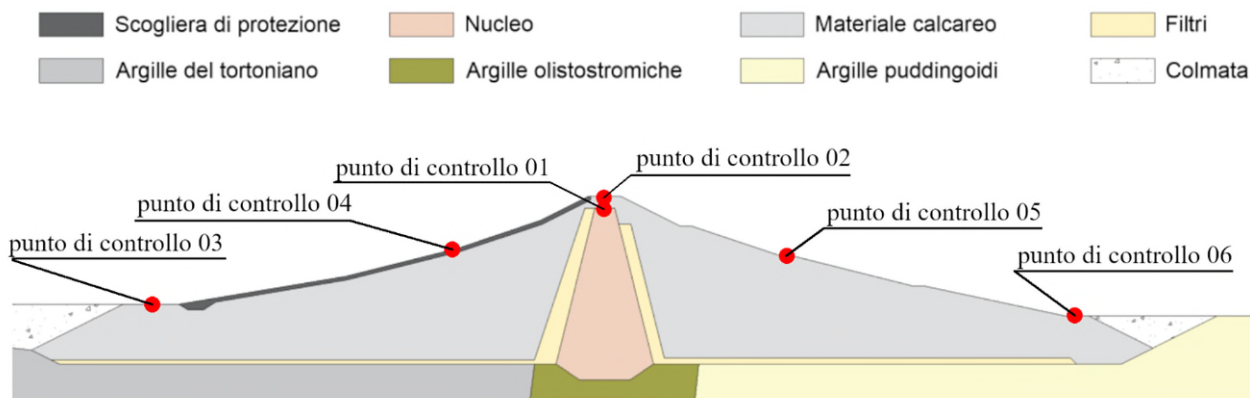




Figura 7-49 Posizione dei punti di controllo selezionati per l'analisi dei risultati.

In appendice si riportano inoltre per ogni analisi effettuata in un primo paragrafo le storie temporali degli spostamenti nei punti di controllo ed in un secondo paragrafo i campi bidimensionali più rappresentativi dello stato tenso-deformativo del corpo diga (tensione di taglio e deformazione di taglio).

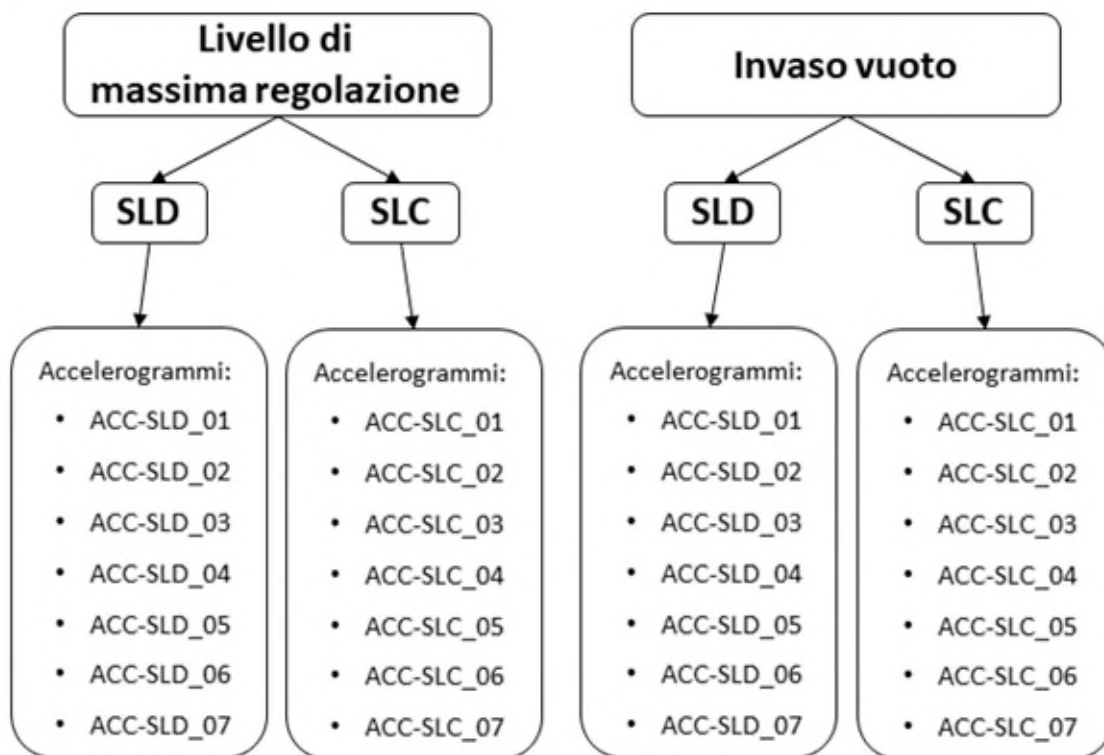
	<p style="text-align: center;"><i>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</i></p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Pag. 127 di 160</b></p>

Con riguardo al livello dell'invaso considerato nelle verifiche, le istruzioni per la verifica rilasciate dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti [3] prescrivono che “Per ciascuno stato limite andranno in ogni caso considerate le situazioni di serbatoio pieno (livello di invasore alla massima regolazione) e serbatoio vuoto”. Viste tali prescrizioni, le verifiche sismiche sia allo Stato Limite Ultimo sia allo Stato Limite di Danno sono state eseguite con riferimento alla condizione di invasore al livello di massima regolazione (229.0m s.l.m.m) e di invasore vuoto e per ognuna di queste due condizioni sono state esaminati sette differenti azioni sismiche selezionate in accordo con il D.M.26 giugno 2014 [1] (vedasi paragrafo 4.4) rappresentate da accelerogrammi registrati, rappresentativi della sismicità del sito. Si riporta in *Figura 7-50* uno schema riassuntivo della procedura di verifica.

### Normativa di riferimento

- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 26 giugno 2014 "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)".
- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»".
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Luglio 2018. Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie. Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18). Luglio 2018.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Marzo 2019. Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie. Procedura.

### Analisi da eseguire



### Analisi dinamica al passo - Procedura

- Definizione degli accelerogrammi di verifica (requisito di spettrocompatibilità).
- Discretizzazione geometrica della diga.
- Calibrazione dei modelli costitutivi dei materiali costituenti la formazione di base ed il corpo diga.
- Esecuzione dell'analisi numerica nel dominio del tempo.

5

Figura 7-50 Diagramma riassuntivo della procedura di verifica.



## 7.9.1 Stato Limite di Esercizio

### 7.9.1.1 Stato Limite di Danno

In questo paragrafo vengono riportati i risultati delle analisi effettuate nei confronti dello Stato Limite di Danno (SLD).

Nelle tabelle seguenti si riportano gli spostamenti orizzontali residui calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione (Tabella 7-7) ed invaso vuoto (Tabella 7-8), quindi gli spostamenti verticali calcolati con invaso alla quota di massima regolazione (Tabella 7-9) ed invaso vuoto (Tabella 7-10). I risultati mostrano che lo spostamento orizzontale massimo di -13.1mm si ottiene nel punto di controllo numero 3 (paramento di monte al piede) con invaso vuoto ed in corrispondenza dell'input sismico SLD-02-Assisi. Il cedimento massimo di 19.9mm si ottiene nel punto di controllo numero 4 (sul paramento di monte in corrispondenza del cambio di pendenza) con invaso vuoto con l'input sismico SLD-02-Assisi.

Tabella 7-7 Spostamenti orizzontali residui calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione.

Spostamenti orizzontali (mm)							
P.to di controllo	SLD-MR-01	SLD-MR-02	SLD-MR-03	SLD-MR-04	SLD-MR-05	SLD-MR-06	SLD-MR-07
1	0.3	2.8	0.8	3.8	0.8	-0.3	0.8
2	0.3	2.9	0.8	3.9	0.8	-0.2	0.8
3	-0.6	0.4	-0.5	2.3	-0.1	-1.8	-0.6
4	-0.2	2.0	0.1	3.1	0.4	-0.9	0.2
5	0.4	3.2	1.0	4.1	0.9	-0.1	1.0
6	0.6	3.2	1.1	4.2	1.0	0.0	1.0
7	0.3	2.8	0.8	3.8	0.8	-0.3	0.8
8	0.3	2.9	0.8	3.9	0.8	-0.2	0.8

Tabella 7-8 Spostamenti orizzontali residui calcolati per i sette accelerogrammi con invaso vuoto.

Spostamento orizzontale (mm)							
P.to di controllo	SLD-V-01	SLD-V-02	SLD-V-03	SLD-V-04	SLD-V-05	SLD-V-06	SLD-V-07
1	0.1	-4.6	-0.8	2.1	-0.5	-0.9	-0.6
2	0.3	-4.6	-1.0	2.0	-0.6	-0.9	-0.6
3	-1.0	-13.1	2.3	2.4	0.2	-0.7	-0.7
4	0.4	-12.8	-2.9	-1.6	-2.9	-1.2	-3.3
5	0.9	8.3	-1.0	4.3	0.6	-0.4	0.9
6	1.2	9.7	-0.9	4.7	0.8	-0.1	1.5
7	0.1	-4.6	-0.8	2.1	-0.5	-0.9	-0.6
8	0.3	-4.6	-1.0	2.0	-0.6	-0.9	-0.6



Tabella 7-9 Spostamenti verticali residui calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione.

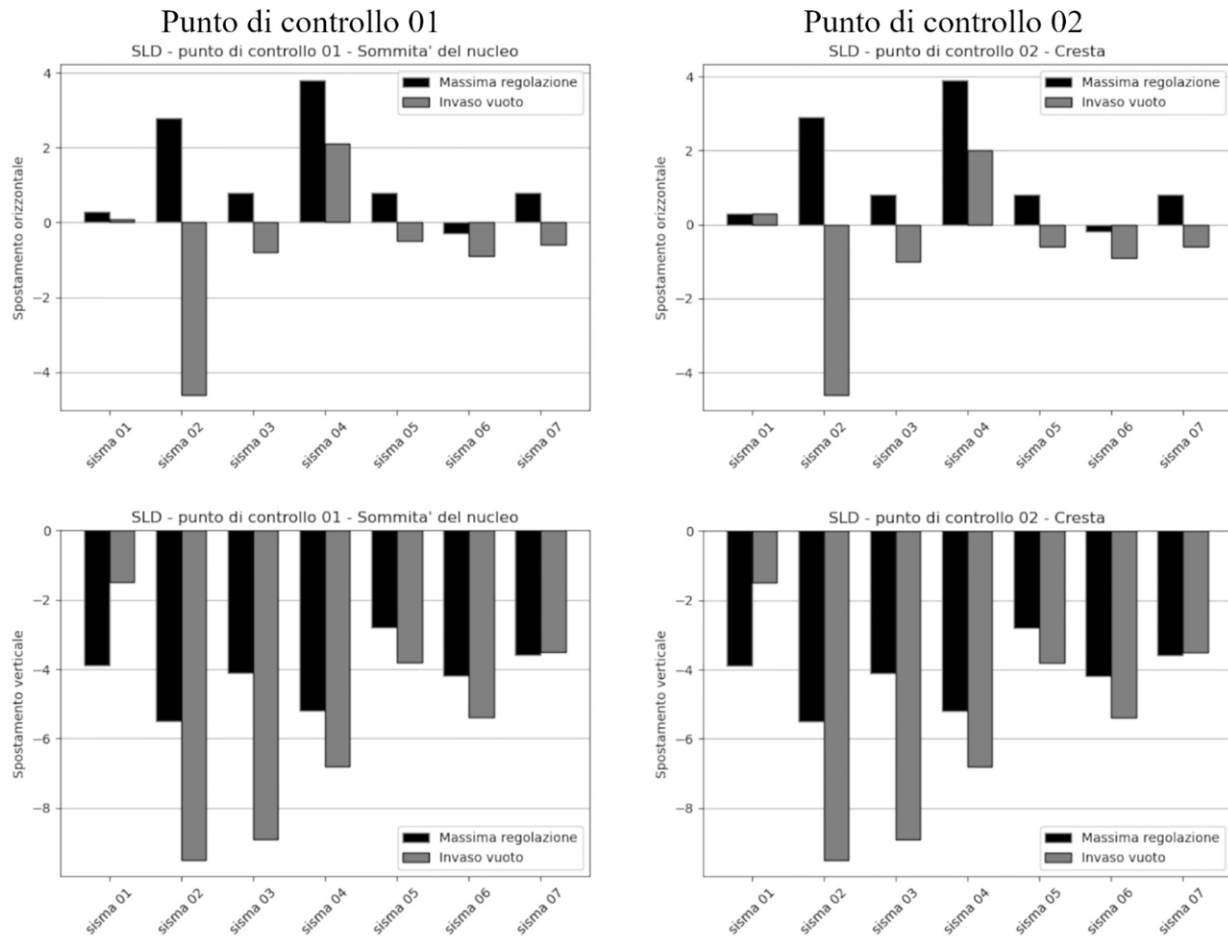
Spostamento verticale (mm)							
P.to di controllo	SLD-MR-01	SLD-MR-02	SLD-MR-03	SLD-MR-04	SLD-MR-05	SLD-MR-06	SLD-MR-07
1	-3.9	-5.5	-4.1	-5.2	-2.8	-4.2	-3.6
2	-3.9	-5.5	-4.1	-5.2	-2.8	-4.2	-3.6
3	-3.4	-5.5	-3.9	-5.1	-2.7	-4.1	-3.6
4	-4.0	-6.0	-4.2	-5.5	-2.9	-4.4	-3.8
5	-3.8	-5.6	-4.1	-5.3	-2.9	-4.2	-3.7
6	-3.0	-4.1	-3.2	-4.2	-2.2	-3.2	-2.8
7	-3.9	-5.5	-4.1	-5.2	-2.8	-4.2	-3.6
8	-3.9	-5.5	-4.1	-5.2	-2.8	-4.2	-3.6

Tabella 7-10 Spostamenti verticali residui calcolati per i sette accelerogrammi con invaso vuoto.

Spostamento verticale (mm)							
P.to di controllo	SLD-V-01	SLD-V-02	SLD-V-03	SLD-V-04	SLD-V-05	SLD-V-06	SLD-V-07
1	-1.5	-9.5	-8.9	-6.8	-3.8	-5.4	-3.5
2	-1.5	-9.5	-8.9	-6.8	-3.8	-5.4	-3.5
3	-1.2	-11.7	-0.9	-4.2	-2.0	-2.8	-2.6
4	0.2	-19.9	-7.8	-11.1	-8.3	-5.6	-7.0
5	-2.4	-7.3	-7.3	-8.4	-4.5	-5.0	-4.7
6	-1.9	-6.5	-5.5	-6.5	-3.5	-4.2	-4.2
7	-1.5	-9.5	-8.9	-6.8	-3.8	-5.4	-3.5
8	-1.5	-9.5	-8.9	-6.8	-3.8	-5.4	-3.5

Gli stessi risultati riportati sinteticamente nelle tabelle sopra proposte, sono diagrammati nelle figure seguenti. In ognuno dei diagrammi presenti in ogni figura si mostra lo spostamento di uno specifico punto di controllo per i sette accelerogrammi di verifica sia con invaso alla quota di massima regolazione che di invaso vuoto.

### Stato Limite di Danno



### Sezione di verifica

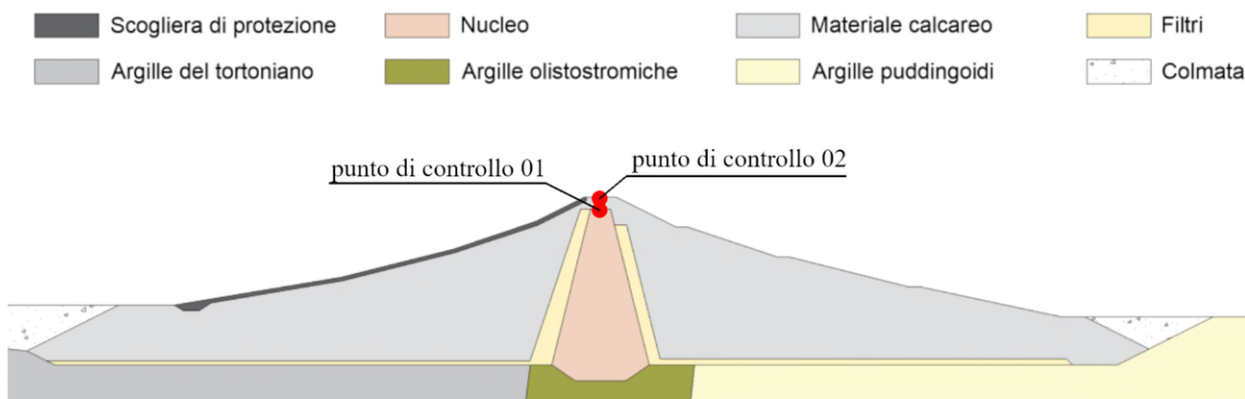
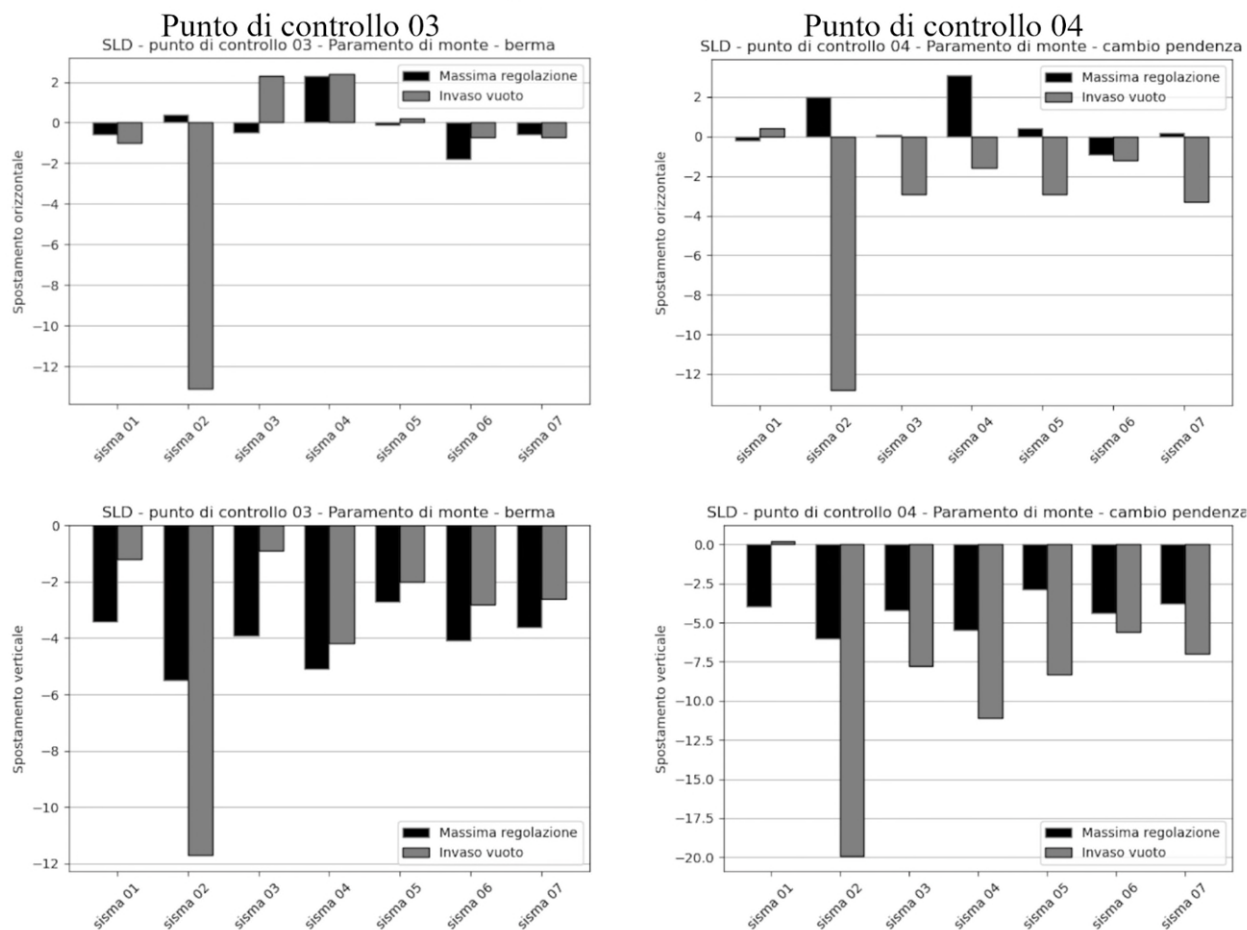


Figura 7-51 Spostamenti orizzontali residui calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 01-02 per i sette accelerogrammi SLD, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto.

### Stato Limite di Danno



### Sezione di verifica

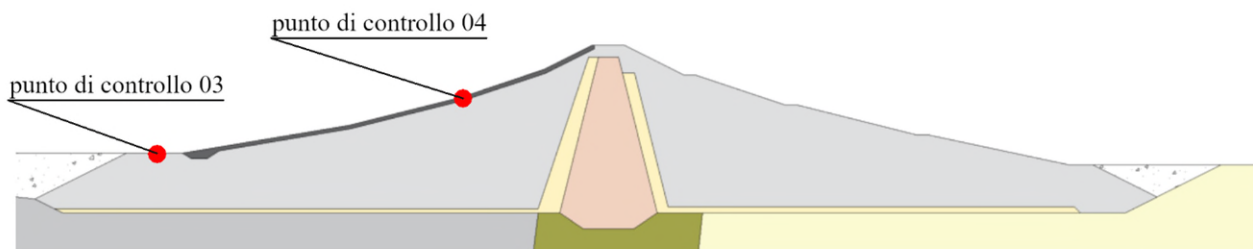
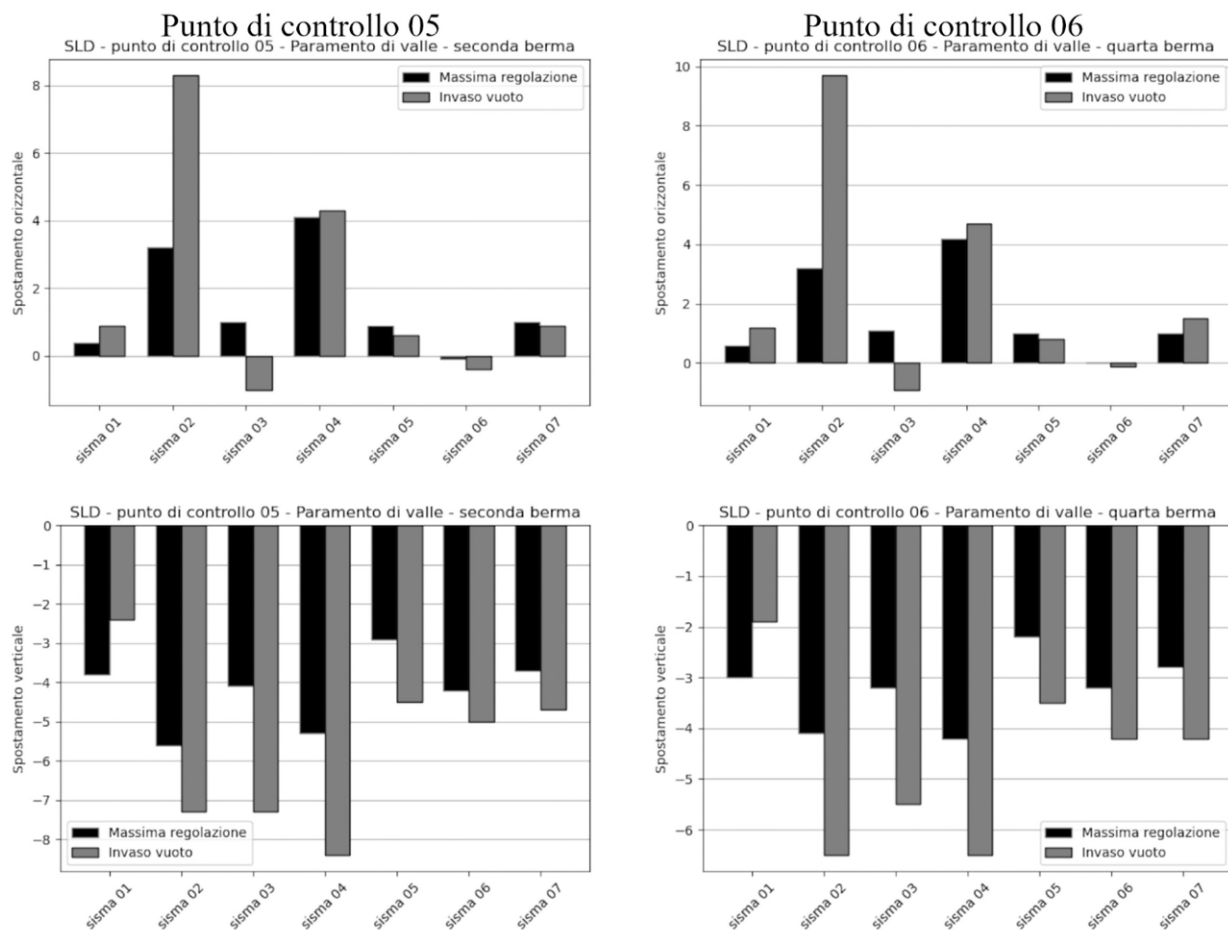


Figura 7-52 Spostamenti orizzontali residui calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 03-04 per i sette accelerogrammi SLD, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto.

### Stato Limite di Danno



### Sezione di verifica

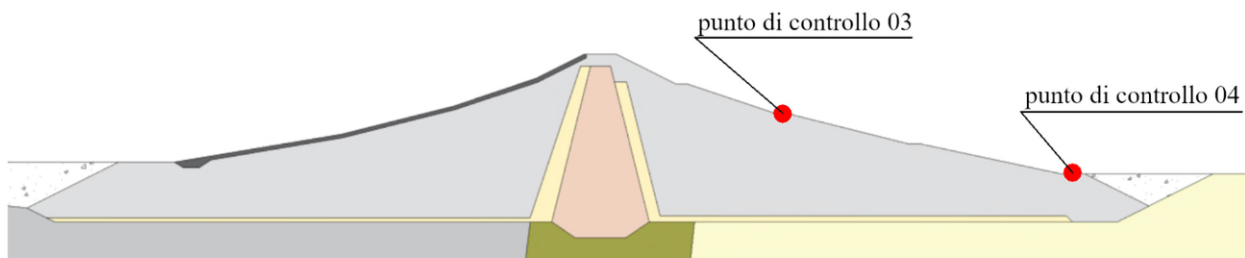


Figura 7-53 Spostamenti verticali residui calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 05-06 per i sette accelerogrammi SLD, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto.

Le analisi eseguite nei confronti dello Stato Limite di Danno mostrano che il coronamento subisce uno spostamento orizzontale massimo di -4.6mm (analisi condotta con input sismico SLD-02-Assisi

ed invaso vuoto) ed un cedimento massimo di 9.5mm (analisi condotta con input sismico SLD–02-Assisi ed invaso vuoto).

La sommità del nucleo ha mostrato uno spostamento verticale di massimo di 9.5mm (analisi condotta con input sismico SLD–02-Assisi ed invaso vuoto).

Dato lo spostamento verticale massimo del coronamento è stato calcolato il rapporto S/H così come definito da Swaisgood (2003), cioè come il rapporto tra il cedimento del coronamento e l'altezza della diga maggiorata dello spessore dello strato deformabile (si riporta in Figura 7-54 un'immagine estratta dall'articolo originale di Swaisgood raffigurante il calcolo del rapporto S/H).

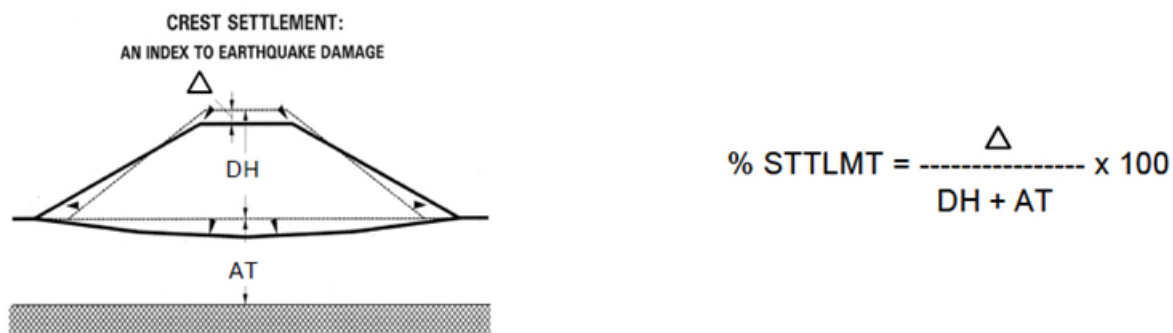


Figura 7-54 Schema di calcolo del rapporto S/H (Swaisgood, 2003).

Si è considerato a vantaggio di sicurezza uno spessore dello strato deformabile nullo. Il valore del rapporto S/H ottenuto è del 0.021% corrispondente ad un livello di danneggiamento della diga assente /lieve (Figura 7-55).

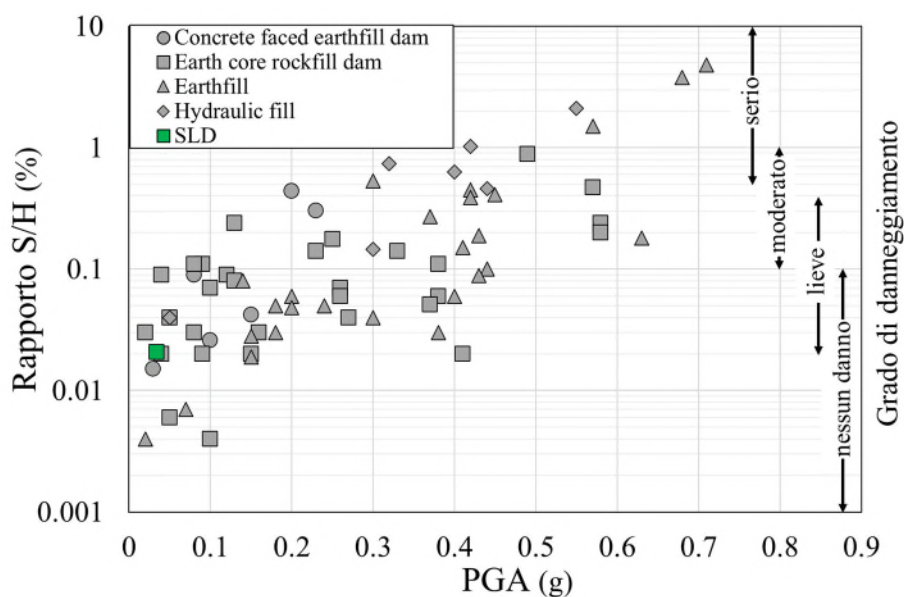


Figura 7-55 Grado di danneggiamento per lo stato limite di danno secondo l'abaco di Swaisgood (2003).



In Tabella 7-11 si riportano i valori della deformazione distorsionale massima registrata nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati sia con invaso alla quota di massima regolazione che con invaso vuoto. Il valore massimo  $\varepsilon_q=0.53\%$  è stata registrata per l'input sismico SLD-06-Sant'Agostino ed invaso vuoto.

Tabella 7-11 Valori massimi della deformazione di taglio registrati nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati, sia con invaso alla quota di massima regolazione che invaso vuoto.

SLD - Deformazione distorsionale massima nel nucleo (%)							
Input sismico	SLD-01	SLD-02	SLD-03	SLD-04	SLD-05	SLD-06	SLD-07
massima regolazione	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
invaso vuoto	0.16	0.51	0.25	0.33	0.29	0.53	0.43

I medesimi valori riportati in Tabella 7-11 si riportano graficamente in Figura 7-56 per un più immediato confronto tra i risultati.

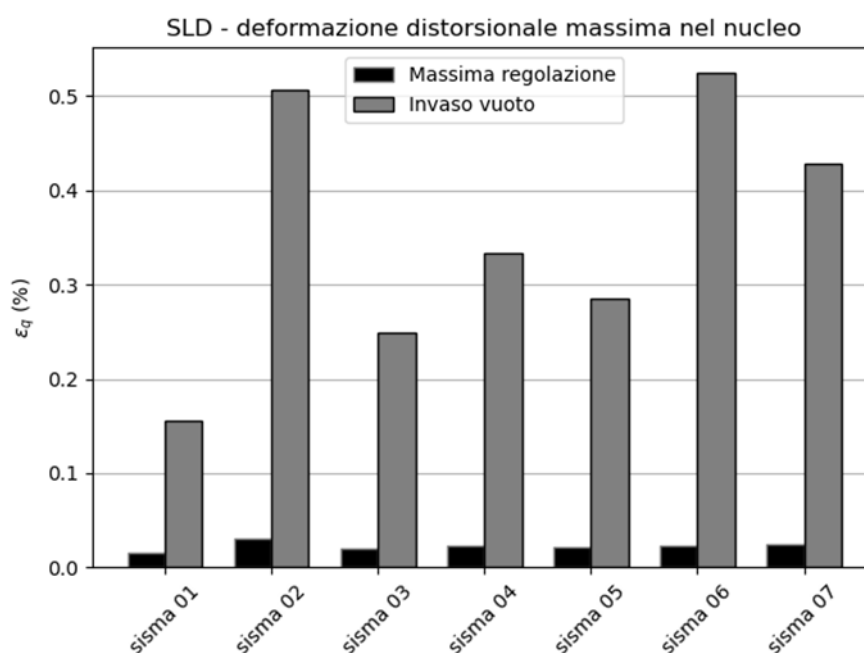


Figura 7-56 Valori massimi della deformazione di taglio registrati nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati, sia con invaso alla quota di massima regolazione che invaso vuoto.

La Figura 7-57 riporta il campo della deformazione distorsionale nel corpo diga relativo all'input sismico SLD-06-Sant'Agostino ed invaso vuoto. La figura mostra un valore massimo della deformazione di taglio  $\varepsilon_{q,MAX}=0.53\%$  registrato limitatamente alla zona sommitale più esterna del nucleo. Dalla figura si evidenzia l'assenza di superfici continue di scorrimento che possano determinare l'instabilità del corpo diga.

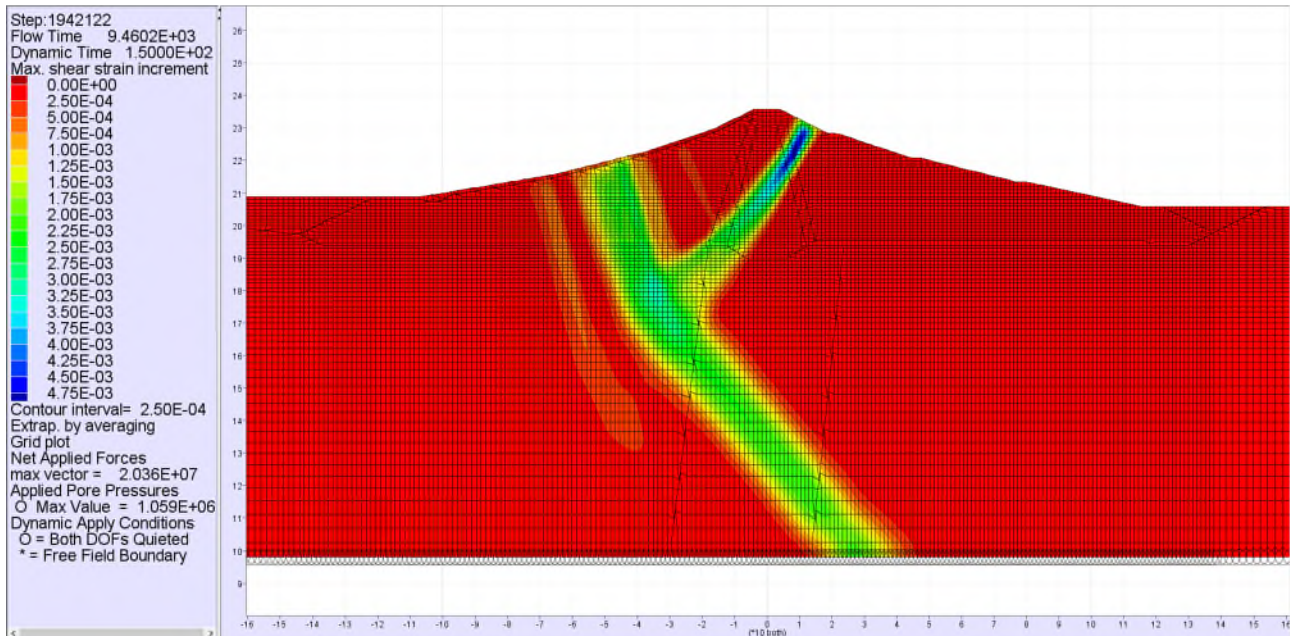


Figura 7-57 Campo della deformazione di taglio nella diga – Verifica allo Stato Limite di Danno – invaso vuoto – input sismico SLD-06-Sant’Agostino.

## 7.9.2 Stato Limite Ultimo

### 7.9.2.1 Stato Limite di Collasso

In questo paragrafo vengono riportati i risultati delle analisi effettuate nei confronti dello stato limite ultimo (SLC).

Nelle tabelle seguenti si riportano gli spostamenti orizzontali calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione (Tabella 7-12) ed invaso vuoto (Tabella 8-22), quindi gli spostamenti verticali calcolati con invaso alla quota di massima regolazione (Tabella 7-14) ed invaso vuoto (Tabella 7-15).

I risultati mostrano che lo spostamento orizzontale massimo di -34.5mm si ottiene nel punto di controllo numero 3 (paramento di monte al piede) con l’invaso vuoto ed in corrispondenza dell’input sismico SLC-01-Amatrice. Il cedimento massimo di 27mm si ottiene nei punti di controllo numero 3 e 4 (sommità del nucleo e cresta) con l’invaso vuoto ed in corrispondenza dell’input sismico SLC-01-Amatrice.

Tabella 7-12 Spostamenti orizzontali calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione.

P.to di controllo	Spostamenti orizzontali (mm)						
	SLC-MR-01	SLC-MR-02	SLC-MR-03	SLC-MR-04	SLC-MR-05	SLC-MR-06	SLC-MR-07
1	1.6	-1.0	0.1	2.2	-2.8	-1.8	0.3
2	1.8	-1.0	0.1	2.3	-2.8	-1.8	0.3
3	-7.5	-3.1	-2.2	-1.9	-4.9	-5.2	-0.3
4	-1.6	-2.0	-1.0	0.5	-3.7	-3.3	-0.1
5	3.8	-0.6	0.7	3.3	-2.1	-1.1	0.6
6	2.6	-0.1	1.1	3.1	-1.6	-1.1	0.9

Tabella 7-13 Spostamenti orizzontali calcolati per i sette accelerogrammi con invaso vuoto.

Spostamenti orizzontali (mm)							
P.to di controllo	SLC-V-01	SLC-V-02	SLC-V-03	SLC-V-04	SLC-V-05	SLC-V-06	SLC-V-07
1	-3.1	-2.9	-0.4	0.8	-4.3	-4.8	-0.4
2	-2.3	-2.9	-0.3	1.0	-3.9	-4.6	-0.2
3	-34.5	-3.7	2.8	-6.6	-10.1	-13.6	-4.1
4	-15.7	-8.3	-1.0	-3.4	-7.0	-9.6	-2.2
5	18.1	-0.6	0.7	6.8	0.4	2.6	2.9
6	27.0	1.1	3.5	9.4	2.3	5.8	4.7

Tabella 7-14 Spostamenti verticali calcolati per i sette accelerogrammi con invaso alla quota di massima regolazione.

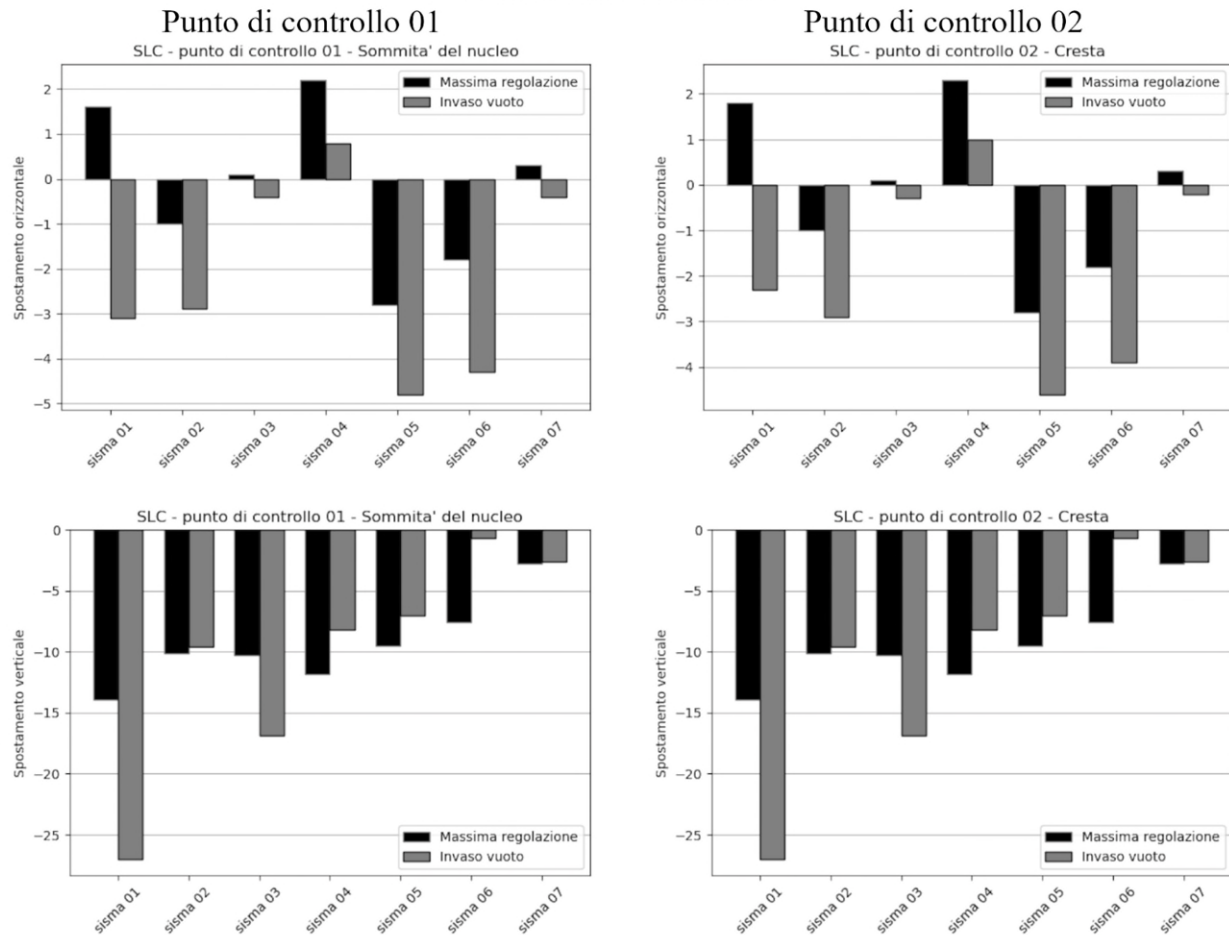
Spostamenti verticali (mm)							
P.to di controllo	SLC-MR-01	SLC-MR-02	SLC-MR-03	SLC-MR-04	SLC-MR-05	SLC-MR-06	SLC-MR-07
1	-13.9	-10.1	-10.3	-11.8	-9.5	-7.6	-2.8
2	-13.9	-10.1	-10.3	-11.8	-9.5	-7.6	-2.8
3	-15.6	-9.4	-9.4	-11.8	-8.5	-7.6	-2.5
4	-16.3	-10.3	-10.4	-12.6	-9.4	-7.9	-2.7
5	-15.7	-10.1	-10.4	-12.7	-9.6	-8.3	-2.9
6	-10.9	-8.5	-8.6	-10.1	-8.0	-6.3	-2.4

Tabella 7-15 Spostamenti verticali calcolati per i sette accelerogrammi con invaso vuoto.

Spostamenti verticali (mm)							
P.to di controllo	SLC-V-01	SLC-V-02	SLC-V-03	SLC-V-04	SLC-V-05	SLC-V-06	SLC-V-07
1	-27.0	-9.6	-16.9	-8.2	-0.7	-7.0	-2.6
2	-27.0	-9.6	-16.9	-8.2	-0.7	-7.0	-2.6
3	-23.1	-6.6	-3.8	-3.7	-8.8	-8.8	-4.1
4	-4.3	-15.1	-9.1	-0.1	-5.2	-4.7	-1.3
5	0.8	-11.4	-15.5	0.8	-6.1	-2.5	-1.3
6	-18.3	-11.3	-17.4	-3.5	-8.9	-7.4	-5.0

Gli stessi risultati riportati sinteticamente nelle tabelle sopra proposte, sono diagrammati nelle figure seguenti. Per ogni figura, in ognuno dei diagrammi si mostra lo spostamento di uno specifico punto di controllo per i sette accelerogrammi di verifica sia con invaso alla quota di massima regolazione che di invaso vuoto.

### Stato Limite di Collasso



### Sezione di verifica

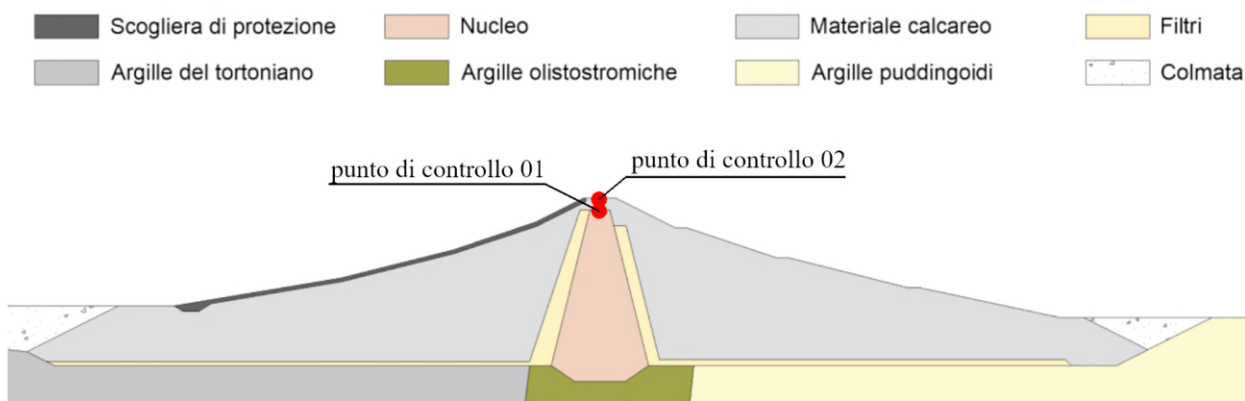
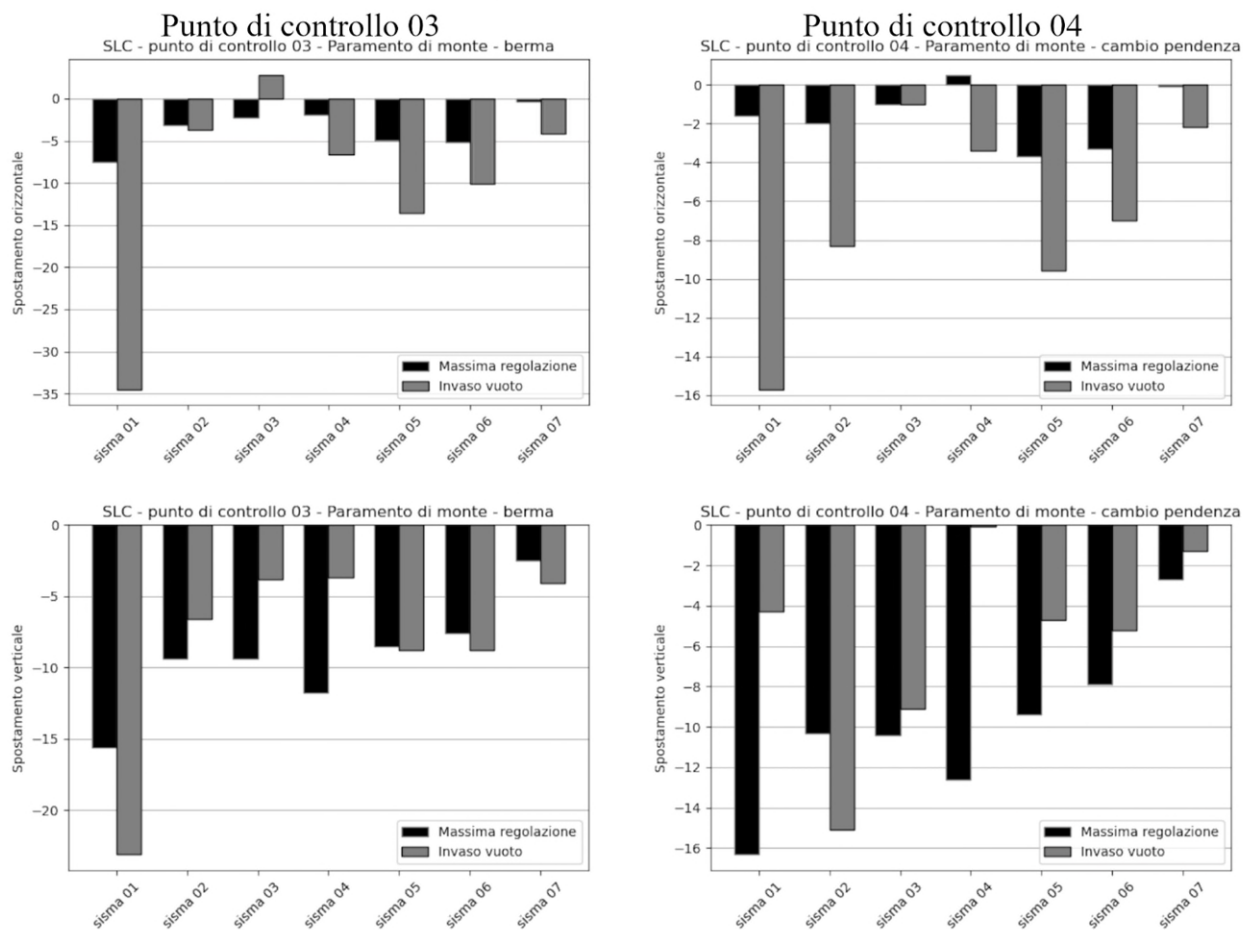


Figura 7-58 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 01 e 02 per i sette accelerogrammi SLC, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto.

### Stato Limite di Collasso



### Sezione di verifica

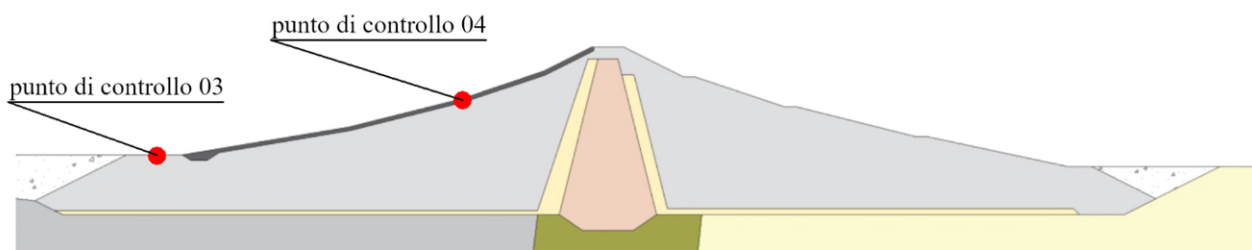
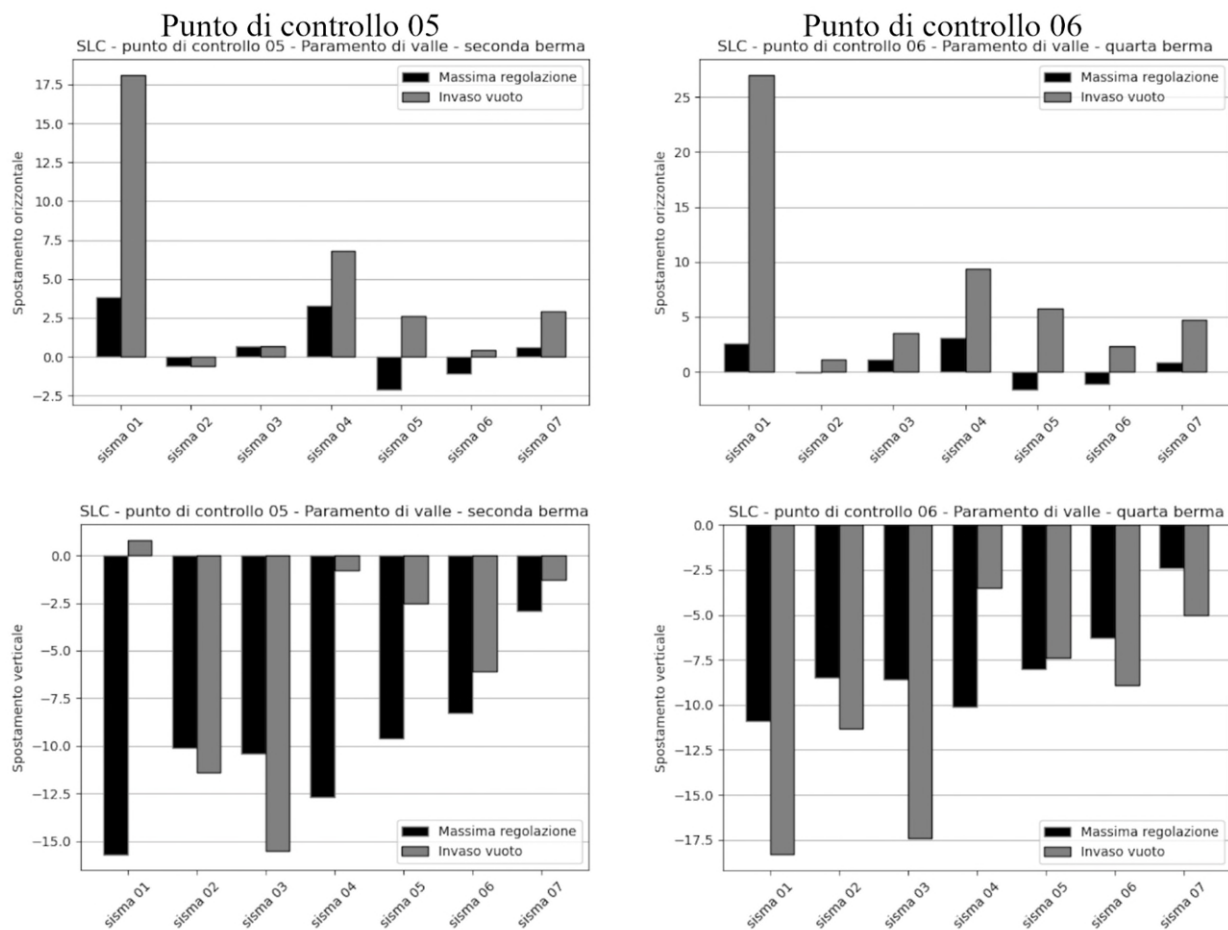


Figura 7-59 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 03 e 04 per i sette accelerogrammi SLC, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto.



### Stato Limite di Collasso



### Sezione di verifica

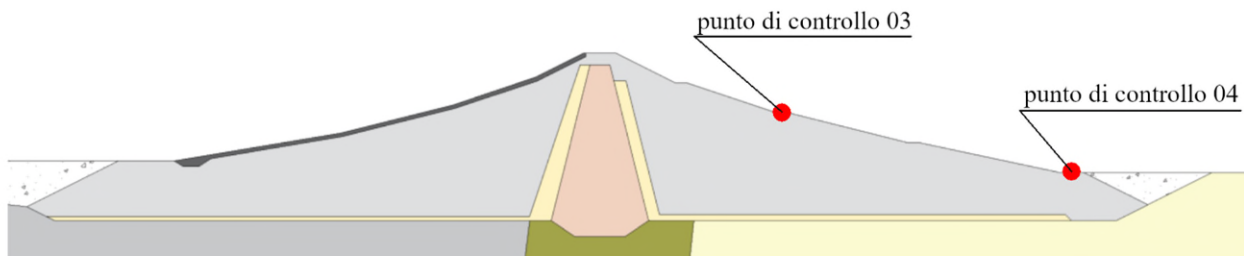


Figura 7-60 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 05 e 06 per i sette accelerogrammi SLC, per invaso alla quota di massima regolazione ed invaso vuoto.

Le analisi eseguite nei confronti dello Stato Limite di Collasso mostrano che il coronamento subisce uno spostamento orizzontale massimo di -4.6mm (analisi condotta con input sismico SLC-06-Mascioni – Campotosto - N ed invaso vuoto) ed un cedimento massimo di 27.0mm (analisi condotta con input sismico SLC-01-Amatrice ed invaso vuoto).

La sommità del nucleo ha mostrato il medesimo cedimento della cresta di 27.0mm (analisi condotta con input sismico SLC-01-Amatrice ed invaso vuoto).

Calcolato il cedimento massimo del coronamento è stato calcolato il rapporto S/H di Swaisgood (2003) così come definito nel paragrafo precedente (Paragrafo 7.9.1). Il valore ottenuto è del 0.06% corrispondente ad un livello di danneggiamento lieve/moderato della diga.

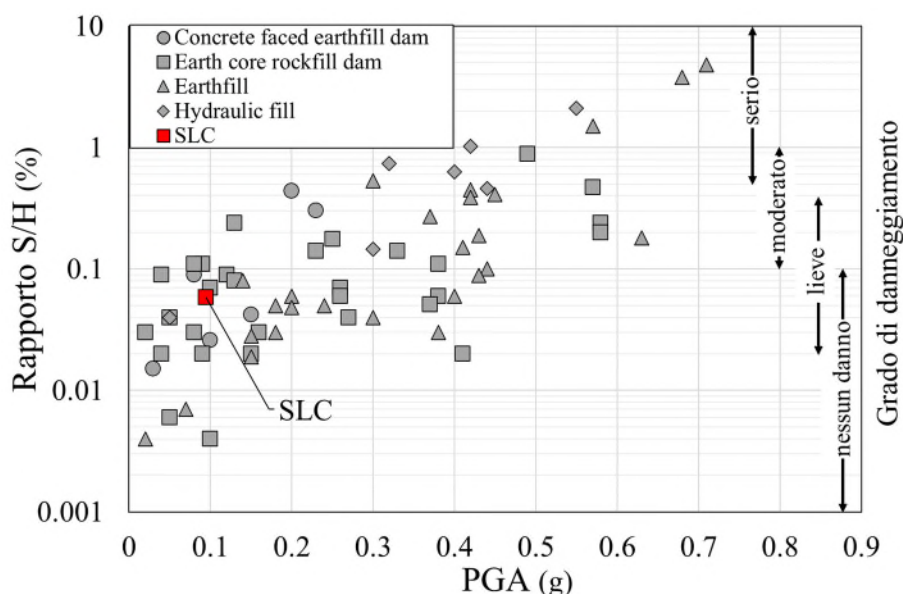


Figura 7-61 Grado di danneggiamento per lo stato limite di collasso secondo l'abaco di Swaisgood (2003).

Si riportano nella seguente Tabella 7-16 i valori massimi del rapporto di sovrappressione ( $r_u$  in Equazione 9.14) registrati nel contronucleo durante le sette analisi allo stato limite di danno sia con invaso alla quota di massima regolazione, che invaso vuoto. Il valore più elevato  $r_{u,MAX}=0.996\%$  è stato registrato nel corso dell'analisi con l'input sismico SLC-01-Amatrice con invaso al livello di massima regolazione.

Tabella 7-16 Valori massimi del rapporto di sovrappressione registrati nei contronuclei della diga per i sette input sismici considerati sia con invaso a livello di massima regolazione che invaso vuoto.

SLC - Rapporto di sovrappressione massimo (%)							
input sismico	SLC-01	SLC-02	SLC-03	SLC-04	SLC-05	SLC-06	SLC-07
massima regolazione	0.996	0.667	0.667	0.51	0.543	0.51	0.363
invaso vuoto	0.005	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001

I medesimi valori riportati in Tabella 7-16 si propongono in Figura 7-62 per un più immediato confronto tra i risultati.

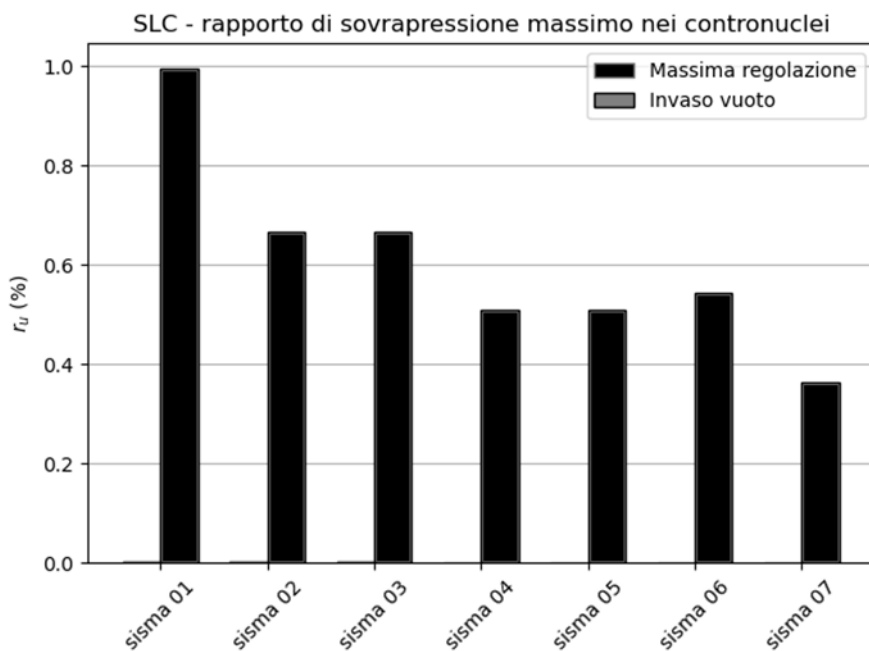


Figura 7-62 Valori massimi del rapporto di sovrappressione registrati nei contronuclei della diga per i sette input sismici considerati sia con invaso a livello di massima regolazione che invaso vuoto.

In Figura 7-63 si riporta l'intero campo del rapporto di sovrappressione massimo registrato per l'analisi che ha mostrato gli incrementi di sovrappressione più significativi (input sismico SLC-01-Amatrice – invaso alla quota di massima regolazione). La figura mostra come i valori più elevati di  $r_u=9\%$  si raggiungano in corrispondenza del nucleo dell'avandiga, laddove ad ogni modo il rischio di liquefazione non è presente. I contronuclei per via dell'elevata permeabilità sono invece caratterizzati da valori di  $r_u$  di un ordine di grandezza più bassi ( $r_{u,MAX}=0.996\%$ ).

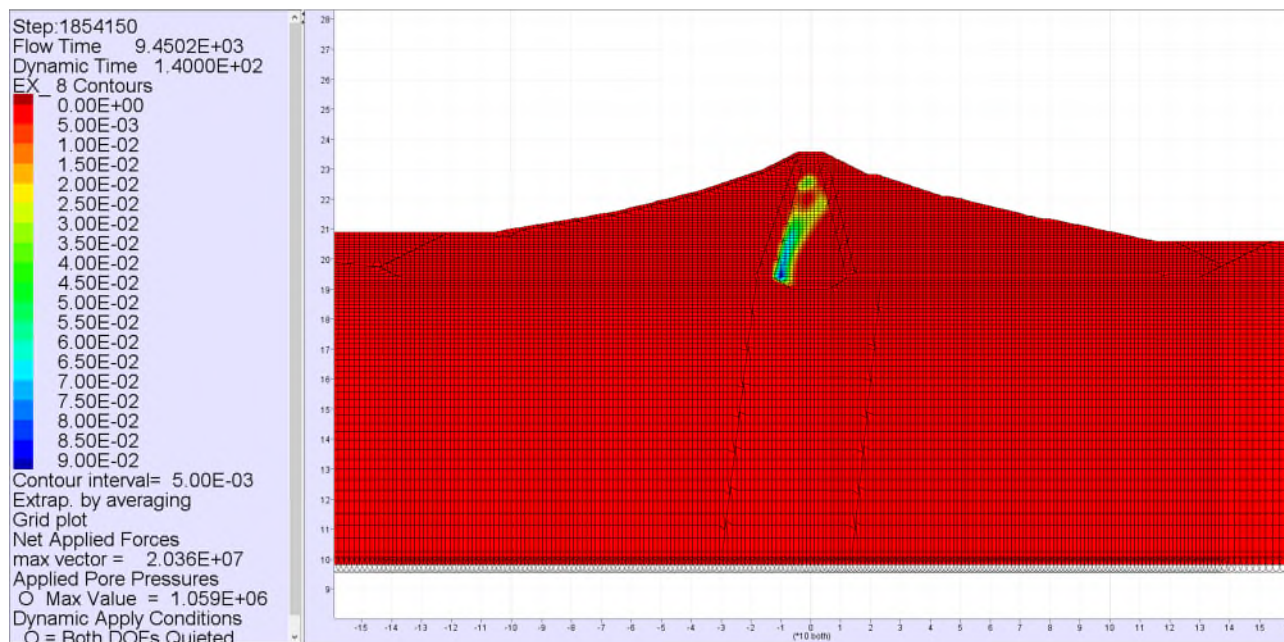


Figura 7-63 Campo della massima sovrappressione nella diga – Verifica allo Stato Limite di Collasso – livello di massima regolazione – input sismico 01-L'Aquila.

In Tabella 7-17 si riportano i valori della deformazione distorsionale massima registrata nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati sia con invaso alla quota di massima regolazione che con invaso vuoto. Il valore massimo  $\varepsilon_q=0.671\%$  è stata registrata per l'input sismico SLC-01-Amatrice ed invaso vuoto.

Tabella 7-17 Valori massimi della deformazione di taglio registrati nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati, sia con invaso alla quota di massima regolazione che invaso vuoto.

SLC - Deformazione distorsionale massima nucleo (%)

input sismico	SLC-01	SLC-02	SLC-03	SLC-04	SLC-05	SLC-06	SLC-07
massima regolazione	0.085	0.022	0.022	0.043	0.022	0.034	0.012
invaso vuoto	0.671	0.223	0.269	0.261	0.200	0.248	0.148

I medesimi valori riportati in Tabella 7-17 si propongono in Figura 7-64 per un più immediato confronto tra i risultati.

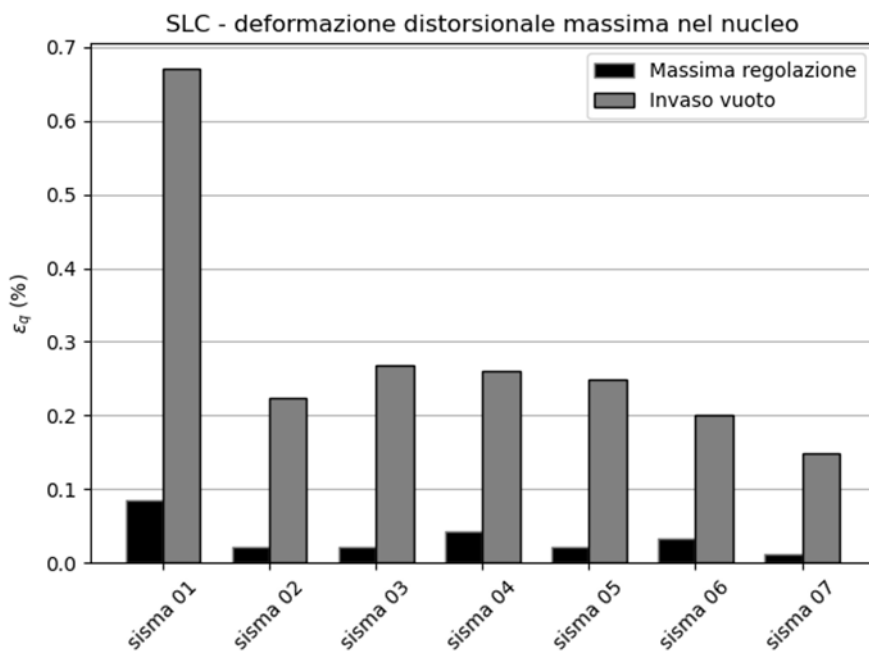


Figura 7-64 Valori massimi della deformazione di taglio registrati nel nucleo della diga per i sette input sismici considerati, sia con invaso alla quota di massima regolazione che invaso vuoto.

In Figura 7-65 si riporta per l'input sismico che ha prodotto la massima deformazione di taglio (SLC-01-Amatrice-invaso vuoto) l'intero campo della deformazione di taglio all'interno dell'intero corpo diga. La figura mostra un valore massimo della deformazione di taglio  $\varepsilon_{q,MAX}=0.671\%$  registrato nella zona sommitale del nucleo. L'assenza di superfici continue di scorrimento ad ogni modo sconsiglia l'insorgere di fenomeni di instabilità.



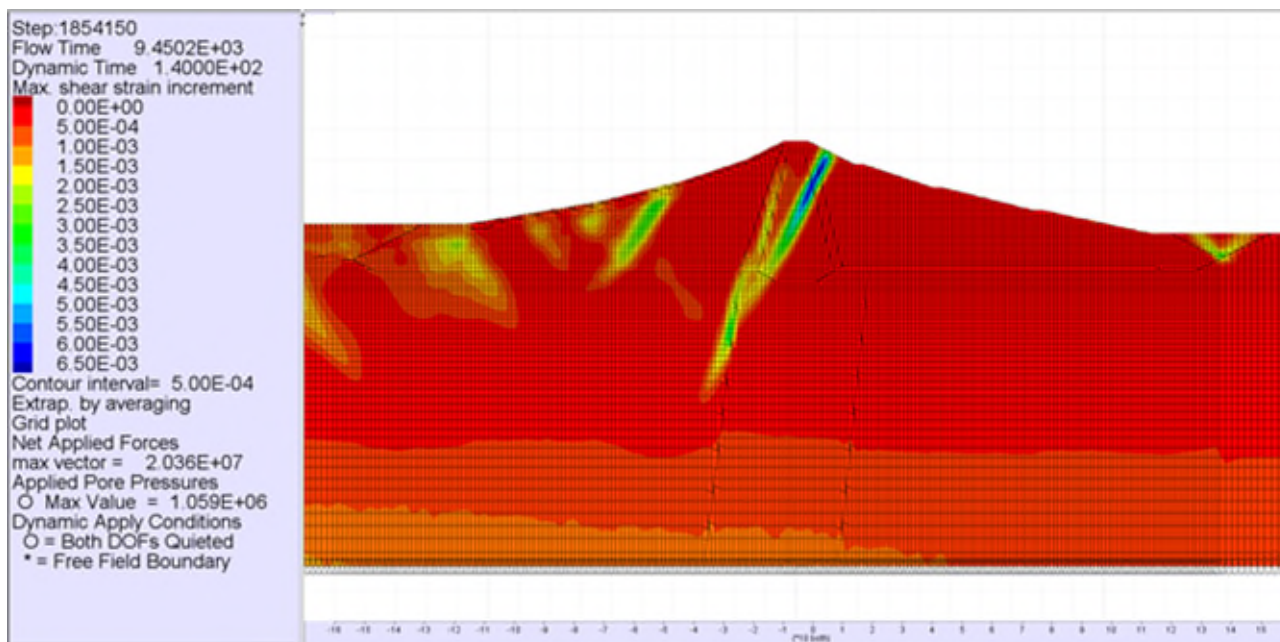


Figura 7-65 Campo della deformazione distorsionale nella diga – Verifica allo Stato Limite di Collasso – livello di massima regolazione – input sismico 05 – Norcia – La Castellina

Le verifiche della diga nei confronti dell'erosione interna sono state eseguite in ottemperanza ai dettami delle “Istruzioni per l'applicazione della normativa” [3].

Si precisa che la problematica dell'erosione interna riguarda esclusivamente il filtro sub-verticale di valle.

In Figura 7-66 si riportano le deformazioni distorsionali permanenti calcolate nei filtri per i sette accelerogrammi di verifica con invaso alla quota di massima regolazione e d invaso vuoto. Si nota che la deformazione residua più significativa  $\epsilon_q=0.672\%$  è stata calcolata per l'accelerogramma SLC-01-Amatrice con invaso vuoto. Il valore modesto della deformazione distorsionale ( $<1\%$ ) suggerisce che i filtri della diga sono da considerarsi verificati nei confronti dei fenomeni di fratturazione meccanica.

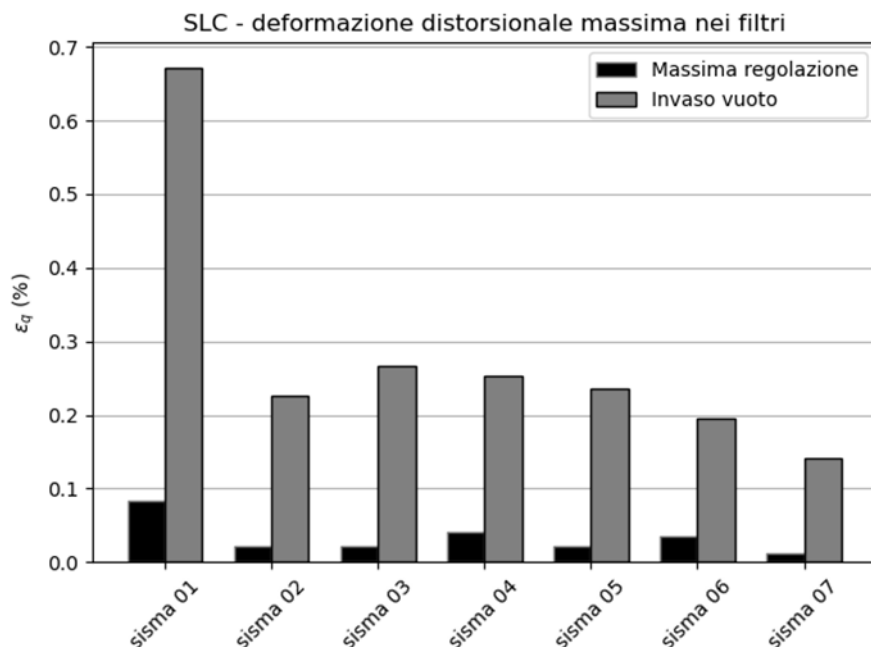


Figura 7-66 Deformazioni distorsionali permanenti calcolate nei filtri per i sette accelerogrammi di verifica con invaso alla quota di massima regolazione e d invaso vuoto

In Figura 7-67 si riportano i valori massimi del rapporto tra la pressione neutra e la tensione principale minima calcolata nei filtri per i sette accelerogrammi di verifica ed invaso alla quota di massima regolazione. Si nota che il valore massimo di 62.5% è stato calcolato per l'accelerogramma SLC-06-Mascioni-Campotosto-N e risulta minore del 100%. Di conseguenza i filtri della diga sono da considerarsi verificati nei confronti dei fenomeni di fratturazione idraulica.

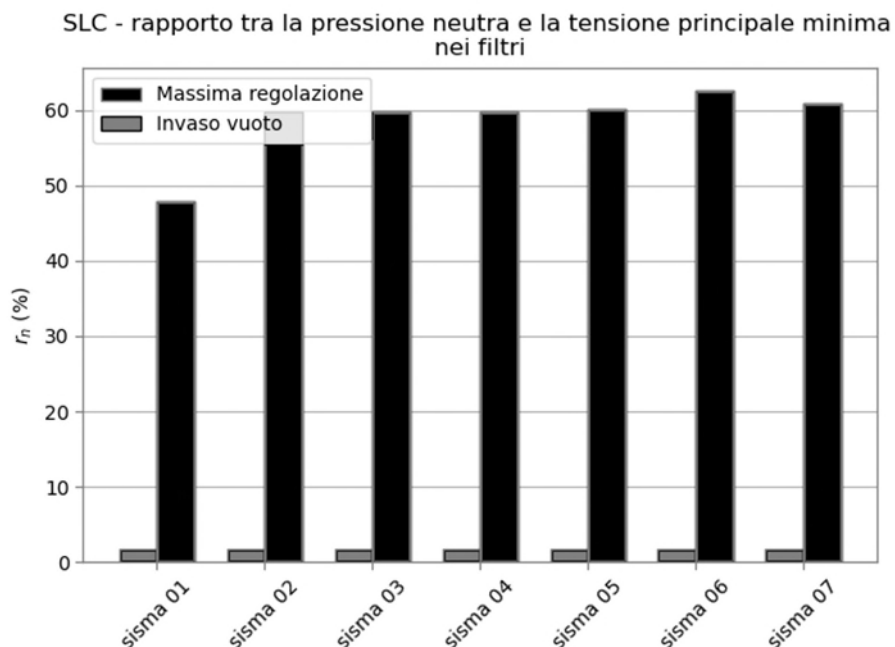


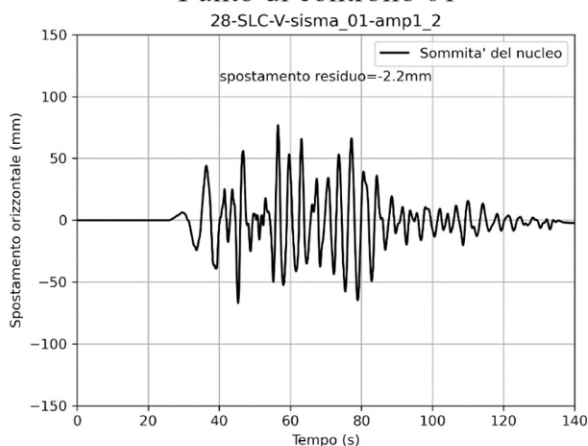
Figura 7-67 Valore massimo del rapporto tra la pressione neutra e la tensione principale minima calcolata nei filtri per i sette accelerogrammi di verifica ed invaso alla quota di massima regolazione.

Allo scopo di valutare l'insorgere di possibili fenomeni di instabilità nel corpo diga e nei terreni di fondazione è stata eseguita un'ulteriore analisi amplificando l'input sismico che ha prodotto gli spostamenti più significativi: "01-Amatrice" per un fattore 1.2.

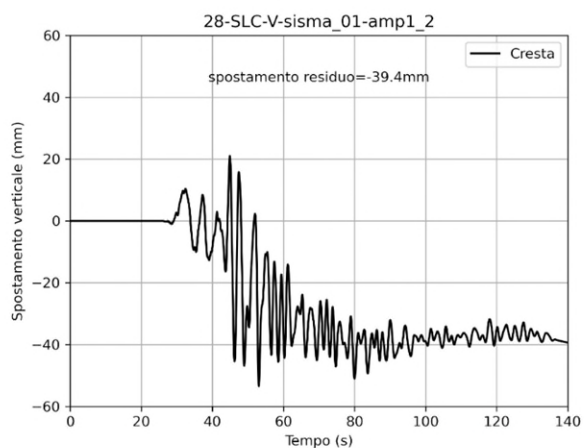
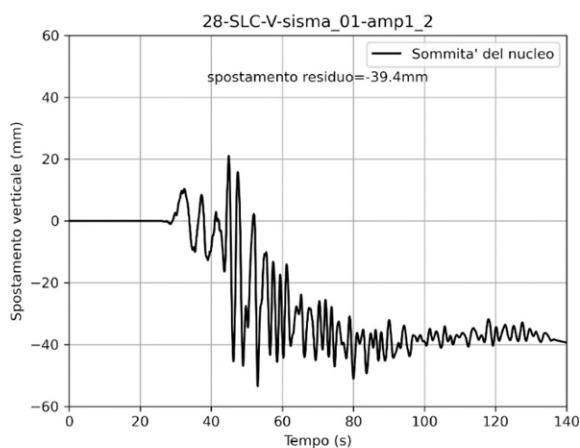
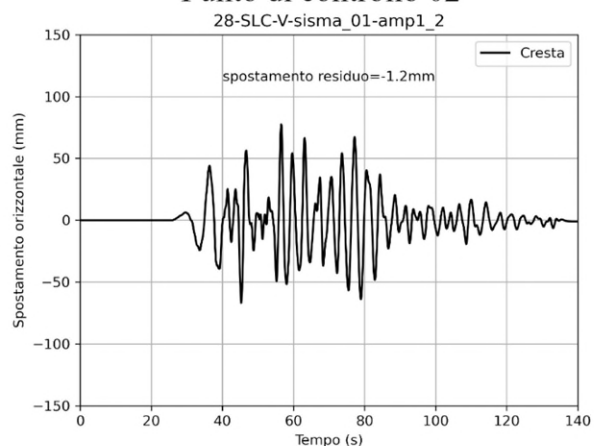
I risultati di quest'analisi sono riportati nelle figure seguenti in termini di spostamenti orizzontali e verticali dei medesimi punti di controllo adottati per le analisi precedenti. Si nota che gli spostamenti calcolati sono più marcati di quelli ottenuti con l'input sismico non amplificato, ma tuttavia non si innescano fenomeni di instabilità.

SLC - V - input sismico 01 - Amatrice - fattore di amplificazione 1.2

Punto di controllo 01



Punto di controllo 02



Sezione di verifica

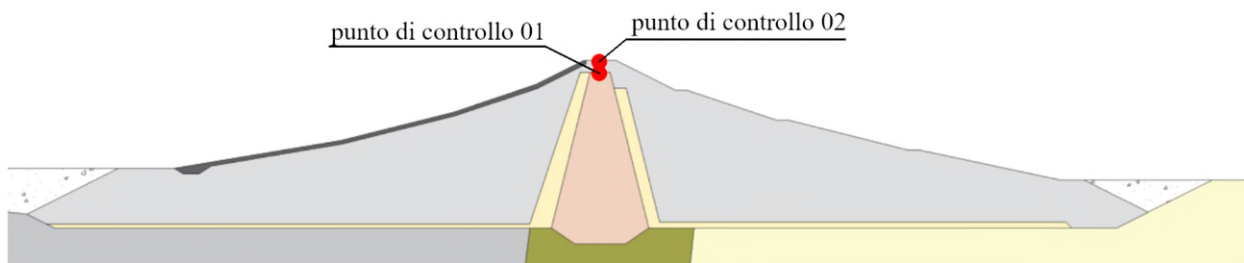
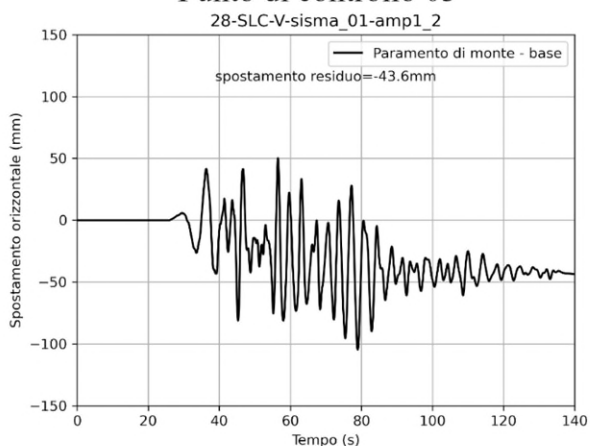


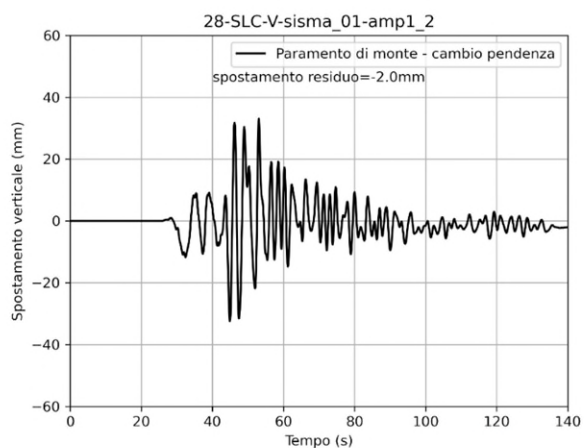
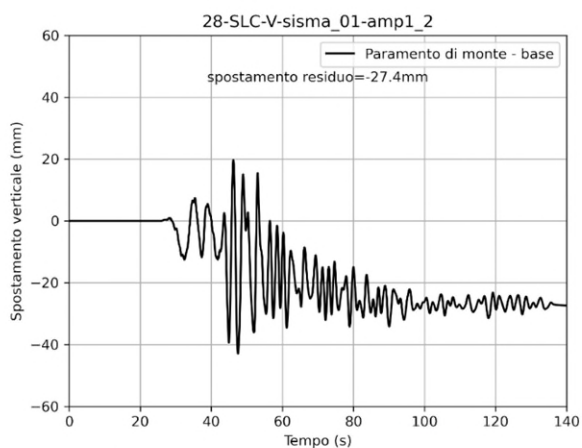
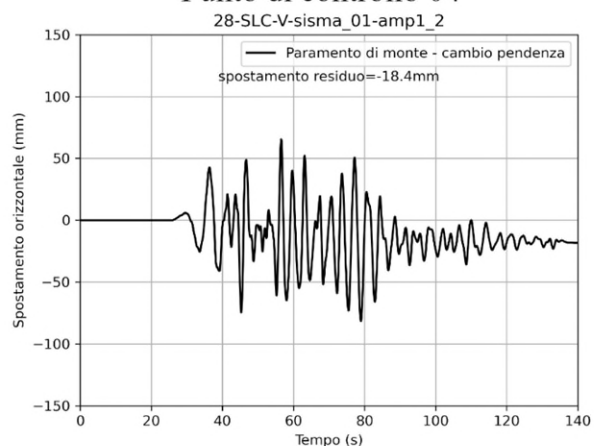
Figura 7-68 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 01 e 02 per invaso vuoto ed accelerogramma SLC-01-Amatrice amplificato di un coefficiente 1.2.

SLC - V - input sismico 01 - Amatrice - fattore di amplificazione 1.2

Punto di controllo 03



Punto di controllo 04



Sezione di verifica

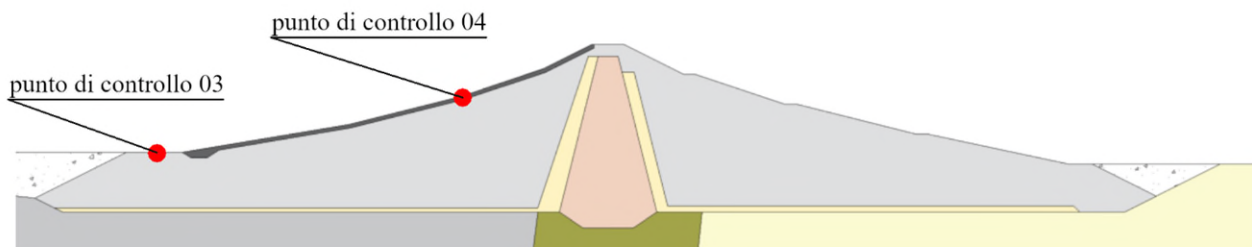
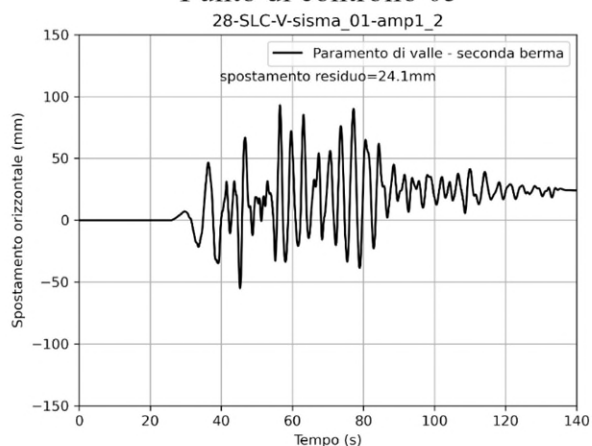


Figura 7-69 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 03 e 04 per invaso vuoto ed accelerogramma SLC-01-Amatrice amplificato di un coefficiente 1.2.

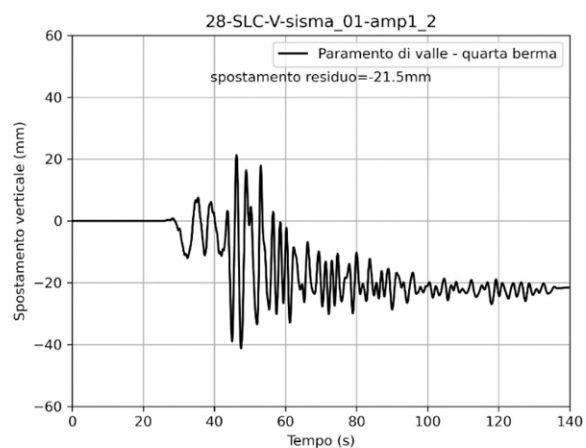
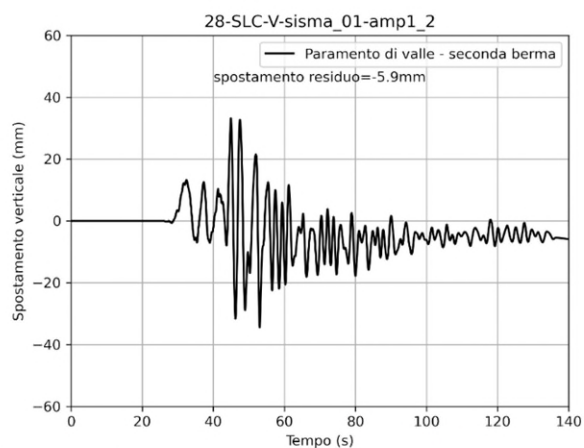
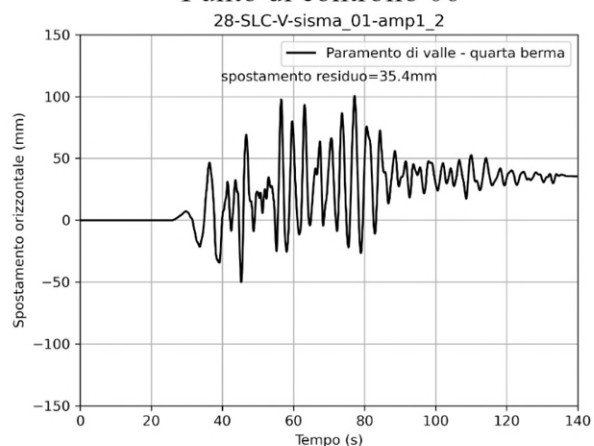


SLC - V - input sismico 01 - Amatrice - fattore di amplificazione 1.2

Punto di controllo 05



Punto di controllo 06



Sezione di verifica

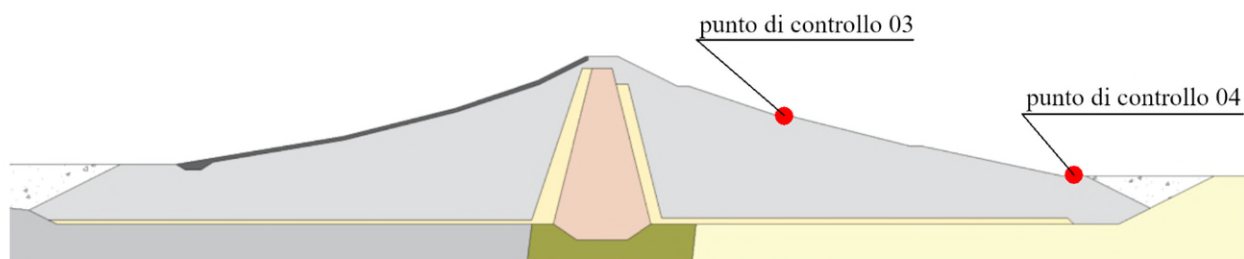


Figura 7-70 Spostamenti orizzontali e verticali calcolati in corrispondenza dei punti di controllo 05 e 06 per invaso vuoto ed accelerogramma SLC-01-Amatrice amplificato di un coefficiente 1.2.

Si riporta in Figura 7-71 il campo della deformazione distorsionale per la simulazione condotta con l'input sismico 01-Amatrice amplificato con fattore 1.2 ed invaso vuoto. La figura mostra chiaramente l'assenza di superfici di scivolamento continue nel corpo diga che possano determinare fenomeni di instabilità. Tale risultato è confermato dalle storie temporali degli spostamenti registrati nei punti di controllo e riportate nelle figure precedenti, infatti, tutte le storie temporali terminano con un valore finito dello spostamento.

Sulla base dei risultati esposti si può quindi affermare che il rilevato e le fondazioni risultano verificati nei confronti dell'instabilità con un fattore di sicurezza almeno pari a 1.2.

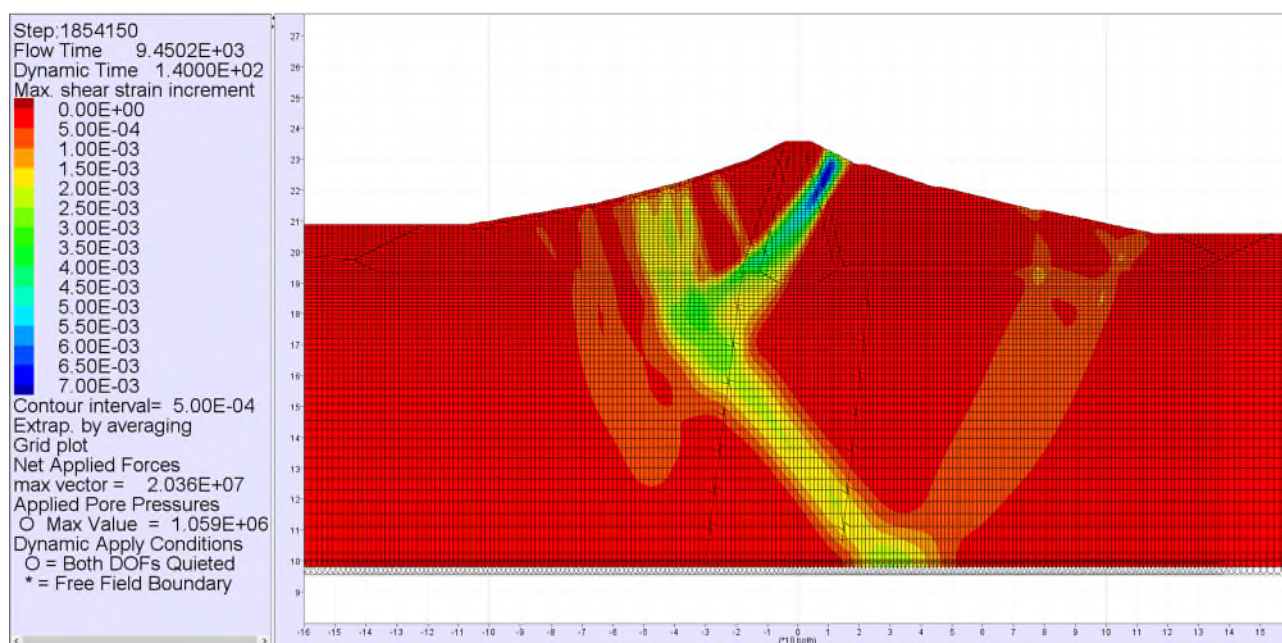




Figura 7-71 Campo della deformazione distorsionale calcolato per l'analisi SLC-01-Amatrice, fattore di amplificazione 1.2 ed invaso vuoto.

 II122F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 152 di 160
	VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE	

### 7.9.3 Previsione teorica del comportamento post sismico

Il Paragrafo III.1.4 delle Istruzioni recita che:” *L’analisi del comportamento sismico è condotta, fra l’altro, al fine di verificare se vi sia pericolo di rilascio incontrollato di acqua a seguito di un evento sismico. L’obiettivo richiede che, oltre alla previsione teorica del comportamento del corpo diga durante le fasi sismiche, siano anche condotte: a) la verifica delle condizioni di sicurezza della diga in condizioni di normale esercizio; b) la previsione teorica del comportamento della diga nelle fasi post-sismiche*”.

Così come per le analisi dinamiche al passo, questo studio è stato eseguito per mezzo del software alle differenze finite FLAC 2D v8 considerando le pressioni interstiziali che si cumulano durante la fase sismica. Queste ultime sono state calcolate attraverso analisi dinamiche complete descritte nel presente Capitolo 7.

Il calcolo è stato condotto dividendo i valori della coesione e dell’angolo d’attrito di un coefficiente  $\gamma=1.5$ . Tale valore si ottiene moltiplicando il coefficiente riduttivo dei parametri di resistenza dei materiali  $\gamma_c = \gamma_\phi = 1.25$  (N.T.C. 2018 [2]) per il coefficiente riduttivo globale che, nelle condizioni di serbatoio pieno, è  $\gamma_r=1.2$  (N.T.D. 2014 [1]).

La verifica è stata eseguita con lo scenario che nelle verifiche dinamiche al passo ha mostrato gli effetti più significativi: accelerogramma SLC-01-Amatrice ed invaso vuoto. È stato comunque considerato il coefficiente  $\gamma_r=1.2$  corrispondente alla condizione di serbatoio pieno a vantaggio di sicurezza.

Quindi, a valle della verifica dinamica SLC descritta nei paragrafi precedenti i parametri di resistenza dei materiali sono stati ridotti ed il modello riportato in equilibrio. Il raggiungimento di tale situazione di equilibrio è già di per sé sintomatica dell’assenza di superfici di scorrimento che possano indurre meccanismi di instabilità nella diga.

In Figura 7-72 si riporta il campo della deformazione di taglio ottenuto con i parametri di resistenza dei materiali ridotti a valle dell’analisi dinamica. Si evince che la deformazione distorsionale massima  $\varepsilon_q=0.65\%$  risulta contenuta, inoltre, data l’assenza di superfici di plasticizzazione continue che possano indurre fenomeni di instabilità del corpo diga, la verifica di stabilità in condizioni post-sismiche è considerata soddisfatta.



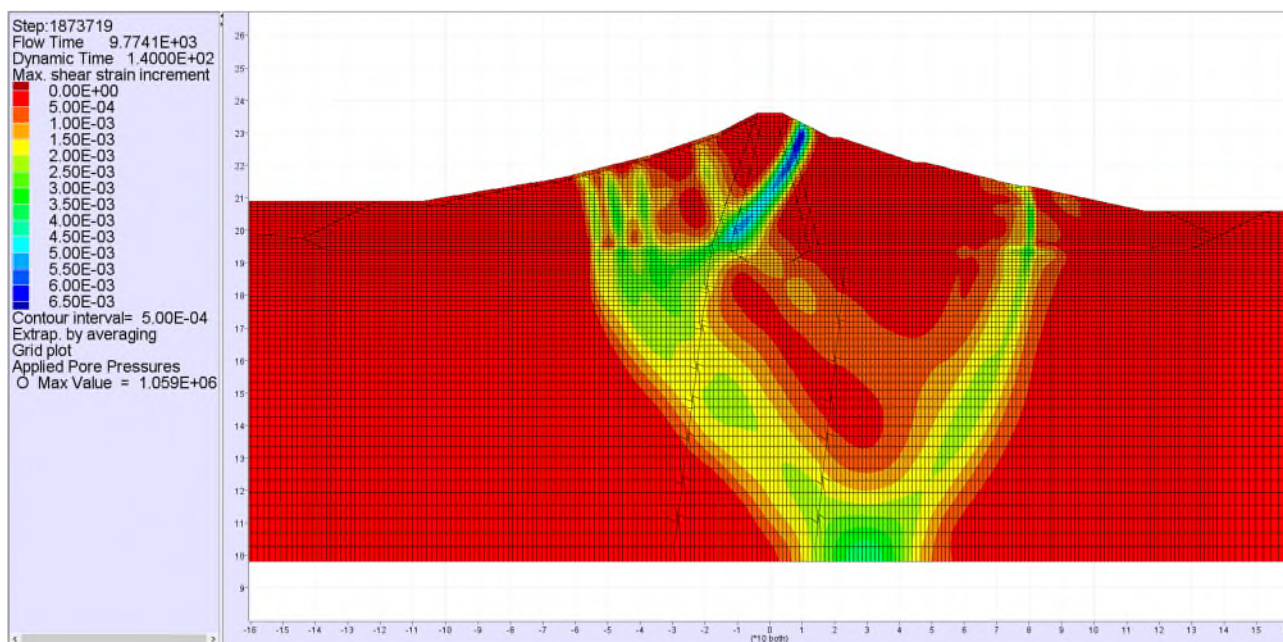




Figura 7-72 Campo della deformazione distorsionale nella diga in condizione post sismica indotto dall'input sismico SLC-01-Amatrice con invaso alla quota di massima regolazione e parametri meccanici dei materiali ridotti di un fattore 1.5.

 III22F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 154 di 160
	VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE	

## 8 Sintesi delle verifiche

In accordo con il paragrafo C.6 del D.M.26 giugno 2014, la valutazione della sicurezza dei serbatoi deve essere eseguita verificando che non si raggiungano le seguenti condizioni limite:

- Stato limite SLO definito dall'uscita dalla condizione di normale funzionamento.
- Stato limite SLD definito dal passaggio dalla condizione di danni riparabili alla condizione di danni non riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua.
- Stato limite SLV definito dal raggiungimento della condizione danni che determinano il rilascio incontrollato di acqua, o comunque rischio di perdite di vite umane.
- Stato limite SLC definito dal raggiungimento della condizione danni che determinano il rilascio incontrollato di acqua, o comunque rischio di perdite di vite umane.

### 8.1 Verifiche statiche

Le verifiche statiche sono state condotte nelle condizioni di bacino alla quota di massimo invaso, invaso alla quota di massima regolazione e di rapido svasso adottando il software Geostru Slope che implementa il metodo dell'equilibrio limite secondo le schematizzazioni di Bishop (1955) per le superfici di scorrimento circolari ed il metodo di Jambu (1967) per le superfici di scorrimento di forma qualsiasi.

Il minimo fattore di sicurezza ( $FS=R_D/E_D/\gamma_R$ ) calcolato in condizioni statiche risulta pari a 2.07 in condizione di "rapido svasso" e superfici di scorrimento di tipo circolare (vedi Tabella 8-2). Tale fattore, significativamente maggiore dell'unità, sconsiglia l'insorgere di fenomeni di instabilità in condizioni di esercizio della diga.



### 8.2 Verifiche sismiche

Ai sensi del paragrafo C.7.7.2 - *Periodo di riferimento per l'azione sismica* del DM del 26 giugno del 2014 [1], la Diga di Gibbesi è classificabile nella categoria delle "grandi dighe" in quanto supera i 15 metri di altezza e determina un volume di invaso superiore a 1.000.000 di metri cubi. Inoltre, considerando che alla data della redazione della valutazione di sicurezza, l'opera risulta completamente realizzata, la diga rientra nella categoria delle Dighe Esistenti, disciplinata dal paragrafo H.1 del DM 2014.

In tali circostanze, la vita nominale della diga è pari a  $V_N=50$  anni ed il coefficiente d'uso  $C_U=1.5$  (Tabella 3-1). Ne consegue che i periodi di ritorno per il computo dell'azione sismica risultano pari (vedere Tabella 3-3) a:  $T_R(SLO)=45$  anni,  $T_R(SLD)=75$  anni,  $T_R(SLV)=710$  anni,  $T_R(SLC)=1460$  anni.

Inoltre, riferendosi alle "Istruzioni per l'applicazione della Normativa Tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18)" emanate nel Luglio 2018 dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti Dipartimento per le Infrastrutture, i Sistemi Informativi e Statistici



 II122F-A-SIS-RT-202-00	Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti <b>DIGA GIBBESI</b> <b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b>	 Pag. 155 di 160
	VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE	

(Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche), dove si afferma che *"nelle verifiche il concessionario può adottare livelli di sicurezza più stringenti di quelli proposti dalla norma, a condizione che tale scelta non comporti immotivati maggiori oneri economici, ambientali e sociali"* e in particolare che *la verifica allo SLV potrà essere omessa se le stesse prestazioni sono garantite con il livello di azione sismica dello SLC*, si è scelto di valutare le prestazioni indotte dalle azioni sismiche corrispondenti al livello SLC confrontandole con condizioni limite definite per il livello SLV.

Pertanto, la verifica è stata svolta facendo riferimento alle condizioni di Stato limite Ultimo e di Esercizio assumendo i criteri di ammissibilità delle verifiche riassunti nella Tabella 3-4.

Gli accelerogrammi naturali adottati per l'analisi al passo sono stati valutati per ciascuno stato limite identificando dalle mappe interattive di pericolosità sismica "Essel" (<http://essel-gis.mi.ingv.it/>) le coppie magnitudo-distanza che maggiormente contribuiscono alla definizione della pericolosità sismica del sito, caratterizzate da probabilità maggiori dell'1%. Dal database europeo dei terremoti "European Strong Motion Database (Luzi et al., 2016)" e dall'archivio italiano delle forme d'onda accelerometriche (Luzi et al., 2019) sono stati estratti per ciascuno stato limite (SLO, SLD, SLC) sette accelerogrammi orizzontali spettro-compatibili insieme con i corrispondenti accelerogrammi verticali. Tali accelerogrammi sono stati quindi scalati in modo da portare il valore della PGA a quelli attesi al sito per il particolare stato limite analizzato.

La compatibilità con lo spettro di risposta di riferimento è stata valutata per la componente orizzontale in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del 5%. Così come prescritto dalla normativa, [1] [3], l'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10% e uno scarto in eccesso superiore al 30%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro di riferimento, in alcun punto dell'intervallo dei periodi propri di vibrazione di interesse per l'opera in esame ( $0.15 \div 2.0$ s secondo le indicazioni delle NTC 2018) per i diversi stati limite. Tale operazione è stata eseguita mediante la piattaforma REXELite sviluppata dall'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Le azioni considerate nella verifica sismica sono state valutate seguendo le indicazioni del Capitolo C.7 del DM 2014 [1] ovvero considerando i due casi di vaso vuoto ovvero di vaso riempito fino alla massima quota di regolazione 229.0m s.l.m.m.

I modelli costitutivi dei diversi materiali, nucleo, rinfianchi e terreni di fondazione sono stati calibrati mediante il processamento delle curve di decadimento proposte da Darendeli (2001).

### 8.2.1 Verifiche sismiche semplificate (Newmark)

L'applicazione del metodo di Newmark presuppone il calcolo di un'accelerazione critica che se superata innesca il moto del pendio sulla superficie di scorrimento più sfavorita. Per tale analisi sono stati posti unitari sia i coefficienti parziali amplificativi delle azioni che riduttivi dei parametri meccanici dei materiali, così come prescritto nel Paragrafo 7.11.3.5.2 delle NTC 2018 [1].

Essendo il valore dell'accelerazione critica calcolata maggiore del valore di picco dell'accelerazione attesa al sito  $PGA=0.095g$  (vedi Paragrafo 4.4) il metodo di Newmark restituisce un valore nullo dello spostamento ad indicare che l'azione sismica di progetto non produce delle superfici continue di plasticizzazione che inneschino fenomeni di instabilità nel corpo diga. La verifica risulta dunque pienamente soddisfatta.

### 8.2.2 Verifiche dinamiche

Nelle Tabella 8-1 si riportano sinteticamente gli esiti delle verifiche dinamiche. Per tutti gli accelerogrammi considerati, i cedimenti calcolati sono dell'ordine di pochi millimetri: quelli orizzontali raggiungono valori residui massimi di 13mm circa; quelli verticali attingono valori inferiori a 20 mm. La risposta dinamica della diga nei confronti dello stato limite di esercizio risulta pertanto pienamente accettabile.



Tabella 8-1 Esito delle verifiche allo Stato Limite di Esercizio.

STATO LIMITE DI ESERCIZIO					
Azione sismica SLD ( $T_R=100$ anni)					
#	Verifica	Parametro di controllo	Ammissibilità	Verifica	ESITO
SLD1	Dissesti locali	Superfici di scivolamento	Assenti	Assenti	Positivo
		Scorrimenti locali	Assenti	Assenti	Positivo
SLD2	Danneggiamento organi di scarico, opere di derivazione, sistemi di misura e controllo	S/H	$S/H < 0.5\%$	$S/H = 0.021\%$	Positivo

Il cedimento massimo calcolato in corrispondenza della sommità del nucleo è di 27.0mm, di molto inferiore alla riduzione tollerabile del franco di sicurezza pari a 3.79m.

I rapporti di sovrappressione massimi nei contronuclei sono significativamente minori dell'1% (Tabella 7-16 e Figura 7-62) e quindi sono tali da scongiurare il rischio di liquefazione.

Inoltre, i quadri di deformazioni distorsionali del rilevato (Figura 7-65) non evidenziano una continuità nel nucleo tale da far temere difetti dell'elemento di tenuta. In particolare, il campo di deformazione distorsionale della diga, anche nel caso più estremo dato dall'input SLC-01 – Amatrice, è tale da non generare l'insorgere di superfici di instabilità continue. A tal fine si è effettuato il calcolo amplificando l'azione sismica con un fattore pari a 1.2 in accordo con le prescrizioni dettate al paragrafo 7.11.4 del D.M. 2018 [2] per i fronti di scavo e rilevati (*il paragrafo recita come segue: "Nelle verifiche di sicurezza si deve controllare che la resistenza del sistema sia maggiore delle azioni (condizione [6.2.1]) impiegando lo stesso approccio di cui al § 6.8.2 per le opere di materiali sciolti e fronti di scavo, ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici (§ 7.11.1) e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a  $\gamma_R = 1.2$* ). La verifica, svolta per la condizione più estrema di input sismico più gravoso ad invaso vuoto (Figura 7-71) amplificando la sollecitazione sismica con un fattore pari a 1.2 non evidenzia la formazione di alcuna superficie di scorrimento. Sulla base dei risultati esposti si può

	<p style="text-align: center;"><i>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</i></p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Pag. 157 di 160</b></p>

quindi affermare che il rilevato e le fondazioni risultano verificati nei confronti dell'instabilità con un fattore di sicurezza almeno pari a 1.2.

La massima deformazione distorsionale calcolata nel filtro sub-verticale di valle è  $\varepsilon_q \leq 0.67\%$ , valore del tutto compatibile con l'integrità del filtro. Inoltre, il valore massimo del rapporto tra la pressione neutra e la tensione principale minima risulta pari a 62.5%, anch'esso inferiore al valore soglia pari a 100% specificato dalle Istruzioni [3]. Tali risultati escludono l'insorgenza di fenomeni di erosione interna sismoindotta del filtro.

Infine, le analisi di stabilità in condizioni post sismiche hanno mostrato che le condizioni tenso-deformative indotte da tutti i sette accelerogrammi di progetto non generano superfici continue di scorrimento che possano innescare fenomeni di instabilità della diga.





	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Pag. 158 di 160</b></p>

Tabella 8-2 Esito delle verifiche allo Stato Limite Ultimo.

STATO LIMITE ULTIMO					
Condizione di esercizio					
#	Verifica	Parametro di controllo	Ammissibilità	Verifica	ESITO
SLU	Instabilità corpo diga	Coefficiente di sicurezza	FS>1	FS≥2.07	Positivo

STATO LIMITE ULTIMO					
Azione sismica SLC (T <sub>R</sub> =1460 anni)					
#	Verifica	Parametro di controllo	Ammissibilità	Verifica	ESITO
SLU1	Instabilità corpo diga	Superfici di scivolamento	Assenti	Assenti	Positivo
		Amplificatore dell'azione sismica	AF=1.2	AF>1.2	Positivo
SLU2	Instabilità dei terreni di fondazione	Superfici di scivolamento	Assenti	Assenti	Positivo
		Amplificatore dell'azione sismica	AF=1.2	AF>1.2	Positivo
SLU3	Fessurazione del nucleo	Superfici continue di plasticizzazione	Assenti	Assenti	Positivo
SLU4	Liquefazione	Rapporto di sovrappressione massimo	r <sub>u,MAX</sub> <90%	r <sub>u,MAX</sub> =1%	Positivo
SLU5	Tracimazione	Abbassamento della quota del nucleo	u <sub>y</sub> <3.79m	u <sub>y</sub> <0.027m	Positivo
SLU6	Rottura organi di scarico	S/H	S/H<1%	S/H=0.06%	Positivo
SLU7	Erosione interna	Deformazione distorsionale	ε <sub>q</sub> <5%	ε <sub>q</sub> ≤0.67%	Positivo
		Rapporto tra la pressione neutra e la tensione principale minima	Rapporto <100%	Rapporto≤62.5%	Positivo



STATO LIMITE ULTIMO					
Condizione post sismica					
#	Verifica	Parametro di controllo	Ammissibilità	Verifica	ESITO
SLU	Instabilità corpo diga	Assenza di superfici continue di scorrimento	Assenti	Assenti	Positivo

	<p style="text-align: center;"><i>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</i></p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	
<p>II122F-A-SIS-RT-202-00</p>	<p style="text-align: center;"><b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Pag. 159 di 160</b></p>

## 9 Bibliografia

- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 26 giugno 2014 “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)”.
- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17 gennaio 2018 “Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»”.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Luglio 2018. Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie. Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18). Luglio 2018.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Marzo 2019. Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie. Procedura.
- Gazetas, G., & Dakoulas, P. (1992). Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11, 27-61.
- Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 98(sm7).
- Hashash, Y.M.A. and D. Park (2001). “Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment,” *Eng. Geology*, Amsterdam, 62(1-3), 185-206.
- Hashash, Y.M.A. and D. Park (2002). “Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in nonlinear site response analysis,” *Soil Dynamics and Earthquake Engng.*, 22(7), 611-624.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Okan, I., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2017) “DEEPSOIL 7.0, User Manual”.
- Iervolino I., Galasso C., Paolucci R., Pacor F. (2011), Engineering ground motion record selection in the Italian ACcelerometric Archive. *Bulletin of Earthquake Engineering* 9(6):1761-1778. DOI: 10.1007/s10518-011-9300-4.
- Kuhleimeyer, R. & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE*, 99(SM5), 421-427.
- Lane, E. W., & Koelzer, V. A. (1943). Density of Sediments Deposited in Reservoirs, Report 9. A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams. US Corps of Engineers, St. Paul District Sub-Office, Hydraulic Laboratory, University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Luzi L, Puglia R, Russo E & ORFEUS WG5 (2016). Engineering Strong Motion Database, version 1.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Observatories & Research Facilities for European Seismology. doi: 10.13127/ESM.
- Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C., & Seed, H. (1975). FLUSH: a computer program for approximate 3D analysis of soil-structure interaction problems. University of California, Berkeley, Engineering research center.
- Park, D. and Y.M.A. Hashash (2004). “Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis,” *J. of Earthquake Eng.*, 8(2), 249-274.



 II122F-A-SIS-RT-202-00	<p style="text-align: center;">Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p style="text-align: center;"><b>DIGA GIBBESI</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE</b></p>	 Pag. 160 di 160
	<b>VERIFICHE SISMICHE – CORPO DIGA - RELAZIONE</b>	

- Rollins KM, Evans MD, Diehl NB, Daily III WD. Shear modulus and damping relationships for gravels. J Geotech Geoenviron Eng 1998; 124:396–405.
- Seed, H.B., K.L. Lee, I.M. Idriss, and F. Makdisi. (1973). Analysis of the Slides in the San Fernando Dams During the Earthquake of Feb. 9, 1971. EERC 73-2. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center.
- Seed HB, Wong RT, Idriss IM, Tokimatsu K. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. J Geotech Eng 1986; 112:1016–32. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:11\(1016\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:11(1016)).
- Schnabel, P. B. (1973). Effects of local geology and distance from source on earthquake ground motions (Doctoral dissertation, University of California, Berkeley).
- Stokoe, K. H., Darendeli, M. B., Gilbert, R. B., Menq, F. Y., & Choi, W. K. (2004, March). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. In *International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response* (pp. 18-19). University of California at Berkeley Berkeley, California.
- Swaisgood, (2003). Embankment dam deformations caused by earthquakes. 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering.
- Working Group ESM (2015) European strong motion database <http://esm.mi.ingv.it>