

## **Ordinanza 79/2019**

**Supporto e coordinamento tecnico-scientifico per realizzare approfondimenti in zone con instabilità di versante e cavità individuate con gli studi di microzonazione sismica condotti ai sensi dell'ordinanza n. 24 del 12 maggio 2017 nei comuni interessati dagli eventi sismici verificatisi a far data dal 24 agosto 2016 o segnalate agli uffici del commissario straordinario.**

# **Consegna dal CentroMS all'Affidatario dei risultati delle analisi pseudostatiche e/o dinamica semplificata e di Risposta Sismica Locale per il calcolo di FA**

**Comune di Fiastra (MC)  
Loc. San Lorenzo Al Lago**

***29/05/2020***

## **Indice**

1. Premessa
2. Indicazioni derivanti dal Verbale di approvazione della Consegna intermedia
3. Analisi della Risposta Sismica Locale e Calcolo di FA
  - a. Approccio metodologico (Risultati attesi in termini di Fa e spettri in superficie, risultati in termini di accelerogrammi alla superficie di scivolamento, dati necessari, scelta di analisi 1D e 2D)
  - b. Descrizione dei dati di input (Sezioni, modello geofisico, modello di analisi, curve di decadimento, input sismici)
  - c. Risultati (Tabelle dei valori di Fa, esempi di spettri di risposta ed eventualmente confronti con applicazioni analisi 1D e 2D, banche dati allegate)
4. Analisi Pseudostatica e/o dinamica semplificata
  - a. Approccio metodologico (sintetico).
    - Descrizione sintetica degli strumenti di analisi
    - Valutazione sugli scenari cinematici ed idraulici di riferimento considerati nelle verifiche preliminari
    - Descrizione degli scenari cinematici ed idraulici di riferimento utilizzati nelle modellazioni
    - Criteri di implementazione dell'input sismico
  - b. Risultati
    - Fattori di sicurezza in condizioni statiche e pseudo-statiche
    - Stima degli spostamenti co-simici e della probabilità di eccedenza di spostamento critico
    - Considerazioni sugli scenari da considerare nello screening delle ZA
5. Considerazioni

## **BIBLIOGRAFIA**

## **1. Premessa**

Nel presente documento sono riportati gli esiti delle analisi pseudostatiche o dinamiche semplificate, e di Risposta Sismica Locale per il calcolo dei Fattori di Amplificazione (FA) previste nel Documento Tecnico allegato alla Convenzione stipulata tra l'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche (per il Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni) e il Commissario straordinario del Governo per la ricostruzione sisma 2016.

Tali analisi rientrano nei prodotti che il CentroMS trasferisce ai professionisti affidatari degli incarichi, necessari alla realizzazione degli elaborati previsti dall'Art.5 (Elaborati) del disciplinare firmato dai professionisti.

Il presente documento contiene, oltre che questa premessa, al paragrafo 2, a cura del Gruppo di Supporto ISPRA, le indicazioni relative al lavoro svolto nella prima fase dall'Affidatario, fino alla valutazione preliminare della stabilità del versante in studio, che hanno permesso la redazione del Verbale di approvazione della Consegna intermedia.

Nel paragrafo 3 sono presenti i risultati delle analisi della Risposta Sismica Locale e Calcolo di FA condotte dal Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e/o dall'Università degli Studi di Siena – Dipartimento Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, sulla base di quanto prodotto dall'Affidatario nella prima fase.

Nel paragrafo 4 vengono illustrati i risultati delle analisi pseudostatiche e/o dinamiche semplificate, svolte dall'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria e dall'Università degli Studi di Roma "Sapienza" - Dipartimento di Scienze della Terra, sempre sulla base di quanto prodotto dall'Affidatario nella prima fase.

Nel Paragrafo 5 vengono sintetizzati i risultati raggiunti.

Infine, in coda al documento, una sintetica bibliografia che raccoglie i lavori citati nel testo ed i software utilizzati per le elaborazioni effettuate.

## **2. Indicazioni derivanti dal Verbale di approvazione della Consegna intermedia**

Il giorno 19/03/2020 il dott. Stefano Pierucci, affidatario dell'incarico relativo al Comune di Fiastra (MC), località San Lorenzo al Lago, ha completato la trasmissione ai gruppi di Supporto del CentroMS/ISPRA della consegna intermedia di cui al disciplinare sottoscritto.

Si riporta di seguito una breve valutazione di merito della consegna effettuata:

### **ARCHIVIAZIONE DEI DATI E DEI METADATI:**

Dato lo stato di consegna intermedia, il controllo sul prodotto sarà effettuato durante la fase di istruttoria finale degli studi, quando tale prodotto sarà completo.

### **ANALISI PRELIMINARE DELL'INSTABILITÀ:**

Lo studio svolto dal geologo affidatario, che attiene alla verifica di stabilità preliminare di cui all'Art. 2 del Disciplinare, risulta adeguatamente sviluppato, sia per quel che riguarda la metodologia adottata che per la rappresentazione grafica dei risultati.

L'esito dello studio rileva l'esistenza di condizioni di stabilità generale del territorio e di assenza di fenomenologie franose in quasi la totalità dell'area investigata, e viene evidenziata la circostanza che l'area in frana riportata in IFFI di fatto non esiste.

Contestualmente, viene analizzata la condizione relativa all'esistenza di porzioni limitate di territorio dove la presenza di una copertura detritica, prodotta dalla alterazione e dal disfacimento della formazione della Scaglia Cinerea che costituisce il substrato, di spessore di pochi metri, crea i presupposti per fenomeni di tipo gravitativo molto localizzati.

I valori del fattore di sicurezza  $F_s$  calcolati nella modellazione geologico-tecnica lungo la sezione di verifica, risultano elevati, con  $F_s > 2$  anche considerando una caratterizzazione geologico-tecnica cautelativa e in condizioni di saturazione completa del terreno con falda prossima al pc. Riguardo al processamento dei dati geofisici (9 misure di rumore e 6 M.A.S.W.), esso è stato svolto con buoni risultati sotto la supervisione del Gruppo di Supporto Geofisica di ISPRA, anche a seguito di nuova campagna di indagine e di due fasi di elaborazione dati.

In conclusione, si ritiene che lo studio possa essere approvato.

### **DATI PER LA PROSECUZIONE DELLE ATTIVITA':**

Dall'analisi di quanto complessivamente consegnato non appare ci siano i presupposti per una analisi di stabilità in condizioni dinamiche. Si rimanda comunque al CentroMS/Sapienza per una verifica di tale circostanza.

Il Gruppo di Supporto ha espresso parere FAVOREVOLE alla approvazione in data 23 marzo 2020.

### **3. Analisi della Risposta Sismica Locale e Calcolo di FA**

#### **a. Approccio metodologico e tipologia di risultati**

Le analisi della Risposta Sismica Locale (RSL) di ciascun sito di studio sono state condotte adottando l'approccio numerico nell'ipotesi di comportamento visco-elastico in sforzi totali, tenendo in considerazione la non linearità del legame costitutivo dei materiali attraverso l'analisi equivalente lineare con conseguente procedura iterativa.

In relazione alle specificità geomorfologiche e geologiche caratterizzanti ciascun sito di studio, le analisi di RSL sono state effettuate su una o più sezioni rappresentative attraverso codici di calcolo bidimensionali ad elementi finiti operanti nel dominio del tempo con discretizzazione del mezzo a masse concentrate.

In particolare, è stato utilizzato il codice di calcolo LSR2D fornito dalla Stacec s.r.l (<http://www.stacec.it/Prodotto/92/lsr-2d>) che è di tipo bidimensionale ed è finalizzato ad analizzare geometrie riconducibili a valli strette, chiusure laterali e inter-digitazioni etc.; esso permette di modellare qualsiasi sezione caratterizzata da diversi materiali con qualsiasi andamento geometrico. Il programma utilizza il metodo degli elementi finiti in stato di deformazione piana (FEM), discretizzando il dominio del continuo in un sistema equivalente di sottodomini più piccoli, tali che il loro assemblaggio dia luogo alla struttura reale, tenendo adeguatamente in considerazione la sua eterogeneità geometrica e le condizioni al contorno. La procedura numerica richiede la discretizzazione del dominio in una mesh di elementi triangolari e/o quadrilateri, le cui dimensioni devono soddisfare precise relazioni, tali da ottimizzare la discretizzazione. In particolare l'altezza dell'elemento deve essere minore o uguale al rapporto tra il valore minimo della  $V_s$  presente nel modello e 5 volte la massima frequenza che si vuole analizzare. La larghezza non deve superare indicativamente 10 volte l'altezza laddove il bedrock è più profondo; dove il bedrock è più superficiale (e presso la frontiera laterale), la larghezza non deve superare 5 volte l'altezza. Il programma utilizza un modello discreto a masse concentrate, per tenere in considerazione l'eterogeneità verticale del sottosuolo, in cui la stratigrafia viene ricondotta ad una serie di masse, concentrate in corrispondenza del baricentro di ciascun elemento della mesh e collegate tra loro da molle e smorzatori viscosi in modo da costruire un sistema a  $n$  gradi di libertà. I parametri che caratterizzano il sistema sono le coordinate di ciascun nodo costituente la mesh, le masse  $m_i$ , le rigidezze delle molle  $k_i$  e i coefficienti di smorzamento viscoso  $c_i$ . Per ciascun elemento costituente la mesh di discretizzazione vengono assegnati i seguenti parametri: densità  $\rho_i$ , coefficiente di Poisson  $\nu_i$ , modulo di taglio iniziale  $G_0$  e rapporto di smorzamento iniziale  $D_0$ ; tali parametri vengono utilizzati per calcolare le matrici delle masse  $M_i$ , delle rigidezze  $K_i$  e degli smorzamenti  $C_i$  di ciascun elemento e poi assemblate tra loro ed utilizzate per risolvere le equazioni del moto, nota l'eccitazione sismica applicata al bedrock sismico. Il codice di calcolo opera nel dominio del tempo mediante integrazione passo-passo con parametri costanti per l'intera durata del sisma e variazione lineare dell'accelerazione tra inizio e fine passo. Lo smorzamento viene calcolato elemento per elemento con l'espressione dello smorzamento proporzionale alla Rayleigh. Il programma adotta l'analisi lineare equivalente per considerare, nella soluzione dell'equilibrio dinamico del sistema, il legame non lineare: tale analisi consiste nell'esecuzione di una sequenza di analisi lineari complete con aggiornamento successivo dei parametri di rigidezza e smorzamento fino al soddisfacimento di un prefissato criterio di convergenza. Il moto di input è rappresentato sotto forma di storia temporale dell'accelerazione ed è applicato simultaneamente a tutti i nodi della frontiera, assegnata orizzontale.

I codici di calcolo utilizzati richiedono come dati di input, oltre agli accelerogrammi e al modello di rigidità del sottosuolo, anche i parametri geotecnici dinamici, in grado di descrivere il comportamento dei materiali sotto sollecitazioni cicliche. Per quanto riguarda le curve di decadimento del modulo di taglio ( $G/G_0$ ) e del rapporto di smorzamento ( $D$ ) in funzione della deformazione tangenziale ( $\gamma$ ) si è fatto riferimento ai dati disponibili dagli studi di MS3 e da curve di letteratura.

I risultati sono stati calcolati in corrispondenza di punti significativi della superficie topografica e, dove necessario, in corrispondenza della superficie di scivolamento e del centro di massa del movimento franoso individuato mediante verifiche di stabilità in condizioni statiche e pseudo-statiche.

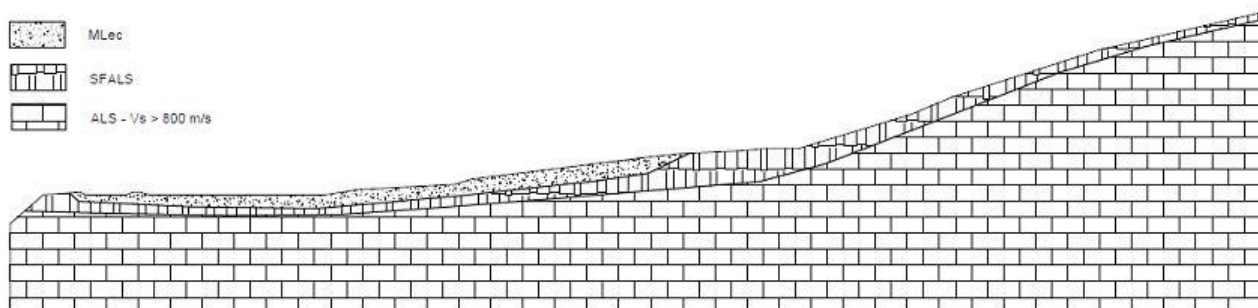
I risultati sono stati espressi in termini di accelerogrammi modificati a partire dai 7 accelerogrammi utilizzati come moto di input; per la sola superficie topografica sono stati calcolati anche gli spettri di risposta elastici in accelerazione al 5% dello smorzamento critico per ciascuno dei 7 accelerogrammi di input e il relativo spettro di risposta elastico medio (media aritmetica), dai quali sono stati ottenuti i valori del fattore di amplificazione FA, calcolati negli intervalli di periodo 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s, come media geometrica tra gli FA riferiti a ciascun accelerogramma di input.

#### **b. Dati di input**

Per ciascuna delle analisi sono stati utilizzati come dati di input il gruppo di 7 accelerogrammi registrati selezionati nell'ambito degli studi di MS3 per ciascun Comune interessato dal Sisma del Centro Italia 2016-2017 (Luzi et al., 2019) e tali per cui la media dei loro spettri di risposta elastici in accelerazione sia spettro-compatibile nell'intervallo di periodo compreso tra 0.1 e 1.1 s con lo spettro di risposta elastico della categoria di sottosuolo A riferito alla pericolosità sismica con  $T_r$  di 475 anni. I 7 accelerogrammi selezionati per il Comune di Fiastra sono riportati nella seguente tabella, identificati con la nomenclatura della Banca dati ITACA (D'Amico et al. 2019), ai quali è stato associato un codice progressivo per identificare i relativi file di output contenuti nella banca dati:

<b><i>Nome file – banca dati ITACA</i></b>	<b><i>Sigla accelerogramma</i></b>
3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018.C.ACC	CDC (1)
3A.MZ19..HNE.D.20161030.064018.C.ACC	CDC (2)
3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018.C.ACC	CDC (3)
IT.CLO..HGN.D.20161026.191806.C.ACC	CDC (4)
IT.MMO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC	CDC (5)
IT.MMO..HGE.D.20161030.064018.C.ACC	CDC (6)
IT.MMO..HGN.D.20161030.064018.C.ACC	CDC (7)

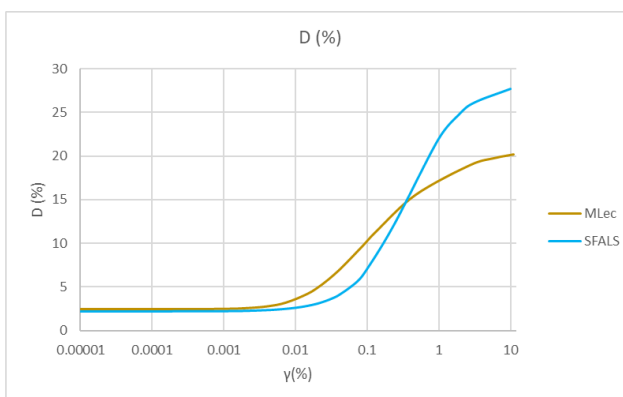
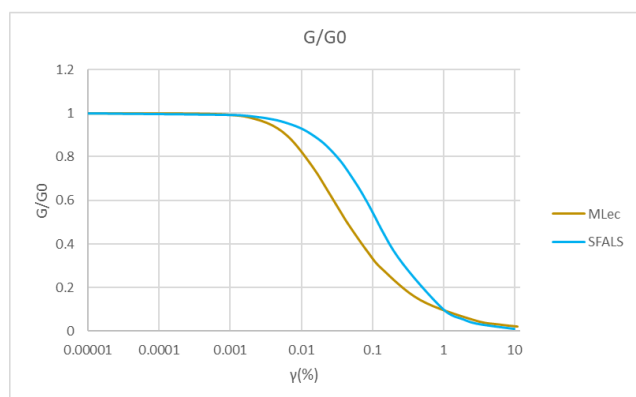
Analizzando i dati forniti dal Professionista incaricato è stata analizzata la sezione geologico-tecnica rappresentativa del modello di sottosuolo ricostruita sulla base dei dati reperiti dall'attività di rilevamento geologico e geomorfologico di dettaglio e dalla campagna di indagini geognostiche e geofisiche in sito. Tale sezione viene di seguito rappresentata:



I valori di  $V_s$  (che corrispondono ai valori medi forniti dal Professionista) e di densità utilizzati nell'analisi RSL per ciascuna delle unità geologico-tecniche (unità GT) identificate sono mostrati nella tabella seguente:

Unità GT	$V_s$ (m/s)	Curve $G/G_0$ e $D$	Densità ( $\text{Kg/m}^3$ )
MLec	245	campione Treia (curva n°6 Marche 1)	1880
SFALS	540	campione Massa Fermana MS138	2039
ALS	1150	lineare con $G/G_0 = 1$ e $D = 0.5\%$	2100

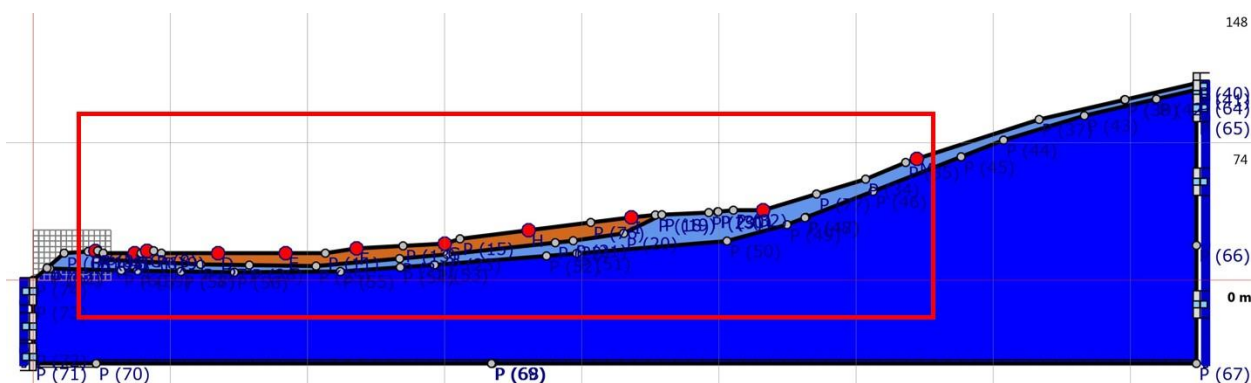
Le curve di decadimento, di seguito riportate per le unità GT MLec e SFALS, sono state desunte dalle attività di caratterizzazione geotecnica eseguita nell'ambito degli studi di MS3 e da letteratura. In particolare, per l'unità GT MLec si è fatto riferimento ai dati desunti dalle prove di laboratorio condotte sul campione prelevato nel Comune di Treia (curva n°6 Macroarea Marche 1); per l'unità SFALS, si fa riferimento alla media fra le stime ottenute da un campione indisturbato MS138 raccolto a Massa Fermana (FM) regolarizzato utilizzando il modello di Yokota. Infine, per l'unità ALS, è stata considerata una relazione lineare con  $G/G_0 = 1$  e  $D = 0.5\%$ .



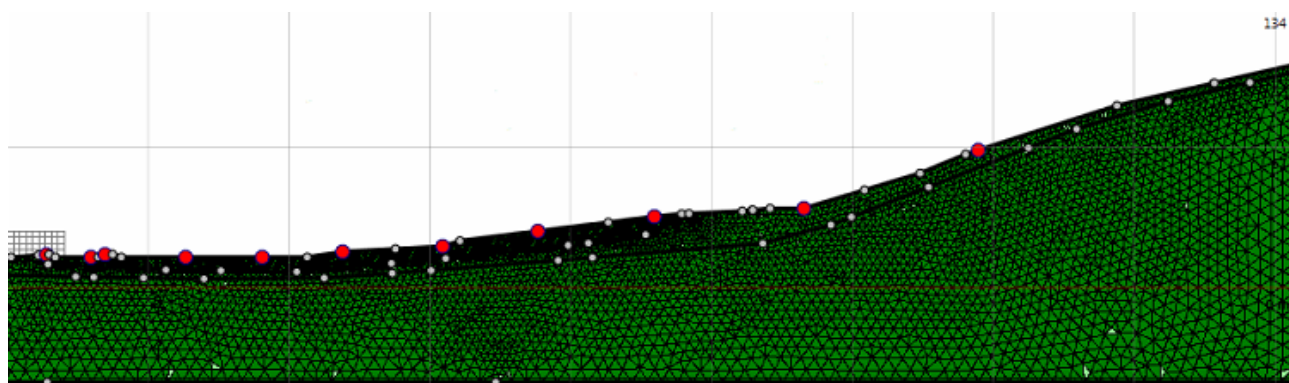


### c. Risultati delle analisi

Per la costruzione del modello numerico bidimensionale per l'analisi, sono state ricostruite fedelmente le interfacce di separazione di ciascuna unità geologico-tecnica associando i parametri geofisici rappresentativi di ciascuna unità. Per quanto riguarda i bordi laterali, è stato applicato come condizione al contorno l'accoppiamento di smorzatori viscosi tra i nodi della frontiera e i nodi di colonne monodimensionali in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero. Nella figura vengono indicati con colore diverso le geometrie delle unità geologico-tecniche considerate nella modellazione. Il riquadro in rosso indica la parte della sezione interessata dallo studio di Microzonazione Sismica.

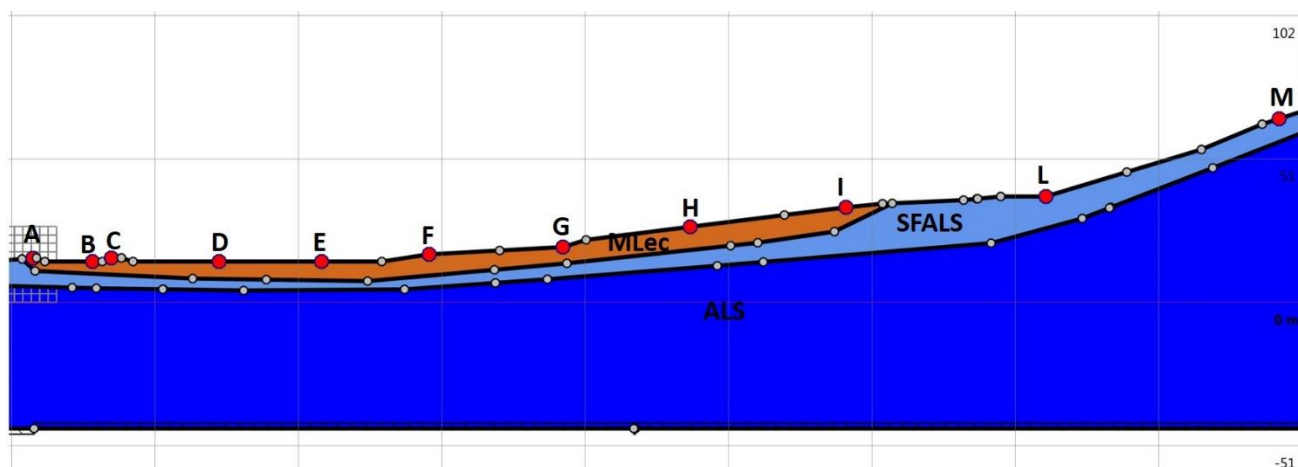


Il modello è stato discretizzato attraverso una mesh ad elementi finiti di forma triangolare composta da n. 4694 nodi e 8957 elementi, la cui distribuzione è indicata nella figura che segue:

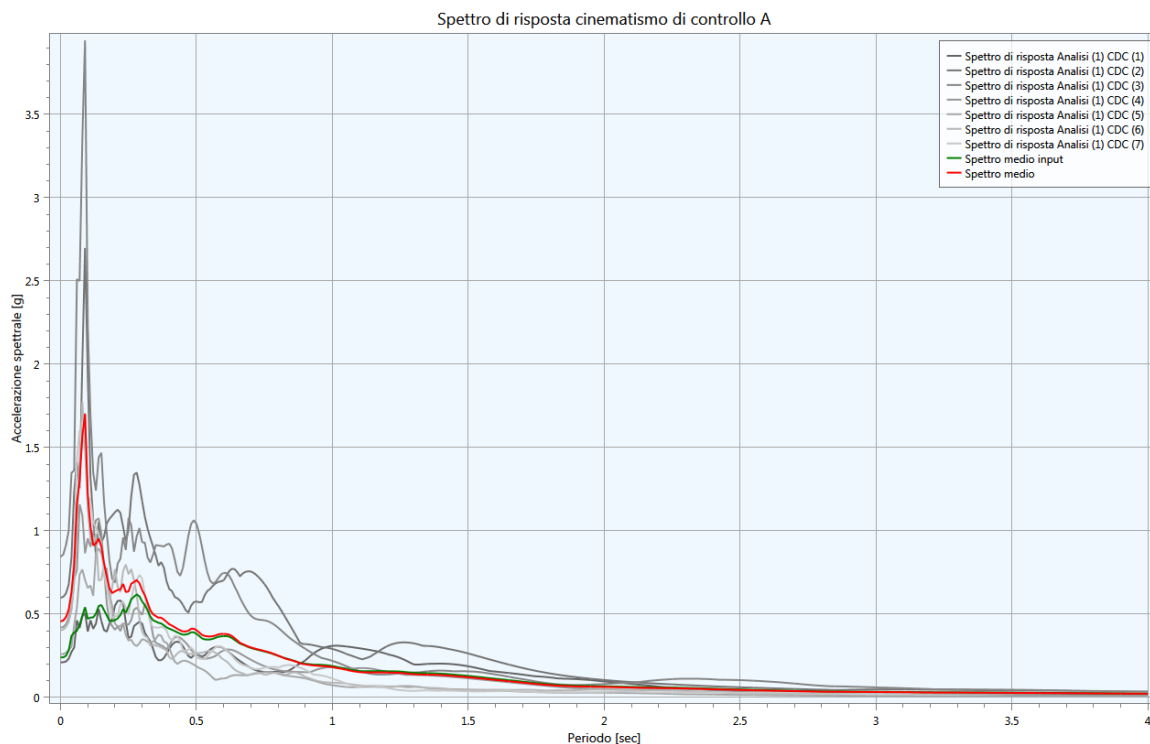


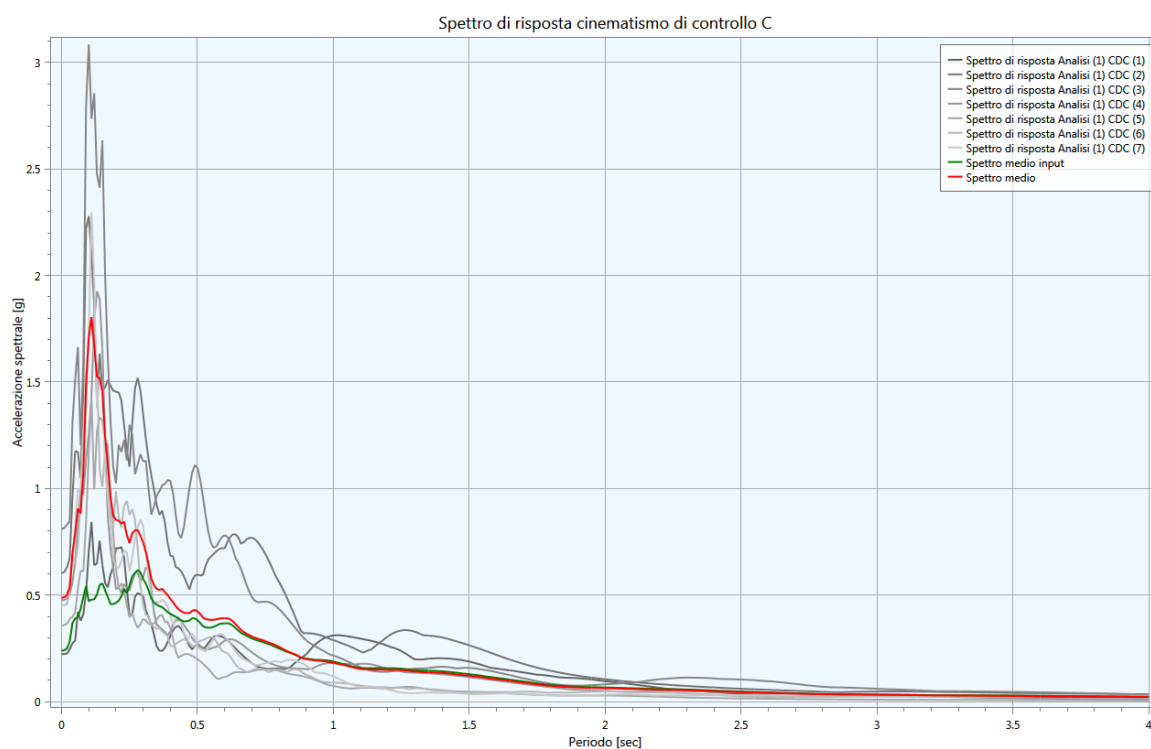
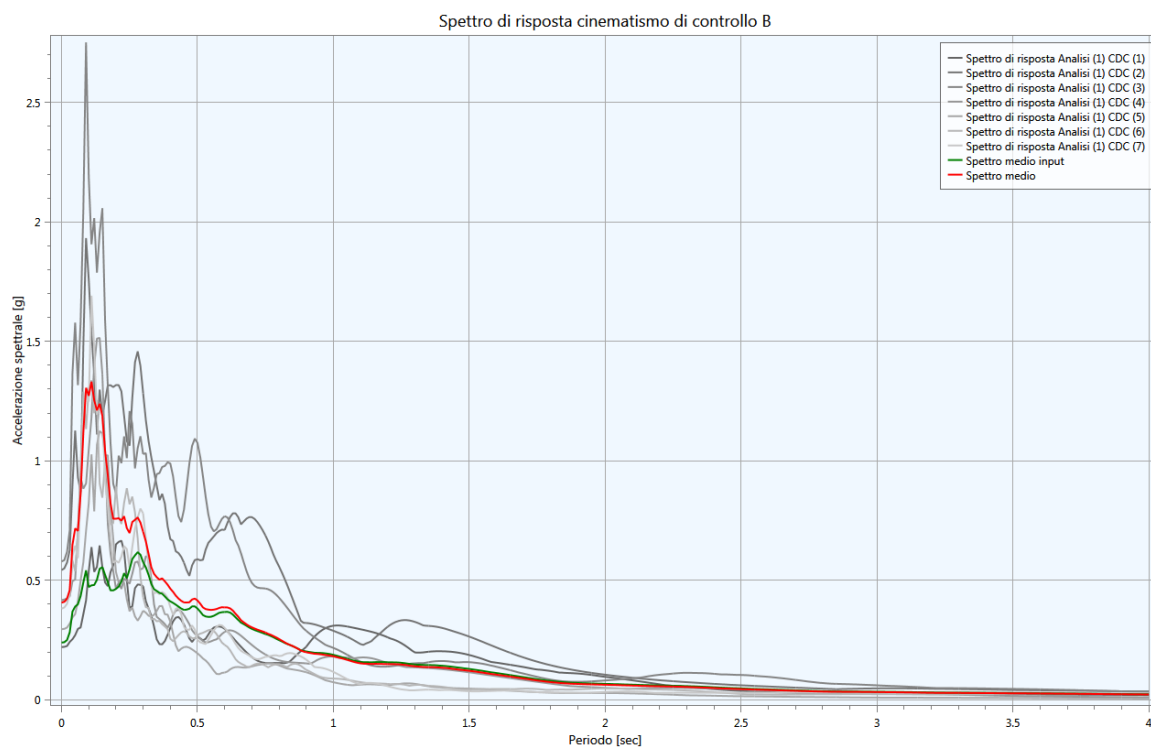
Sul modello predisposto, in corrispondenza del profilo topografico, sono stati individuati 11 punti significativi (nominati da A ad M nella figura che segue) nei quali è stata calcolata la risposta sismica in termini di accelerogrammi, spettri di risposta elastici e fattori di amplificazione:

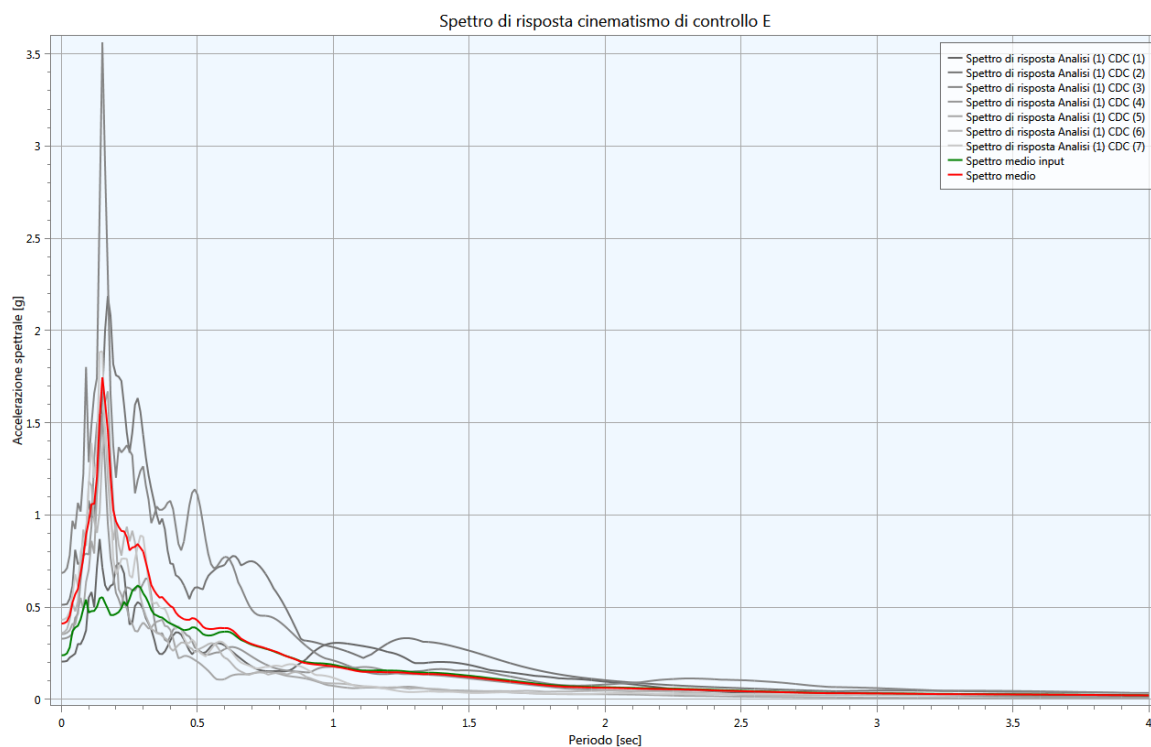
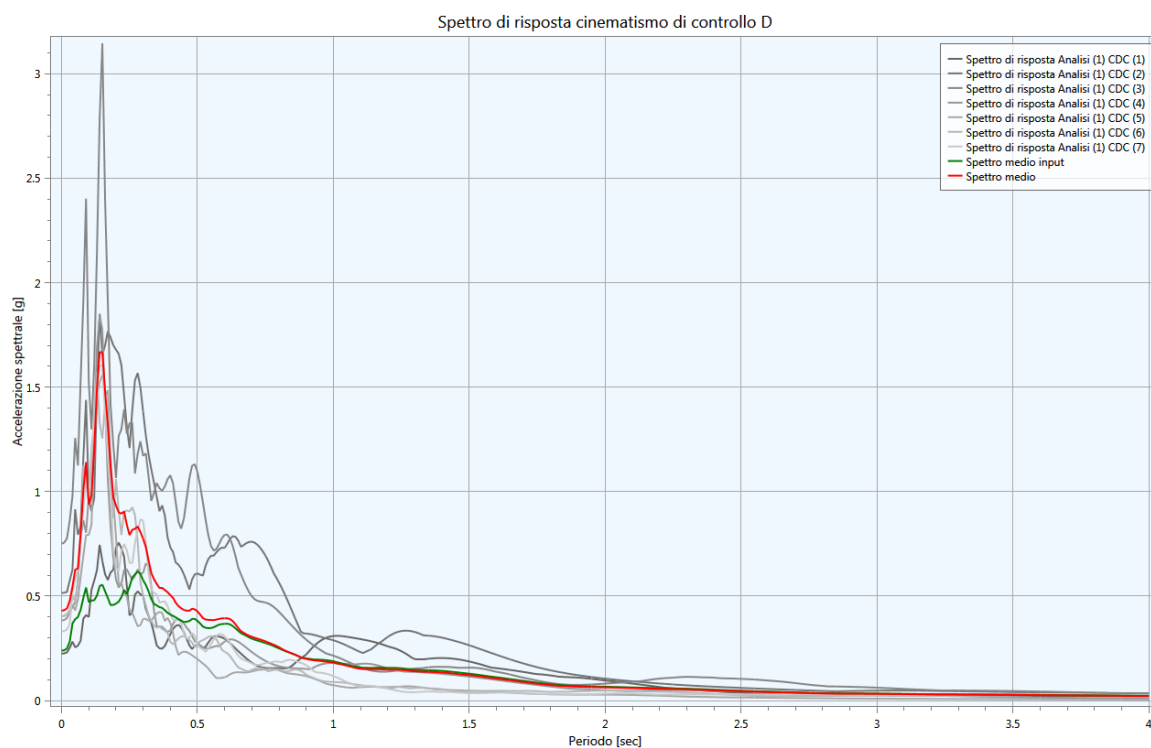


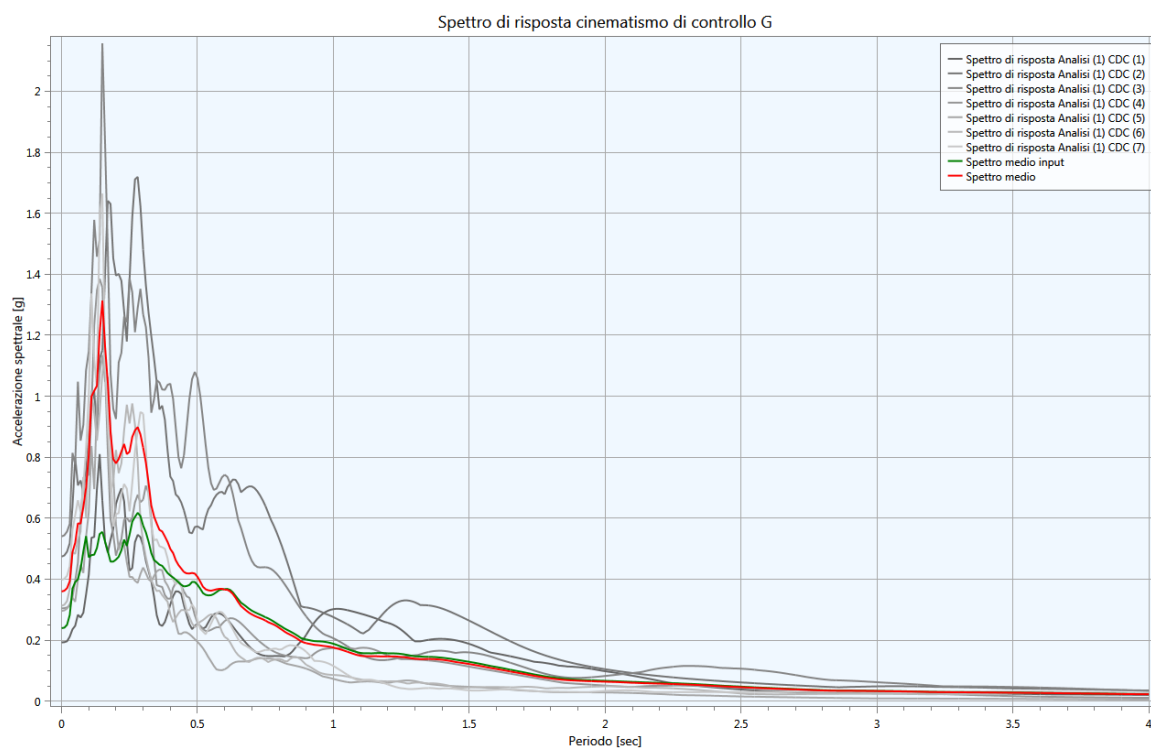
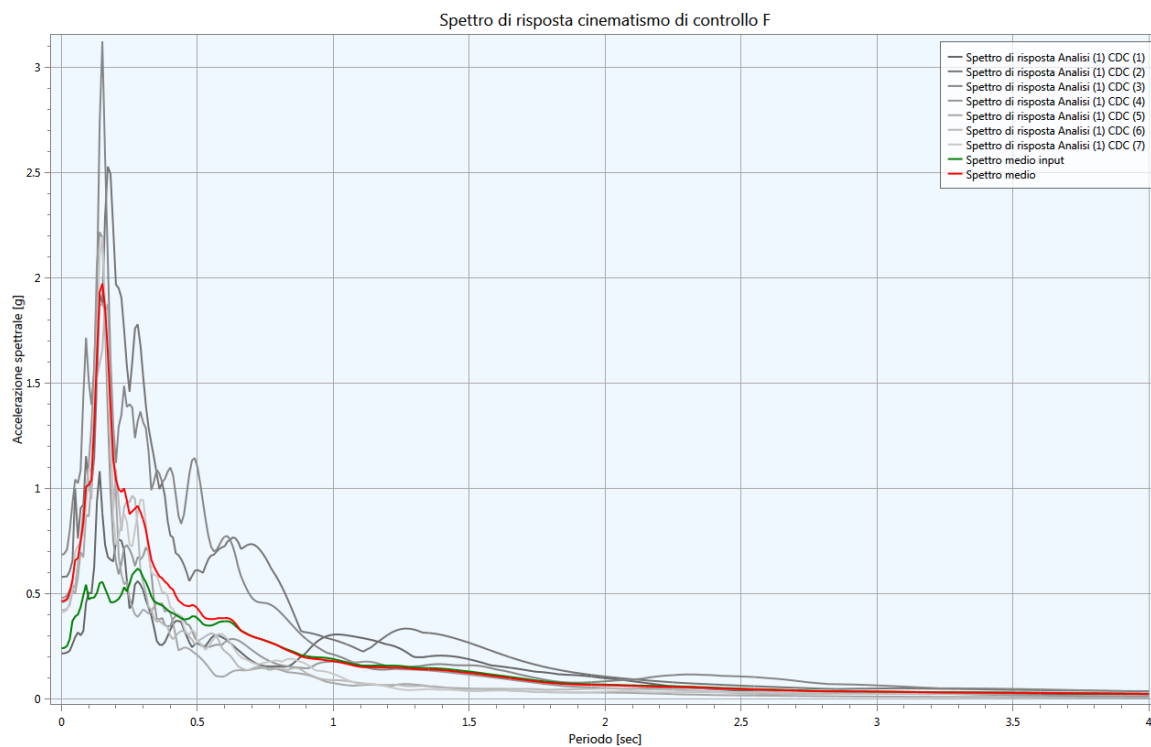


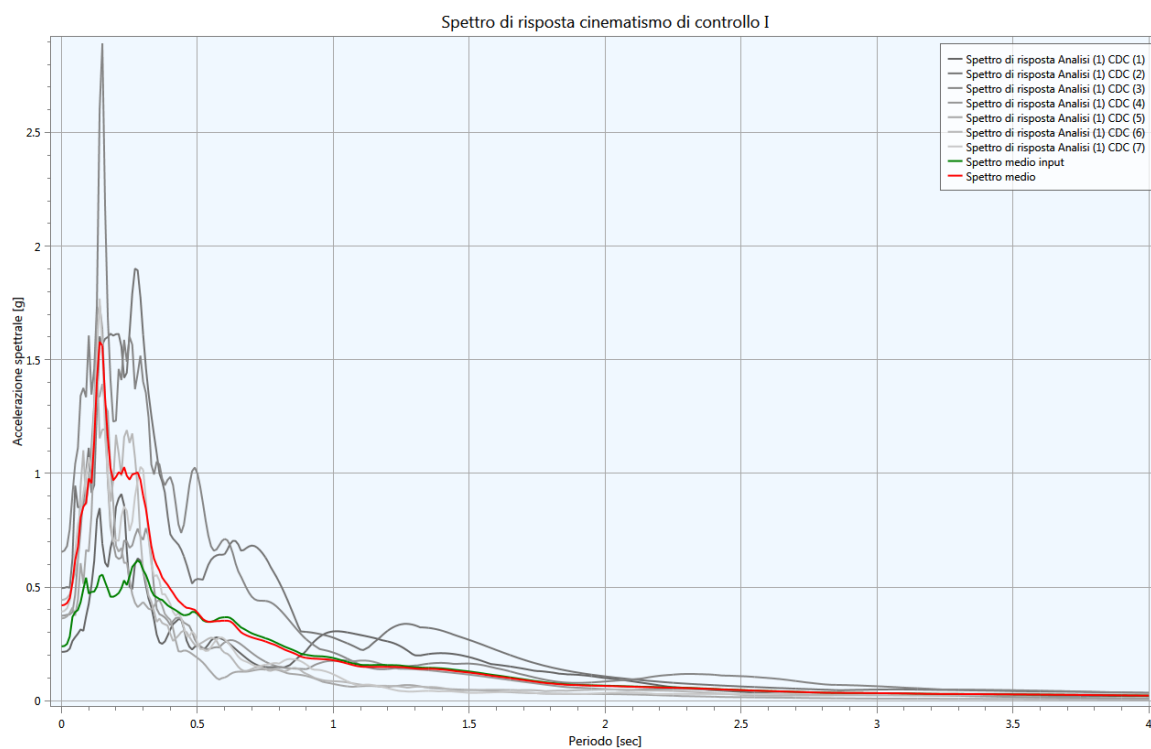
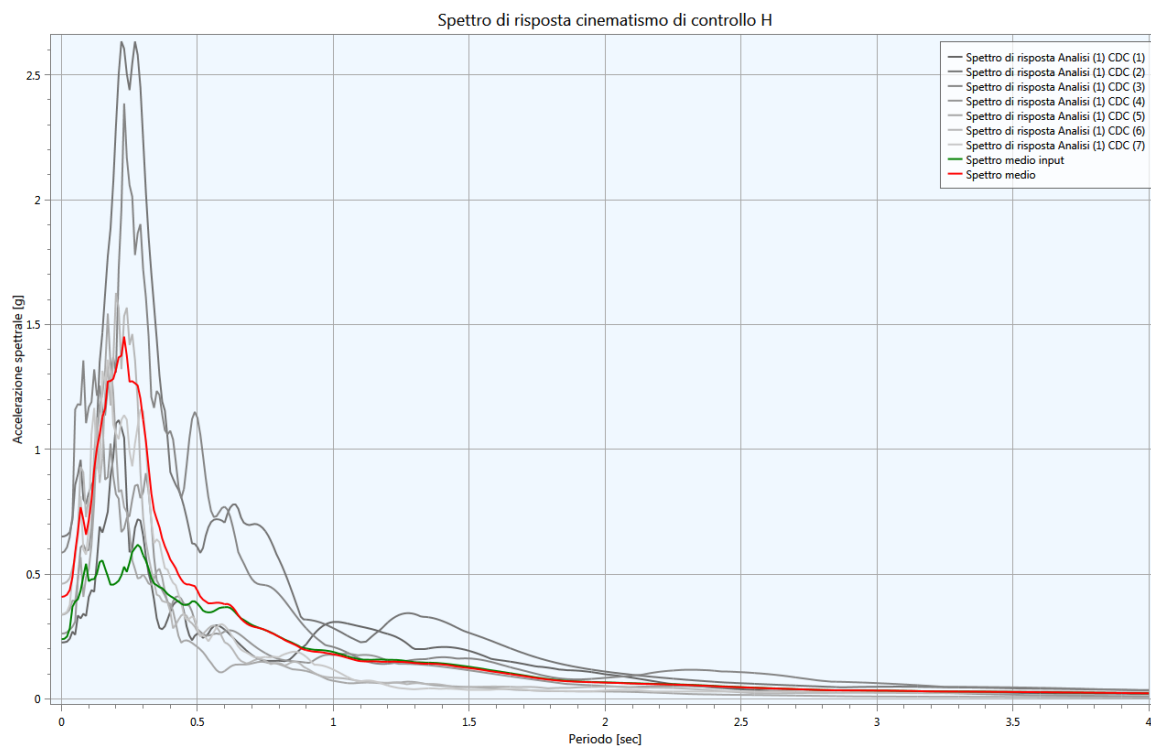
Di seguito si riportano i risultati della modellazione per ciascun punto di controllo in termini di spettri di risposta. Nei grafici seguenti con la linea verde è rappresentato lo spettro di risposta medio di input, con la linea rossa lo spettro di risposta medio di output e con le linee grigie gli spettri di risposta di output relativi ai 7 accelerogrammi utilizzati.

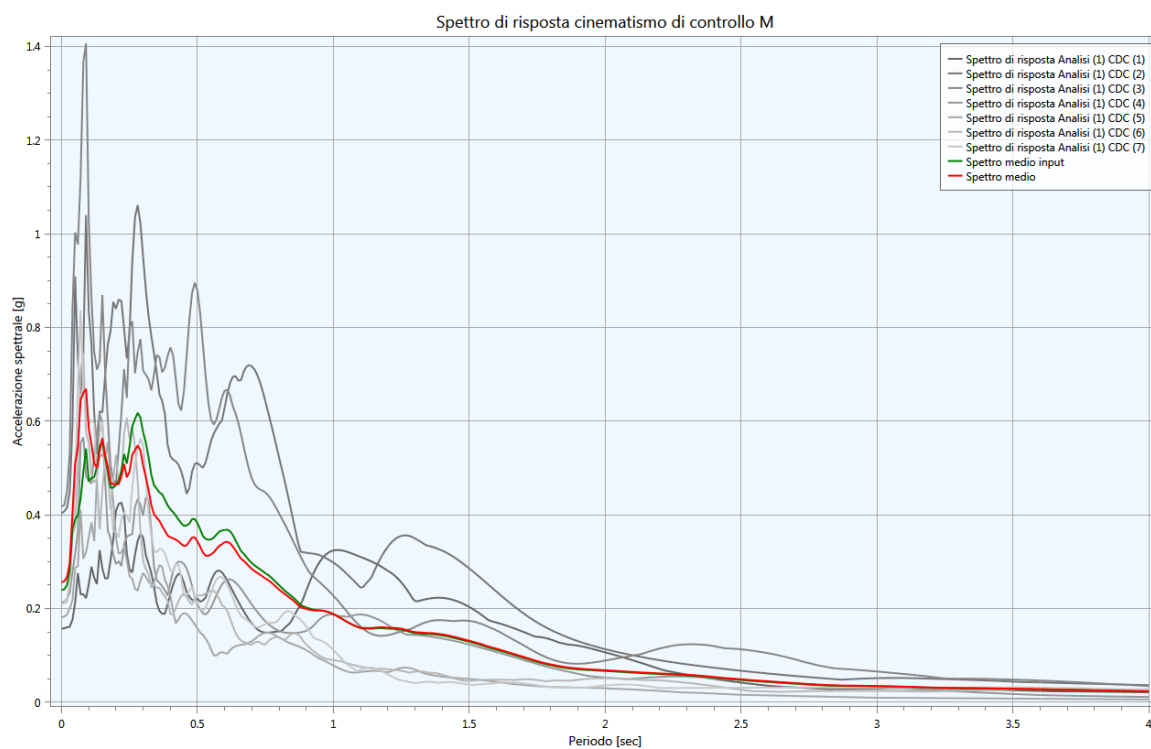
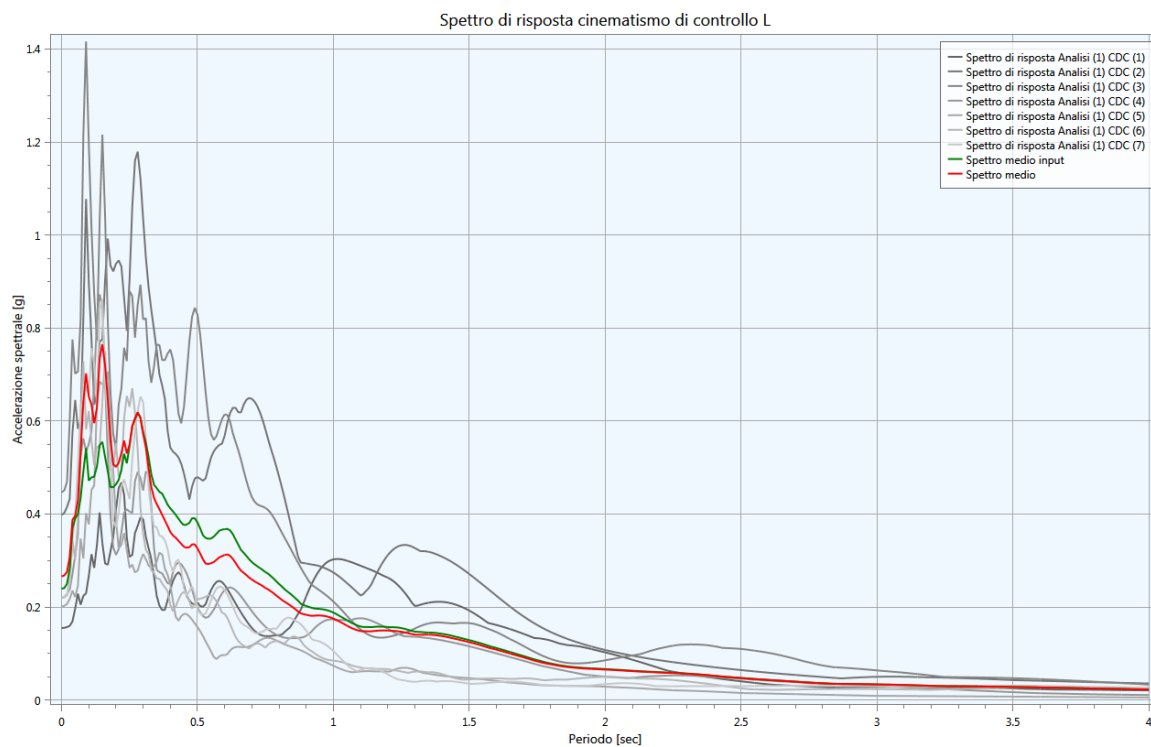




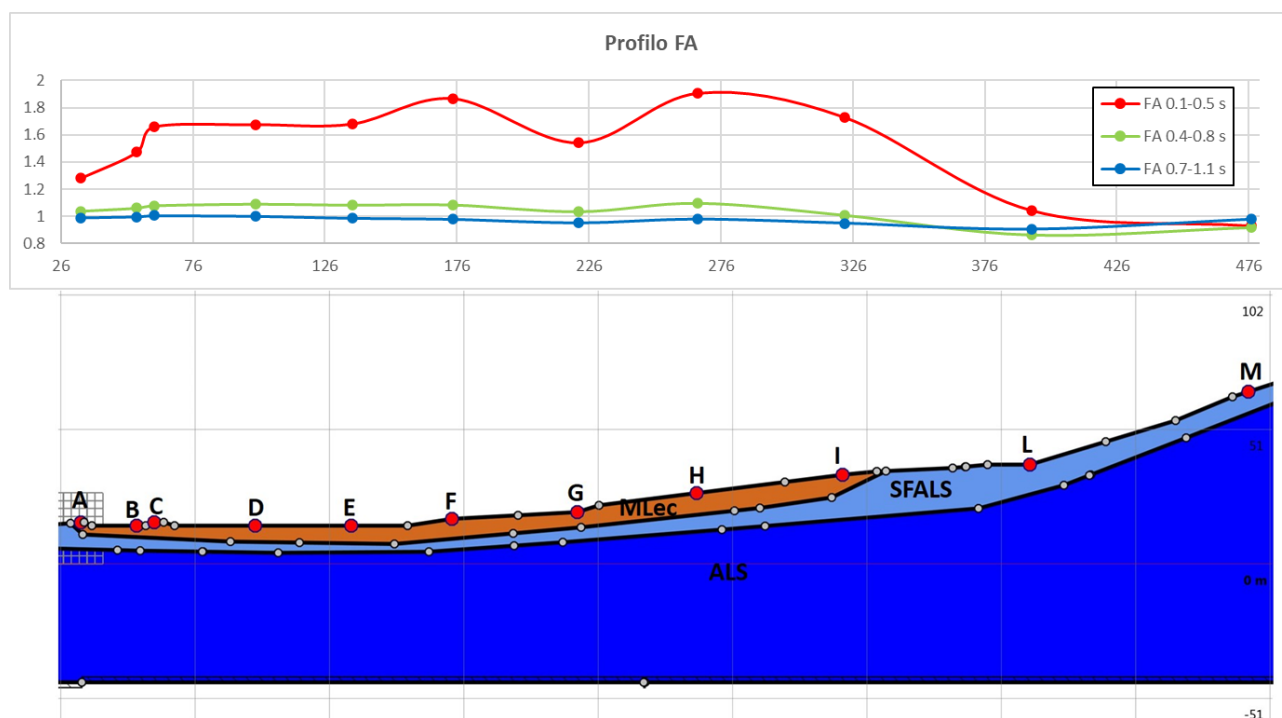








Di seguito si riportano i risultati della modellazione in termini di valori di FA. Nella figura seguente è rappresentato l'andamento dei valori di FA rispetto alla sezione modellata: la linea rossa rappresenta l'andamento dei valori riferiti all'intervallo di periodo 0.1-0.5 s, la linea verde all'intervallo 0.4-0.8 s, quella blu all'intervallo 0.7-1.1 s.

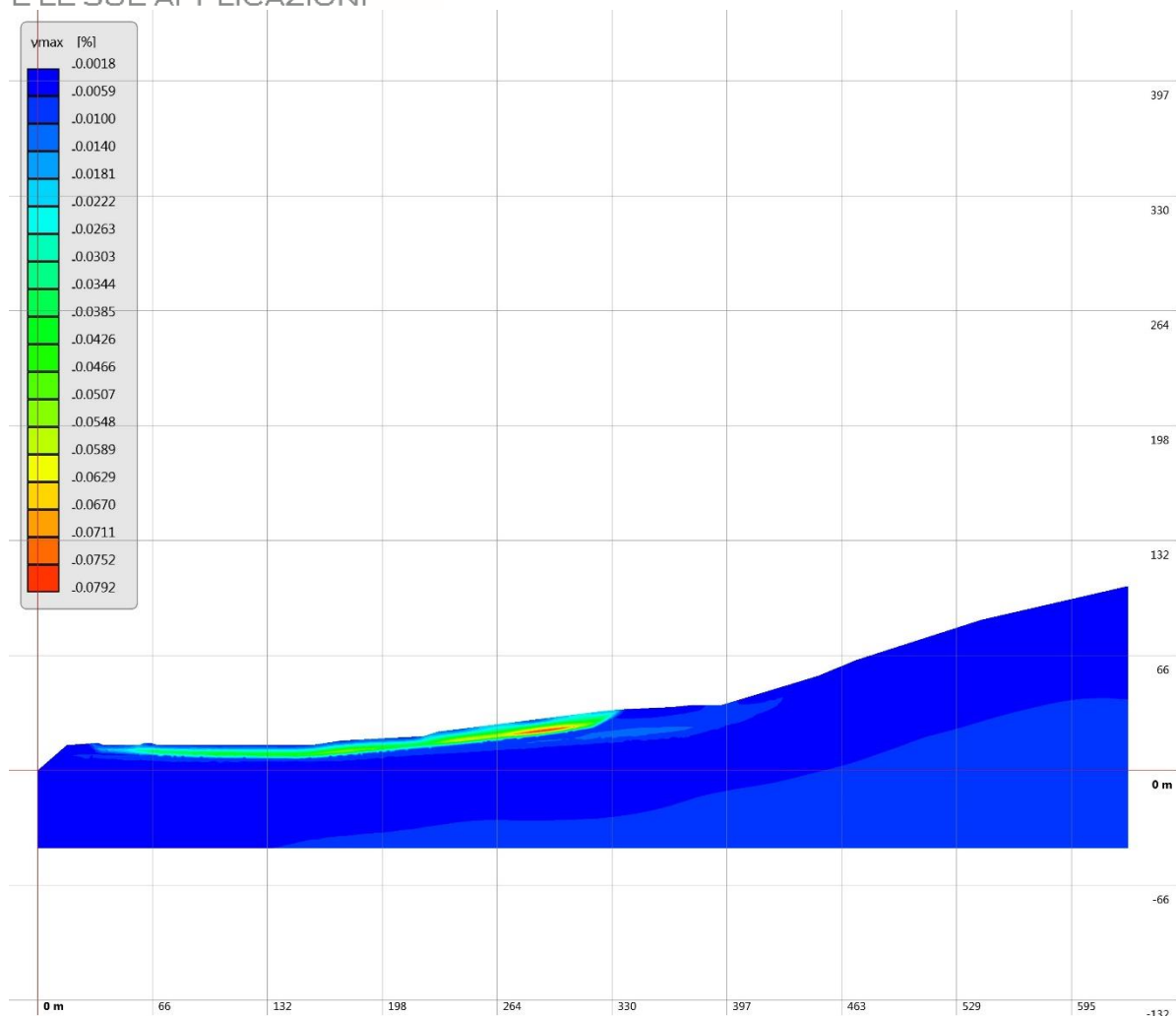


Nella tabella seguente alla figura tali valori sono riepilogati per ciascun punto di controllo, per i quali è anche specificato il valore in metri della distanza orizzontale rispetto al margine sinistro della sezione geologico-tecnica.

FATTORI DI AMPLIFICAZIONE IN SUPERFICIE FREE-FIELD											
Punto analisi	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M
X (m)	34	55	61	100	136	174	222	267	323	394	477
FA <sub>0.1-0.5</sub>	1.3	1.5	1.7	1.7	1.7	1.9	1.5	1.9	1.7	1.0	0.9
FA <sub>0.4-0.8</sub>	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	0.9	0.9
FA <sub>0.7-1.1</sub>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0

Infine, come ultimo risultato dell'analisi RSL, viene qui di seguito mostrata la distribuzione dei valori di deformazione di taglio massimi all'interno della sezione analizzata ottenuti considerando la media dei valori ottenuti applicando i 7 accelerogrammi.





**Banche dati allegate:**

**Output\_acc.rar:** Accelerogrammi calcolati a piano campagna per ciascun punto di analisi e espressi in g riferiti a ciascun accelerogramma di input con  $\Delta t$  di 0.005 s.

**Output\_spe.rar:** Spettri di risposta elastici in accelerazione calcolati a piano campagna per ciascun punto di analisi e espressi in g riferiti a ciascun accelerogramma di input. Sono inoltre presenti gli spettri medi di input e di output.

#### 4. Analisi Pseudostatica e/o dinamica semplificata

Scopo del paragrafo è fornire un quadro riassuntivo sulle metodologie utilizzate ed i risultati ottenuti a seguito delle analisi di stabilità di versanti in terra eseguite da parte del Centro di Microzonazione Sismica nell'ambito degli studi di approfondimento delle zone instabili per frana presenti all'interno dell'Ordinanza 79 emanata dal Commissario straordinario alla ricostruzione sisma 2016.

Le analisi sono state eseguite a valle di una prima fase di lavoro condotta dai professionisti incaricati che ha portato, sulla base di dati ricavati da indagini sia pregresse che di nuova acquisizione, alla costruzione del modello geologico nonché geologico-tecnico del versante oggetto dello studio.

Sulla base di tale modello geologico-tecnico, attraverso la costruzione di sezioni rappresentative del versante, è stata eseguita inoltre da parte dei professionisti una verifica preliminare di stabilità in condizioni statiche attraverso approcci di calcolo semplificati all'Equilibrio Limite Globale.

È possibile distinguere sostanzialmente 2 possibili casistiche riscontrabili a valle degli studi condotti dai professionisti incaricati:

**Frane Accertate.** Si tratta di frane la cui evidenza e attività è risultata chiara sulla base delle indagini eseguite e che quindi sono passibili di riattivazioni. In questo caso la geometria della superficie di scorrimento può essere, in prima analisi, ricostruita sulla base di vincoli geomorfologici e, ove disponibili o realizzati allo scopo, stratigrafici da indagini geognostiche e/o geofisiche. Qualora persistano incertezze che comunque gravano sull'esatto posizionamento della superficie, si procede ad effettuare una ricerca della superficie a minimo valore di  $F_s$  (che si attesterà a valori vicini ad 1), utilizzando una maglia dei centri di dimensioni ridotte ed in un intorno molto ravvicinato all'area valutata in frana. In questi casi, per quanto attiene alla parametrizzazione geotecnica della/e sezione/i di analisi, si fa riferimento ai parametri di resistenza residua.

**Frane Incerte.** Si tratta di aree, spesso segnalate come  $ZA_{FR}$  e definite come aree potenzialmente franose (APF nelle linee guida allegate a ICMS) per le quali, a valle delle informazioni disponibili e delle indagini eseguite, le evidenze sullo stato di attività della frana e sulla posizione della (eventuale) superficie di scorrimento sono meno robuste. In questi casi sarà necessario avanzare delle ipotesi la cui validazione è demandata alla successiva fase di analisi numerica, la quale si svolgerà sulla base della generazione di superfici di tentativo a minimo valore di  $F_s$ . In questi casi, per quanto attiene alla parametrizzazione geotecnica della/e sezione/i di analisi, si fa riferimento ai parametri di resistenza di picco qualora, in assenza di evidenze dirette (rilevamento ed indagini eseguite per questo lavoro) od indirette (segnalazioni e dati di archivio), il problema di sismo-induzione potenziale sia da riferire ad un processo di prima attivazione del movimento. Diversamente, si tengono in considerazione i parametri residui.

Uno degli aspetti di più difficile definizione nella costruzione del modello geologico-tecnico del versante riguarda la presenza ed il corretto posizionamento di una eventuale falda acquifera, la quale può determinare una forte influenza sulle condizioni di stabilità. Nel caso in cui le informazioni inerenti alla posizione della falda non siano robuste, i professionisti incaricati hanno provveduto, in questa fase preliminare di analisi, alla ricostruzione di scenari idraulici. Sia per le frane certe che incerte è infatti essenziale tenere conto di possibili scenari idraulici, ovvero di insorgenza di pressioni neutre all'interno

Consegna dal CentroMS all'Affidatario  
Comune di FIASTRA

del versante. In questo senso, nella fase preliminare, risulta importante svolgere analisi di sensibilità del sistema alla forzante idraulica, cioè calcolando il valore di  $F_s$  per differenti valori di pressione dell'acqua, sempre partendo da scenari asciutti (assenza di falda) e poi considerando un aumento discreto (quindi a gradini) della superficie piezometrica fino al valore che porta  $F_s = 1$ , valutando poi la effettiva possibilità di realizzazione dello scenario più gravoso sulla base di giudizio esperto qualora non si disponga di dati quantitativi sito-specifici.

Recepiti i risultati di tale analisi preliminare eseguita in condizioni statiche, compito del Centro di Microzonazione Sismica è quello di verificare la stabilità del versante in condizioni pseudo-statiche e dinamiche, attraverso metodi di analisi semplificati (come previsto dalle linee guida allegate agli ICMS), al fine di eseguire lo *screening* da  $Z_{A_{FR}}$  a  $Z_{S_{FR}}$ . Le aree in frana o potenzialmente in frana che dovessero risultare instabili all'azione sismica in queste analisi costituiranno la perimetrazione delle  $Z_{S_{FR}}$ . È importante sottolineare che il centroMS conduce le analisi sulla base delle ipotesi sia cinematiche che idrauliche formulate dai professionisti: lo scopo non è la valutazione dell'attendibilità delle ipotesi e dei relativi scenari. Pertanto, nei casi in cui per lo stesso versante siano riportati diversi scenari, il centroMS restituisce i risultati analitici di tutti gli scenari considerati, demandando al professionista la valutazione di quello, necessariamente unico, che dovrà essere preso in considerazione per valutare l'effettivo passaggio da  $Z_{A_{FR}}$  a  $Z_{S_{FR}}$  ovvero da  $Z_{A_{FR}}$  a microzona stabile/suscettibile di amplificazione.

#### **a. Approccio metodologico**

Sia per le frane accertate che per quelle incerte, una volta definita la superficie di scorrimento sulla base delle evidenze di campagna e/o dall'individuazione della superficie "random" a minor  $F_s$ , viene condotta in prima battuta un'analisi di stabilità all'ELG con approccio pseudo-statico, atta a determinare il coefficiente pseudo-statico critico  $K_c$  in funzione dei differenti scenari idraulici ipotizzati. Il valore di  $K_c$  ottenuto viene confrontato con quello della componente orizzontale equivalente dell'accelerazione sismica attesa  $K_h$ , in modo tale da avere nell'immediato un'idea della possibile sismo-inducibilità del versante in frana. L'analisi di mobilità in condizioni sismiche verrà condotta per le frane per le quali  $K_c \leq K_h$ , con  $K_h$  quantificato secondo le indicazioni normative (NTC 2018).

L'analisi pseudo-statica viene eseguita tramite lo strumento di calcolo SSAP (*Slope Stability Analysis Program*), un *software* di comprovata affidabilità il quale, grazie alla sua natura *freeware*, rende riproducibili in qualunque momento e da chiunque le analisi eseguite. Il codice di calcolo inoltre è adatto alla verifica di diverse tipologie di movimento dal momento che implementa tutte le soluzioni rigorose di maggiore utilizzo (tra le quali meritano menzione i metodi di Bishop, Jambu, Morgenstern & Price, Spencer, Sarma) per calcolare il fattore di sicurezza.

In prima analisi viene quindi calcolato, per la specifica superficie, il valore di  $K_c$  critico che porterebbe il pendio a  $F_s=1$ , ovvero in condizioni di stabilità critica. Il procedimento per determinare su una superficie singola il valore di  $K_c$  è effettuato automaticamente da SSAP qualora in condizioni statiche, per una specifica superficie di scivolamento assunta dall'utente, risulti  $F_s > 1$ . L'analisi sulla singola superficie di scivolamento viene eseguita attraverso tutti i 7 metodi di calcolo rigorosi presenti del *software* che operano nell'ambito della metodologia della verifica della stabilità dei pendii mediante il metodo dell'equilibrio limite. Nella procedura adottata dal centroMS viene tuttavia considerato valido il risultato

ottenuto con il metodo più appropriato in relazione alla geometria della superficie di scorrimento e non secondo un criterio semplicemente cautelativo.

Caratteristica di SSAP è che, successivamente alla determinazione del coefficiente sismico critico  $K_c$ , viene effettuata un'analisi con il metodo semi-probabilistico degli spostamenti di *Biondi et al. (2011)*, il quale permette di avere in prima battuta un valore espresso in centimetri dello spostamento atteso, che potrà essere utilizzato come termine di confronto con quello ottenuto dalla successiva analisi dinamica. *Biondi et al. (2011)* propongono una procedura semplificata che lega il coefficiente sismico critico  $K_c$ , determinato con metodi numerici per una determinata superficie di scivolamento, e la accelerazione massima  $a_{max}$  prevista in sito, con una stima semi-probabilistica dello spostamento atteso. Il modello proposto da *Biondi et al. (2011)* è altresì basato su un ampio *database* con un archivio con migliaia di reali (non sintetiche) registrazioni accelerometriche italiane.

L'analisi di mobilità in condizioni sismiche si esplica attraverso il metodo di *Newmark (1965)*, il quale prevede l'applicazione di una o più *time history* di accelerazione al baricentro della massa di frana ipotizzata rigida e con rottura fragile. Il metodo di analisi proposto da *Newmark* consiste nel prendere in considerazione un accelerogramma di riferimento e, avendo preventivamente calcolato l'accelerazione critica di una determinata frana, calcolarne lo spostamento cosismico cumulato  $S_p$ . Avendo ipotizzato una massa perfettamente rigida, l'effetto deformativo dovuto all'azione sismica è perfettamente elastico (dunque reversibile) al di sotto della soglia critica e perfettamente plastico (dunque irreversibile) al di sopra della stessa, ipotizzando quindi un movimento della frana ogni qual volta l'accelerazione dell'input sismico superi l'accelerazione critica prefissata. Lo spostamento cosismico cumulato di una massa di frana è quindi calcolabile attraverso una doppia integrazione dell'accelerogramma nell'intervallo temporale di superamento della soglia critica pseudo-statica.

Relativamente ai valori di accelerazione critica si possono presentare tre condizioni:

- $K_c = 0$ : l'accelerazione critica è nulla; lo spostamento cosismico è pari alla doppia integrazione di tutto il segnale;
- $K_c > PGA$ : la *time history* non ha accelerazioni utili per il calcolo dello spostamento cosismico. In questo caso è sempre  $S_p = 0$ ;
- $0 \leq K_c \leq PGA$ : il calcolo viene eseguito attraverso la doppia integrazione della porzione di *time history* che eccede l'accelerazione critica;

Per l'input sono state considerate 7 *time-histories* reali rappresentative della pericolosità sismica locale (scenari di scuotimento) associata ad eventi con tempo di ritorno di 475 anni derivate dall'analisi di risposta sismica locale attraverso modellazione bidimensionale agli elementi finiti e calcolate sulla superficie di scivolamento.

Calcolati gli spostamenti cosismici cumulati per ciascuna *time-history* è possibile determinare, nella condizione in cui  $0 \leq K_c \leq PGA$ , la probabilità di superamento ( $P_{ecc}$ ) di una soglia critica di spostamento, corrispondente ad un valore di 10 cm per le frane in terra (*Romeo, 2000*). Tale probabilità esprime di fatto la pericolosità.

L'applicazione del metodo di *Newmark* è stata eseguita con il codice di calcolo SLAMMER (*Seismic*

*Landslide Movement Modeled using Earthquake Records*), un *software freeware* prodotto da USGS che permette di utilizzare accelerogrammi propri per il calcolo degli spostamenti cumulati e separatamente per le due porzioni positiva e negativa della registrazione accelerometrica. Viene restituita inoltre una media di questi due valori la quale, vista la loro possibile discrepanza, è stata considerata per il calcolo della probabilità di eccedenza.

## **b. Risultati**

Per l'area soggetta ad approfondimenti del comune di Fiastra, in prossimità della località San Lorenzo a Lago, è stata analizzata la sismo-inducibilità del versante posto in corrispondenza dell'abitato. Il dissesto in studio non è segnalato nel Piano Stralcio di bacino per l'Assetto Idrogeologico, mentre è cartografato nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia e classificato come scivolamento rotazionale-traslato.

L'esito dello studio eseguito dal professionista incaricato rileva l'esistenza di condizioni di stabilità generale del territorio e l'assenza di fenomenologie franose in quasi la totalità dell'area investigata; viene evidenziata la circostanza che l'area in frana riportata in IFFI di fatto non esiste.

Contestualmente, viene riportata la condizione relativa all'esistenza di porzioni limitate di territorio dove la presenza di una copertura detritica, prodotta dall'alterazione e dal disfacimento della formazione della Scaglia Cinerea che costituisce il substrato, di spessore di pochi metri, crea i presupposti per fenomeni di tipo gravitativo molto localizzati.

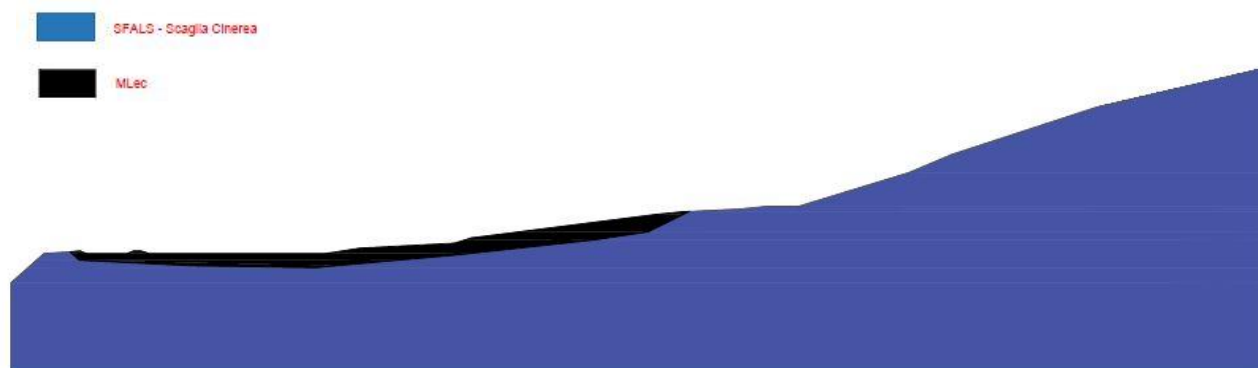
Il modello geologico-tecnico di riferimento adottato per il versante, in accordo con le analisi preliminari condotte dal professionista incaricato, è un modello semplificato in cui l'intero substrato geologico (Scaglia Cinerea) viene cautelativamente assimilato ad unità di tipo SFALS, ed è quindi caratterizzato da 2 unità geologico-tecniche:

- Terreni di copertura limoso-argillosi-MLeC;
- Scaglia Cinerea fratturata-SFALS;

Dato l'esito delle indagini condotte ed il modello geologico del versante proposto dal professionista, il caso in esame è inquadrabile come un potenziale problema di attivazione co-sismica di un processo attualmente non esistente (APF).

Per la verifica di stabilità del versante è stata presa come riferimento la sezione geologico-tecnica B-B' proposta dal professionista, posizionata nella porzione meridionale dell'area oggetto dello studio.

La sezione evidenzia chiaramente il contrasto morfologico tra la porzione superiore del versante, caratterizzata dall'affioramento della Scaglia Cinerea, e quella inferiore in prossimità del centro abitato, costituita dall'affioramento di terreni di copertura spessi alcuni metri e poggianti sul sopracitato substrato di Scaglia Cinerea.



I parametri geotecnici forniti dal professionista sulla base delle indagini eseguite ed utilizzati per le analisi di stabilità sono riportati della seguente tabella.

n°	Unità litotecnica	$\gamma$ (kN/m3)	$\gamma_{sat}$ (kN/m3)	$\varphi'$ (°)	$c'$ (kPa)
1	Terreni di copertura	18,8	19,5	23,4	9
2	Scaglia Cinerea fratturata	21	21	35	50

Viste le differenze morfologiche e litologiche riscontrate lungo la sezione si è deciso di analizzare distintamente le porzioni superiore ed inferiore del versante, la prima già analizzata nello studio preliminare mentre la seconda introdotta in questa fase.

In prima battuta è stata replicata l'analisi condotta dal professionista, con ricerca di potenziale superfici di rottura limitatamente alla porzione inferiore del versante, cioè quella a bassa inclinazione e con presenza in affioramento di coperture.

Per quanto riguarda le condizioni di saturazione della porzione inferiore del versante caratterizzata dalla presenza di terreni di copertura, non essendo robuste le informazioni relative al corretto posizionamento della falda acquifera, si è proceduto, in accordo con quanto proposto dal professionista, alla verifica di stabilità considerando 3 differenti scenari di saturazione:

- Assenza di falda;
- Falda a -3 metri da p.c.;
- Falda a p.c.



Per quanto riguarda lo scenario in assenza di saturazione, l'analisi ha portato all'individuazione, attraverso l'applicazione del metodo di Morgenstern-Price (1965) in condizione statiche, di una superficie con valore minimo di  $F_s$  pari a 3,94. L'analisi pseudo-statica eseguita su questa superficie ha individuato un valore di  $K_c$  pari a 0,38. Essendo il coefficiente sismico orizzontale calcolato per questa porzione del versante pari a circa 0,1 è verificata la condizione  $K_c \geq K_h$  e non si procede quindi con l'analisi in condizioni dinamiche.

Considerando uno scenario di saturazione circa intermedia dei terreni di copertura, con livello di

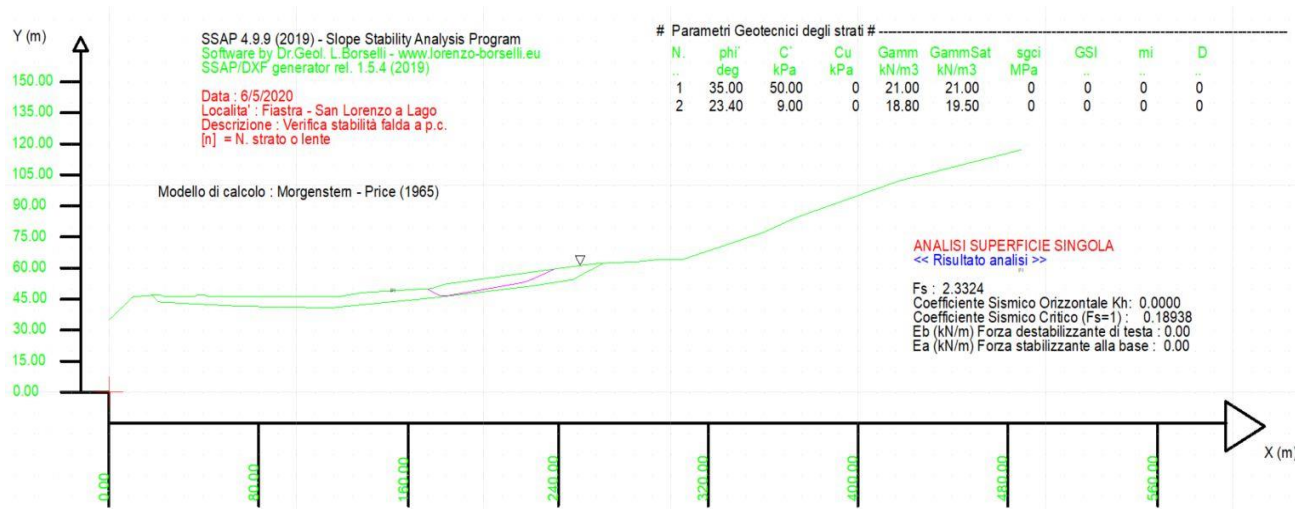


falda posto a -3 metri da piano campagna, si individua una superficie di rottura che mantiene un valore di sicurezza elevato pari a circa 3,33. Permane inoltre la condizione  $K_c \geq K_h$ , essendo il  $K_c$  pari a 0,30; non si procede quindi con l'analisi in condizioni dinamiche.





Portando i terreni di copertura in totale saturazione, ipotizzando quindi uno scenario estremo con falda a piano campagna, si individua una superficie con valore minimo di  $F_s$  pari a 2,33 e permane quindi una condizione di stabilità in condizioni statiche. L'analisi pseudo-statica eseguita su questa superficie ha individuato un valore di  $K_c$  pari a circa 0,18 ed è nuovamente verificata la condizione  $K_c \geq K_h$ ; non si procede quindi con l'analisi in condizioni dinamiche.



A valle delle analisi condotte in condizioni pseudo-statiche, successivamente alla determinazione del coefficiente sismico critico  $K_c$ , è stata eseguita, per ogni scenario considerato, l'analisi con il metodo semi-probabilistico degli spostamenti di *Biondi et al. (2011)*, il quale ha permesso di avere in prima battuta diversi valori espressi in centimetri dello spostamento atteso, in funzione della accelerazione orizzontale applicata.

Considerando esclusivamente lo scenario più conservativo con falda a piano campagna, dal quale risultano i valori più bassi (seppur abbondantemente al di sopra dei valori critici) in termini di  $F_s$  e  $K_c$ , si nota come, per ciascuno dei metodi di calcolo presi in considerazione, non si prevedono spostamenti massimi superiori a 6 centimetri fino ad un valore di accelerazione orizzontale pari a 1g, largamente al di sopra del valore dell'accelerazione massima attesa in sito su suolo rigido ( $a_{(g)}=0,225-0,250$ ).

ssap2010\_64bit

X

**RISULTATI VERIFICA SU SUPERFICIE SINGOLA**

METODO DI CALCOLO.....Fs.....lambda....MLD....Kc.....Esito.....Note....

JANBU_RIGOROSO(1973).....	2,3807	1,0000	0,0366	0,1925	Verificata	
SPENCER(1973).....	2,3341	0,1333	0,0355	0,1900	Verificata	
SARMA_I(1973).....	2,3340	0,4730	0,0349	0,1894	Verificata	
MORGESTERN-PRICE(1965)...	2,3324	0,1524	0,0357	0,1894	Verificata	
CHEN-MORGESTERN(1983)...	2,3295	0,0590	0,0353	0,1888	Verificata	
SARMA_II(1979).....	2,3327	0,5483	0,0352	0,1894	Verificata	
BORSELLI(2016).....	2,3327	0,1322	0,0357	0,1894	Verificata	

NOTE di Calcolo:-----

[0]--> Fs<1.0 oppure non convergenza calcolo

[1]--> Fs>50

[2]--> Kc=0.0 per FS<1.0

[3]--> Kc=0.0 per Fs>50

[4]--> Calcolo Kc senza convergenza

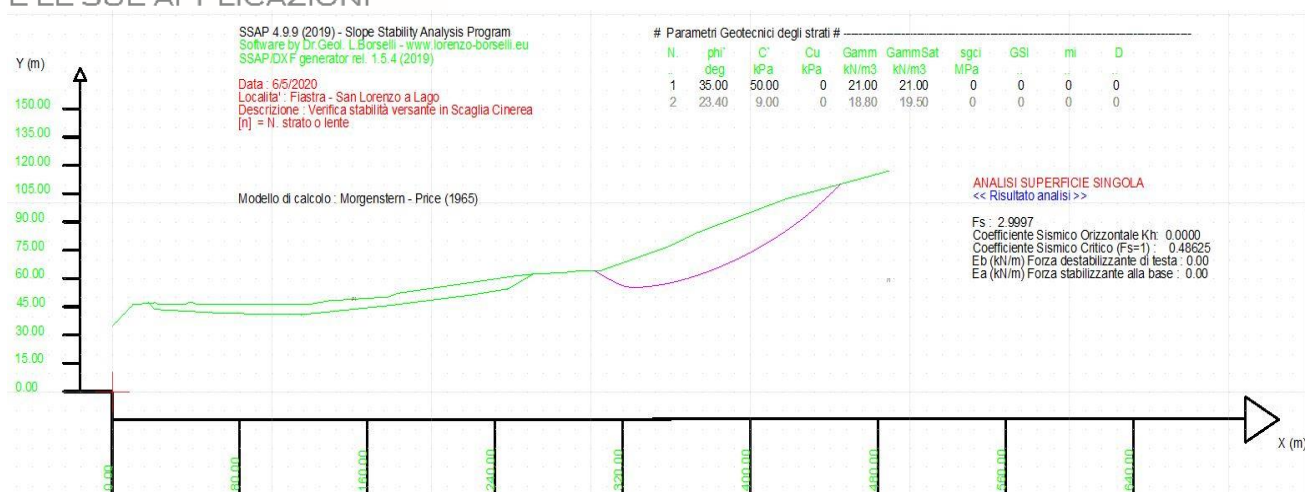
[5]--> Calcolo Kc non attivato

SPOSTAMENTO ATTESO S(cm) CON 10% PROB. ECCENDENZA - da BIONDI et al.(2011), BANDINI et al.(2015), DU(2018)

.....||----- S(cm) per Amax(g)-----||

METODO DI CALCOLO.....	Kc.....	Sr.....	0.1g.....	0.2g.....	0.4g.....	0.6g.....	0.8g.....	1.0g
JANBU_RIGOROSO(1973).....	0,1925	0,989	0,001	0,001	0,820	2,282	3,895	5,551
SPENCER(1973).....	0,1900	0,993	0,001	0,002	0,857	2,353	3,997	5,681
SARMA_I(1973).....	0,1894	0,993	0,001	0,002	0,866	2,368	4,018	5,708
MORGESTERN-PRICE(1965)...	0,1894	0,995	0,001	0,002	0,868	2,374	4,027	5,721
CHEN-MORGESTERN(1983)...	0,1888	0,995	0,001	0,002	0,877	2,391	4,051	5,751
SARMA_II(1979).....	0,1894	0,995	0,001	0,002	0,868	2,374	4,028	5,722
BORSELLI(2016).....	0,1894	0,995	0,001	0,002	0,868	2,373	4,027	5,720

Come accennato in precedenza, a completamento della validazione delle verifiche effettuate anche dal professionista nella parte bassa del versante, Tale scelta è legata al fatto che, pur a fronte di un litotipo affiorante roccioso, la parametrizzazione geotecnica dei materiali, ai quali sono stati attribuiti valori in linea con terre a grana grossa ben addensate e parzialmente cementate e/o con componente coesiva, ha suggerito la necessità di verificare le condizioni di stabilità in ragione della maggiore acclività di questa porzione di versante. Considerando l'assenza di una reale falda acquifera data la limitata permeabilità della Scaglia Cinerea, è stata individuata, attraverso l'applicazione del metodo di Morgestern-Price (1965) in condizione statiche, una superficie con valore minimo di Fs pari a 3,0. L'analisi pseudo-statica eseguita su questa superficie ha restituito un valore di Kc pari a circa 0,48. Essendo l'accelerazione sismica attesa calcolata per il sito in oggetto pari a circa 0,09 (considerando le caratteristiche stratigrafiche e topografiche della porzione superiore della sezione) è verificata ampiamente la condizione  $K_c \geq K_h$  e non si è proceduto quindi con l'analisi in condizioni dinamiche.



## **5. Considerazioni conclusive**

Sulla base di quanto descritto nei paragrafi precedenti il Professionista Affidatario dell'incarico dovrà utilizzare i risultati conseguiti per la prosecuzione delle proprie attività e la realizzazione degli elaborati oggetto della Consegna Finale.

In particolare, si ricorda che sarà necessario procedere all'aggiornamento dello studio di microzonazione sismica esistente secondo quanto previsto nel disciplinare sottoscritto.

Per il sito di Fiastra è stata analizzata una sezione rappresentativa.

Tale sezione ha mostrato una significativa variabilità nei valori di FA riferiti all'intervallo di periodo 0.1-0.5 s. In particolare, si riscontrano valori compresi tra 1.3 (punto A) ed 1.9 (punto H) per i punti di controllo situati sulla copertura eluvio-colluviale (MLec). Tale variabilità è molto probabilmente legata allo spessore di questi depositi. Sempre per questo intervallo di periodo, i valori di FA sono prossimi ad 1 per i punti L ed M, situati sul substrato alterato/fratturato (SFALS). Per gli intervalli 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s, è possibile notare che i valori di FA si mantengono pressoché costanti e prossimi ad 1 su tutta la superficie della sezione. Per quanto riguarda le deformazioni di taglio massime, i valori maggiori (all'incirca 0.0752-0.0792 %) si riscontrano nella zona dei punti di controllo H ed I, in prossimità del contatto tra i depositi eluvio-colluviali e il substrato alterato/fratturato.

Per quanto riguarda le analisi di stabilità, sono state effettuate verifiche atte a valutare la potenziale attivazione di dissesti in concomitanza di eventi sismici sulla base dei modelli geologico e geotecnico forniti e già adottati per la verifica preliminare di stabilità dal professionista incaricato. In particolare, ad integrazione di quanto già analizzato preliminarmente dal professionista, si è scelto di condurre analisi volte a valutare le condizioni di stabilità della porzione superiore del versante. Pur considerando parametri geotecnici abbastanza conservativi ed anche ipotizzando scenari idraulici gravosi, non è mai stata soddisfatta la condizione per cui  $K_c < K_h$ , con ciò potendo affermare che non sussistono le condizioni per considerare nessuna parte del versante indagato quale una ZS.

I gruppi di Supporto del CentroMS rimangono a disposizione per chiarimenti e approfondimenti sugli studi effettuati.

Roma, 29 maggio 2020

*Per il CentroMS*

Prof. Dario Albarello  
Dott. Enrico Paolucci  
Prof. Carlo Esposito  
Dott. Federico D'Alessandro

*Il Responsabile del progetto  
per il CentroMS*  
Dott. Marco Amanti

### **Riferimenti bibliografici e sitografici per le analisi di stabilità**

- BIONDI G., CASCONI E., & RAMPOLLO S. (2011). Valutazione del comportamento dei pendii in condizioni sismiche. Rivista Italiana di Geotecnica, 45(1), 9-32.
- NEWMARK N.W. (1965) – Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. The first Rankine Lecture of the British Geotechnical Society, Geotechnique, vol. 15, n. 2.
- NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI, 2018.  
(<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf>)
- ROMEO R. (2000) - Seismically induced landslide displacements: a predictive model. Engineering Geology, 58, 387-397.

Software utilizzati:

SLAMMER: <https://www.usgs.gov/software/slammer>

SSAP: <https://www.ssap.eu/>

### **Bibliografia relativa al capitolo del calcolo di FA**

D'Amico M, Felicetta C, Russo E, Sgobba S, Lanzano G, Pacor F, Luzi L (2019) Italian Accelerometric Archive v 3.1 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Dipartimento della Protezione Civile Nazionale. doi: 10.13127/itaca.3.1.

Luzi L, Pacor F, Felicetta C, Puglia R, Lanzano G, D'Amico M (2019) 2016-2017 Central Italy seismic sequence: strong-motion data, seismic hazard and design earthquake for the seismic microzonation of Central Italy. Bulletin of Earthquake Engineering, doi:/10.1007/s10518-019-00676-3.