

Studi di microzonazione sismica di III livello dei Comuni interessati dagli eventi sismici verificatisi a far data dal 24 agosto 2016

(OPCM n. 24 del 12 maggio 2017)



ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE 2D

COMUNE DI ORTEZZANO (FM)

Prof. Ing. Sebastiano Foti (DISEG)

Ing. Andrea Ciacimino (DISEG)

Politecnico di Torino,

Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica (DISEG)

Torino, 10/01/2017



## Sommario

1. Premessa	2
2. Descrizione del codice di calcolo	3
3. Scelta dell'input sismico	5
4. Modello di sottosuolo	6
5. Analisi di risposta sismica locale	8
Modello numerico	8
Risultati delle analisi	10
Confronti analisi 1D/2D	12
Fattori di amplificazione	14
6. Bibliografia	16

## 1. Premessa

Il presente studio riguarda la valutazione della risposta sismica locale in condizioni bidimensionali (RSL2D) del Comune di Ortezzano (Fermo). Si colloca nell'ambito dell'ambito delle attività previste dall'OPCM n. 24 del 12 maggio 2017 riguardante gli studi di microzonazione sismica di III livello dei Comuni interessati dagli eventi sismici verificatisi a far data dal 24 agosto 2016.

Per la valutazione della risposta sismica locale di un sito è necessario riprodurre un modello attendibile del sottosuolo della area di interesse, a cui poter applicare, nell'ambito delle simulazioni numeriche, un input sismico per determinarne poi gli effetti nel modo più realistico possibile. A tal proposito è stato fatto riferimento a quanto emerso dallo studio di microzonazione sismica di III livello, depositato in digitale nel sito ftp nella cartella relativa al Comune di Ortezzano.

In seguito sono descritti, in primo luogo, il metodo ed il codice di calcolo adottati. In secondo luogo i modelli di sottosuolo realizzati per effettuare le analisi di RSL 2D e le caratteristiche del moto adottato come input. Infine sono presentati i risultati delle analisi di risposta sismica locale e le procedure eseguite per la loro elaborazione.

## 2. Descrizione del codice di calcolo

Le analisi sono state eseguite con il codice di calcolo LSR\_2D (Stacec srl), agli elementi finiti, che consente di effettuare analisi lineari equivalenti nel dominio del tempo mediante modelli bidimensionali.

La procedura iterativa, che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema, consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidità e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente (Idriss and Sun, 1992), da applicare ad ogni elemento della mesh, è il seguente:

1. *inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni ( $G_0$  e  $D_0$ );*
2. *calcolo della risposta dinamica del terreno e valutazione della deformazione massima a taglio  $\gamma_{max,1}$  in ogni elemento;*
3. *calcolo della deformazione a taglio caratteristica di ogni elemento  $\gamma_1$ , ottenuta come:  $\gamma_{max,1} \cdot \alpha$  (generalmente posto pari a 0,65);*
4. *aggiornamento dei valori  $G_1=G(\gamma_1)$  e  $D_1=D(\gamma_1)$  per ogni elemento;*
5. *iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ( $\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$ ), con tolleranza, di  $G$  e  $D$ , posta pari all'1%.*

Il metodo adottato dal codice di calcolo per modellare il comportamento meccanico dei terreni è di tipo visco-elastico lineare equivalente. Il legame tra tensione e deformazione si basa sul modello di Kelvin-Voigt, nel quale la tensione  $\tau$  dipende dalla deformazione a taglio  $\gamma$  e dalla sua derivata  $\dot{\gamma}$  secondo la relazione:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

dove:

- $G$ : *Modulo di rigidità a taglio;*
- $\eta$ : *viscosità del mezzo.*

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell' i-esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani, di forma quadrangolare o rettangolare, al quale viene applicata una storia di accelerazione al bedrock.

Ad ogni istante di tempo è possibile scrivere l'equazione globale del moto (2), che descrive l'equilibrio dinamico del sistema.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g \quad (2)$$

dove:

- $M$  : matrice di massa del sistema;
- $C$  : matrice di smorzamento del sistema;
- $K$  : matrice di rigidezza del sistema;
- $\ddot{u}, \dot{u}, u$ : rispettivamente vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;
- $a_g$ : vettore di accelerazione alla base.

L'equazione viene quindi risolta nel dominio del tempo mediante il metodo di integrazione di Newmark, adottando i coefficienti di integrazione  $\beta$  e  $\gamma$  rispettivamente pari a 0,25 e 0,50.

La matrice di smorzamento del sistema viene ottenuta mediante l'assemblaggio delle matrici di smorzamento dei singoli elementi, queste ultime ottenute proporzionalmente alle matrici di massa e di rigidezza del singolo elemento, utilizzando la seguente formulazione alla Rayleigh:

$$C_q = \alpha_q M_q + \beta_q K_q \quad (3)$$

dove:

- $\alpha_q, \beta_q$ : coefficienti di smorzamento alla Rayleigh.

L'utilizzo della formulazione di Rayleigh comporta, in contrasto con l'evidenza sperimentale, la dipendenza dello smorzamento del terreno dalla frequenza, secondo la seguente formulazione:

$$D_q = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_q}{\omega} + \beta_q \omega \right) \quad (4)$$

Di conseguenza, per ovviare al problema, si utilizza un approccio a doppia frequenza di controllo, analogo a quello implementato nel codice QUAD4m (Hudson et al., 1994), dove i coefficienti vengono ottenuti in funzione del rapporto di smorzamento del singolo elemento e delle frequenze  $\omega_1, \omega_2$  così definite:

- $\omega_1$ : frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega_2 = n * \omega_1$

Con  $n = \omega_i / \omega_1$  (approssimato all'interno pari più grande) e  $\omega_1$  frequenza di picco dello spettro in input.

### 3. Scelta dell'input sismico

Per quanto concerne l'input sismico si è fatto riferimento a quanto riportato nel “Rapporto tecnico sulla selezione di un insieme di 7 accelerogrammi compatibili con lo spettro di normativa (NTC08), da utilizzare come input per le simulazioni numeriche della microzonazione sismica di terzo livello (Ordinanza n. 24 del 12 maggio 2017)”. In particolare si è fatto riferimento agli accelerogrammi selezionati per il comune di Ortezzano.

L'input sismico è costituito da sette storie temporali in accelerazione orizzontale compatibili con il regime sismotettonico del sito e mediamente spettro-compatibili con lo spettro di risposta elastico prescritto dalla normativa sismica italiana NTC08, considerando un periodo di ritorno  $T_r = 475$  anni e un campo di periodi compreso tra 0,1 e 1,1 s.

In Figura 3.1 sono rappresentati i sette spettri di risposta elastici in accelerazione relativi ai sette accelerogrammi utilizzati come input. È inoltre rappresentato lo spettro medio dei sette, determinato attraverso media logaritmica.

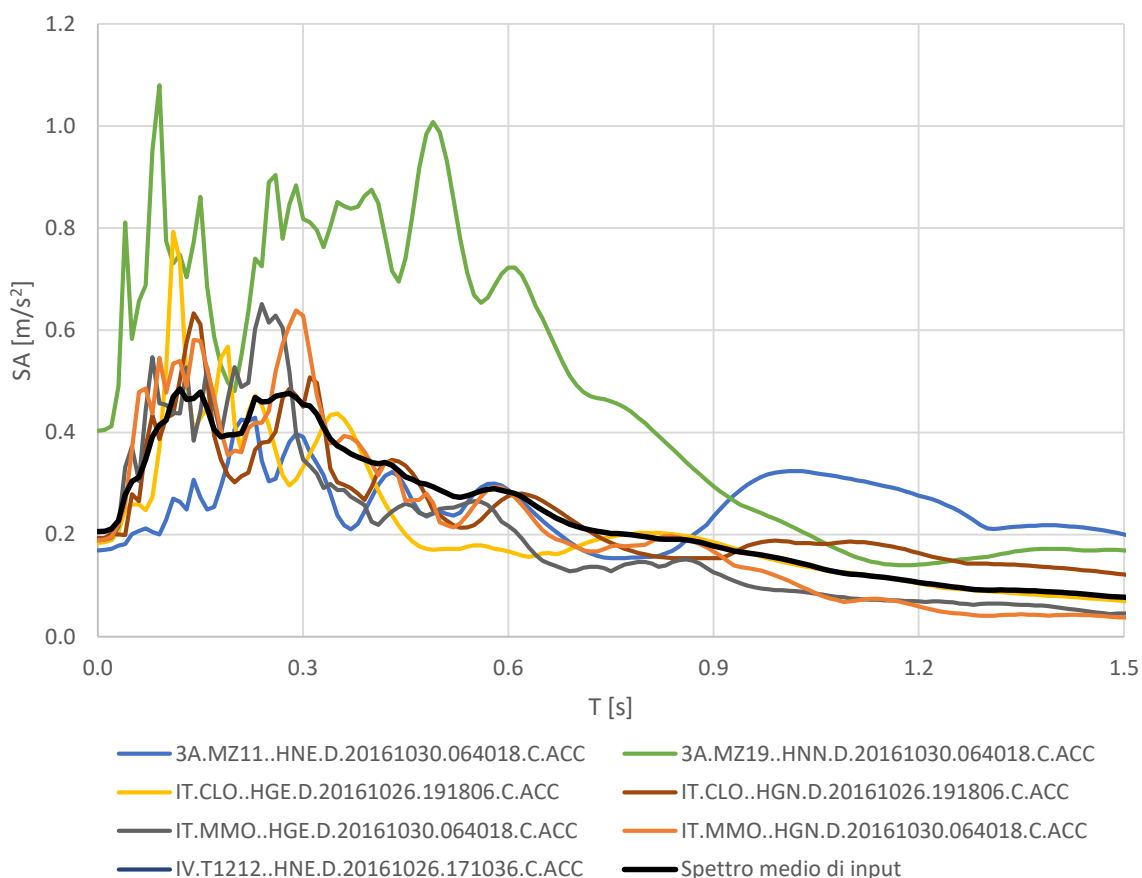


Figura 3.1 – Spettri di risposta dei setti accelerogrammi utilizzati come input sismico.

## 4. Modello di sottosuolo

Per la definizione del modello di sottosuolo da utilizzare nelle analisi di risposta sismica locale è stato fatto riferimento a quanto determinato dal professionista incaricato, nell'ambito del progetto "Studi di Microzonazione Sismica di III livello dei Comuni interessati dagli eventi sismici verificatisi a far data dal 24 agosto 2016 (OPCM n. 24 del 12 maggio 2017)".

La sezione oggetto di modellazione è quella indicata come sezione AA'. In assenza di informazioni specifiche riguardo la profondità del Bedrock sismico (non intercettato dalle indagini eseguite) è stato fatto riferimento a quanto emerso dalle analisi di calibrazione dei modelli monodimensionali eseguite dal professionista incaricato. In particolare si è fatto riferimento alle MOPS 2002 e 2003, per le quali i profili di velocità degli strati superficiali sono stati definite mediante la prova DH. Di conseguenza il Bedrock sismico è stato posto ad una profondità di circa 100 m per tali MOPS. La geometria modellata è riportata in Figura 4.1.

I differenti litotipi presenti, identificati nelle immagini, sono riportati in Tabella 1. Per ognuno di essi è indicato il codice, la descrizione litologica, i parametri meccanici e il modello di variazione del modulo di rigidità a taglio e del rapporto di smorzamento. A tal proposito, in assenza di dati sperimentali, si è fatto riferimento a curve di letteratura ben note e utilizzate dalla comunità scientifica. Le curve di laboratorio e di letteratura adottate sono riportate in Figura 4.2.

Si noti che per quanto concerne i depositi identificati come GM – tf, non potendo adeguatamente cogliere con un modello 2D gli effetti relativi alle lenti di sabbia presenti, si è preferito far riferimento ad un unico litotipo la cui velocità media delle onde di taglio e delle onde di compressione è stata definita come velocità equivalente degli strati intercettati dalla prova DH realizzata.

Per quanto riguarda invece la velocità del substrato argilloso (COS) si è fatto riferimento alle prove eseguite nel limitrofo comune di Monte Rinaldo.

*Tabella 1 – Modello di sottosuolo adottato per le analisi di risposta sismica locale.*

<b>COD.</b>	<b>LITOLOGIA</b>	<b>V<sub>s</sub> [m/s]</b>	<b><math>\nu</math> [-]</b>	<b><math>\gamma</math> [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Curve G/G<sub>0</sub> - D</b>
ML-ec	Limi argillosi	199	0.48	16	Vucetic and Dobry (1991) – IP=30
GM-tf	Ghiaia a matrice limoso/sabbiosa	377	0.46	20	Rollins et al. (1998) – Media
COS	Substrato coesivo sovraconsolidato	575	0.46	21.9	Prova di Laboratorio Monte Rinaldo
BED	Bedrock sismico	800	0.30	23	Lineare Elastico D = 0,5%



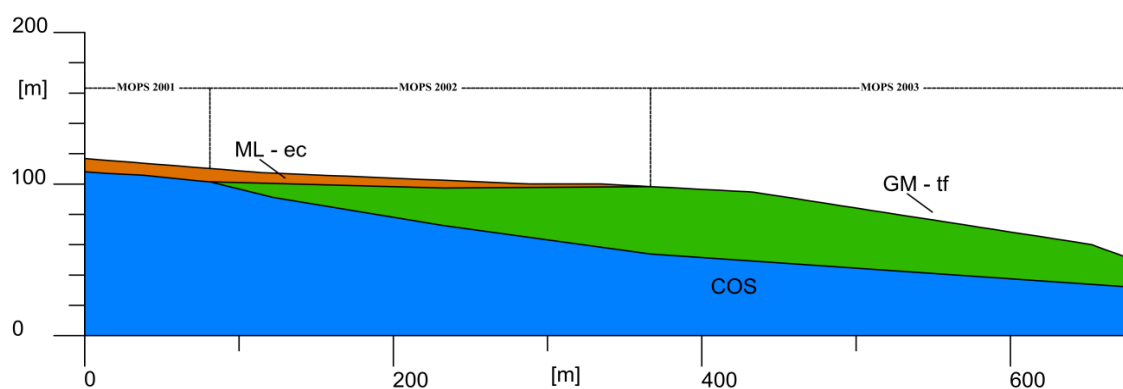


Figura 4.1 – Geometria della sezione AA'.

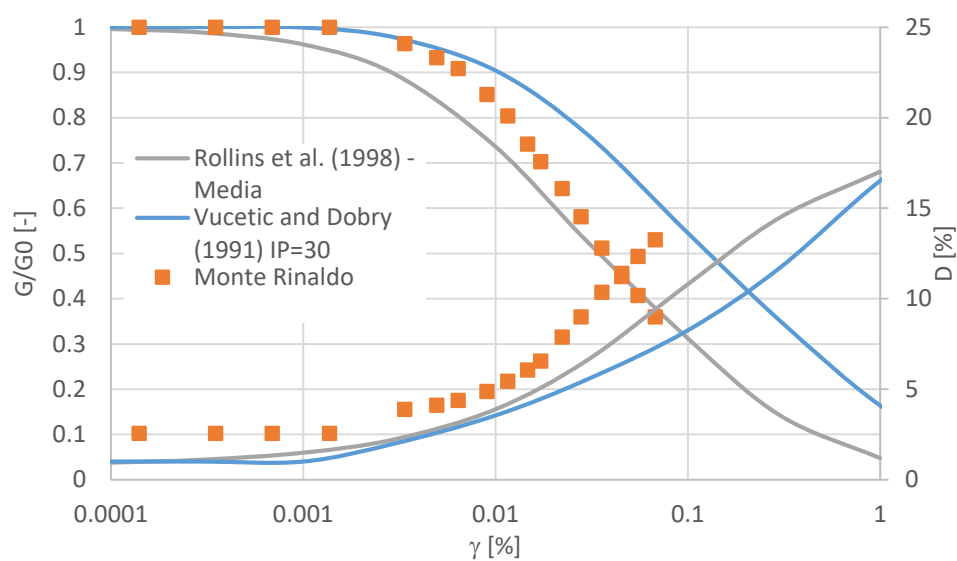


Figura 4.2 – Curve di variazione del modulo di rigidezza a taglio e del fattore di smorzamento.

## 5. Analisi di risposta sismica locale

### *Modello numerico*

Come precisato in precedenza, le analisi sono state eseguite con il codice di calcolo LSR\_2D (Stacec srl), agli elementi finiti, che consente di effettuare analisi lineari equivalenti mediante modelli bidimensionali.

Preliminarmente è stato definito il reticolo di elementi finiti di forma quadrangolare. Per realizzare un modello numerico adeguato a riprodurre la risposta sismica locale delle sezioni oggetto di studio, è stato necessario in primo luogo valutare la dimensione massima della mesh da assegnare ai diversi materiali identificati. Al fine di garantire l'accuratezza numerica, le dimensioni massime degli elementi sono state scelte in funzione della frequenza massima di interesse per la quale deve essere garantita la corretta condizione di trasmissione delle onde.

Facendo riferimento alla minima lunghezza d'onda d'interesse è stata quindi definita la dimensione massima degli elementi per ogni materiale modellato:

$$h_{max} = \frac{\lambda_{min}}{6} = \frac{V_s}{6 \cdot f_{max}} \quad (5)$$

dove:

- $f_{max}$ : massima frequenza di interesse, posta pari a **20 Hz**;
- $V_s$ : velocità di propagazione delle onde di taglio nel materiale.

In Figura 5.1 è riportata la mesh realizzata per la sezione oggetto di studio.

Per quanto concerne le condizioni al contorno del problema in esame, ai bordi è stato scelto di adottare vincoli riflettenti (carrelli orizzontali) e di allontanare le frontiere di 400 m, per garantire la dissipazione delle onde riflesse dai contorni. Tale decisione è emersa a seguito di uno studio preliminare di taratura del programma, che ha mostrato una buona corrispondenza tra i risultati delle analisi effettuate, in tali condizioni, con LSR\_2D e i risultati di analisi analoghe condotte con il noto codice QUAD4m (Hudson et al., 1994).

Alla base del modello viene invece applicato l'input in termini storia tensionale, come moto all'outcrop. La condizione di bedrock sismico assorbente viene modellata mediante l'applicazione di smorzatori viscosi sui nodi inferiori del modello. Tali smorzatori esprimono due componenti (una orizzontale ed una verticale) di forza proporzionali alla velocità. Le costanti di smorzamento sono state definite in funzione della densità e della velocità di propagazione delle onde S e P del substrato.

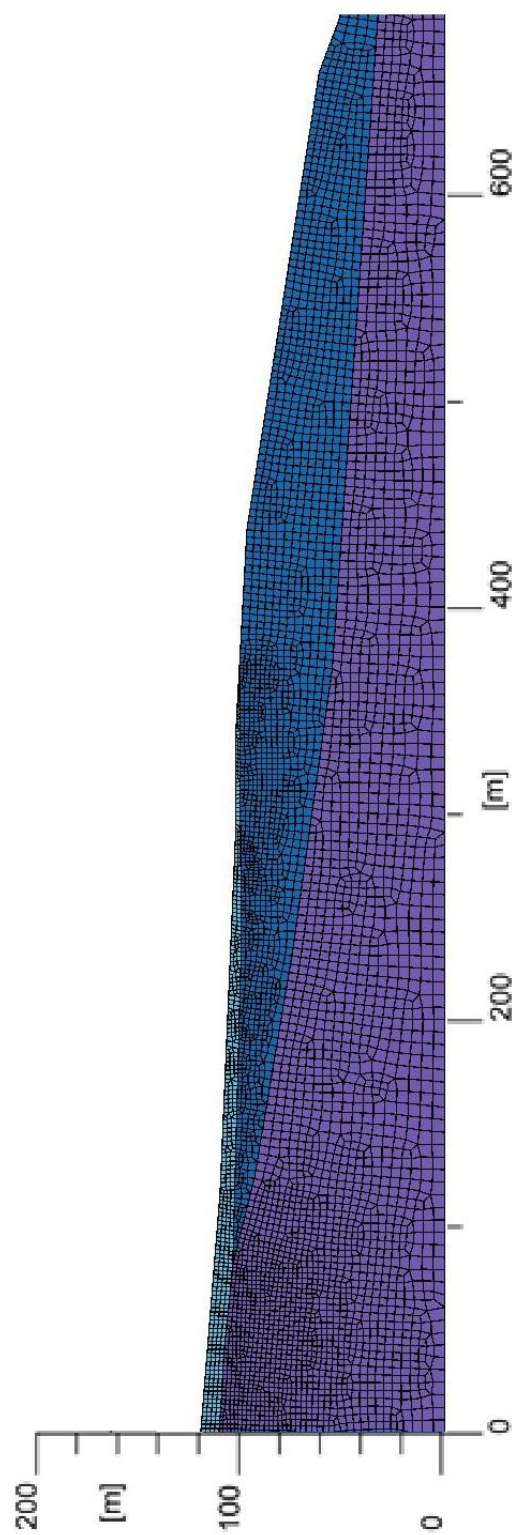


Figura 5.1 – Dettaglio della mesh, Sezione AA’.

## Risultati delle analisi

Per la sezione oggetto di studio sono state condotte sette analisi differenti, corrispondenti ai sette accelerogrammi selezionati. Per ogni analisi condotta sono quindi state determinate le deformazioni massime a convergenza, caratteristiche di ogni elemento, e i corrispondenti parametri equivalenti, in termini di decadimento del modulo di rigidezza a taglio e fattore di smorzamento.

I risultati delle analisi consistono quindi in sette accelerogrammi e i corrispondenti sette spettri di risposta in superficie, per ogni nodo della mesh definito come punto di controllo. In particolare è stato scelto un passo dei punti di controllo di 10 m, al fine di ottenere una buona discretizzazione dei risultati in superficie.

L'elaborazione dei risultati è stata effettuata come indicato nei *“Protocolli di acquisizione dati ed elaborazione relativi alle attività di Microzonazione di Livello III nei 140 Comuni di cui all'Ordinanza n. 24 del 12 maggio 2017 della Presidenza del Consiglio dei Ministri”*.

Per ogni punto e per ogni accelerogramma sono quindi stati determinati i Fattori di Amplificazione (FA) relativi ai tre campi di periodi oggetto di studio (0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s), secondo le seguenti relazioni:

$$FA_{T_a-T_b} = \frac{O_{T_a-T_b}}{I_{T_a-T_b}} \quad (6)$$

$$I_{T_a-T_b} = \frac{1}{T_a - T_b} \cdot \int_{T_b}^{T_a} PSA_i(T) dT \quad (7)$$

$$O_{T_a-T_b} = \frac{1}{T_a - T_b} \cdot \int_{T_b}^{T_a} PSA_o(T) dT \quad (8)$$

I FA medi relativi ad ogni punto sono poi stati ottenuti mediante media logaritmica dei sette FA relativi ad ogni accelerogramma. In Figura 5.2 sono rappresentati i risultati per le sezioni oggetto di studio.

I valori numerici ottenuti sono riportati nei fogli di calcolo allegati alla presente relazione.

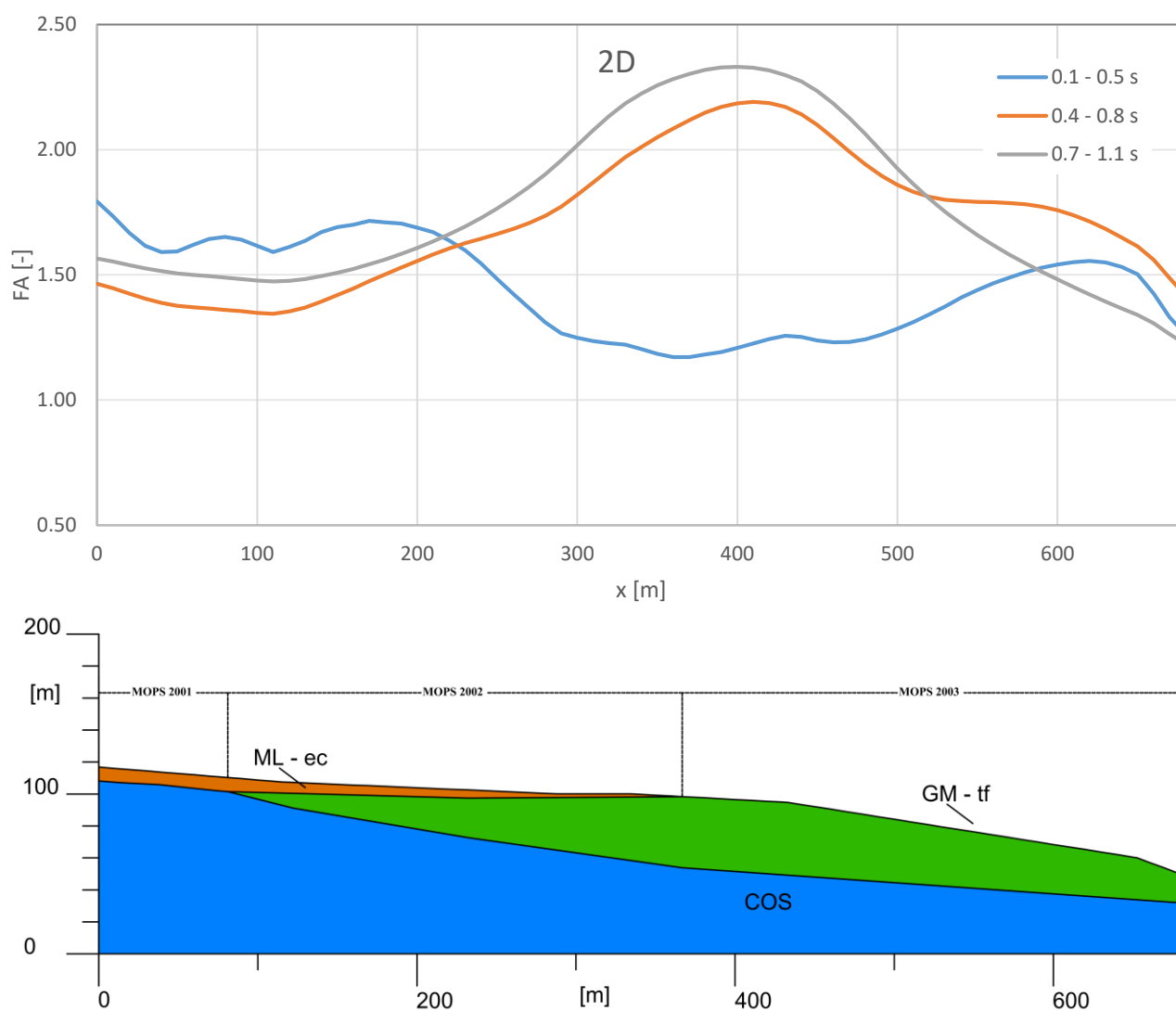


Figura 5.2 – Fattori di amplificazione medi delle sette analisi di risposta sismica locale, passo 10 m – Sezione AA'.

### *Confronti analisi 1D/2D*

Al fine di evidenziare gli effetti di amplificazione bidimensionale e di validare i risultati delle analisi 2D sono state effettuate delle analisi di risposta sismica locale 1D mediante il software Deepsoil 6.1 (Hashash et al., 2016). Sono quindi stati realizzati dei modelli monodimensionali il cui profilo stratigrafico è stato ricostruito mediante le sezioni, adottando un passo di discretizzazione di 50 m.

Per ognuno dei modelli sono quindi stati calcolati i FA medi sui sette input e i risultati sono stati confrontati con quelli delle analisi 2D. In Figura 5.3 è riportato il confronto tra i fattori di amplificazione medi ottenuti per le analisi monodimensionali e bidimensionali, per le sezioni oggetto di studio. Nel range di periodi di maggior interesse (0.1 - 0.5 s), le analisi bidimensionali risultano sempre più gravose, poichè in grado di cogliere fenomeni bidimensionali non modellabili da analisi monodimensionali.

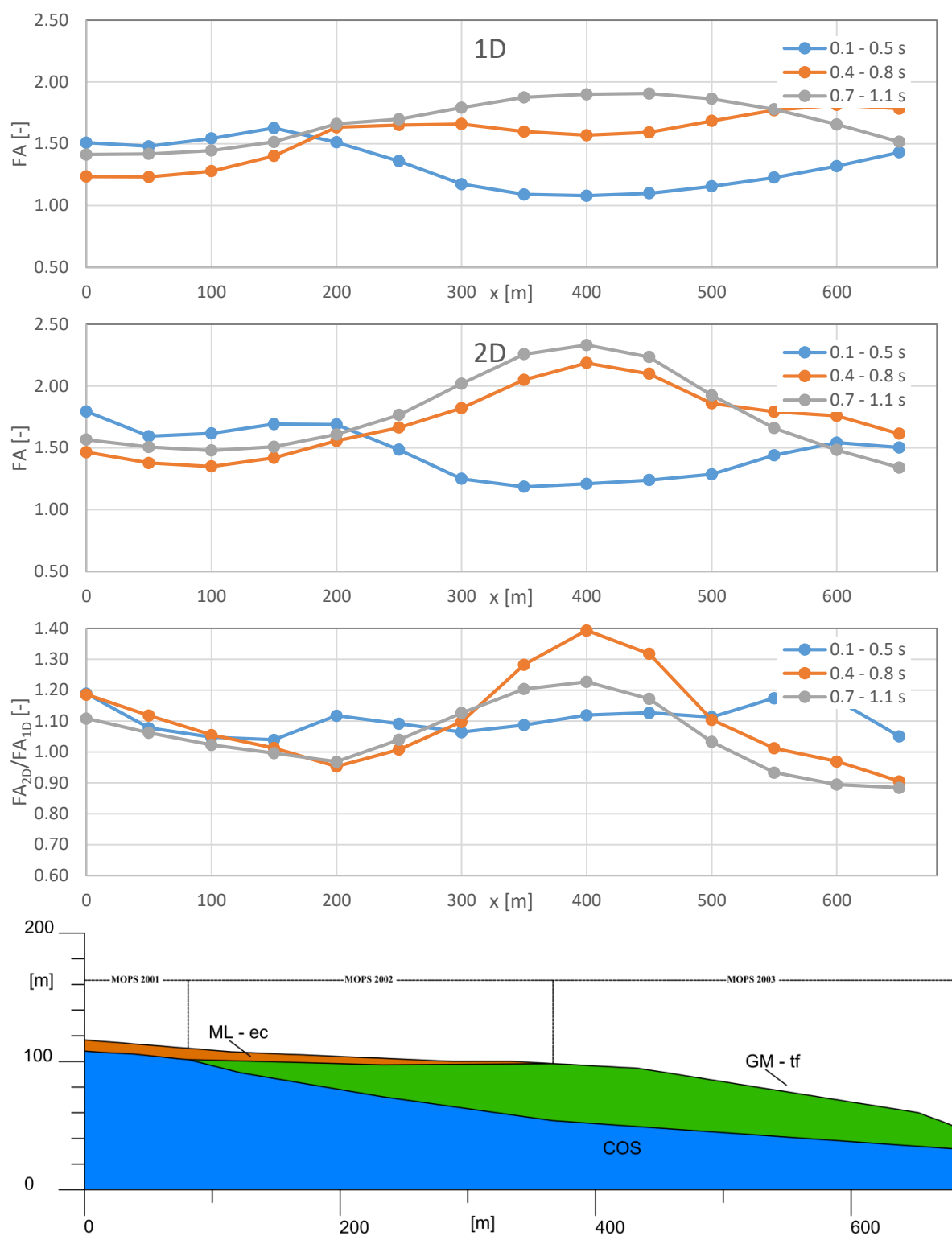


Figura 5.3 – Fattori di amplificazione medi delle analisi a) monodimensionali e b) bidimensionali; c) rapporto tra i fattori di amplificazione 2D e 1D; passo 50 m – Sezione AA’.

### *Fattori di amplificazione*

Nel presente paragrafo vengono proposti i fattori di amplificazione e i relativi spettri di risposta da assegnare ad ogni MOPS individuata, alla luce dei risultati ottenuti dalle analisi di risposta sismica locale. Le MOPS intercettate dalla sezione sono quelle identificate nello studio di Microzonazione di III livello come 2001, 2002 e 2003.

La procedura adottata per definire i FA consiste nel selezionare, come rappresentativo dell'intera MOPS, il punto caratterizzato da FA massimo nel campo di periodi 0.1-0.5s. Di conseguenza, per i valori di FA della microzona nei restanti intervalli di periodo, i risultati da selezionare sono quelli associati alla simulazione che ha generato la banda di periodo 0.1-0.5s, così come gli accelerogrammi di output e gli spettri di risposta.

In Tabella 2 sono riportati i Fattori di Amplificazione ottenuti per le differenti MOPS e le progressive che ne identificano il perimetro. In Figura 5.4 e Figura 5.5 è rappresentata la sovrapposizione tra i FA proposti e quelli ottenuti dalle analisi 2D e 1D.

Per ogni MOPS nel foglio di calcolo allegato sono riportati: i FA medi ottenuti; i sette spettri di risposta elastici; i sette accelerogrammi; lo spettro medio di output.

*Tabella 2 – Fattori di amplificazione proposti per le MOPS – Sezione AA'.*

	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>
<b>xi [m]</b>	0	80	360
<b>xf [m]</b>	80	360	680
<b>FA<sub>0.1-0.5s</sub></b>	1.79	1.72	1.56
<b>FA<sub>0.4-0.8s</sub></b>	1.46	1.48	1.71
<b>FA<sub>0.7-1.1s</sub></b>	1.57	1.54	1.42



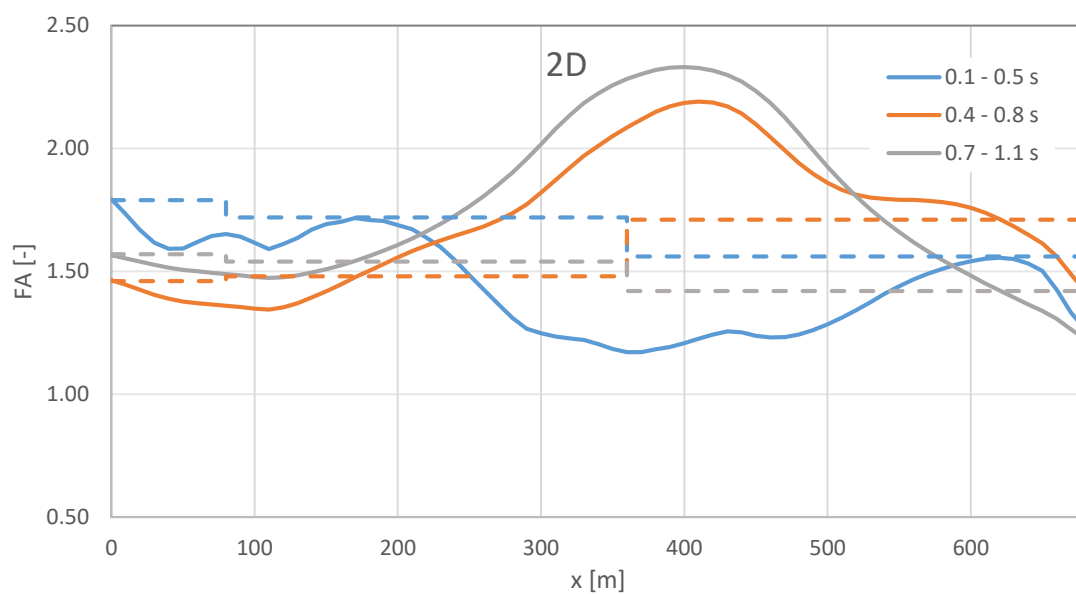


Figura 5.4 – Sovrapposizione tra i FA proposti e quelli ottenuti dalle analisi 2D – Sezione AA'.

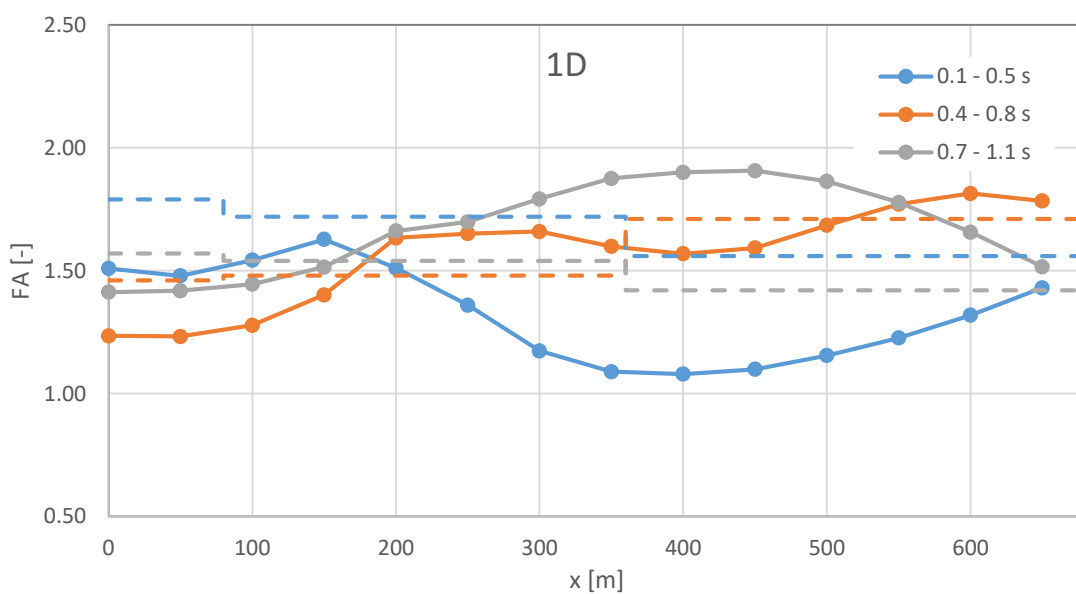


Figura 5.5 – Sovrapposizione tra i FA proposti e quelli ottenuti dalle analisi 1D – Sezione AA'.

## 6. Bibliografia

- [1.] Hashash, Y., Musgrove, M., Harmon, J., Groholski, D., Phillips, C., & Park, D. (2016). DEEPSOIL 6.1, User Manual. Urbana, IL: Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [2.] Hudson, M., Idriss, I., & Beikae, M. (1994). User's Manual for QUAD4M. *Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis, California, May.*
- [3.] Idriss, I., & Sun, J. I. (1992). SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. *Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA.*
- [4.] NTC08, N. T. p. I. C. (2008). Italian Building Code. *Ministry of Infrastructures and Transportations (in Italian).*
- [5.] Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B., & III, W. D. D. (1998). Shear modulus and damping relationships for gravels. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(5), 396-405.
- [6.] Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of geotechnical engineering*, 117(1), 89-107.