

SOMMARIO

0. PREMESSA	2
1. IL QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO	2
2. OBIETTIVI DELLO STUDIO	2
3. BASE CARTOGRAFICA DI RIFERIMENTO	3
3. GLI ELABORATI	3
3.1 Elaborati cartografici	3
3.2. Modellazioni sismiche (RSL 2D)	3
4. INDIVIDUAZIONE E PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI STUDIO	3
5. METODOLOGIA DI LAVORO	4
5.1 La carta geologico-tecnica.....	4
5.2 La carta delle M.O.P.S.	5
5.3 Le carte dei fattori di amplificazione FA (MS2 e MS3).....	6
5.3.1 MS di livello 2	6
5.3.2 MS di livello 3	7
6. VERIFICHE DI STABILITÀ DEI DEPOSITI DI FRANA.....	7

agosto 2023

IL GEOLOGO
dott. Renzo FALASCHI
*Iscritto al n. 1267
dell'Ordine della Regione Toscana*

N.B.: Tutti i diritti di riproduzione e di memorizzazione elettronica sono riservati. Nessuna parte di questa relazione può essere riprodotta in alcuna forma, comprese le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Autore.

0. PREMESSA

Per incarico ricevuto dalle Amministrazioni Comunali di Badia Tedalda, in collaborazione con l'Ufficio Prevenzione Sismica-Settore Sismica della Regione Toscana, è stato redatto il presente **Studio di Microzonazione Sismica di 2. e 3. livello.**

Lo studio viene realizzato limitatamente alle aree urbane già oggetto della **precedente Microzonazione Sismica di 1. livello** a firma Geol. Gianni Amantini (2012), dalla quale è stata recepita sia l'impostazione generale relativa alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e geologico-tecniche sia quella inerente la suddivisione in Microzone Omogenee; tutti i dati sono stati aggiornati ai contenuti dello studio geologico, geomorfologico e sismico di supporto al nuovo Piano Strutturale Intercomunale di Badia Tedalda e Sestino (2023).

Vista la limitata estensione delle aree esaminate per lo studio ed essendo il quadro conoscitivo della MS1 già ampiamente rappresentativo, si è ritenuto sufficiente integrare le conoscenze pregresse con un numero limitato di nuove indagini geognostiche (HVSR).

Pertanto, per quanto riguarda i report delle indagini si rimanda alla relazione di supporto allo studio di MS1.

1. IL QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

Le indagini geologiche e sismiche sono state redatte in conformità alla seguente normativa di riferimento:

- ◇ **Indirizzi e criteri di Microzonazione Sismica** – Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica - Versione 4.2 del dicembre 2020;
- ◇ **Istruzioni Tecniche per le indagini Geologico-Tecniche, Geofisiche, Geognostiche e Geotecniche, statiche e dinamiche, finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana** - Programma VEL Toscana – Del. GRT. N.1343 del 18 dicembre 2000 e s.m.i.;
- ◇ **Specifiche Tecniche Regionali per l'elaborazione di Indagini e Studi di Microzonazione Sismica** – aggiornamento del 08 Settembre 2021.

2. OBIETTIVI DELLO STUDIO

Come noto gli studi di Microzonazione Sismica hanno l'obiettivo di razionalizzare la conoscenza sulle alterazioni che lo scuotimento sismico può subire in superficie, restituendo informazioni utili sia per la pianificazione urbanistica sia per le progettazioni edilizie.

Conseguentemente gli studi di Microzonazione Sismica vengono redatti prevalentemente sui centri abitati e sulle aree all'interno delle quali la pianificazione consente la realizzazione di fabbricati, opere e infrastrutture, con particolare riguardo per quelle strategiche e/o con funzioni di protezione civile.

Lo studio di Microzonazione Sismica si differenzia in funzione del livello di approfondimento prefissato:

- **il livello 1** è di fatto uno studio propedeutico a quelli di 2. e 3. livello, in quanto consiste principalmente in una raccolta di dati pregressi che vengono poi elaborati in modo tale da suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee (MOPS);
- **il livello 2** associa l'elemento deterministico a quello principalmente qualitativo del livello 1., usufruendo di ulteriori e mirate indagini geognostiche che consentono di stilare delle mappe cartografiche che evidenziano le aree con i vari fattori di amplificazione desunti sulla base di appositi abachi.
- **il livello 3** restituisce delle cartografie che includono le aree a diverso grado del fattore di amplificazione FA, desunte da specifiche ed approfondite analisi di risposta sismica locale (RSL 1D e/o 2D).

Il lavoro di MS di Livello 2. e 3. del Comune di Badia Tedalda è stato svolto in più fasi tra loro strettamente connesse.

Prioritaria è stata la verifica e quando necessario la rielaborazione e l'affinamento dei dati pregressi, sia di tipo geognostico sia geologico-geomorfologico, peraltro sa molto rappresentativi.

Successivamente sono stati acquisiti ed elaborati tutti i dati inerenti lo studio geologico, geomorfologico e sismico del nuovo PSC intercomunale, quali rilevamenti di dettaglio, analisi fotogeologiche multitemporali, indagini geognostiche consultabili ma non pubblicabili (progettazioni private).

Questa moltitudine di dati ha poi permesso di entrare negli **abachi regionali** per la definizione dei vari fattori di amplificazione FA (2. livello di approfondimento) e di redigere delle dettagliate sezioni geotecniche e successivamente sismostratigrafiche da sottoporre a RSL 2D (3. Livello di approfondimento).

3. BASE CARTOGRAFICA DI RIFERIMENTO

Per la rappresentazione cartografica dei vari tematismi analizzati, si è scelto di utilizzare la Carta Tecnica Regionale alla scala di 1:10000, in ogni caso l'unica disponibile per tutte le aree interessate dagli studi di microzonazione sismica.

Al fine di evidenziare con la massima risoluzione possibile le caratteristiche geo-morfologiche del territorio studiato, è stato effettuato un ingrandimento fotostatico del 200% della sopraindicata C.T.R. che è stata quindi restituita alla scala di 1:5000.

3. GLI ELABORATI

3.1 Elaborati cartografici

Gli elaborati cartografici prodotti sono i seguenti:

- Elementi per la valutazione degli effetti sismici locali (MS di livello 2 e 3)
 - Carta delle indagini scala di 1:5000
 - Carta geologico-tecnica scala di 1:5000
 - Sezioni Geologico-Tecniche scala di 1:2000
 - Carta delle frequenze fondamentali dei depositi scala di 1:5000
 - Carta delle MOPS scala di 1:5000
 - Carta dei fattori di amplificazione FA (0.1-0.5 s = 2. e 3 livello) scala di 1:5000
 - Carta dei fattori di amplificazione FA (0.4-0.8 s = 2. e 3 livello) scala di 1:5000
 - Carta dei fattori di amplificazione FA (0.7-1.1 s = 2. e 3 livello) scala di 1:5000

3.2. Modellazioni sismiche (RSL 2D)

- Analisi di Risposta Sismica Locale (MS di livello 3)

Le analisi di Risposta Sismica Locale 1D e 2D, inerenti il 3. livello di approfondimento, eseguite unicamente all'interno del capoluogo di Badia Tedalda, sono integralmente riportate nella relazione in calce alla presente a firma Dr. Geol. Vittorio d'Intinosante (Ufficio Prevenzione Sismica - Servizio Sismica Regione Toscana).

4. INDIVIDUAZIONE E PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI STUDIO

Le seguenti aree di studio sono state definite in conformità alle perimetrazioni della Microzonazione Sismica di I livello, così come fornite dal Servizio Sismico della Regione Toscana.

MS3	MS2
Capoluogo di Badia Tedalda	Loc. Pratieghi
	Loc. Caprile
	Loc. Fresciano
	Loc. Rofelle
	Loc. Ca' Raffaello

5. METODOLOGIA DI LAVORO

Lo studio è stato quindi sviluppato con le seguenti modalità:

- ◇ Aggiornamento e perfezionamento delle perimetrazioni relative ai depositi di versante e di frana già individuati nello studio di MS1;
- ◇ Aggiornamento della Carte Geologica di MS1 (2012) e stesura della Carta Geologico-Tecnica con elaborazione delle Sezioni Geologico-Tecniche;
- ◇ Esecuzione di nuove indagini HVSR limitatamente alle aree nelle quali i dati pregressi non permettevano di rappresentare esaurientemente il contesto;
- ◇ Aggiornamento delle carte delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) già redatte per lo studio di MS1 (2012);
- ◇ Redazione delle Cartografie di Microzonazione Sismica di livello 2 per i territori urbani delle frazioni elencati nella tabella sopraindicata utilizzando gli abachi regionali;
- ◇ Analisi di risposta sismica locale 1D e 2D per la redazione della carta di MS3 del capoluogo di Badia Tedalda. Le RSL 2D/1D sono state eseguite dal dott. Vittorio D'Intinosante dell'Ufficio Regionale di Prevenzione Sismica - Settore Sismica.
- ◇ Stesura delle Carte dei Fattori di Amplificazione FA (2. e 3. Livello di approfondimento).

5.1 La carta geologico-tecnica

Partendo dai dati della carta geologica e geomorfologica, i depositi, le frane e le formazioni marine sono stati rianalizzati, principalmente sulla base della tessitura-granulometria dei depositi e litologia degli ammassi rocciosi, e nuovamente cartografati in conformità alla legenda degli ICMS.

Le associazioni effettuate sono le seguenti:

TERRENI DI COPERTURA

RI – terreni contenenti resti di attività antropica (Rientrano in questa classe):

- i terreni di riporto (h1).

CL – argille organiche di medio-bassa plasticità (Rientrano in questa classe):

- i depositi eluvio-colluviali (b2).

OH – argille organiche di media-alta plasticità (Rientrano in questa classe):

- i depositi fluvio-lacustri (b4).

GM – ghiaie limose, miscela di ghiaia sabbia e limo (Rientrano in questa classe):

- i depositi di versante (b1).

GW – ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaia e sabbia (Rie. in questa classe):

- i depositi alluvionali (b3).

SUBSTRATO GEOLOGICO

ALS – alternanza di litotipi, stratificato (Rientrano in questa classe):

- Monte Morello (MLL); Marnoso Arenacea pelitica (FMAb); Marne di San Paolo (SPL); Marne di Vicchio (VIC); Marne Varicolori di Villore (MVV).

LPS – lapideo, stratificato (Rientrano in questa classe):

- Marnoso Arenacea arenaceo-pelitica (FMAa); Arenarie del Monte Falterona (FAL).

SFALS – alternanza di litotipi, stratificato fratturato/alterato (Rientrano in questa classe):

- Sillano (SIL); Argille Varicolori (AVR); Brecce Poligeniche (BAP).

INSTABILITÀ DI VERSANTE

FRANA COMPLESSA – attiva, quiescente e inattiva

FRANA PER SCORRIMENTO – attiva e quiescente

FRANA PER COLAMENTO – attiva e quiescente

5.2 La carta delle M.O.P.S.

Come detto, il Comune di Badia Tedalda era già dotato dello Studio di MS1 eseguito secondo gli indirizzi e criteri vigenti nell'anno 2012.

Il nuovo studio ha permesso di ottenere un livello qualitativo superiore, in particolare per quanto riguarda la perimetrazione e la parametrizzazione geomorfologica e geologico-tecnica dei depositi di versante e di frana.

Sono state conseguentemente aggiornate le carte delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, all'interno delle quali figurano:

- ◇ n. 12 microzone inerenti le "Zone Stabili Suscettibili di Amplificazioni Locali";
- ◇ n. 4 microzone relative alle "Zone di Attenzione per Instabilità".

Per quanto riguarda l'assenza di Zone Stabili si chiarisce quanto segue.

Nel territorio studiato sono presenti varie formazioni del substrato geologico marino che nella sopraindicata carta geologico-tecnica sono state identificate come:

- ◇ ALS – alternanza di litotipi, stratificato
- ◇ LPS – lapideo, stratificato
- ◇ SFALS – alternanza di litotipi, stratificato fratturato/alterato

Per quanto riguarda le formazioni ricadenti nei gruppi ALS e LPS, i dati derivanti dalle numerose indagini geofisiche disponibili consentono di valutare che le velocità delle onde secondarie (Vs) possono essere sia maggiori sia minori di 800 m/s.

Tali formazioni geologiche NON possono quindi essere valutate incondizionatamente stabili.

Questa condizione è convalidata dalle numerose misure HVSR che mostrato, talora, massimi significativi (picchi) a basse frequenze, pertanto riconducibili ad impedenze e relative amplificazioni collocabili internamente al substrato geologico marino.

Invece, per quanto riguarda le formazioni ricadenti nel gruppo SFALS, i dati geofisici consentono di valutare che le velocità delle onde secondarie (Vs) sono sempre minori di 800 m/s; quindi stabili ma suscettibili di amplificazioni locali.

Nella carta delle MOPS sono riportati anche i punti di misurazione dei microtremori (HVSR).

Le microzone discretizzate quelle riportate nella tabella a lato.

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

2001	Zona 1
2002	Zona 2
2003	Zona 3
2004	Zona 4
2005	Zona 5
2006	Zona 6
2007	Zona 7
2008	Zona 8
2009	Zona 9
2010	Zona 10
2011	Zona 11
2012	Zona 12
2013	Zona 13
2014	Zona 14
2099	Substrato fratturato alterato

Zone di attenzione per instabilità


	Zona 1
	Zona 2
	Zona 11
	Zona 99


5.3 Le carte dei fattori di amplificazione FA (MS2 e MS3)

In accordo con l'ufficio di prevenzione sismica del settore sismica della Regione Toscana, per quanto le condizioni delle aree non siano talvolta del tutto omogenee, è stato deciso di procedere con l'utilizzo degli "abachi regionali", quindi con la **MS di livello 2 per le frazioni**, e di procedere con l'analisi di risposta sismica locale bidimensionale, quindi con la **MS di livello 3, per il capoluogo di Badia Tedalda**.

5.3.1 MS di livello 2

Per la realizzazione degli studi di **MS di livello 2** sono stati utilizzati i seguenti abachi regionali indicati nelle specifiche tecniche regionali di cui all'o.d.p.c.m. 3907/2010 e di cui alla deliberazione della Giunta regionale 144/2015.





Toscana Appenninica (Substrato sismico $\leq 30\text{m}$)

Valore di a_g ($T_r=475$ anni) $\geq 0.15g$

FA $0.1 < T < 0.5\text{ s}$

FA $0.4 < T < 0.8\text{ s}$

		f0 (Hz)										75° perc.
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥ 8		
(s/m) ppa	<200	0.8	1.3	1.9	2.2	2.1	2.0	1.8	1.8	1.4	1.8	
	300	0.6	1.3	1.9	2.0	2.0	1.8	1.7	1.6	1.4	1.9	
	500		1.0	1.9	1.8	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.7	
	700				1.8	1.4	1.5	1.5	1.5	1.3	1.4	
	≥ 800									1.2	1.2	

		f0 (Hz)										75° perc.
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥ 8		
(s/m) ppa	<200	1.2	2.1	2.2	1.9	1.4	1.2	1.2	1.1	1.0	1.7	
	300	1.0	2.2	2.1	1.7	1.4	1.2	1.2	1.1	1.1	1.8	
	500		2.0	1.9	1.6	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.3	
	700				1.5	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	
	≥ 800									1.0	1.0	

FA $0.7 < T < 1.1\text{ s}$


CLASSI

		f0 (Hz)										75° perc.
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥ 8		
(s/m) ppa	<200	1.9	2.3	1.6	1.3	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.3	
	300	1.8	2.2	1.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.3	
	500		2.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	
	700				1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	
	≥ 800									1.0	1.0	

Velocità (m/s)	Vs
<200	Vs < 200
300	200 \leq Vs < 400
500	400 \leq Vs < 600
700	600 \leq Vs < 800
≥ 800	Vs ≥ 800

f0 (Hz)	f0 < 1
1.5	1 \leq f0 < 2
2.5	2 \leq f0 < 3
3.5	3 \leq f0 < 4
4.5	4 \leq f0 < 5
5.5	5 \leq f0 < 6
6.5	6 \leq f0 < 7
7.5	7 \leq f0 < 8
≥ 8	≥ 8

UNIVERSITÄT SUDT
DSFTA
1863XXXX



Toscana Appenninica (Substrato sismico > 30m)

Valore di a_g ($T_r=475$ anni) $\geq 0.15g$

FA $0.1 < T < 0.5$ s

		f0 (Hz)										75° perc.
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥8		
(s/m) DSFA	<200	0.7	1.0								0.8	
	300	1.1	1.5	1.9	2.1	2.1	1.8	2.0	2.0	2.2	1.6	
	500	1.2	1.4	1.8	1.9	1.8	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	
	700	1.2	1.2	1.6	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	
	≥800	1.1	1.2		1.5	1.3	1.3			1.4	1.4	

FA $0.4 < T < 0.8$ s

		f0 (Hz)										75° perc.
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥8		
(s/m) DSFA	<200	1.1	1.4								1.2	
	300	1.4	2.1	2.2	2.1	2.2	2.0	2.1	2.1	1.8	2.1	
	500	1.3	1.9	2.0	1.7	1.6	1.8	1.7	1.7	1.6	1.8	
	700	1.2	1.5	1.7	1.5	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	
	≥800	1.3	1.5		1.4	1.1	1.1			1.3	1.4	

FA $0.7 < T < 1.1$ s

		f0 (Hz)										75° perc.
		<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	≥8		
(s/m) DSFA	<200	1.4	2.6								1.4	
	300	1.6	2.3	1.7	1.9	1.8	1.7	1.5	1.9	1.9	2.1	
	500	1.4	2.0	1.5	1.3	1.5	1.6	1.3	1.3	1.3	1.7	
	700	1.3	1.7	1.3	1.2	1.1	1.1	1.3	1.2	1.2	1.3	
	≥800	1.6	2.2		1.1	1.0	1.0			1.2	1.3	

CLASSI

Velocità (m/s)	Vs < 200	
	300	200 ≤ Vs < 400
	500	400 ≤ Vs < 600
	700	600 ≤ Vs < 800
	Vs ≥ 800	

(Hz) ezueobef	f0 < 1	
	1.5	1 ≤ f0 < 2
	2.5	2 ≤ f0 < 3
	3.5	3 ≤ f0 < 4
	4.5	4 ≤ f0 < 5
	5.5	5 ≤ f0 < 6
	6.5	6 ≤ f0 < 7
	7.5	7 ≤ f0 < 8
	≥ 8	

L'utilizzo degli abachi è stato preceduto da una rivalutazione qualitativa delle curve HVSR.

Sono state scartate e quindi NON utilizzate quelle per le quali i Criteri SESAME (2004) non risultavano completamente verificati e anche quelle non risultanti di "classe A tipo1 e tipo2 e classe B tipo1" (Albarelli et alii, 2011).

Sono inoltre state utilizzate, ma con cautela, le curve che presentavano plateau in ampi intervalli di frequenza e massimi coalescenti.

Nelle carte del fattore di amplificazione derivanti dal livello 2 di MS, sono state perimetrare anche le aree potenzialmente interessate da amplificazione topografica in quanto caratterizzate da pendenze $\alpha > 15^\circ$.

Per queste aree si stima un **fattore di amplificazione topografica $FT=1.20$** .

Si precisa, inoltre, che i massimi a bassa frequenza ($f_0 \approx 2$) sono stati valutati intraformazionali e che, in presenza dei depositi di frana sovrastanti, **il fattore FA da tabella è stato cautelativamente e convenzionalmente incrementato di 0.2.**

5.3.2 MS di livello 3

Come già menzionato per il capoluogo di Badia Tedalda sono state eseguite nuove analisi di RSL 1D/2D.

Conseguentemente sono state redatte un numero sufficientemente rappresentativo di sezioni sismostratigrafiche.

Le modellazioni numeriche sono state effettuate dal dott. Vittorio D'Intinosante del settore sismica della Regione Toscana.

Le analisi di RSL sono state relazionate in un elaborato che costituisce parte integrante del presente studio e al quale si rimanda per tutti gli approfondimenti.

6. VERIFICHE DI STABILITÀ DEI DEPOSITI DI FRANA

In relazione alle verifiche di stabilità dei depositi di frana, considerata la carenza di dati geotecnici puntuali attendibili per spessori significativi in grado di consentire l'esecuzione di analisi di stabilità e l'ottenimento di risultati affidabili, in accordo con l'Ufficio Prevenzione Sismica della Regione Toscana, alle frane attive e quiescenti presenti nell'area di studio, **è stato associato il valore di spostamento (FRT) pari a 15cm**, desunto da specifiche analisi dinamiche eseguite in contesti vicini e similari sotto il profilo geologico e geomorfologico.

agosto 2023

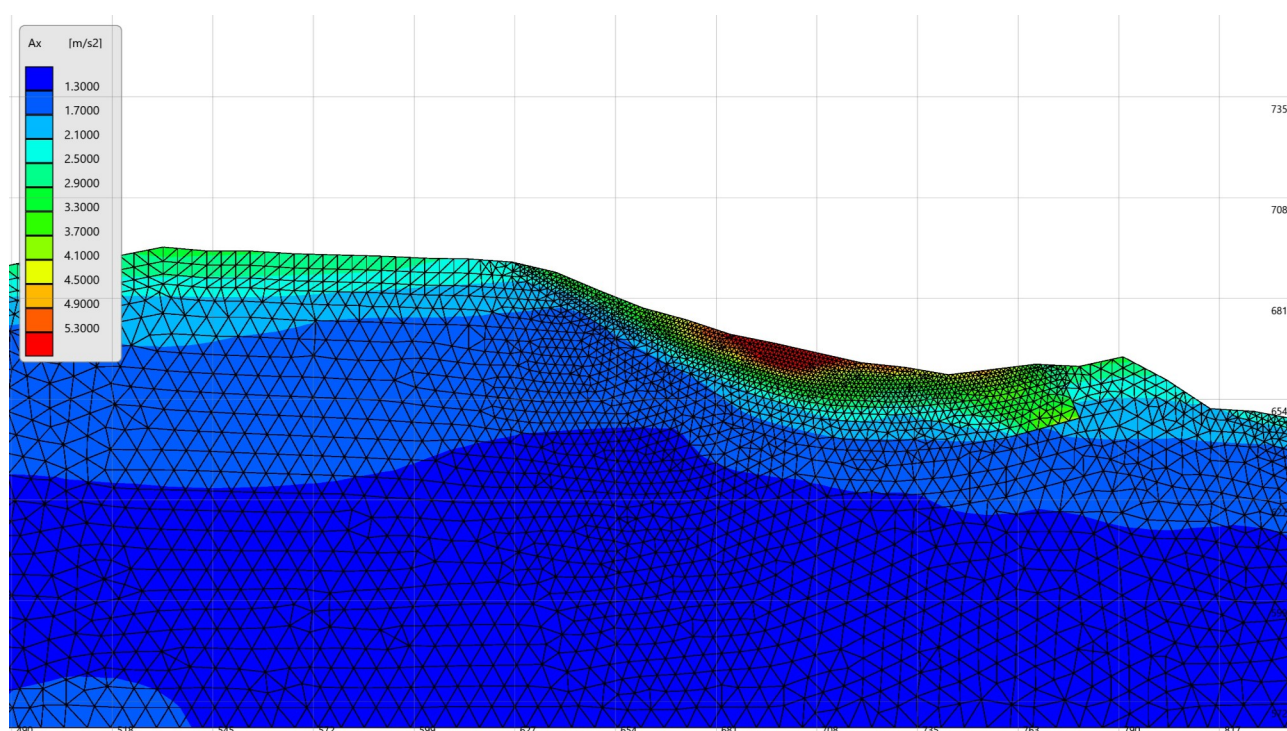
IL GEOLOGO
dott. Renzo FALASCHI
Iscritto al n.1267
dell'Ordine della Regione Toscana

La presente relazione è composta da n. 7 pagine più allegati.

N.B.: Tutti i diritti di riproduzione e di memorizzazione elettronica sono riservati. Nessuna parte di questa relazione può essere riprodotta in alcuna forma, comprese le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Autore.



ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE 2D PER LA REDAZIONE DELLA CARTA DI MS3 NEL CENTRO ABITATO DI BADIA TEDALDA (AR)



A CURA DI VITTORIO D'INTINOSANTE

UFFICIO PREVENZIONE SISMICA, SETTORE SISMICA – REGIONE TOSCANA

(FEBBRAIO 2023)



INDICE

1) Introduzione	pag. 3
2) Selezione delle storie temporali di input	pag. 4
3) Definizione del modello geologico-tecnico	pag. 8
4) Risultati delle analisi di Risposta Sismica Locale.....	pag. 12
5) Spettri medi e redazione della carta di MS3.....	pag. 18
6) Indicazioni per la fase progettuale	pag. 22
7) Conclusioni	pag. 28



1) INTRODUZIONE

La Microzonazione Sismica (di seguito MS) permette di simulare l'accadimento di un evento sismico compatibile con la pericolosità sismica di un determinato sito, valutandone i principali effetti tra cui le modificazioni apportate allo scuotimento del suolo dalle condizioni geologico-tecniche locali e dalle condizioni topografiche locali (valutazione degli effetti locali).

Tali valutazioni possono essere effettuate mediante diversi livelli di approfondimento: dalle analisi di I Livello basate su un approccio qualitativo, fino allo studio parametrico rigoroso, proprio del III Livello.

Uno studio di microzonazione sismica di III Livello (di seguito MS3) prevede la disamina di tutti gli aspetti propri di una microzonazione sismica (stima dell'azione sismica e, quindi, dell'eventuale livello di amplificazione sismica e definizione delle aree di rispetto e/o suscettibilità per le aree instabili) mediante procedure avanzate finalizzate ad una parametrizzazione quantitativa.

Il documento tecnico di riferimento generale per la realizzazione degli studi è rappresentato dagli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (di seguito indicato con la sigla ICMS) approvati il 13 novembre 2008 dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome.

Nella sua interezza il documento nazionale intende costituire un elemento utile all'approfondimento della pericolosità sismica locale, necessario all'analisi del rischio sismico, applicabile ai settori della programmazione territoriale, della pianificazione urbanistica, della pianificazione dell'emergenza e della normativa tecnica per la progettazione. Il documento individua e determina criteri, metodi e procedure per l'esecuzione di azioni di microzonazione a diverse scale e con diversi livelli di approfondimento.

Gli ICMS sono stati aggiornati, modificati e implementati nel corso degli ultimi anni mediante la predisposizione di Standard tecnico-operativi.

Di seguito si illustrano le analisi di risposta sismica locale (di seguito RSL), realizzate in assetto bidimensionale e finalizzate ad una rigorosa parametrizzazione dell'amplificazione sismica ai fini della redazione della carta di MS3.

Per la valutazione dell'amplificazione sismica mediante RSL bisognerà definire un modello di input sismico (selezione delle storie temporali di input), geologico-tecnico (determinazione dell'assetto geometrico sepolto e superficiale dei terreni interessati dallo studio di microzonazione sismica) e fisico-meccanico (parametrizzazione in chiave dinamica dei sismostrati oggetto delle analisi di RSL).

Tali fasi sono documentate nei capitoli seguenti, mentre i capitoli finali sono dedicati all'illustrazione dei risultati delle analisi di RSL e dei parametri di output (spettri di risposta e Fattori di Amplificazione) ed il loro utilizzo per la redazione della carta di MS3.

2) SELEZIONE DELLE STORIE TEMPORALI DI INPUT

Per quanto attiene alla definizione delle serie temporali utilizzate come input sismico, esse sono state ricavate mediante l'utilizzo del software regionale SCALCONA 3.0 (SCALing of COmpatible Natural Accelerograms), scaricabile al link: <http://www.regione.toscana.it/-/accelerogrammi-di-riferimento-per-la-toscana>.

Tale codice di calcolo è stato definito mediante la procedura messa a punto dall'Università di Pavia nell'ambito di un Accordo di Collaborazione Scientifica con la Regione Toscana. (Zuccolo et al., 2011; Rota et al., 2012; Zuccolo et al., 2012; Zuccolo et al., 2014). In particolare, per tutto il territorio toscano, è possibile selezionare differenti periodi di ritorno (ossia 30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 712 e 949 anni). Il **periodo di ritorno** ufficiale per la realizzazione di studi di MS3 sarà di **475 anni**. Inoltre, per le motivazioni espresse nei prossimi capitoli, le analisi di RSL andranno eseguite anche utilizzando una settupla di accelerogrammi naturali relativa ad un **periodo di ritorno di 50 anni**. La scelta di privilegiare settuple estratte mediante SCALCONA 3.0 (già utilizzato negli studi di MS3 realizzati in Toscana) deriva dalla necessità di avere omogeneità in termini di accelerogrammi di input, soprattutto per studi di MS3 di comuni attigui.

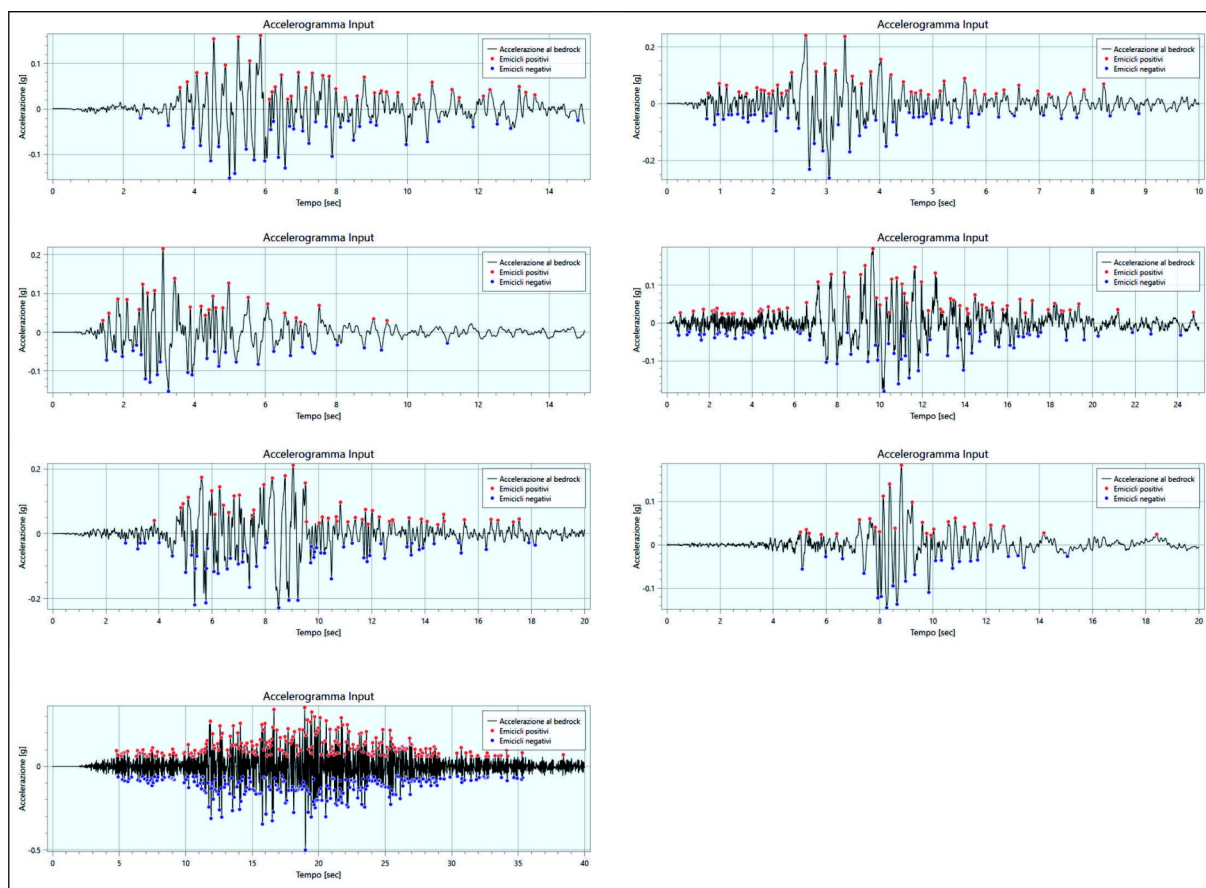


Fig. 1 – Esempio di input sismico in termini di storie temporali in accelerazione utilizzato per studi di MS3 per un $T_r=475$ anni

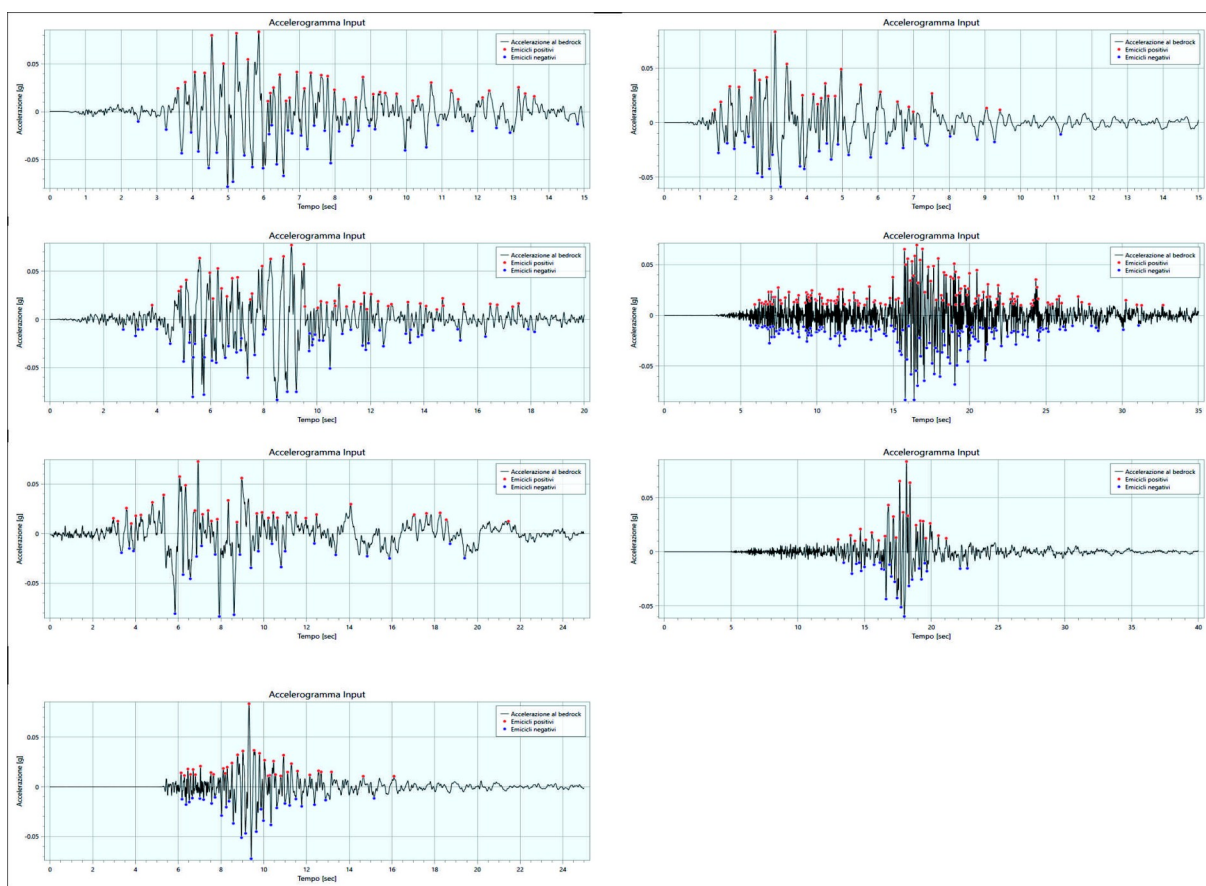


Fig. 2 – Esempio di input sismico in termini di storie temporali in accelerazione utilizzato per studi di MS3 per un $T_r=50$ anni

Sono state selezionate settuple di accelerogrammi per i periodi di ritorno di 475 anni e 50 anni e riferite spazialmente alla sede comunale di Badia Tedalda, come convenzionalmente viene fatto negli studi di MS3. Il primo periodo di ritorno è quello utilizzato per le analisi principali da cui desumere i livelli di amplificazione ed alla base della parametrizzazione delle instabilità. Il periodo di ritorno inferiore è stato utilizzato soltanto per fornire lo spettro caratteristico per lo SLD, come descritto nel cap.6.

In figura 1 sono illustrate le sette storie temporali in accelerazione utilizzate per le analisi al tempo di ritorno $T_r=475$ anni, mentre in figura 2 sono riportati gli accelerogrammi relativi all'analisi per $T_r=50$ anni. Le figure 3 e 4 riportano le medesime settuple in termini di spettri di risposta elastici. Per entrambe le settuple è possibile osservare una buona spettrocompatibilità degli spettri medi con i rispettivi spettri target.

Le tabelle 1 e 2 riportano i principali elementi sismologici collegati alle settuple selezionate (codice evento, magnitudo, distanza epicentrale e fattore di scala); nel caso della settupla relativa all'analisi per $T_r=475$ anni si è preferito operare la normalizzazione al valore di a_g del sito, migliorando globalmente la spettrocompatibilità dello spettro medio nei confronti dello spettro target del sito (cat. A-T1 ai sensi delle NTC2018). Pertanto, viene riportato il valore del fattore di scala fornito in output da SCALCONA 3.0 (Fattore di scala originario) ed il valore finale (Fattore di scala finale) ricavato a seguito della predetta normalizzazione.



Tab.1 – Caratteristiche della settupla utilizzata per $T_r=475$ anni

Nome codice evento	Magnitudo (Mw)	Distanza epicentrale (km)	Fattore di scala originario	Fattore di scala finale
ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC	6.20	29.90	2.11	2.76
NGA-West2 RSN146_COYOTELK_G01320.AT2	5.74	12.57	2.24	1.81
ESM IT.ATN..HNN.D.19840507.174943.C.ACC.ASC	5.90	10.10	2.14	2.10
NGA-West2 RSN804_LOMAP_SSF115.AT2	6.93	83.53	3.62	3.91
NGA-West2 RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2	6.69	38.07	1.51	1.39
KiK-net SMNH100010061330.EW2	6.60	31.00	0.74	0.85
NGA-West2 RSN5685_IWATE_MYGH11NS.AT2	6.90	70.13	2.71	1.14

Tab.2 – Caratteristiche della settupla utilizzata per $T_r=50$ anni

Nome codice evento	Magnitudo (Mw)	Distanza epicentrale (km)	Fattore di scala
ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC	6.20	29.90	1.09
ESM IT.ATN..HNN.D.19840507.174943.C.ACC.ASC	5.90	10.10	0.84
NGA-West2 RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2	6.69	38.07	0.55
NGA-West2 RSN2989_CHICHI.05_CHY102N.AT2	6.20	78.79	1.46
NGA-West2 RSN8167_SANSIMEO_DCPP247.AT2	6.50	57.74	1.80
KiK-net SAGH050503201053.EW2	6.60	62.00	0.59
ESM IT.AQP..HNE.D.20090407.174737.C.ACC.ASC	5.40	13.2	0.89

Per l'analisi per $T_r=50$ anni non si è ritenuto necessario operare la predetta normalizzazione al valore di a_g del sito e, quindi, viene riportato solo il valore del fattore di scala fornito in output da SCALCONA 3.0. L'analisi degli spettri elastici degli eventi sismici utilizzati come input per le analisi di RSL, denota una ottima spettrocompatibilità dello spettro medio nei confronti dello spettro target, riferito allo spettro di cat. A-T1 per l'area in esame, testimoniata dalla possibilità di aver ridotto l'estremo superiore di tolleranza dal valore massimo concesso (30%) al valore del 20%. Ciò sia per l'analisi con $T_r=475$ anni sia per quella con $T_r=50$ anni.

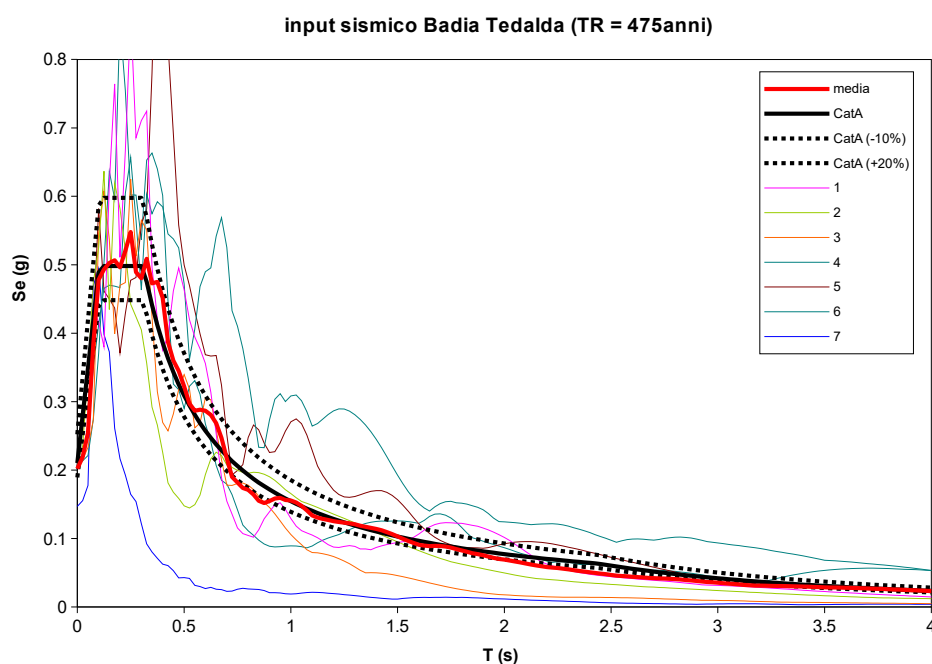


Fig. 3 – Spettri di risposta elastici relativi alla settupla di accelerogrammi riportata in figura 1. Con la curva rossa è indicato lo spettro medio, mentre con curva nera continua è riportato lo spettro target del sito (cat. A-T1)

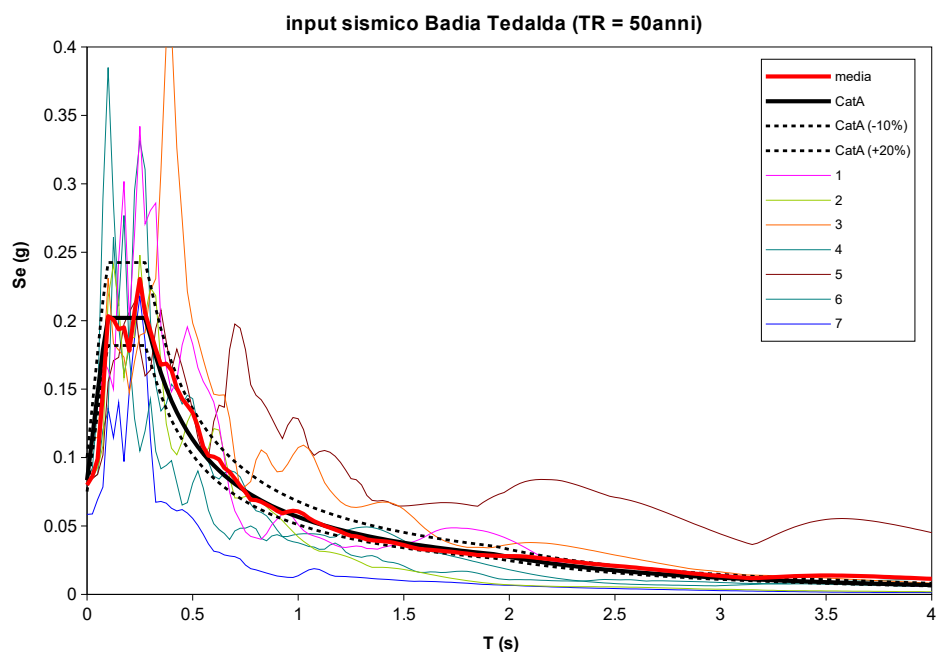


Fig. 4 – Spettri di risposta elastici relativi alla settupla di accelerogrammi riportata in figura 2. Con la curva rossa è indicato lo spettro medio, mentre con curva nera continua è riportato lo spettro target del sito (cat. A-T1)



3) DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO

L'area del centro abitato di Badia Tedalda è stata oggetto di analisi di risposta sismica locale in assetto bidimensionale, finalizzate alla redazione di cartografie di microzonazione sismica di livello 3. Il fine principale è stato quello di stimare, mediante una procedura analitica (possibile grazie alla campagna di esplorazione multidisciplinare del sottosuolo) il valore del fattore di amplificazione dei terreni oggetto di indagine, ascrivibile sia a condizioni stratigrafiche e/o topografiche sia al contesto geometrico sepolto dell'area.

Le analisi di modellazione dinamica in assetto bidimensionale sono state condotte mediante software agli elementi finiti LSR2D della Stacec. Esso consente di definire il comportamento dinamico del terreno con un modello lineare equivalente, il quale si basa su parametri rappresentativi delle proprietà elastiche ed isteretiche dei terreni in funzione della deformazione di taglio. Nei modelli lineari equivalenti, pur attenendosi ad una formulazione lineare "a tratti", si considerano gli effetti di non linearità e di dissipazione.

Tab.3 – Parametrizzazione dinamica dei litotipi investigati, finalizzata all'esecuzione di analisi di RSL bidimensionali secondo un modello lineare-equivalente

Litologia		Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs	Rapporto Poisson	Peso di volume (kN/mc)	Modulo di taglio G (kPa)	curve dinamiche (G/G0 e D)
a (depositi gravitativi)		600	200	3.0	0.44	18.0	73419	B8_sestino
b (depositi colluviali)		1000	300	3.3	0.45	19.0	174369	B8_sestino
Formazione di Sillano (SIL)	SIL1	900	350	2.6	0.41	21.0	262318	sil alterato
	SIL2	1600	500	3.2	0.45	21.0	535343	average rock
	SIL3	2100	700	3.0	0.44	23.0	1149204	average rock
	SIL4	2400	900	2.7	0.42	23.0	1899704	linear D= 2%
	SIL5	2800	1000	2.8	0.43	23.0	2345314	linear D= 1%
Formazione di Monte Morello (MLL)	MLL1	1500	500	3.0	0.44	20.0	509851	average rock
	MLL2	2500	800	3.1	0.44	25.0	1631523	linear D= 2%
	MLL3	3500	1200	2.9	0.43	25.0	3670926	linear D= 1%
Formazione delle Marne di San Paolo (SPL)	SPL1	1500	560	2.7	0.42	22.0	703513	average rock
	SPL2	2100	660	3.2	0.45	22.0	977200	average rock
	SPL3	2800	740	3.8	0.46	22.0	1228455	average rock
	SPL4	3000	840	3.6	0.46	25.0	1798754	linear D= 2%
	SPL5	3500	1000	3.5	0.46	25.0	2549254	linear D= 1%
Formazione Marnoso-arenacea (FMA)	FMA1	1700	700	2.4	0.40	22.0	1099238	average rock
	FMA2	2800	1200	2.3	0.39	25.0	3670926	linear D= 1%

Tale software permette la digitalizzazione di sezioni geologo-tecniche, l'inserimento dei parametri geotecnico-geofisici delle formazioni geologiche presenti e la discretizzazione dei livelli individuati in elementi (mesh), le cui dimensioni sono stimate sulla base dei valori di velocità delle onde di taglio nello strato in esame, della massima frequenza che si vuole propagare e di un coefficiente di stabilità, secondo la relazione di Kuhlemeyer e Lysmer, 1973:

$$D_{max} = \lambda / k = (T V_s)/k \quad (1)$$

dove **Vs** è la velocità di propagazione delle onde di taglio (ricavata dalle indagini geofisiche dirette ed illustrate nei precedenti capitoli) e **T** è il periodo corrispondente alla più corta onda sismica propagabile e posto pari a 0.05s (frequenza massima propagata pari a 20Hz). Tale periodo è quindi il minor periodo per cui si può ritenere attendibile il dato di output. Il coefficiente k viene posto pari a 8 (Lanzo & Silvestri, 1999).

In figura 5 sono illustrate le 4 sezioni geologico-tecniche sottoposte ad analisi di RSL, la cui ubicazione è visibile in figura 6. Le sezioni mostrano un assetto sepolto non omogeneo, caratterizzato dalla presenza di differenti tipologie di substrato sismico, sormontate da spessori variabili di livelli di alterazione più o meno spinti. Le coperture sismiche, in questo contesto, sono rappresentate da depositi colluviali (b) e depositi gravitativi attivi o quiescenti (a).

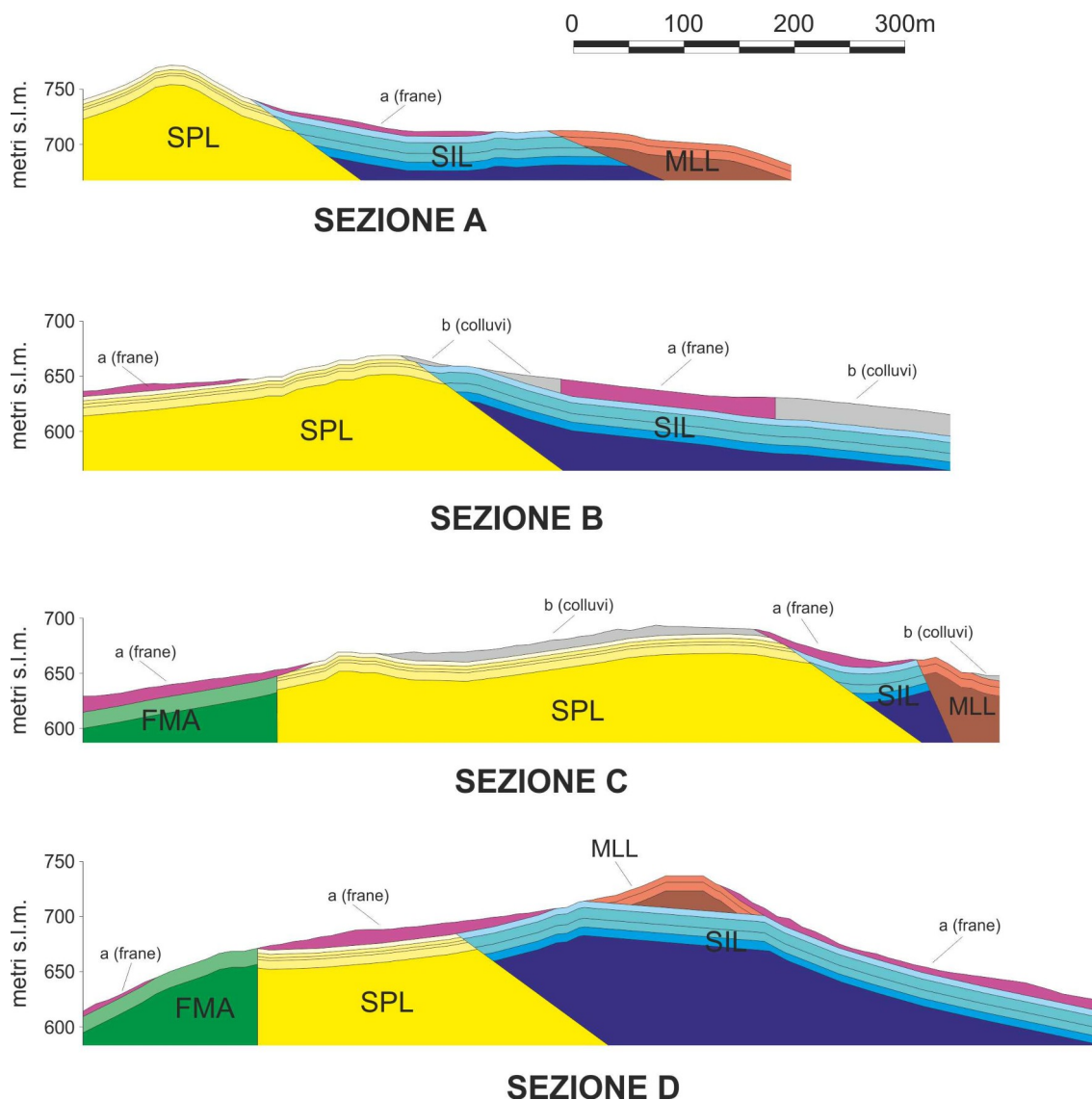


Fig. 5 – Le quattro sezioni geologico-tecniche sottoposte ad analisi di RSL bidimensionale. La simbologia delle unità geologiche è illustrata in tabella 4

Sulla base dei risultati dell'indagine sismiche realizzate nell'area è stato possibile fornire ad ognuno dei litotipi presenti nell'area di studio una parametrizzazione meccanica (Tab. 3) che, trattandosi di analisi in assetto bidimensionale, consistono nella velocità sismica in onde P ed onde S (V_p e V_s) e nel peso di volume.

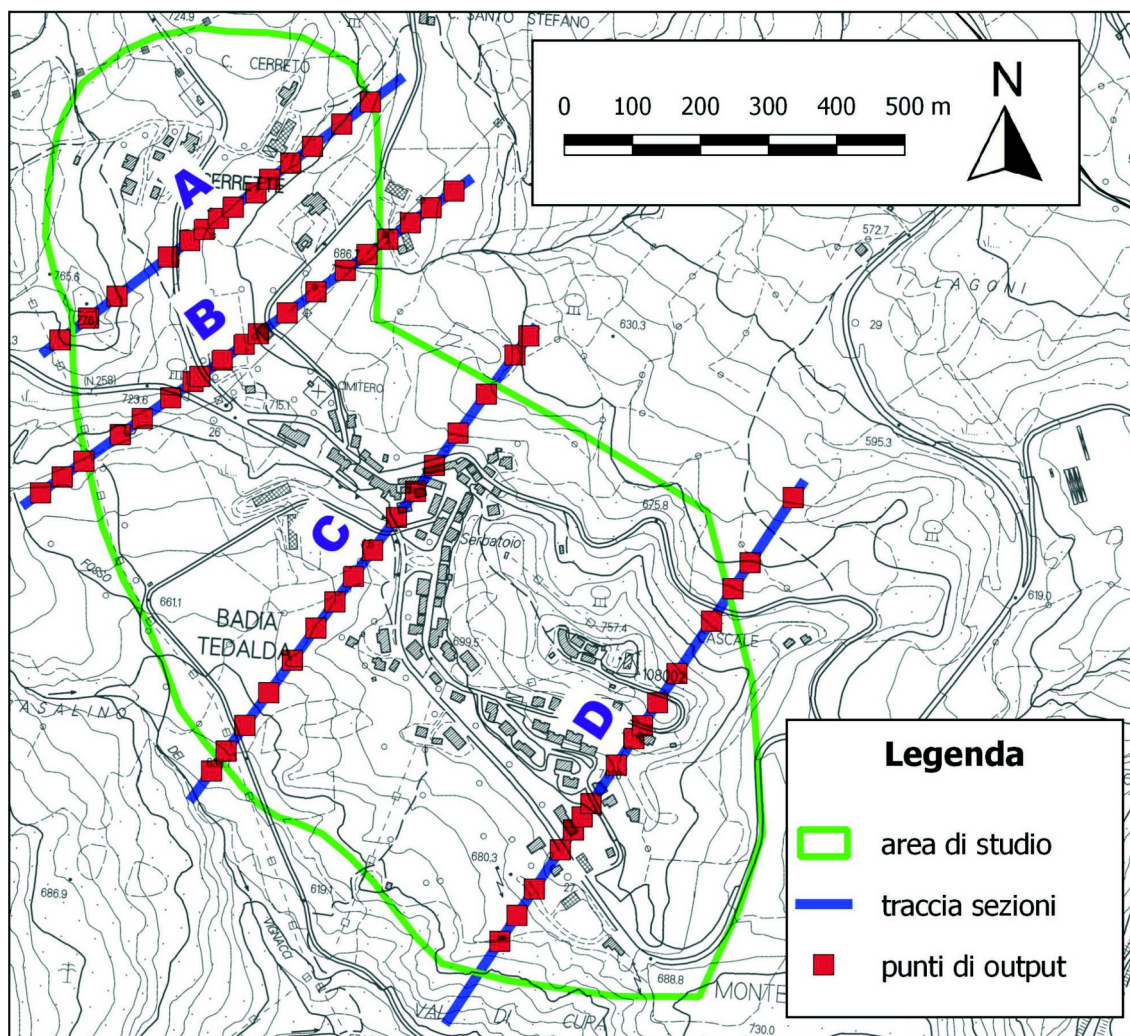


Fig. 6 – Ubicazione delle sezioni geologico-tecniche sottoposte ad analisi di RSL bidimensionale

Inoltre, l'approccio di tipo lineare-equivalente delle analisi di RSL, impone la scelta per ogni litotipo indagato di curve dinamiche (G/G_0 e D) in grado di simulare parzialmente il comportamento non lineare del terreno. Le curve utilizzate sono visibili nelle figure 7 e 8. Le curve attribuite alle coperture sono state desunte dalla Banca Dati VEL sulla base di indagini effettuate nell'area, mentre per i livelli alterati del substrato è stata scelta una curva di bibliografia riferita alle rocce tenere.

Ai litotipi ascrivibili al substrato sismico, invece, è stato dato un comportamento di tipo lineare, attribuendo un valore costante dello smorzamento D proporzionale al valore di V_s del tipo di substrato sismico (e di conseguenza del valore del suo modulo di taglio massimo G_{max}), come specificato in tabella 4.

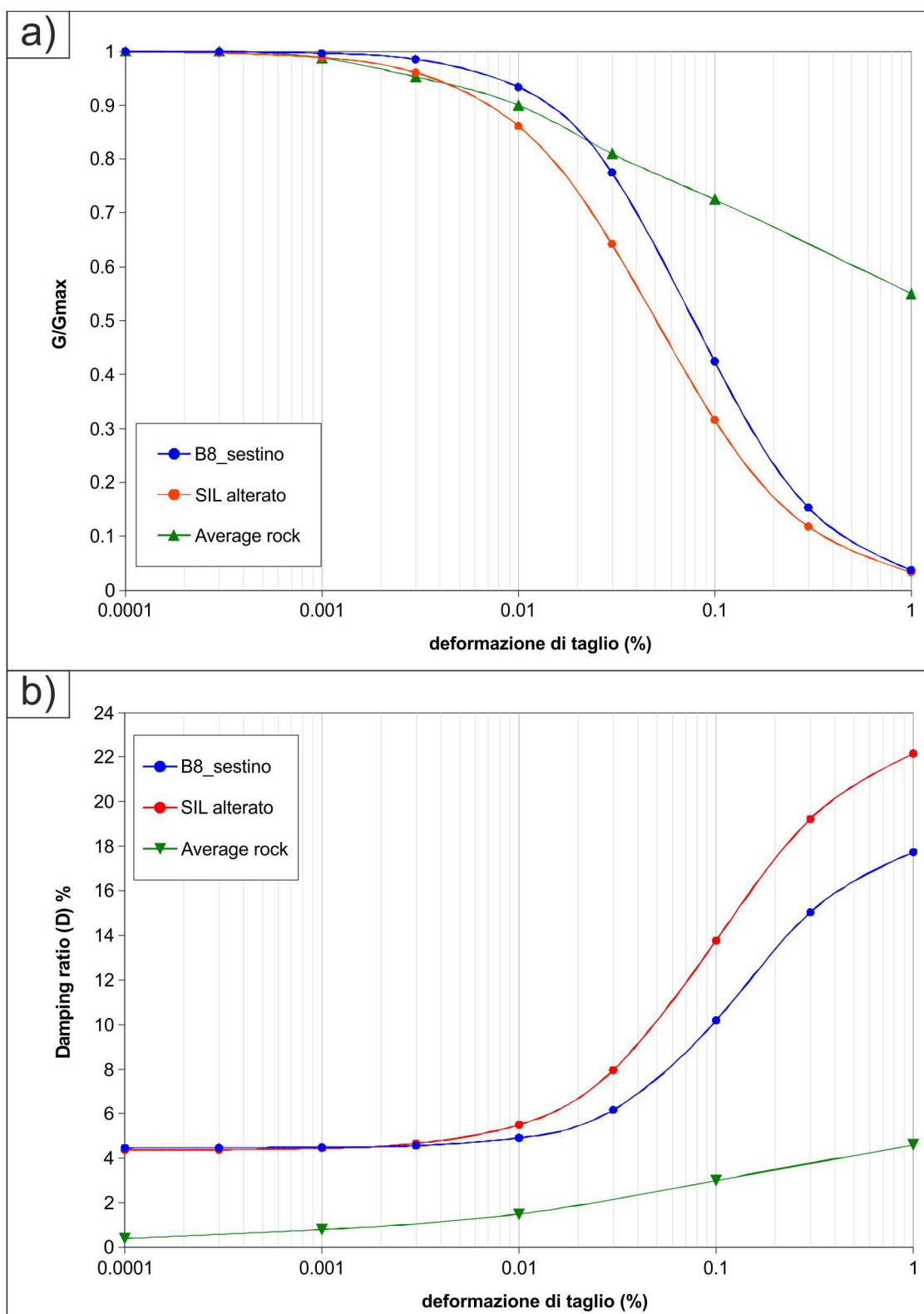


Fig.7 – a) Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato $G(\gamma)$ e b) di incremento del rapporto di smorzamento $D(\gamma)$ con la deformazione tangenziale utilizzate nel presente studio

4) RISULTATI DELLE ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Le sezioni geologico-tecniche illustrate nel precedente capitolo sono state implementate nel software di analisi di risposta sismica locale e sottoposte alla sollecitazione dinamica indotta dall'input sismico descritto al cap.2.

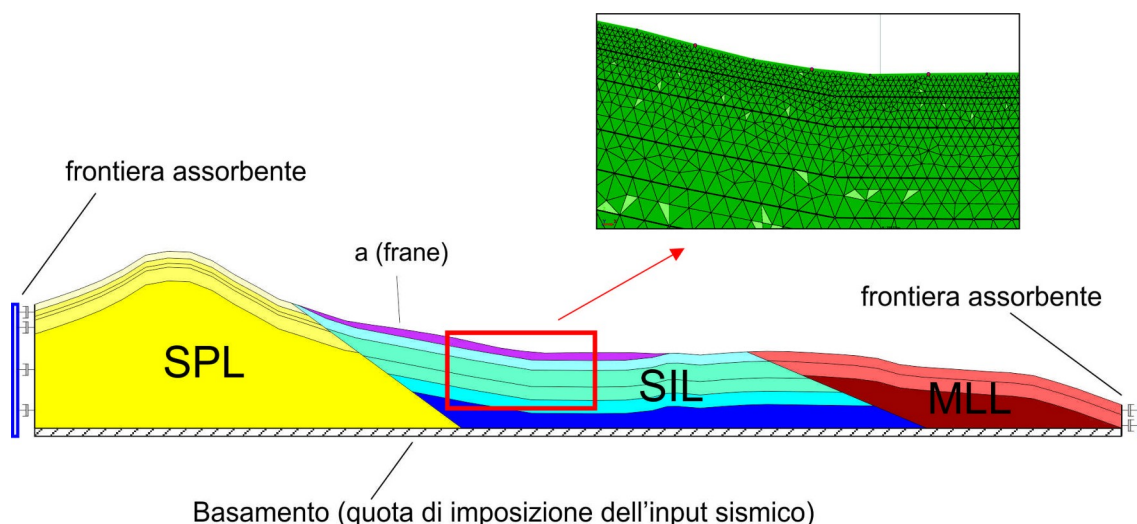


Fig.8 – Esempio di implementazione della sezione A nel codice di calcolo di RSL 2D

Le sezioni geologico-tecniche illustrate nel precedente capitolo sono state implementate nel software di analisi di risposta sismica locale e sottoposte alla sollecitazione dinamica indotta dall'input sismico descritto al cap.2.

Ai bordi laterali della sezione sono state posizionate delle frontiere assorbenti, in grado di minimizzare il problema della riflessione interna dell'energia sismica, mentre la sollecitazione dinamica è stata imposta ad una profondità costante rappresentata dal tetto del basamento. La totalità delle analisi, a cui è stata imposta una soglia minima di errore del 4% sia per G_γ sia per D_γ , ha raggiunto la convergenza mantenendosi a livelli di deformazione massima tipici del contesto lineare-equivalente, proprio dello stile di analisi. I massimi valori di deformazione si ottengono al contatto tra coperture e substrato, come visibile nell'esempio di figura 9.

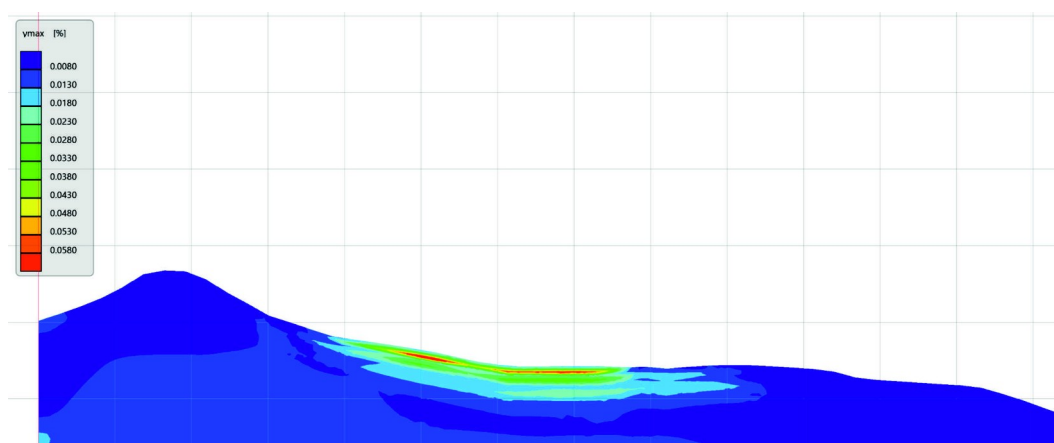


Fig.9 – Distribuzione delle deformazioni tangenziali massime in corrispondenza dell'analisi sulla sezione A

La totalità delle analisi, per le quali è stato previsto un numero totale di punti di output pari a 66 e la cui ubicazione in mappa è visibile in figura 6, ha rivelato elevati livelli di amplificazione ascrivibili a due fenomenologie, ben distinguibili in figura 10 (dove sono rappresentati per la sez. A i valori di PGA medi):

- amplificazione topografica su rilievi costituiti da unità del substrato alterato sia nell'area NW (rilievo sulla formazione delle Marne di San Paolo nella parte sinistra di figura 10) sia nel settore SE, dove è presente un rilievo costituito dalla Formazione Marnoso-arenacea sovrascorsa sull'Unità di Sillano;

- amplificazione stratigrafica, che raggiunge i valori massimi in corrispondenza del contatto tra le coperture franose ed il substrato, talora con presenza di fenomeni di focalizzazione (area est in figura 10).

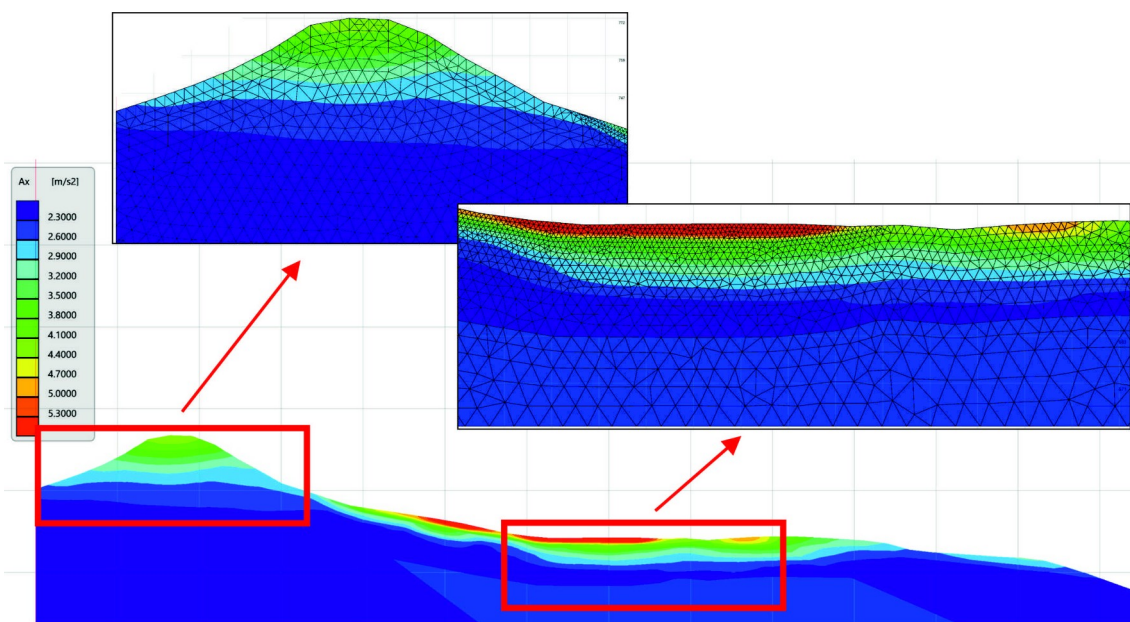


Fig.10 – Distribuzione delle PGA per la sezione A. E' possibile notare nel riquadro a sinistra un fenomeno di amplificazione topografica e nel riquadro a destra l'amplificazione prevalentemente stratigrafica in corrispondenza dell'affioramento dei depositi gravitativi

$$FA\ 0105 = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{inp}(T) dT} \quad (2)$$

$$FA\ 0408 = \frac{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{inp}(T) dT} \quad (3)$$

$$FA\ 0711 = \frac{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{inp}(T) dT} \quad (4)$$



Le figure dalla 11 alla 14 riportano per ogni sezione gli spettri medi desunti in corrispondenza dei punti di output; invece, nelle figure dalla 15 alla 18 è illustrata la distribuzione per ogni sezione dei 3 fattori di amplificazione obbligatori ai sensi degli Standard Nazionali di Microzonazione Sismica, indicati nelle precedenti formule.

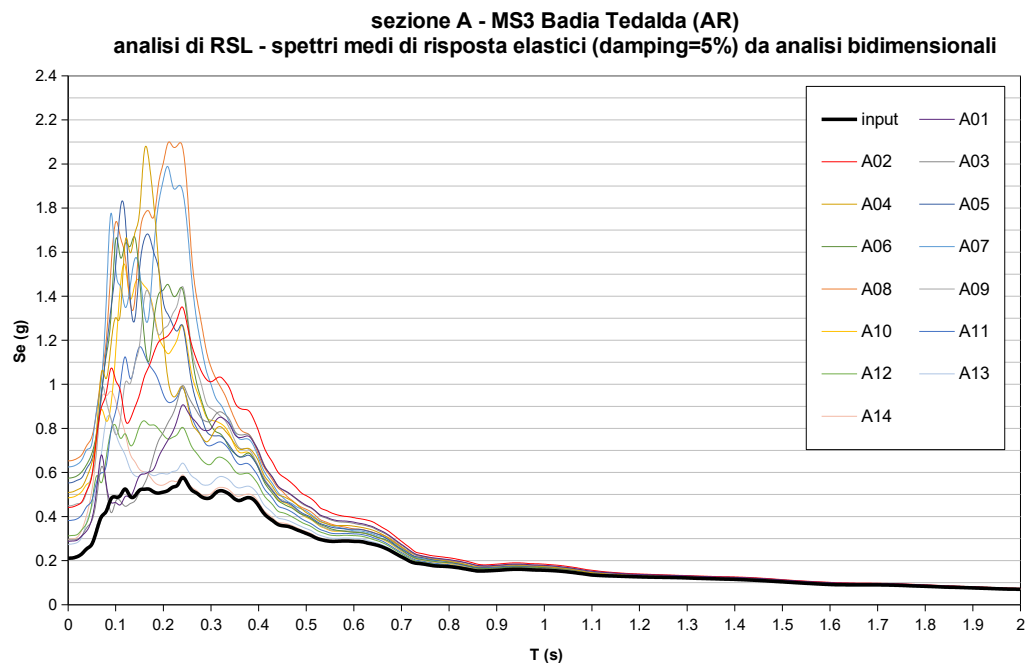


Fig.11 – Spettri di risposta medi per i punti di output della sezione A

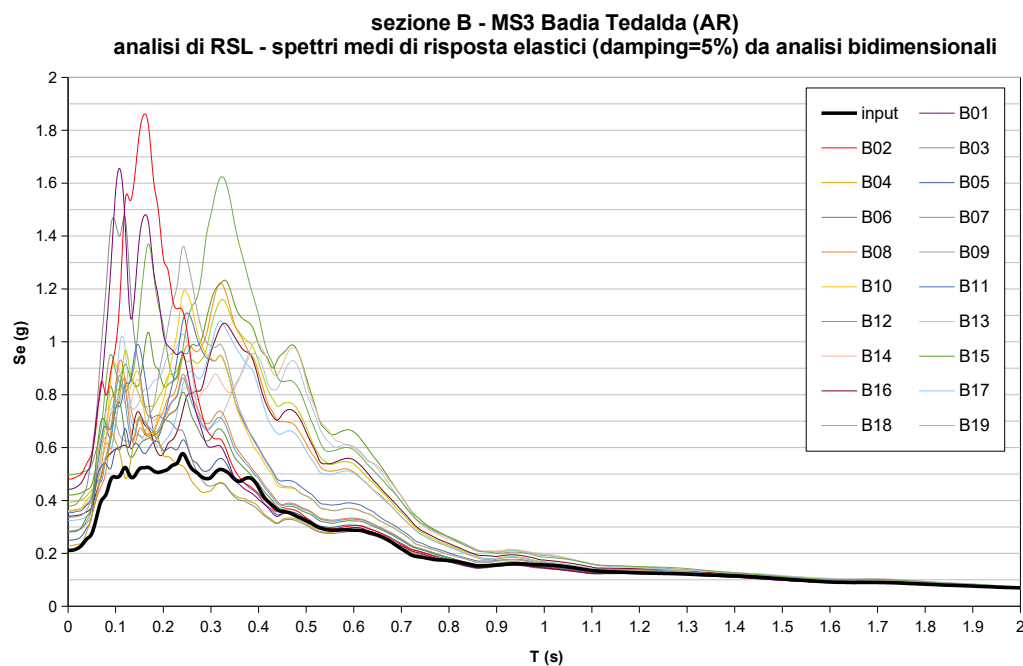


Fig.12 – Spettri di risposta medi per i punti di output della sezione B

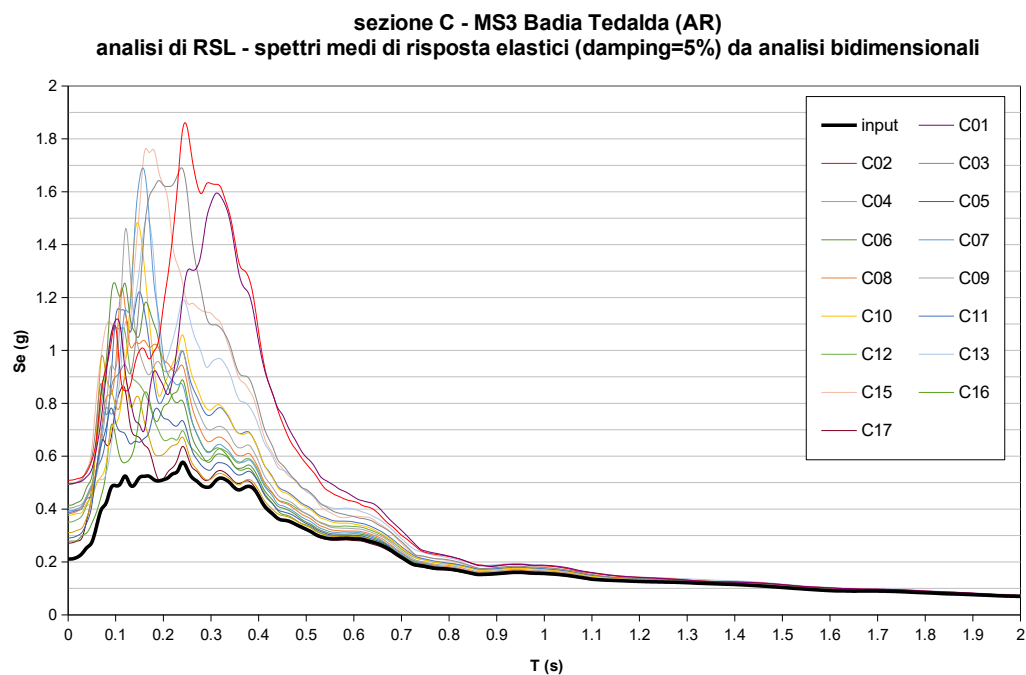


Fig.13 – Spettri di risposta medi per i punti di output della sezione C

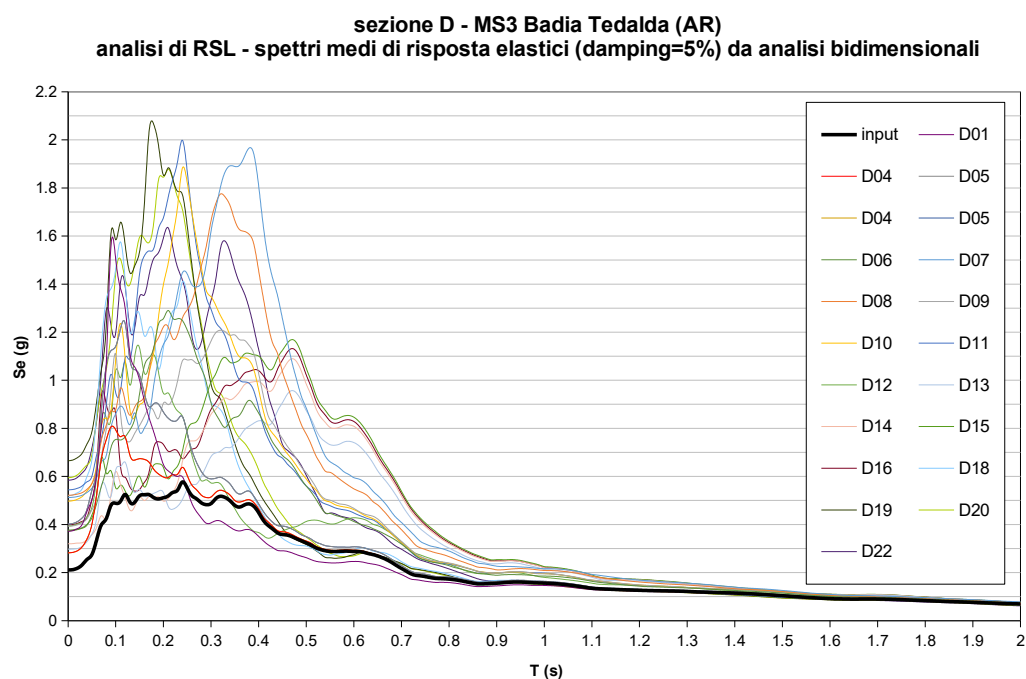
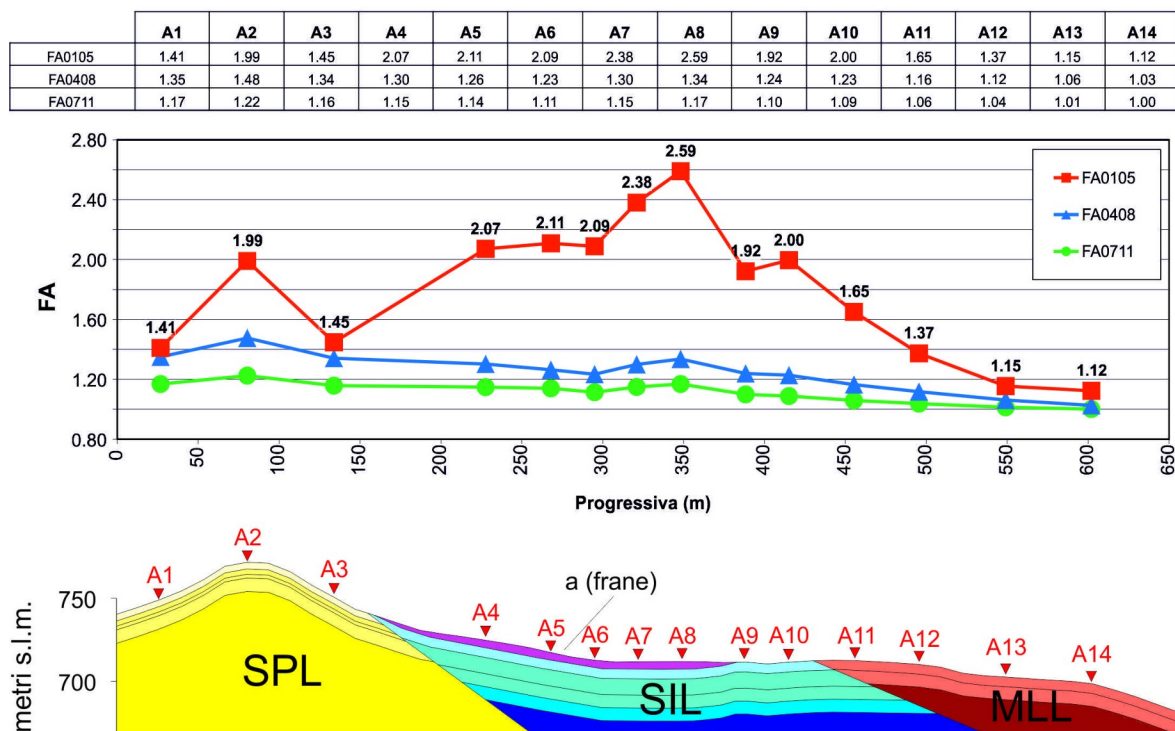


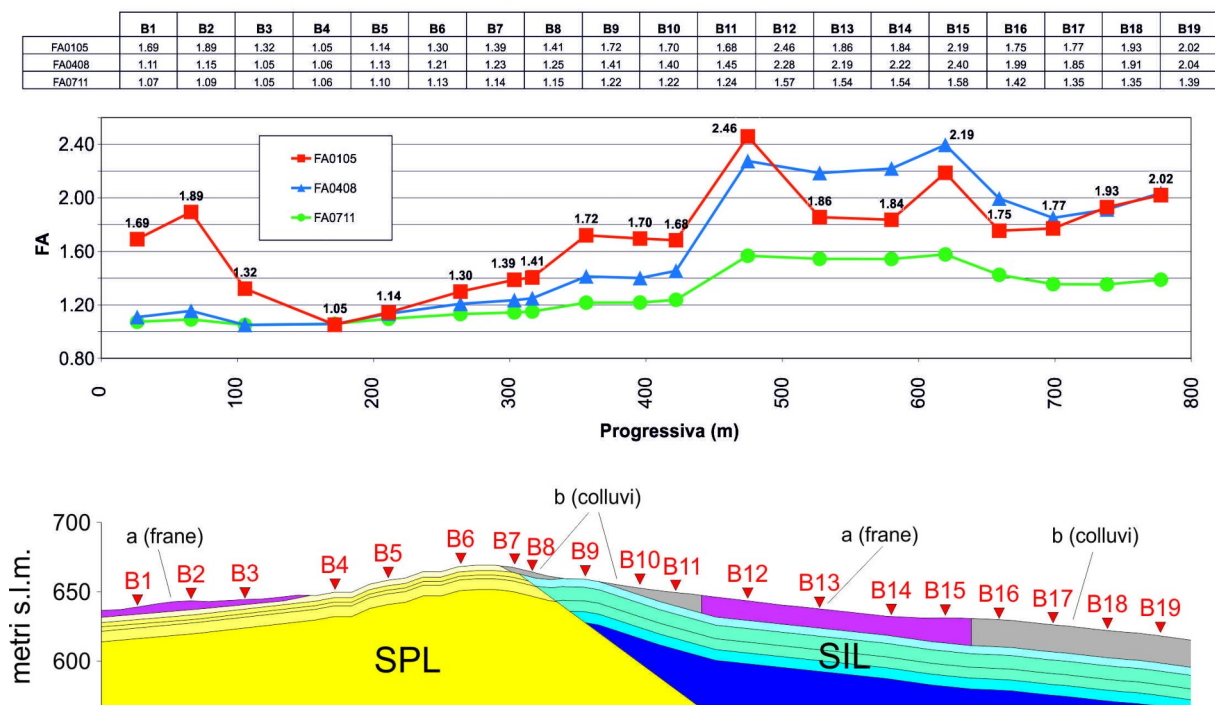
Fig.14 – Spettri di risposta medi per i punti di output della sezione D



Badia Tedalda (AR) sezione A - Fattori di amplificazione



Badia Tedalda (AR) sezione B - Fattori di amplificazione





Badia Tedalda (AR) sezione C - Fattori di amplificazione

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C15	C16	C17
FA0105	2.24	2.52	2.29	1.20	1.24	1.55	1.68	1.59	1.65	1.71	1.69	1.38	1.96	2.29	1.30	1.13
FA0408	1.72	1.67	1.42	1.04	1.07	1.10	1.12	1.15	1.18	1.24	1.26	1.18	1.44	1.42	1.05	0.99
FA0711	1.26	1.26	1.20	1.00	1.01	1.03	1.04	1.06	1.09	1.11	1.14	1.12	1.24	1.19	1.02	0.98

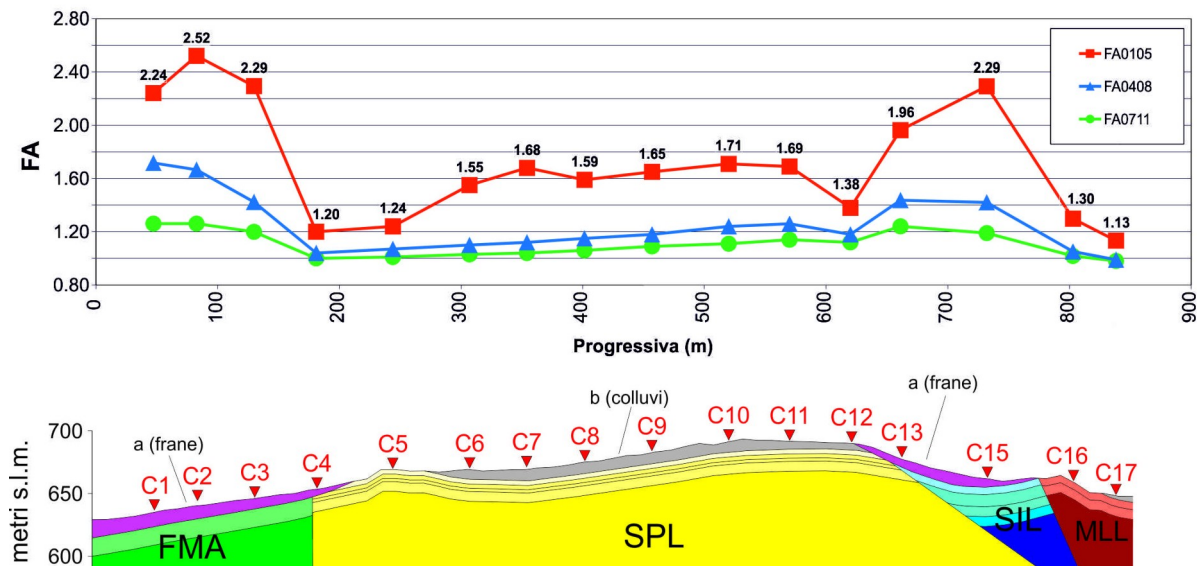


Fig.17 – Distribuzione dei fattori di amplificazione per la sezione C

Badia Tedalda (AR) sezione D - Fattori di amplificazione

	D1	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D18	D19	D20	D22
FA0105	1.23	1.15	1.49	2.00	2.85	2.70	2.07	2.45	2.58	1.51	1.38	1.59	1.78	1.72	1.80	2.17	2.18	2.52
FA0408	0.86	1.03	1.09	1.62	2.37	2.16	1.75	1.73	1.68	1.35	2.54	2.83	3.01	2.92	1.17	1.18	1.24	1.98
FA0711	0.94	1.01	1.06	1.30	1.58	1.49	1.36	1.35	1.34	1.24	1.79	1.89	1.95	1.91	1.14	1.14	1.11	1.28

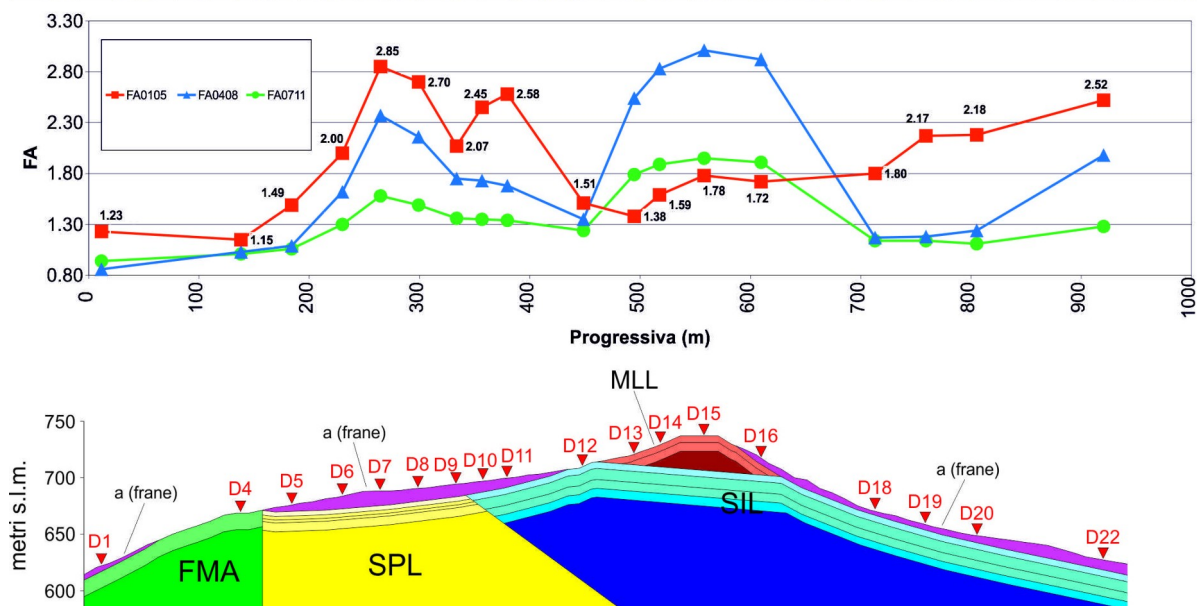


Fig.18 – Distribuzione dei fattori di amplificazione per la sezione D

5) SPETTRI MEDI E REDAZIONE DELLA CARTA DI MS3

A seguito dell'esecuzione delle analisi di risposta sismica locale è possibile ottenere la distribuzione dell'amplificazione lungo le sezioni analizzate.

L'operazione successiva, che si configura come la più difficile nel processo di realizzazione di uno studio di MS3, è quella di definire le zone omogenee, provvedendo successivamente all'estrapolazione areale. Mentre nella MS1 l'omogeneità di una microzona, non essendo prevista alcuna forma di parametrizzazione, è costituita dal fatto che ognuna delle aree comprese nella predetta zona possono essere schematizzate dal medesimo profilo stratigrafico, espresso nella struttura informatica dello studio dal campo "tipo_z", nella MS2, invece, è possibile raggruppare aree omogenee sulla base del valore del fattore di amplificazione (in Toscana, sulla base del vigente reg. 1R/22, viene privilegiato il fattore di amplificazione FA0105 la cui definizione è espressa dalla relazione 2).

In uno studio di MS3, avendo provveduto a stimare l'amplificazione sismica mediante analisi rigorose di RSL, è possibile disporre di tutti i prodotti di output di una modellazione sismica. Tra questi prodotti viene privilegiato (anche in analogia con la comune pratica professionale in termini di progettazione sismica) lo spettro di risposta elastico. Esso rappresenta l'elemento di omogeneità della risposta sismica di un'area, tenendo conto che due spettri simili tra loro porteranno anche a fattori di amplificazione simili.

Pertanto, la prima operazione è stata quella di raggruppare i 66 spettri di output sulla base delle caratteristiche sismostratigrafiche della verticale (tipo_z). Successivamente, avendo verificato una buona omogeneità degli spettri selezionati, al fine di semplificare il più possibile il modello ai fini di una sua migliore comprensione e fruibilità, si è provveduto ad accoppiare spettri medi simili, come ad esempio quelli relativi agli affioramenti dei livelli alterati di SPL, MLL ed FMA. In figura 19 è illustrato lo spettro medio di questo gruppo, a confronto con i singoli spettri.

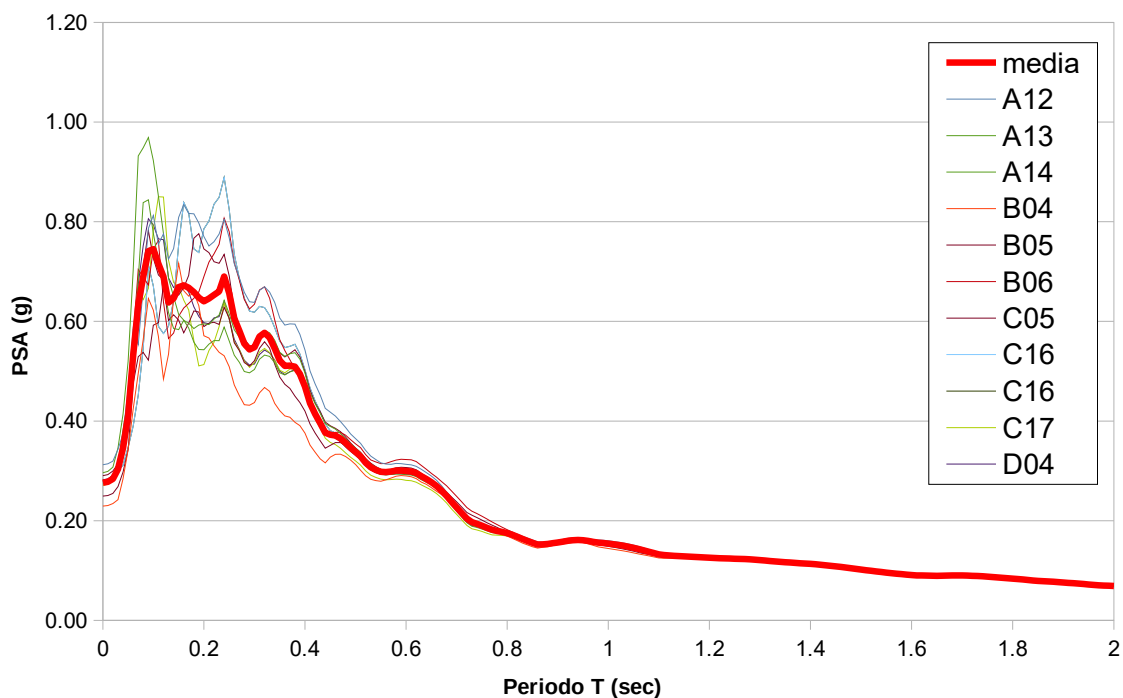


Fig.19 – Determinazione dello spettro medio di riferimento per le aree di affioramento di SPL, MLL ed FMA

Al termine della fase di sorting sono stati determinati 5 spettri medi, rappresentati in figura 20. Da essi sono stati ricavati i fattori di amplificazione ufficiali di questo studio e, sulla base di un confronto areale tra FA e carta delle MOPS, si è operato l'accorpamento visibile in tabella 4.

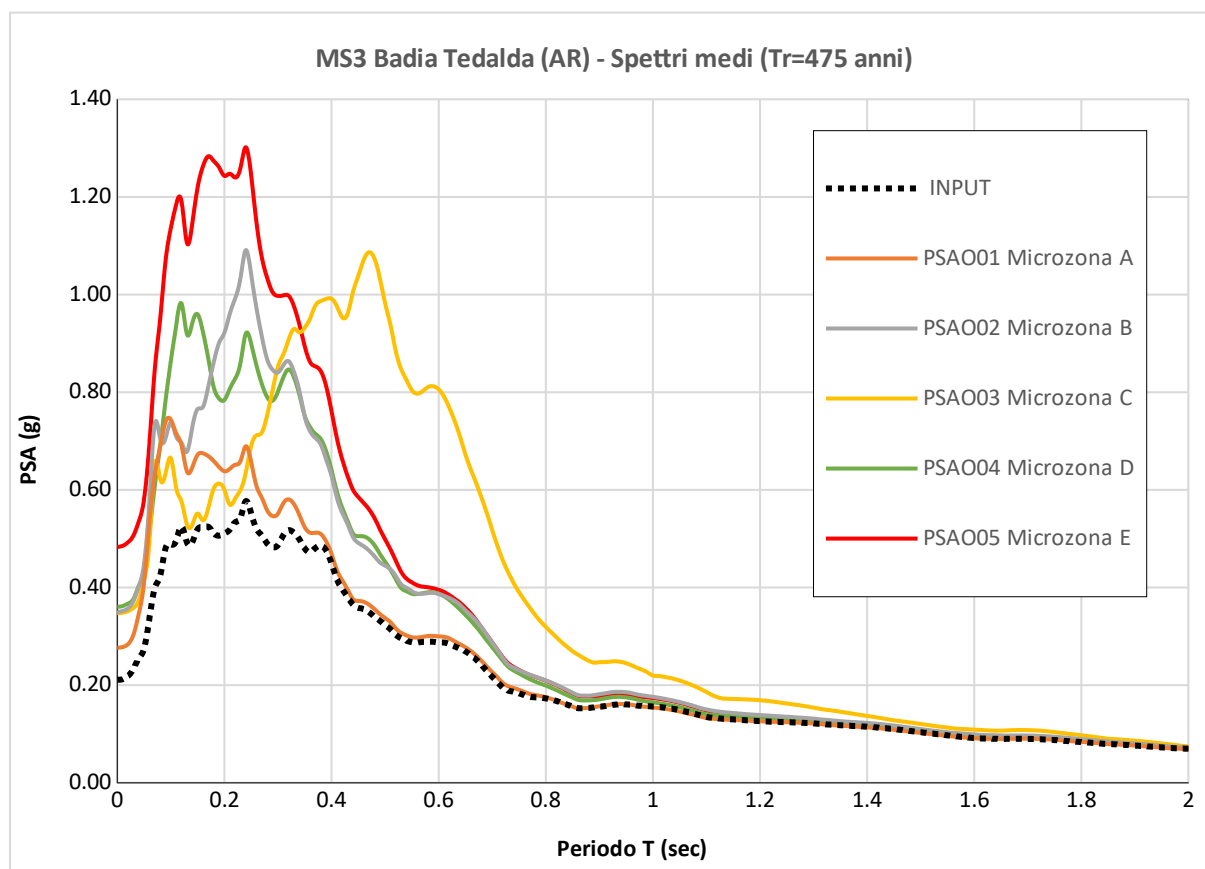


Fig.20 – Spettri medi in pseudoaccelerazione per il sito di Badia Tedalda

Tab. 4 – Valori di FA degli spettri medi e loro correlazione con le aree omogenee dello studio di livello 1 (MOPS)

		TIPO_Z	FA0105	FA0408	FA0711
Microzona A	PSAO01	SPL_MLL_FMA (2001, 2002, 2006)	1.2	1.07	1.04
Microzona B	PSAO02	SIL-topografia_SPL (rilievo su 2002, 2009)	1.62	1.39	1.2
Microzona C	PSAO03	topografia_MLL (rilievo su 2001)	1.62	2.83	1.89
Microzona D	PSAO04	riporti_colluvi (2003, 2005, 2008, 2009, 2013)	1.66	1.42	1.19
Microzona E	PSAO05	frane (instab)	2.08	1.51	1.23

Come modalità operativa si è preferito mantenere la forma delle microzone individuate nel livello 1, confermando anche quantitativamente la bontà delle scelte operate, ad eccezione di alcuni contesti (prevalentemente legati alla presenza di amplificazioni di tipo topografico) in cui le microzone in oggetto sono state differenziate ed associate a spettri medi omogenei differenti. Questo è il caso riportato in figura 21, dove una microzona, evidenziata in verde e caratterizzata dal codice 2002 (corrispondente all'affioramento del substrato alterato appartenente alla Formazione delle Marne di San Paolo) è stata differenziata in base alla differente risposta sismica dell'area affetta da amplificazione topografica a N dalla rimanente

The map displays a geographical area with two distinct microzones. Microzona A is a yellow-shaded region in the lower half, while Microzona B is an orange-shaded region in the upper half. A green line delineates the boundary between them. Topographic features include contour lines with elevations such as 765.6, 723.6, and 686.7. A road network is shown with various symbols for buildings and infrastructure. Numerous blue square markers with numerical values (e.g., 1.45, 1.99, 1.41, 1.39, 1.3, 1.14, 1.05, 1.32, 1.89, 1.69, 2.07, 1.72, 1.68, 1.94, 2.46) are scattered across the map. A green box containing the year '2002' is located in the center-left. Arrows point from the labels 'MICROZONA A' and 'MICROZONA B' to their respective areas.

- ✓ **Microzona A (PSA001)** = Tutte le aree di affioramento del substrato alterato attribuibile alle formazioni di SPL, MLL ed FMA;
- ✓ **Microzona B (PSA002)** = Attribuita sia alle aree di affioramento del substrato alterato attribuibile alle formazioni di SIL sia alle zone di affioramento di SPL alterato affetto da amplificazione topografica (settore NW dell'area);
- ✓ **Microzona C (PSA003)** = Zone di affioramento di MLL alterato affetto da amplificazione topografica (settore SE dell'area);
- ✓ **Microzona D (PSA004)** = Aree di affioramento di riporti antropici e depositi colluviali;
- ✓ **Microzona E (PSA005)** = Aree con presenza di depositi gravitativi.

Gli spettri medi, sia in termini di pseudoaccelerazione (PSA) sia in termini di pseudovelocità (PSV) sono stati inseriti come file testo nella struttura dello studio di MS alla cartella **MS23/spettri** e redatte secondo il formato prescritto dagli Standard Nazionali. Gli accelerogrammi di input sono stati catalogati (sempre nel formato richiesto dagli Standard Nazionali) nella cartella **Indagini/documenti**.

Infine, i fenomeni gravitativi (unica tipologia di instabilità presenti) hanno dimostrato una risposta sismica molto differenziata, sulla base dei differenti spessori delle coperture, dei diversi contrasti d'impedenza presenti e di frequenti fenomeni di focalizzazione (come nell'esempio in figura 22, relativo al settore centro-orientale del centro abitato). Pertanto, si è ritenuto non utile differenziare gli spettri ubicati su tali instabilità, per le quali sarà adottato un unico spettro medio (Microzona E – PSA005).

Infine, non essendo state svolte analisi specifiche per la parametrizzazione dell'instabilità di tipo gravitativo, alle frane attive e quiescenti presenti nell'area di studio, è stato associato il valore di spostamento (FRT) pari a 15cm, desunto da specifiche analisi dinamiche eseguite in contesti vicini e simili sotto il profilo geologico e geomorfologico.

La figura 23 riporta tutti i cinque spettri medi risultanti dalla procedura precedentemente illustrata.

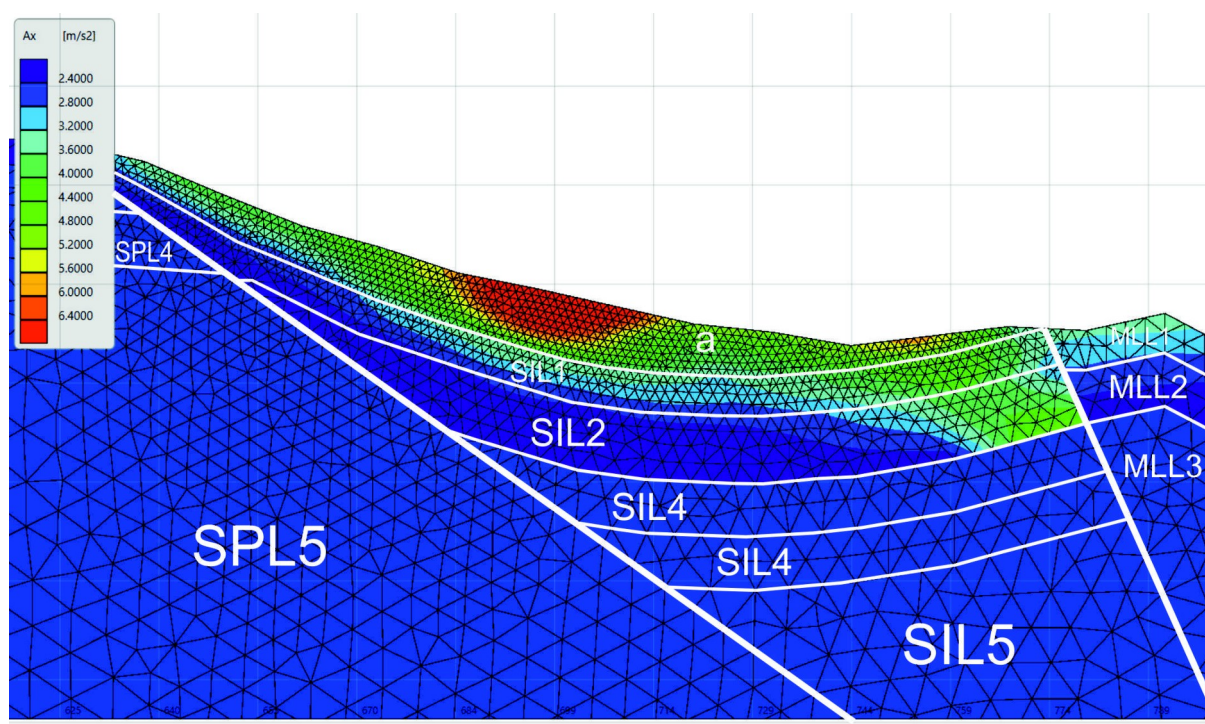


Fig.22 – Focalizzazione in corrispondenza di un deposito gravitativo nel settore centro-orientale dell'area di studio. La simbologia è descritta in tabella 3

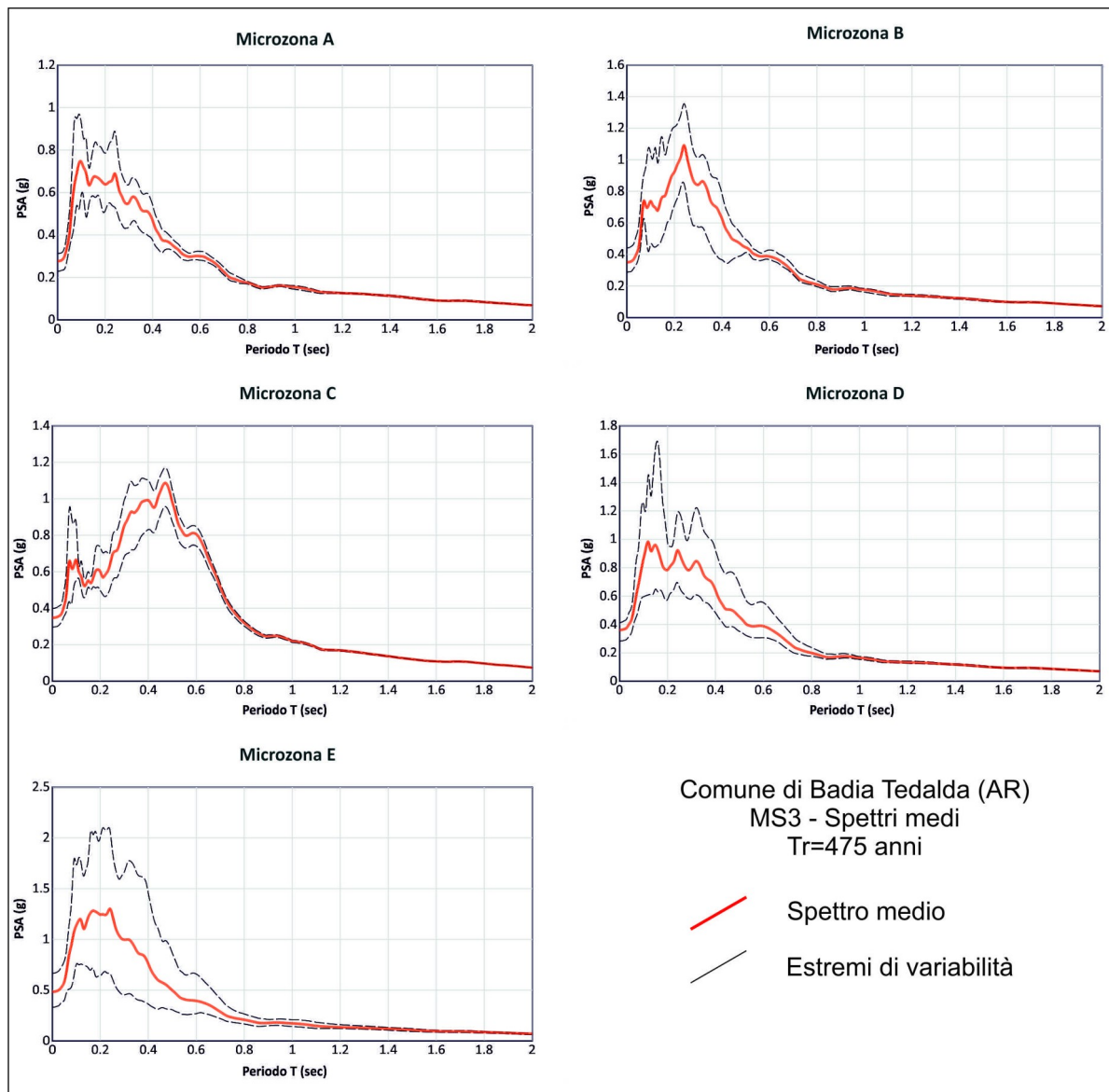


Fig.23 – Spettri medi per la MS3 del capoluogo di Badia Tedalda

6) INDICAZIONI PER LA FASE PROGETTUALE

Nell'ambito del nuovo regolamento n.5R/20 è stata prevista la possibilità di utilizzo diretto dei risultati della microzonazione sismica di terzo livello per la progettazione di opere ordinarie.

La realizzazione di studi di microzonazione sismica di terzo livello prevede, infatti, per la stima delle amplificazioni locali, la realizzazione di adeguate analisi di risposta sismica locale. Il prodotto di output per tali analisi è solitamente costituito oltre che dai fattori di amplificazione, utilizzati per la quantificazione della minore o maggiore predisposizione dei terreni indagati all'amplificazione locale, anche da spettri di risposta elastici (caratterizzati da uno smorzamento del 5%).

In aree di studio in cui la MS3 restituisce microzone con estensione areale tipicamente limitata ed in cui è presente una dettagliata definizione dell'azione sismica sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo, è possibile (in aggiunta a quanto previsto dagli ICMS) fornire per ogni microzona strumenti utili a rappresentare in quel determinato ambito areale l'azione sismica di progetto.

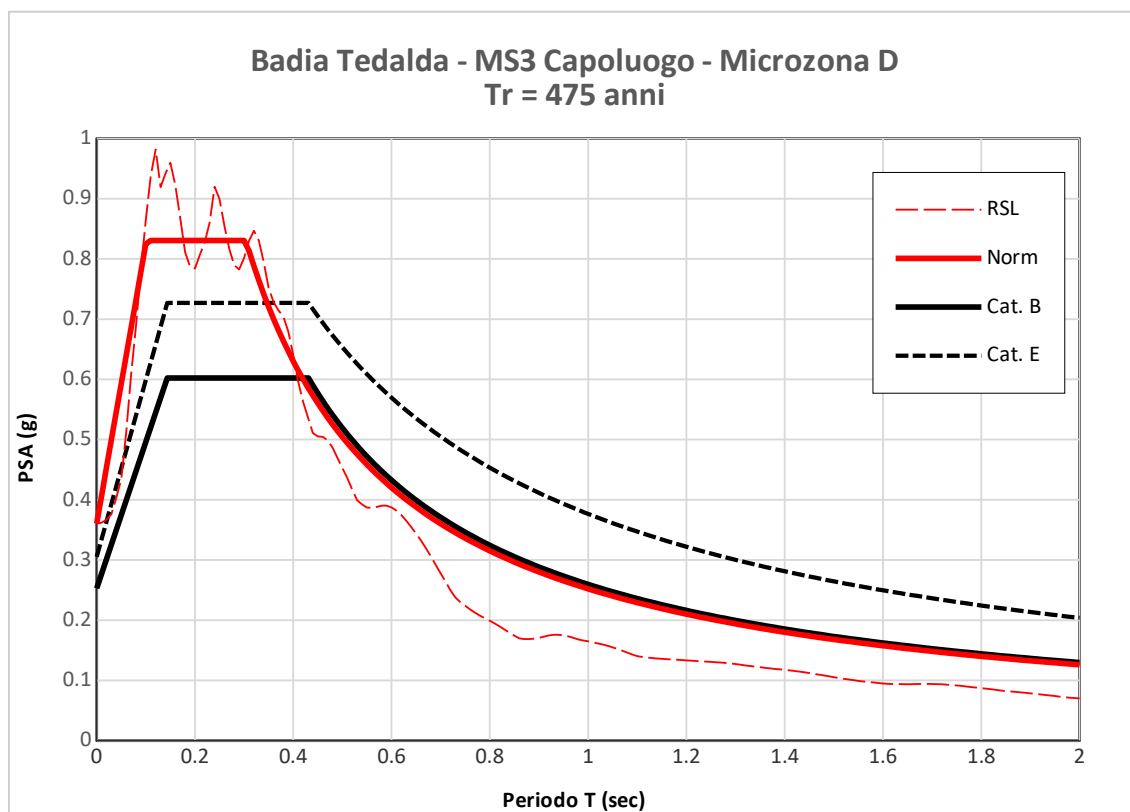


Fig.24 – Spettro caratteristico normalizzato secondo la procedura descritta nel testo, relativo alla microzona D (PSA004) di Badia Tedalda e per un periodo di ritorno pari a 475 anni a confronto con gli spettri semplificati di normativa più attinenti alle caratteristiche sismostratigrafiche della microzona in oggetto

La metodologia verte, quindi, sulla definizione di una procedura finalizzata alla definizione di spettri di risposta elastici, direttamente derivanti dagli studi di microzonazione sismica, da utilizzare nelle fasi progettuali successive a quella pianificatoria.

Effettuate le analisi di risposta sismica locale (tipicamente per un $T_r=475$ anni) è possibile, realizzata la carta di microzonazione sismica di terzo livello, pervenire alla definizione di spettri "caratteristici", prevedendo i seguenti step:

- 1) Definire gli spettri medi secondo la procedura evidenziata nel precedente capitolo;
- 2) Operare la regolarizzazione dello spettro medio. Questa operazione permette di definire sia uno spettro di forma simile a quelli semplificati di normativa sia, di conseguenza, i suoi parametri dipendenti (**S**, **T_b** e **T_c**), mentre i parametri indipendenti sono fissati, come noto, dalla localizzazione del sito e dalle scelte progettuali alla base funzione della progettazione. La regolarizzazione dello spettro viene effettuata secondo le procedure illustrate negli ICMS 2008 e meglio specificate da Pergalani e Compagnoni (2013). In

sintesi, secondo tale metodo, dallo spettro medio si ricavano i valori di **TA** (periodo per il quale è massimo il valore in accelerazione), **SA** (valore medio dello spettro in accelerazione per periodi compresi tra **0.5TA** ed **1.5TA**), **TV** (periodo per il quale è massimo il valore in pseudovelocità), **SV** (valore medio dello spettro in pseudovelocità per periodi compresi tra **0.8TV** ed **1.2TV**). Ricavati tali valori si determinerà l'estensione del plateau (tratto dello spettro con accelerazione costante) tenendo conto che **Tc = 2π*(SV/SA)** e **Tb = 1/3Tc**. Noti i parametri indipendenti dalle condizioni di sito (**ag** e **Td**) è possibile, infine, ricavare il parametro **S** come **amax/ag** dove amax è calcolata da analisi di risposta locale. Il parametro **F0**, indipendente dalle condizioni sismostratigrafiche del sito secondo l'approccio semplificato delle **NTC2018**, nel presente metodo viene reso, invece, dipendente dalle condizioni geologiche locali con valore pari al rapporto tra **SA** ed **amax** (accelerazione di ancoraggio dello spettro caratteristico). Lo spettro così regolarizzato è visibile in linea rossa continua nell'esempio di figura 24, dove è messo a confronto con gli spettri semplificati di normativa (relativi alle categorie di sottosuolo B ed E) più attinenti alle condizioni sismostratigrafiche della microzona individuata nell'esempio di figura 24.

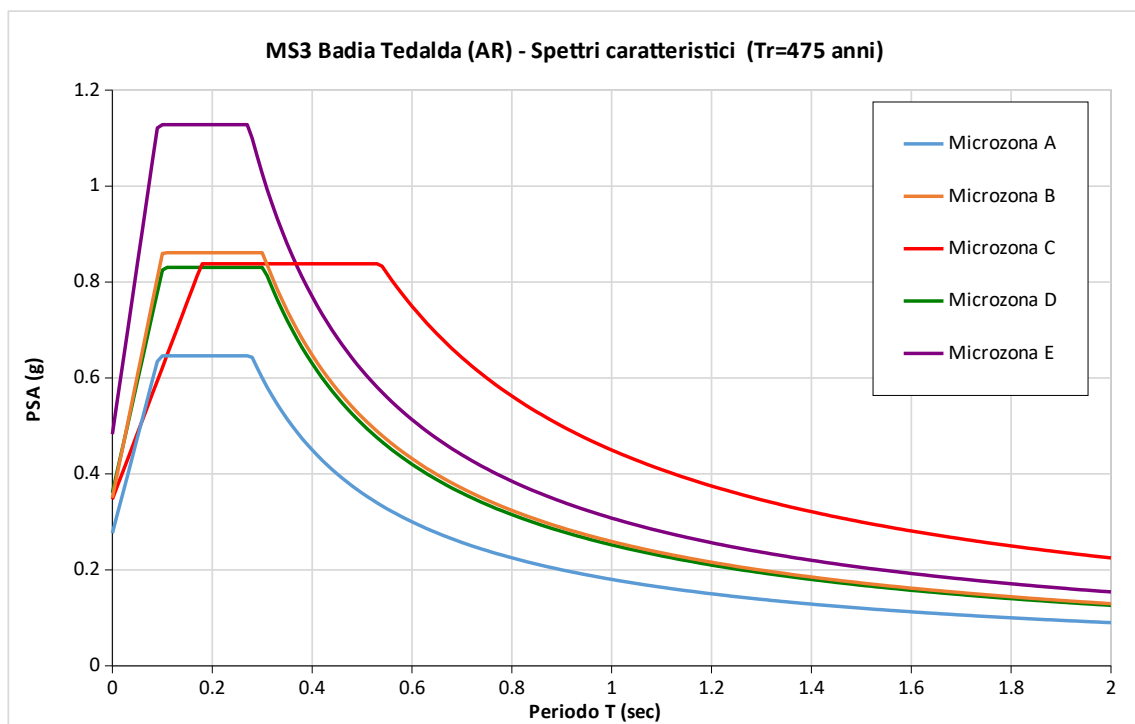


Fig.25 – Spettri caratteristici per la MS3 di Badia Tedalda per lo SLV

Questo spettro si riferisce ad un **periodo di ritorno di 475 anni** e, pertanto, può essere paragonato allo spettro semplificato di normativa relativo all'azione sismica per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (**SLV**) per un edificio "ordinario" (Vita nominale **VN = 50 anni** e **Classe d'uso CU = II**).

Oltre all'analisi "ufficiale" della MS3, caratterizzata da un periodo di ritorno di 475 anni ed utile per la progettazione di opere con vita nominale $V_n=50$ anni e classe d'uso II per lo Stato Limite Ultimo (usualmente Salvaguardia della Vita, **SLV**), sono state realizzate analoghe analisi imponendo come input sismico (Figg. 2 e 4) accelerogrammi spettro-compatibili e sismo-compatibili per periodi di ritorno propri dello Stato Limite di Esercizio (di solito Stato limite di Danno, **SLD**), che nel caso specifico corrispondono ad un **Tr=50 anni**. Operando con la medesima procedura precedentemente illustrata, è stato possibile ricavare spettri caratteristici normalizzati utilizzabili per rappresentare l'azione sismica allo SLE.



Le figure 25 e 26 illustrano gli spettri caratteristici per il centro abitato di Badia Tedalda, rispettivamente per SLV ed SLD. I parametri relativi sono illustrati, invece, nelle tabelle 5 e 6.

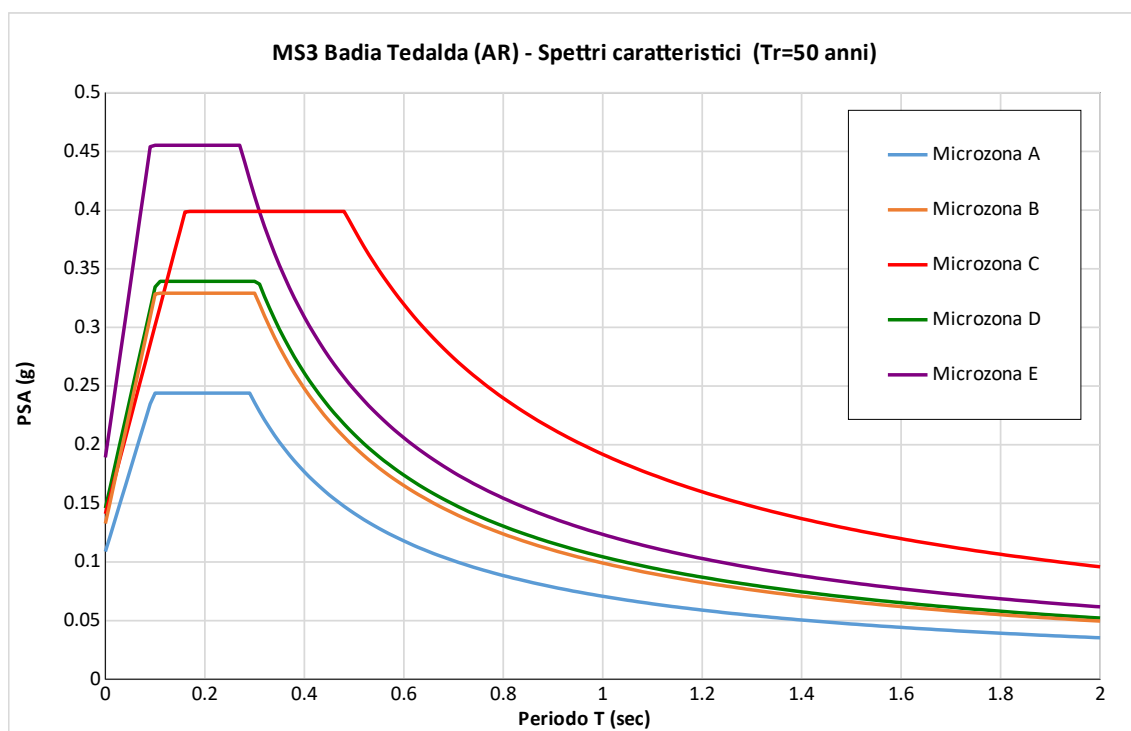


Fig.26 – Spettri caratteristici per la MS3 di Badia Tedalda per lo SLD

La normalizzazione di uno spettro di risposta permette la determinazione immediata di tutti i parametri (dipendenti ed indipendenti) che ne caratterizzano l'aspetto. Nelle tabelle 5 e 6 sono riportati i parametri per **SLV (Tr=475 anni)** e **SLD (Tr=50 anni)**.

Tab.5 – Parametri dipendenti relativi agli spettri di risposta caratteristici (Tr=475 anni), desunti a seguito del processo di normalizzazione

Badia Tedalda (AR)

Microzonazione sismica di 3°livello - SLV (Tr=475 anni)

Spettri caratteristici delle microzone sismiche - parametri

ag = 0.211g						
microzona	località	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)
A	BADIA TEDALDA	2.338	1.31	0.093	0.279	2.705
B		2.458	1.66	0.100	0.301	3.001
C		2.412	1.65	0.179	0.537	2.990
D		2.303	1.71	0.101	0.304	3.042
E		2.335	2.29	0.091	0.273	3.532



Tab.6 – Parametri dipendenti relativi agli spettri di risposta caratteristici ($T_r=50$ anni), desunti a seguito del processo di normalizzazione

Badia Tedalda (AR)

Microzonazione sismica di 3° livello - SLD ($T_r=50$ anni)

Spettri caratteristici delle microzone sismiche - parametri

ag = 0.084g						
microzona	località	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)
A	BADIA TEDALDA	2.242	1.30	0.097	0.290	2.035
B		2.481	1.58	0.100	0.301	2.131
C		2.828	1.68	0.160	0.481	2.164
D		2.325	1.74	0.103	0.308	2.184
E		2.407	2.25	0.090	0.271	2.357

In figura 27 è possibile visualizzare la distribuzione areale di utilizzo degli spettri caratteristici.

Infine, preme sottolineare alcune regole base per un corretto utilizzo degli spettri caratteristici:

- ❑ Si ritiene opportuno che tale approccio sia consentito per progetti caratterizzati al massimo da **classe d'uso II** (opere ordinarie). Per opere caratterizzate da classe d'uso superiore (opere strategiche e rilevanti) e ricadenti in aree definite a elevata pericolosità sismica sarà necessario rendere obbligatoria la stima dell'azione sismica di progetto mediante adeguate analisi di risposta sismica locale;
- ❑ L'utilizzo degli spettri caratteristici dovrà essere vincolato alla verifica, a cura del professionista incaricato della stima dell'azione sismica di progetto, della conformità del modello di sottosuolo (in termini di affidabilità, significatività e rappresentatività delle analisi effettuate) in corrispondenza del sito di progetto con quello tipico della microzona, anche in riferimento alla quota di riferimento dell'opera in progetto (quota di imposta delle fondazioni);
- ❑ Se i valori dei periodi di ritorno di progetto corrispondono a quelli utilizzati per le analisi di livello 3 sarà possibile utilizzare direttamente i dati presenti nel file .txt (inserito nella cartella MS23/spettri/caratteristici). In alternativa, per piccole variazioni del periodo di ritorno (ad esempio il passaggio dall'azione sismica propria dello **SLD** a quella per **SLO**), assumendo quindi lo stesso grado di non linearità nel comportamento dei terreni, si potranno utilizzare i parametri dipendenti presenti nella "header" del file testo (**S, F0, TB, TC**) combinandoli con i parametri indipendenti (**ag, TD**) propri della scelta progettuale.

La progettazione di opere ricadenti in **classe d'uso I** e **II** ai sensi delle NTC 2018, caratterizzate da uno stato limite corrispondente ad un medesimo periodo di ritorno dello spettro rappresentativo, può avvalersi direttamente di tale spettro, previa verifica della maggior cautela, stabilita in base al valore di accelerazione spettrale per il/i periodo/i di interesse dell'opera, rispetto a quanto ricavabile in termini di spettro di risposta elastico dall'applicazione delle categorie semplificate di sottosuolo. Andrà comunque sempre verificata la reale corrispondenza delle condizioni geologico-tecniche del sito rispetto al contesto riportato nello studio di MS.

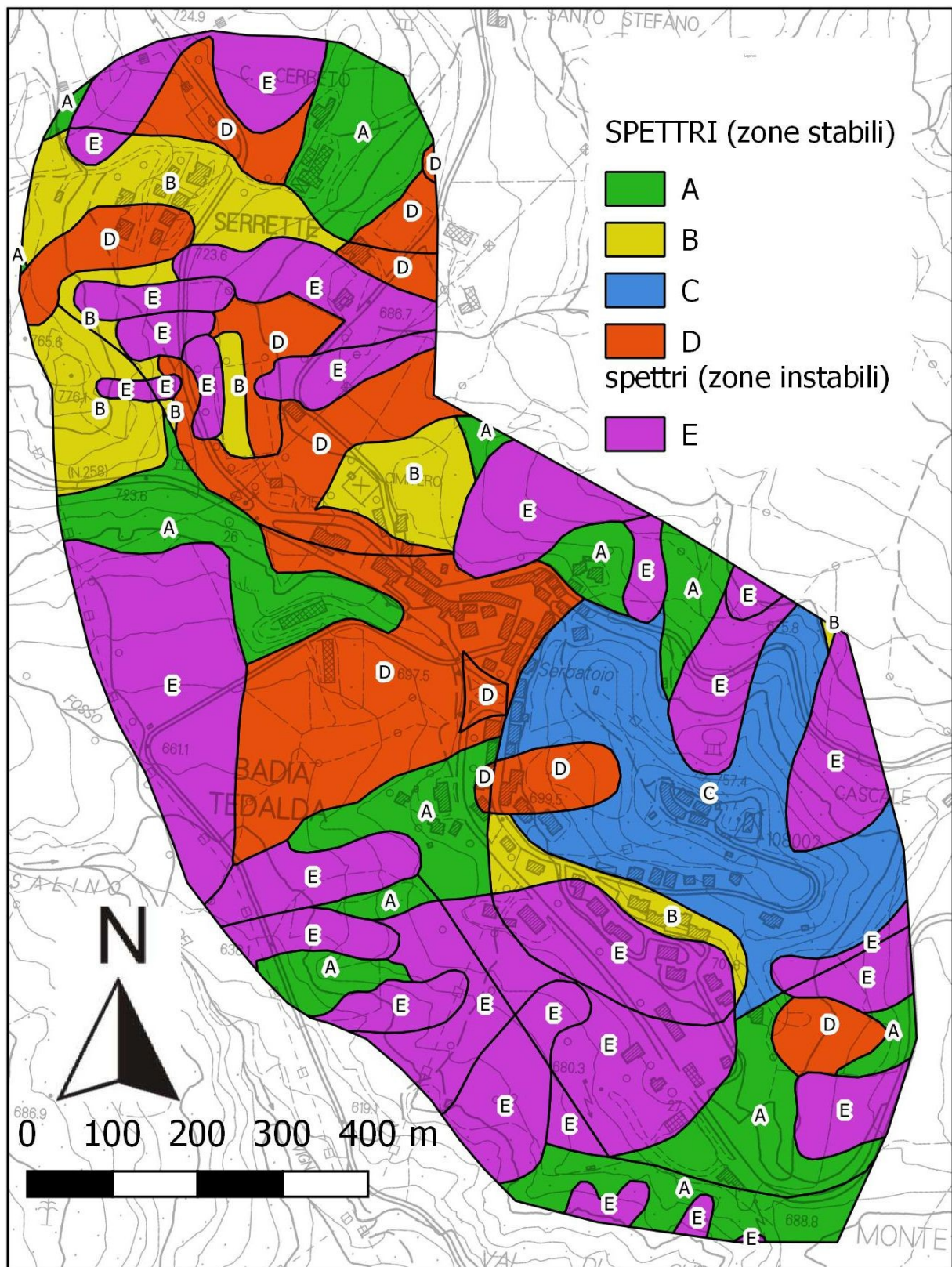


Fig.27 – Distribuzione areale delle aree di utilizzo degli spettri caratteristici



7) CONCLUSIONI

Nel centro abitato di Badia Tedalda è stata realizzata uno studio di Microzonazione Sismica di Terzo Livello (MS3) mediante l'esecuzione di analisi rigorose di Risposta Sismica Locale in assetto bidimensionale.

L'esito di tali simulazioni ha definito un livello di amplificazioni locali globalmente non trascurabile. In particolare:

non esistono aree stabili poiché nell'area di studio non sono presenti mai affioramenti diretti del substrato sismico, dal momento che esso (a prescindere dalle sue caratteristiche fisico-meccaniche e deposizionali) è sempre sormontato da un livello più o meno spinto di alterazione;

le aree con affioramenti delle porzioni alterate del substrato ascrivibile alle formazioni delle Marne di San Paolo (SPL), Monte Morello (MLL) e Marnoso-arenacea (FMA) dimostrano un'amplificazione limitata

le zone con affioramento delle porzioni alterate del substrato ascrivibile alla formazione di Sillano (SIL) dimostrano un'amplificazione maggiore, a causa delle caratteristiche dinamiche più scarse dei livelli di alterazione. La risposta sismica si è rivelata simile a quella rilevata in concomitanza del rilievo nel settore MW sulla formazione delle Marne di San Paolo, dove sono stati rinvenuti elementi amplificativi ascrivibili a motivi topografici;

anche nel settore SE è presente amplificazione topografica in corrispondenza del rilievo sulla formazione di Monte Morello, con amplificazione molto elevata soprattutto in corrispondenza dei periodi più lunghi;

l'amplificazione più elevata nell'intervallo di maggiore interesse (0.1-0.5sec) è relativo alle aree con presenza di fenomeni gravitativi, caratterizzati da proprietà dinamiche molto basse e, quindi, con presenza di elevati contrasti d'impedenza. In queste aree, in funzione delle geometrie sepolte, sono presenti talora anche fenomeni di focalizzazione dell'energia sismica.

L'area è stata discretizzata in 5 aree omogenee sotto il profilo amplificativo, ognuna delle quali caratterizzata da un peculiare spettro medio e, conseguentemente, propri valori di FA.

Tali spettri sono stati normalizzati e vengono resi fruibili per un utilizzo diretto in fase progettuale (basato sulla verifica di tutti gli elementi di verifica e cautela espressi nel precedente capitolo) come previsto dal reg. 5R/20.



BIBLIOGRAFIA

- Baglione M., D'Intinosante V. & Fabbroni P. (2015). *La conoscenza del rischio sismico attraverso gli studi di microzonazione sismica della regione Toscana: risultati, strumenti e metodologie proposte per la pianificazione territoriale*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.
- Circolare NTC (2009). Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici "Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008".
- Commissione tecnica per la Microzonazione sismica (2018). *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR)*. Versione 2.1. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, 2018.
- Commissione tecnica per la Microzonazione sismica (2020). *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica*. Versione 4.2. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, dicembre 2020.
- Commissione tecnica per la Microzonazione sismica (2022). *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazione*. Versione 2.0. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, 2022.
- D'Intinosante V. & GdL Fivizzano (2014). *Definizione del modello integrato di sottosuolo propedeutico alla realizzazione di studi di microzonazione sismica di livello 3 nel centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIII Convegno Nazionale GNGTS, Bologna.
- D'Intinosante V. & GdL Fivizzano (2015a). *Analisi di risposta sismica locale del centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.
- D'Intinosante V. & GdL Fivizzano (2015b). *La microzonazione sismica nel centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.
- Gruppo di Lavoro Fivizzano (2017). *Microzonazione sismica di livello 3: il caso del centro abitato di Fivizzano (MS)*. Roma, 2017.
- Gruppo di lavoro MS (2008). *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle regioni e delle Province autonome. Dipartimento della protezione civile, Roma. 3 vol. e Dvd.
- Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G. & Penna A. (2012). Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms. *Bull Earthquake Eng* (2012) 10:1357–1375. DOI 10.1007/s10518-012-9369-4.
- Ufficio Prevenzione sismica – Regione Toscana (2018). *MICROZONAZIONE SISMICA REGIONALE Redazione delle specifiche tecniche regionali per l'elaborazione di indagini e studi di microzonazione sismica e prescrizioni per le analisi della Condizione Limite per l'Emergenza*
- Zuccolo E., Corigliano M., Taverna L. & Lai C.G. (2011). *Meso-zonazione di un territorio per la definizione di accelerogrammi reali spettro-compatibili*. XIV Convegno ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia". Bari, 18 - 22 settembre 2011.
- Zuccolo E., Rota M., Lai C.G., Taverna L., Corigliano M. & Penna A. (2012). *Definition of Spectrum-Compatible Natural Records for the Italian Territory*. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 24-28 september 2012.
- Zuccolo E., Corigliano M. & Lai C.G. (2014). *Selection of spectrum- and seismo-compatible accelerograms for the Tuscany region in Central Italy*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 305-313.

TAVOLA SINOTTICA – MS2

MZ	Località	ID_HVSR	f0	ID_INDLIN_DH	VS	BEDROCK	CLASSI		FA MS2		
							VS	f0	01-0,5	0,4-0,8	0,7-1,1
2001	Rofelle	P42	0,81			>30	600-800	<1	1,2	1,2	1,2
2001 inst	Rofelle	P61	1			>30	600-800	<1	2	1,4	1,2
2003	Rofelle	P42	0,81			<30	600-800	<1	1,2	1,2	1,3
2007	Rofelle	P45	18,2			<30	600-800	>8	1,2	1,2	1,2
2002	Pratieghi	P33	NO PICCO			<30		NO PICCO	1,2	1,2	1,2
2002 inst	Pratieghi	P32	2,8			<30	200-400	2-3	1,9	2,1	1,5
2011	Pratieghi	P28	2,1			>30	200-400	2-3	1,9	2,2	1,7
2013	Pratieghi	P30	12,9			<30	200-400	>8	1,4	1,1	1,0
2001	Ca' Raffaello	P58	12,7			<30	600-800	NO PICCO	1,2	1,2	1,2
2002	Ca' Raffaello					<30	600-800		1,2	1,2	1,2
2004	Ca' Raffaello	P49	4,2			<30	200-400	4-5	2,0	1,4	1,2
2004	Ca' Raffaello	P48	11,88			<30	200-400	>8	1,4	1,1	1,0
2008	Ca' Raffaello	P60	6,4			<30	200-400	6-7	1,8	1,2	1,1
2010	Ca' Raffaello	P59	4,2			<30	400-600	4-5	1,8	1,3	1,1
2012	Ca' Raffaello					<30	200-400	>8	1,8	1,6	1,5
2001	Caprile		NO PICCO			<30	600-800	NO PICCO	1,2	1,2	1,2
2001 inst	Caprile	P41	12,7			<30	200-400	12,7	1,4	1,1	1,0
2002	Caprile	P38	NO PICCO			<30	600-800	NO PICCO	1,2	1,2	1,2
2002 inst	Caprile	P39	9			<30	200-400	9	1,4	1,1	1,0
2005	Caprile					<30	400-600	>8	1,4	1,1	1,0
2001	Fresciano		NO PICCO			<30		NO PICCO	1,2	1,2	1,2
2001 inst	Fresciano	P36-P37	2			>30	400-600	2	1,8	2	1,5
2003	Fresciano					<30	200-400	6-7	1,7	1,2	1,1