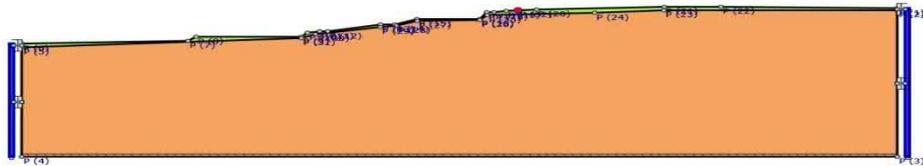


Ubicazione sito: Via del Pino – Petriolo (MC)
Coordinate (datum WGS84): lon. 13.465 lat. 43.221

RELAZIONE DI CALCOLO

ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE



Per Presa Visione



Archivio: Scuola Savini – Petriolo (MC) - Data : 20/11/2018

Oggetto: Analisi di Risposta Sismica Locale per la verifica di vulnerabilità dell'edificio sede della scuola dell'infanzia "Savini" a Petriolo

Committente

Settore Lavori Pubblici
del comune di Petriolo

Progettista

Dott. Geol. Fabrizio Raffaeli

Sommario

1 -	Introduzione	
1.1 -	Impostazione del Problema di Calcolo dell'Amplificazione Locale	
1.2 -	Normativa di Riferimento	
2 -	Risposta Sismica Locale	
3 -	Metodo di calcolo adottato e descrizione del codice di calcolo LSR 2D	
3.1 -	Metodo lineare equivalente	
3.2 -	Soluzione alla singola iterazione mediante FEM.....	
Smorzamento.....		
Free-field boundaries		
3.3 -	Procedimento iterativo	
3.4 -	Interpretazione dei risultati.....	
4 -	Input	
4.1 -	Curve di Decadimento dei Materiali	
4.2 -	Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati	
4.3 -	Accelerogrammi e Spettri di Input.....	
4.4 -	Modello di Calcolo FEM.....	
5 -	Output	
5.1 -	Accelerogrammi Output	
5.2 -	Spettri Output	
5.3 -	Interpretazione dei risultati.....	
5.4 -	Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL.....	

1 - Introduzione

In passato si è potuto osservare, a seguito di terremoti distruttivi, una distribuzione anomala del danneggiamento delle costruzioni, con forti differenziazioni fra zone contigue anche di modeste dimensioni.

Oltre alle intrinseche differenze della vulnerabilità sismica delle costruzioni ed alle differenti caratteristiche dinamiche delle stesse, tali cause possono essere attribuite principalmente alle modificazioni delle caratteristiche del moto sismico indotte da condizioni geologiche e geomorfologiche locali.

Il moto sismico in un determinato sito, infatti, è influenzato da tre parametri importanti:

- meccanismo di sorgente;
- propagazione;
- risposta sismica locale.

I primi due fattori dipendono fortemente dalle caratteristiche dell'evento sismico; questi variano in funzione delle caratteristiche della sorgente (magnitudo e tipo di rottura della faglia) e dalla distanza tra il sito in esame e la sorgente.

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

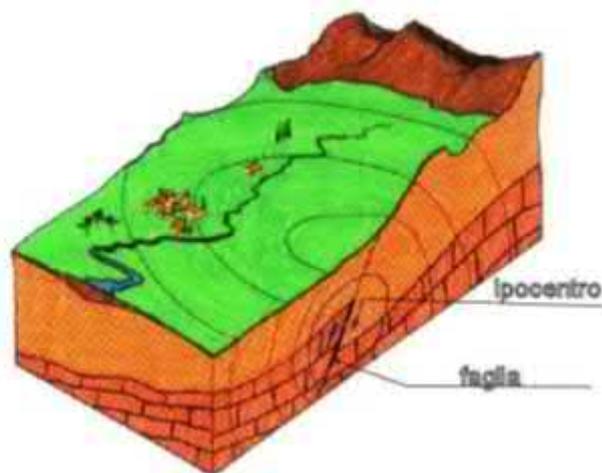


Figura 1. Schema della rottura del terreno e generazione e propagazione delle onde sismiche.

In altre parole le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al., 1999).

Nella Figura 1 è rappresentato uno schema della rottura fragile del terreno in profondità con conseguente generazione di onde che si irradiano dall'ipocentro.

Se si ipotizza di avere installato un sismometro ad una grande distanza dall'ipocentro un possibile segnale registrato potrebbe essere quello mostrato nella Figura 2. Il segnale inizia con l'arrivo delle onde P caratterizzate da alte frequenze a bassa ampiezza. Successivamente arrivano le onde S che si propagano meno velocemente delle P e sono di frequenza più bassa e di maggiore ampiezza. Queste ultime sono in genere la causa dei maggiori danni. Le onde P e quelle S sono chiamate onde di volume per distinguerle da quelle di superficie che sono più lente.



Figura 2. Tipico sismogramma registrato in superficie a grande distanza.

In generale si può dire che le onde generate dalla sorgente sismica sono di due differenti tipi, cioè quelle associate a stati deformativi di compressione-dilatazione volumetrica, dette onde P che si propagano con velocità V_p pari a:

$$V_p = \sqrt{\frac{Mv}{\rho}}$$

con:

$$Mv = \lambda + 2G$$

dove:

- λ = modulo di Lamé del terreno;
- G = modulo elastico del taglio del terreno;
- ρ = densità del volume del terreno;

Per le onde P il moto oscillatorio delle particelle di terreno avviene parallelamente alla direzione di propagazione.

Le onde S sono associate a deformazione di taglio ed hanno una velocità V_s pari a:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Il moto delle particelle di terreno è in tal caso perpendicolare alla direzione di propagazione. Il campo di spostamenti, in genere, è scomposto in due componenti perpendicolari tra di loro: le onde SV polarizzate nel piano verticale contenente la sorgente e le onde SH polarizzate nel piano orizzontale (piano della superficie libera del terreno in direzione perpendicolare al precedente).

Per maggiore chiarezza, se si considera il piano π verticale e contenente la direzione di propagazione dell'onda incidente, il moto della particella di terreno perpendicolare a tale piano costituisce l'onda SH , viceversa il moto nel piano costituisce l'onda SV .

Le onde P e S arrivate in superficie possono trasformarsi parzialmente in onde di diverso tipo (P in S oppure S in P) oppure in onde superficiali, chiamate così perché viaggiano in superficie attenuandosi rapidamente con la profondità. Queste ultime si differenziano in onde di Rayleigh quando il moto

della particella di terreno è in un piano verticale oppure onde di Love quando il moto è in un piano orizzontale.

Con riferimento alla Figura 3, il fenomeno della propagazione delle onde può essere descritto come segue. Nella sua complessità morfologica, litologica e stratigrafica, un territorio può essere rappresentato come un insieme di formazioni superficiali, interessate dai loro fenomeni evolutivi tipici, poggianti su formazioni più profonde, i cui andamenti possono essere stati resi complessi fino alla creazione di affioramenti dai fenomeni tettonici ed orogenetici.

Prevalentemente, le formazioni profonde saranno costituite da rocce ignee o metamorfiche di origine sedimentaria, mentre quelle superficiali saranno di natura sedimentaria più recente, coerenti od incoerenti, e quindi di caratteristiche meccaniche ben differenziate rispetto alle prime. Le onde sismiche che si sono generate in profondità, e che sono già caratterizzate diversamente a seconda del meccanismo proprio della sorgente, subiscono una serie di modificazioni ulteriori (riflessioni e rifrazioni) nell'attraversare la crosta terrestre e giungere fino alle formazioni di base per il sito. Ad una certa distanza dall'epicentro e per una porzione di territorio ragionevolmente limitata, il moto sismico apparirà come un fronte d'onda uniforme propagantesi dal basso verso l'alto, con una certa angolazione rispetto alla verticale, che viene trasmesso dalle formazioni di base a quelle superficiali.

Il moto al suolo tende a non dipendere più solamente dal tipo di rottura della sorgente e a diventare il risultato di due ulteriori meccanismi eventualmente combinati:

- la propagazione delle onde sismiche all'interno delle formazioni di base e dalla conformazione delle frontiere della stessa;
- la risposta dinamica delle formazioni superficiali.

Tutto ciò comporta una non omogeneità del moto vibratorio in superficie che può cambiare da punto a punto anche a breve distanza. Sugli aspetti quantitativi e qualitativi del fenomeno hanno pertanto grande rilevanza diversi fattori quali la natura delle onde sismiche incidenti ed in particolare il meccanismo di sorgente, le diversità fra le caratteristiche meccaniche dei terreni attraversati, ed in particolare tra formazioni di base e superficiali, la conformazione e la giacitura degli strati, la presenza di falde idriche, l'entità dei fenomeni dissipativi ed altri ancora.

Al variare delle condizioni locali, il moto alla superficie risulterà quindi differente per quanto attiene ai suoi caratteri principali e cioè: ampiezza, contenuto in frequenza e durata. Si osserva che tutti e tre questi caratteri sono significativi e concorrono a causare il danneggiamento delle strutture e l'instabilità dei terreni (frane, cedimenti, liquefazioni).

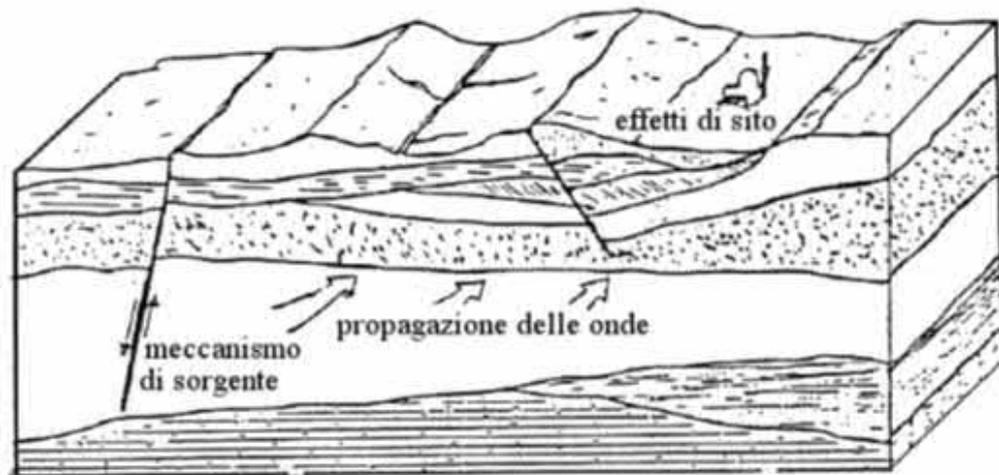


Figura 3. Schema di una situazione reale.

1.1 - Impostazione del Problema di Calcolo dell'Amplificazione Locale

Per illustrare gli aspetti principali del fenomeno della risposta sismica locale, si paragoni il moto in corrispondenza di tre siti, indicati con A, B e C nella Figura 4, posti alla stessa distanza dalla sorgente sismica durante lo stesso evento sismico. Si supponga inoltre che il primo sito sia su un semispazio affiorante (per esempio roccia) e il secondo B su un deposito alluvionale posto al di sopra del semi spazio ed il terzo C su di un rilievo.

In corrispondenza della coltre alluvionale si verifica, rispetto al moto sul semi spazio affiorante, una amplificazione del moto in particolari campi di frequenza e una deamplificazione negli altri campi. Analogamente sul rilievo in C si verificheranno focalizzazioni oppure diradazioni di onde per effetto della forma del rilievo e della direzione di incidenza delle onde.

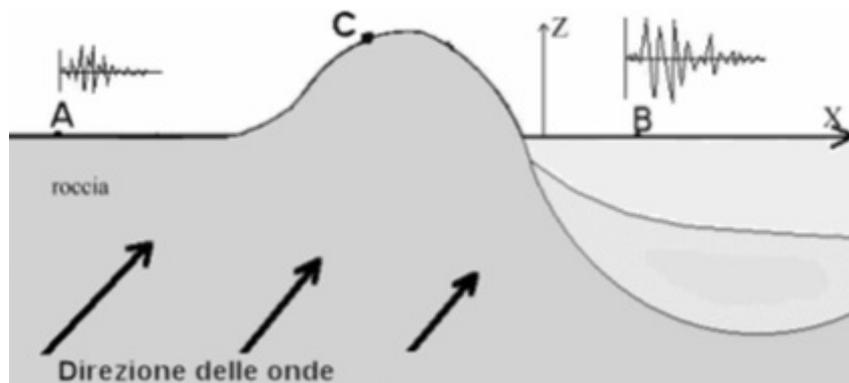


Figura 4. Schema della propagazione delle onde dalla sorgente e delle differenti condizioni locali.

In letteratura si parla di effetti stratigrafici o monodimensionali, nel caso in cui le modifiche che il moto sismico subisce nel propagarsi in direzione prevalentemente verticale, verso la superficie dal sottostante basamento roccioso, siano essenzialmente attribuibili a fenomeni di filtraggio. L'amplificazione delle onde sismiche dipende, in questo caso dalla stratigrafia del sottosuolo, dalle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e del contenuto in frequenza del moto sismico.

Il termine “effetti di bacino” è utilizzato quando le onde incidenti incontrano una valle alluvionale; in tal caso ai fenomeni sopra descritti si sovrappongono quelli dovuti al manifestarsi di fenomeni complessi di interazione tra le onde, che possono sommarsi o elidersi a vicenda, con generazione di onde superficiali. Spesso ai bordi della valle si verificano le maggiori amplificazioni, dette “effetti di bordo”.

Con “effetti topografici” si intendono le modifiche delle caratteristiche del moto sismico causate essenzialmente da fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche per effetto della particolare geometria della superficie (per es. la cresta di un rilievo o un canyon) e sono molto influenzati dalla lunghezza d’onda del moto incidente e dalla direzione di incidenza.

Lo scopo delle analisi di amplificazione sismica locale è quello di determinare il moto in B oppure in C, una volta noto il moto nel sito di riferimento A. Tale moto di riferimento è in genere determinabile in via statistica (analisi di pericolosità) o deterministica dallo studio del meccanismo di rottura della sorgente nell’ipotesi che tra la sorgente stessa ed il sito in esame il mezzo sia omogeneo ed isotropo. Come è facile immaginare le caratteristiche del moto in superficie sono fortemente influenzate, oltre che dalla geometria degli strati e delle loro proprietà meccaniche, anche dalle caratteristiche del moto incidente, cioè dalla direzione di propagazione, dal suo contenuto energetico e dalla direzione del moto delle particelle del terreno.

1.2 - Normativa di Riferimento

Le normative di riferimento per lo studio del problema in esame sono:

- NTC 2018 Cap 7.11.3.1 (Risposta Sismica Locale);
- Leggi Regionali di riferimento (Es L.R regione Calabria n. 35 del 19/10/2009 - Allegato 3 - Effetti di sito per interventi di tipo edilizio).

2 - Risposta Sismica Locale

Come già detto in precedenza, il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

1. Definizione input sismico;
2. Stima dell’accelerazione di base;
3. Dati di disaggregazione;
4. Estrazione, conversione e normalizzazione accelerogrammi di input;
5. Analisi di Risposta Sismica Locale;
6. Inserimento sismostratigrafia di input (derivata da indagine sismica MASW);
7. Esecuzione dell’analisi e restituzione grafica.

Le analisi numeriche che consentono di valutare gli effetti del sito nell’amplificazione delle onde sismiche possono essere distinte in:

- Analisi numeriche monodimensionali;
- Analisi numeriche bidimensionali;

- Analisi numeriche tridimensionali.

Il primo approccio consente di definire una realistica risposta sismica stratigrafica di terreni non affetti da problematiche bidimensionali. Questo approccio è ritenuto la via ufficiale delle NTC 2018 (Cap. 3.2.2) e consente, in determinati casi e mediante il confronto con la relativa categoria di sottosuolo, elementi di risparmio rispetto all'approccio semplificato di normativa, poiché identifica amplificazione per intervalli di periodi solitamente più limitati rispetto a quelli di normativa.

Il secondo approccio è da preferire in quelle situazioni in cui il sottosuolo presenta una geometria variabile in cui, oltre alla profondità, è importante considerare un'altra delle due restanti dimensioni spaziali. Un esempio di situazione che richiede l'utilizzo di modelli bidimensionali è il caso delle aree marginali delle valli alluvionali, in cui alle normali cause di amplificazione del moto sismico si sommano gli effetti di bordo connessi alla geometria del problema.

Il terzo approccio necessita di modelli complessi che richiedono capacità computazionali notevoli; solo recentemente iniziano ad avere una certa diffusione grazie al rapido sviluppo degli strumenti informatici. Il loro utilizzo è principalmente concentrato sulla valutazione delle amplificazioni in presenza di effetti morfologici, data l'importanza assunta in queste analisi dalla conoscenza precisa e dalla gestione di un modello tridimensionale del terreno.

3 - Metodo di calcolo adottato e descrizione del codice di calcolo LSR 2D

Il codice di calcolo LSR 2d, alla stregua di software ben noti dalla comunità scientifica (es. QUAD4 e QUAD4M), consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Qualora la stratigrafia in esame non presenti problematiche di carattere bidimensionale è comunque possibile studiare il problema monodimensionale grazie ad una discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

3.1 - Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche, adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Figura 5. La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata $\dot{\gamma}$, secondo la relazione:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$

dove:

- G = Modulo di taglio;
- η = viscosità del mezzo;

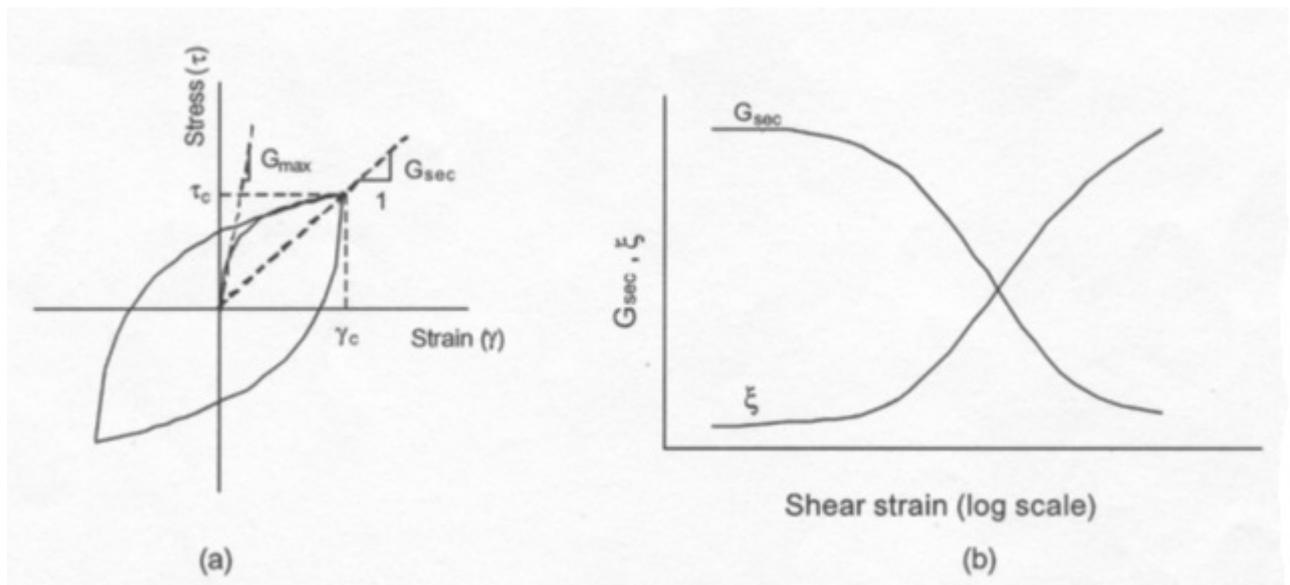


Figura 5. Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Figura 5. Il modulo di taglio equivalente, G , è preso considerando il modulo di taglio secante G_s . È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

La curva $G_s - \gamma$ non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva $\tau - \gamma$ e sussiste la seguente relazione:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma}\gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento D , definito come:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$

dove:

- ΔW^{dissp} = quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- W^{max} = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico;

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento (Figura 5b).

3.2 - Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

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 che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (figura 6) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

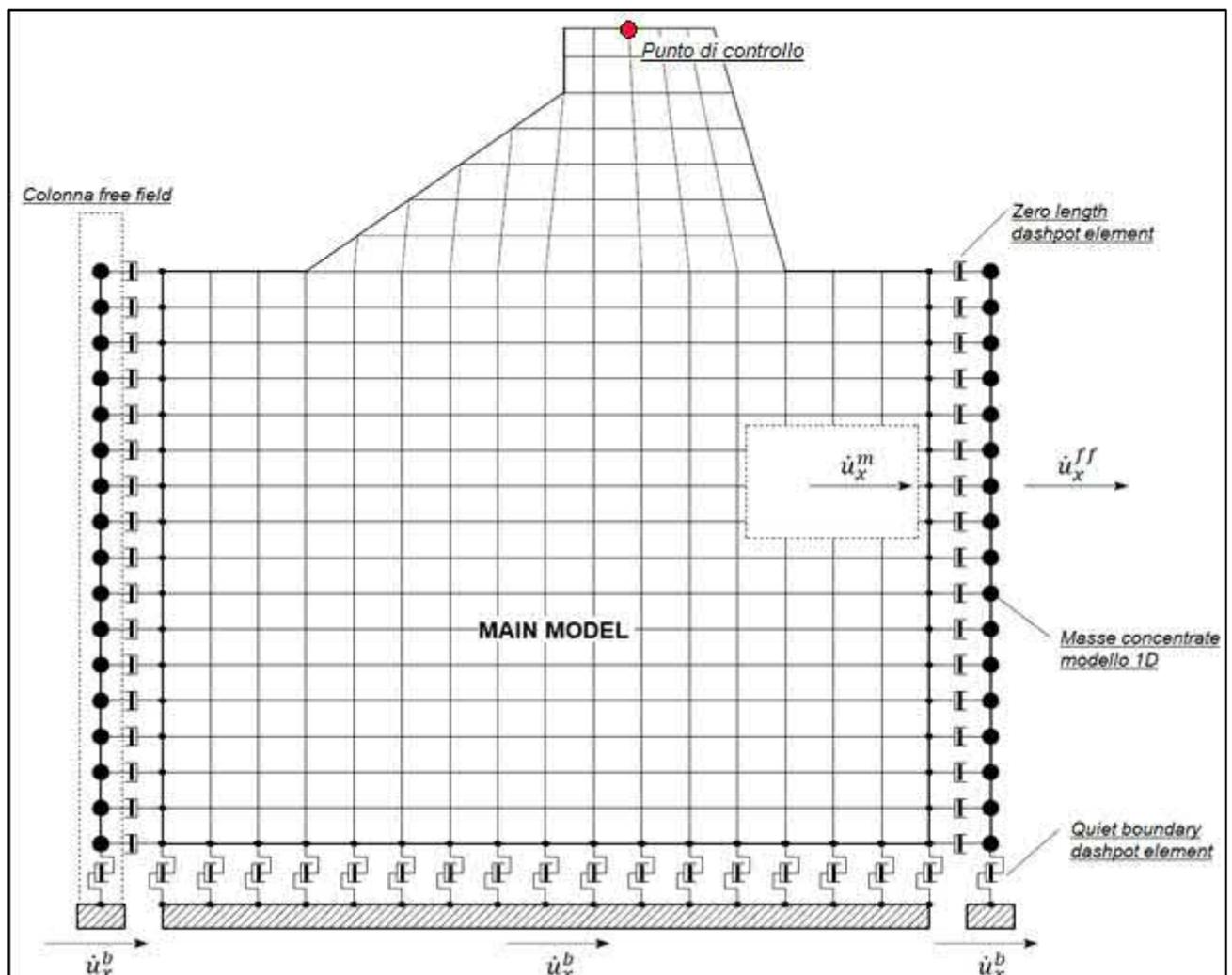


Figura 6. Discretizzazione FEM del deposito di terreno.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g$$

dove:

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

Tale equazione vale per ogni istante di tempo tn e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni tn viene ottenuta a partire dalle seguenti relazioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma)\ddot{u}_{n-1} + \gamma\ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta)\ddot{u}_{n-1} + 2\beta\ddot{u}_n]$$

dove:

- Δt = incremento temporale tra l'istante di tempo tn e $tn - 1$;
- β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25;
- γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50;

Smorzamento

La matrice di smorzamento del sistema viene ottenuta mediante l'assemblaggio delle matrici di smorzamento dei singoli elementi, queste ultime ottenute a loro volta come:

$$C_q = \alpha_q M_q + \beta_q K_q$$

dove:

- α_q e β_q = coefficienti di smorzamento alla Reyleigh;

Tali coefficienti vengono ottenuti a partire dal rapporto di smorzamento viscoso del singolo elemento e dalla relazione seguente:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma)\ddot{u}_{n-1} + \gamma\ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta)\ddot{u}_{n-1} + 2\beta\ddot{u}_n]$$

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

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

dove:

- ω_1 = frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega_2 = n * \omega_1$ con $n = \omega_i / \omega_1$ (approssimato all'intero pari più grande) e ω_i frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

Free-field boundaries

Le condizioni di free-field sulle frontiere laterali vengono implementate mediante l'accoppiamento di smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne free-field) in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero. Le coordinate dei nodi delle frontiere laterali del modello e delle colonne free-field possono essere uguali. È necessario, affinché tali condizioni al contorno siano applicabili, che le frontiere laterali del modello siano perfettamente verticali. Le forze interne agli smorzatori possono essere ottenute mediante le seguenti equazioni:

$$F_x = -\rho V_p (\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff}) A \quad (1)$$

$$F_y = -\rho V_s (\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff}) A \quad (2)$$

dove:

- ρ : densità di massa del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- V_p : velocità delle onde P del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- V_s : velocità delle onde S del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- A : area di influenza relativa al nodo su cui agisce lo smorzatore;
- \dot{u}_x^m : velocità del nodo del modello in direzione x;
- \dot{u}_y^m : velocità del nodo del modello in direzione y;
- \dot{u}_x^{ff} : velocità del nodo della colonna free-field in direzione x;
- \dot{u}_y^{ff} : velocità del nodo della colonna free-field in direzione y.

Le componenti della velocità dei nodi delle colonne laterali ad ogni istante di tempo vengono ottenute mediante una soluzione numerica monodimensionale a masse concentrate dell'equazione di propagazione delle onde. Tale soluzione è affidata ad un processo di calcolo che opera in parallelo rispetto a quello impiegato per la soluzione del modello principale. In altre parole, per il generico passo di integrazione temporale, vengono dapprima ottenute le componenti delle velocità delle colonne di campo libero attraverso la soluzione 1D, per poi essere convertite in carichi applicati al modello principale mediante le equazioni (1) e (2).

3.3 - Procedimento iterativo

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. Facendo riferimento alla Figura 7, lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico:

- definizione di curve $G = G(\gamma)$ e $D = D(\gamma)$ per i diversi strati;
- inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni (G_0 e D_0);
- calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato (γ_1 , Figura 7);

- aggiornamento dei valori $G1 = G(\gamma1)$ e $D1 = D(\gamma1)$;
- iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_i - 1 \sim \gamma_i$).

3.4 - Interpretazione dei risultati

Il risultato della procedura iterativa sopradescritta non è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM. Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione in superficie in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica.

4 - Input

Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai dati di input utilizzati per lo studio della risposta sismica locale del deposito.

Scelta input sismico

SLV

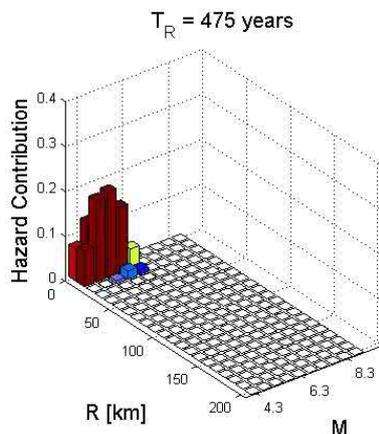
Categoria A

Classe topografica T1

Cu 1.5

Vita nominale 50

disaggregazione



parametri di ricerca

```
=====
REXELite ELABORATION SUMMARY
=====
```

Target spectrum

```
=====
```

Latitude: 43.220945

Longitude: 13.463864

Site classification: A

Topography: 1

Nominal life [years]: 50

Building functional type (Cu): 1.5

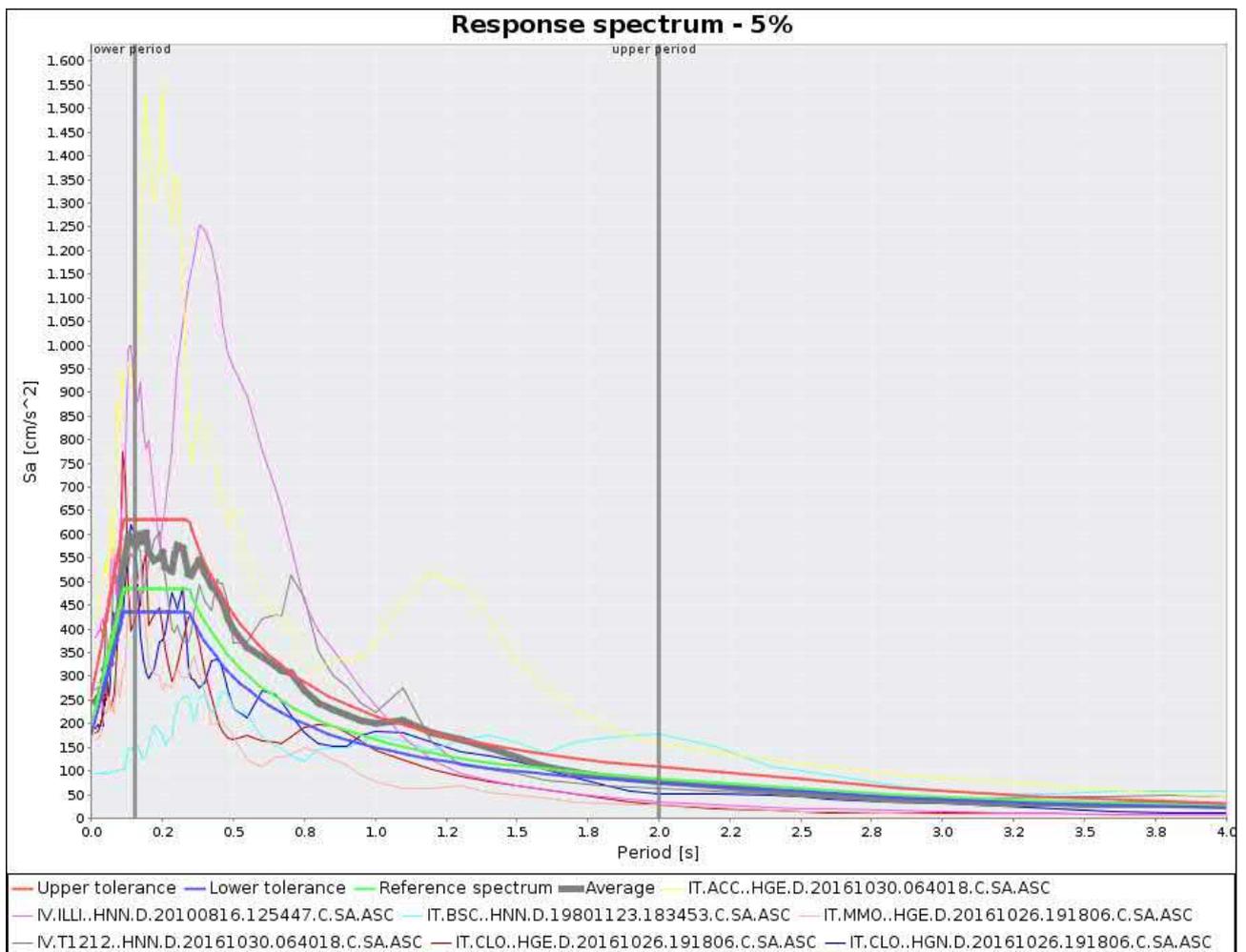
Limit state probability : 0.1

Preliminary record search

```

=====
Station site classification: A,A*
Magnitude min: 4.5
Magnitude max: 6.5
Types of magnitude considered: WL
Epicentral distance min [km]: 0.0
Epicentral distance max [km]: 35.0
Include late trigger events: no
Include analog recordings: yes
Spectrum matching parameters and analysis options
=====
Period range min [s]: 0.15
Period range max [s]: 2.0
Tolerance below average [%]: 10.0
Tolerance above average [%]: 30.0
Scaled records: no
    
```

Spettri



SLD

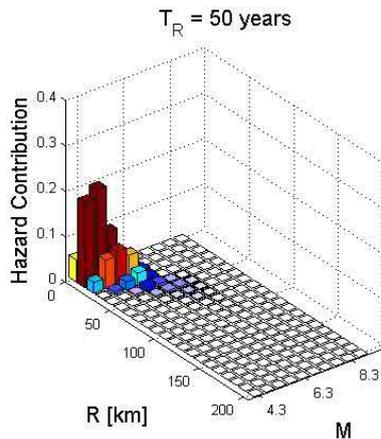
Categoria A

Classe topografica T1

Cu 1.5

Vita nominale 50

disaggregazione



parametri di ricerca

REXELite ELABORATION SUMMARY

=====

Target spectrum

=====

Latitude: 43.220945

Longitude: 13.463864

Site classification: A

Topography: 1

Nominal life [years]: 50

Building functionaltype (Cu): 1.5

Limit state probability : 0.63

Preliminary record search

=====

Station site classification: A,A*

Magnitude min: 4.0

Magnitude max: 6.5

Types of magnitude considered: WL

Epicentral distance min [km]: 0.0

Epicentral distance max [km]: 50.0

Include late trigger events: no

Include analog recordings: yes

Spectrum matching parameters and analysis options

=====

Period range min [s]: 0.15

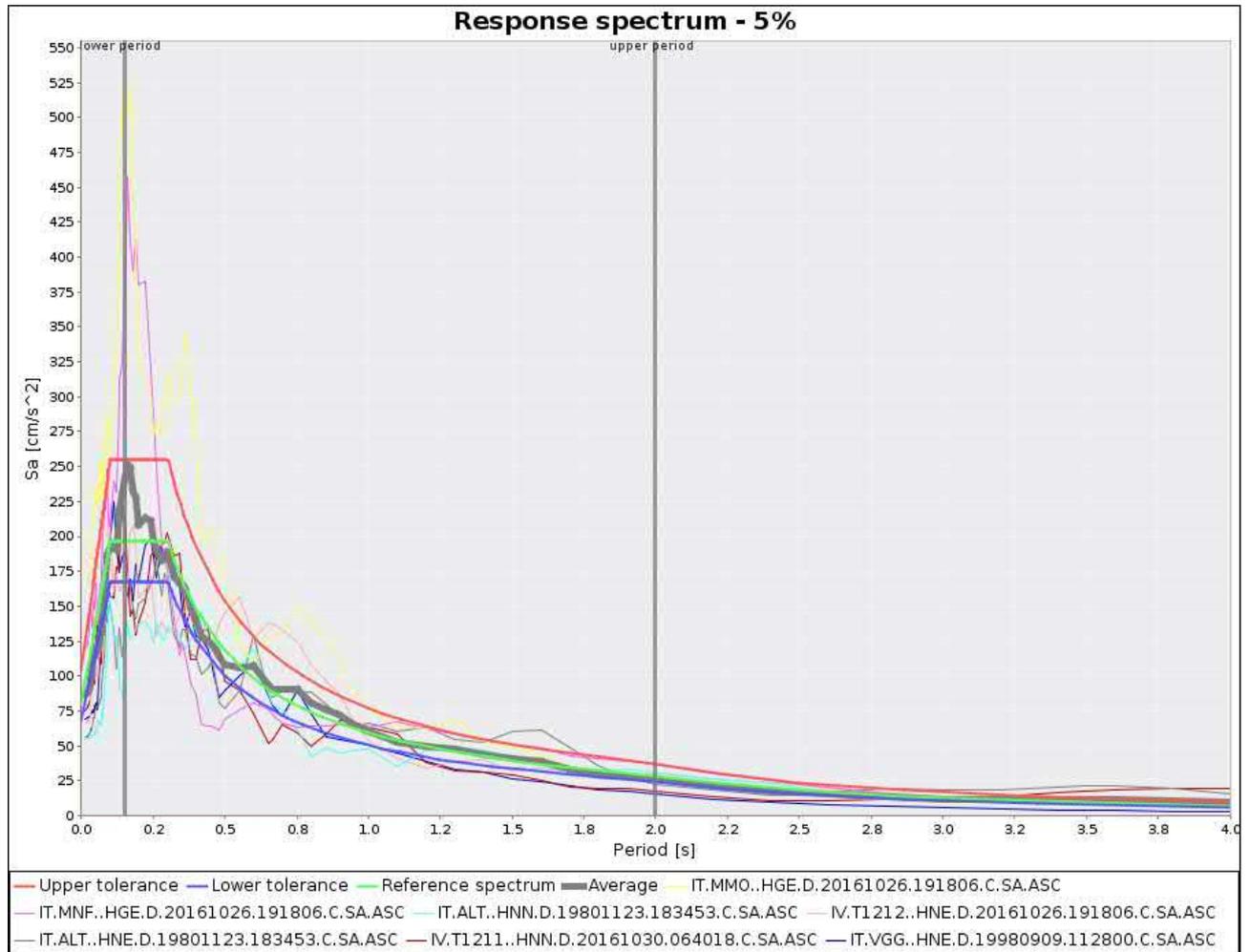
Period range max [s]: 2.0

Tolerance below average [%]: 15.0

Tolerance above average [%]: 30.0

Scaled records: no

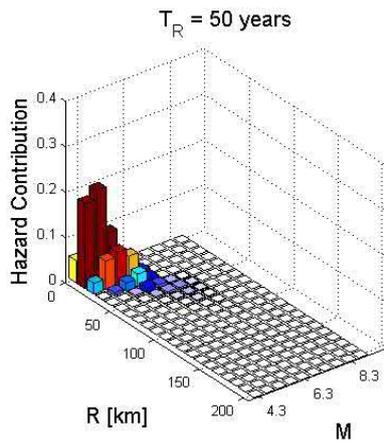
Spettri



SLO

Categoria A
 Classe topografica T1
 Cu 1.5
 Vita nominale 50

disaggregazione



parametri di ricerca

REXELite ELABORATION SUMMARY

=====

Target spectrum

=====

Latitude: 43.220945
 Longitude: 13.463864
 Site classification: A
 Topography: 1
 Nominal life [years]: 50
 Building functionaltype (Cu): 1.5
 Limit state probability : 0.81

Preliminary record search

=====

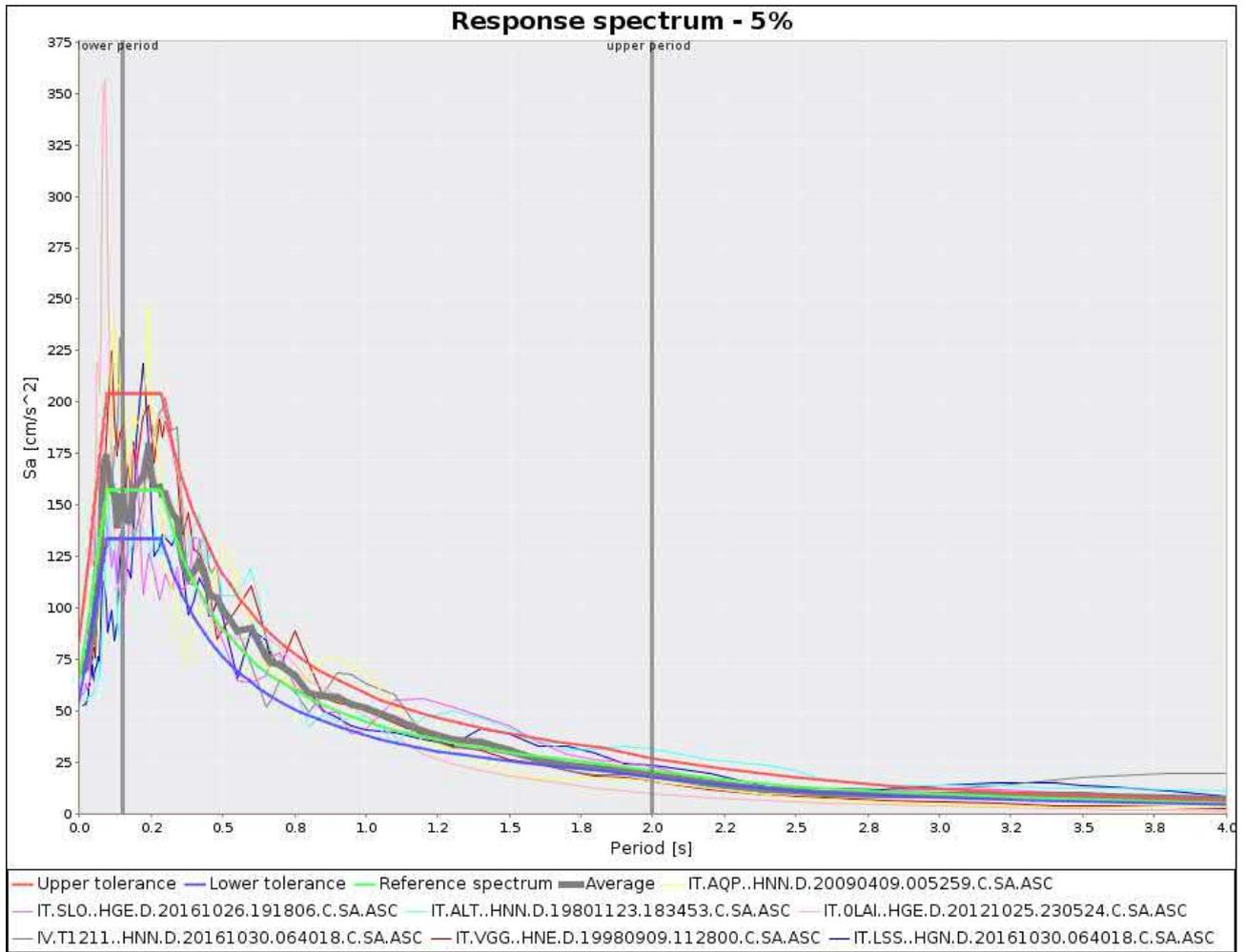
Station site classification: A,A*
 Magnitude min: 4.0
 Magnitude max: 6.5
 Types of magnitude considered: WL
 Epicentral distance min [km]: 0.0
 Epicentral distance max [km]: 50.0
 Include late trigger events: no
 Include analog recordings: yes

Spectrum matching parameters and analysis options

=====

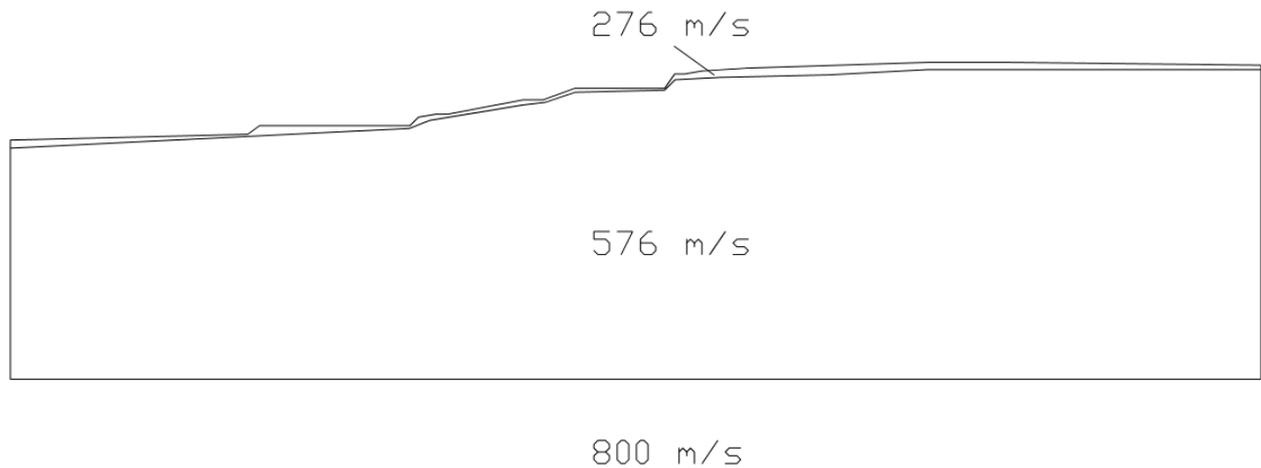
Period range min [s]: 0.15
 Period range max [s]: 2.0
 Tolerance below average [%]: 15.0
 Tolerance above average [%]: 30.0
 Scaled records: no

Spettri



Scelta modello sismostratigrafico

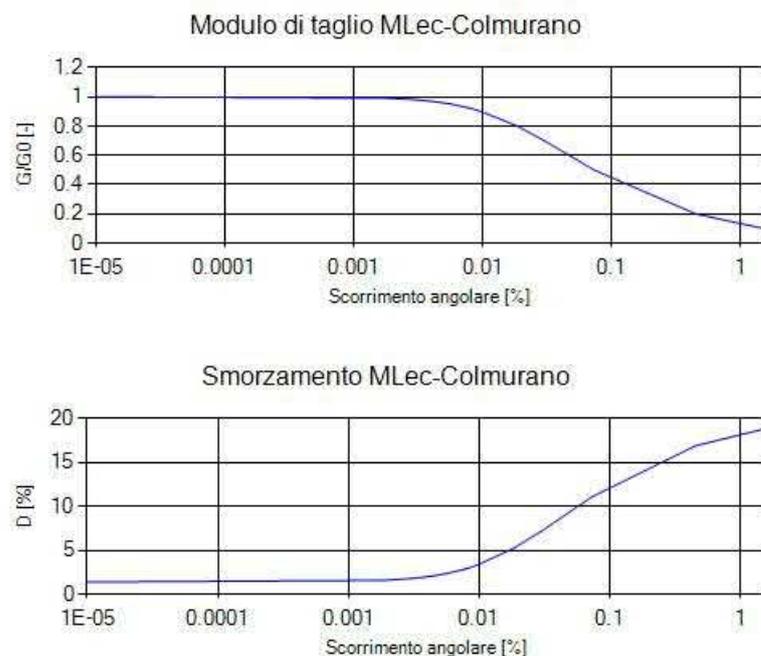
Le Vs misurate con la masw congiuntamente alle misure hv, danno risultati congruenti. Si è utilizzata la seguente sismostratigrafia, considerando gli strati con velocità che non differiscono significativamente sia verticalmente che orizzontalmente, la risposta sismica locale 2D terrà conto infatti, solo degli aspetti morfologici del rilievo:

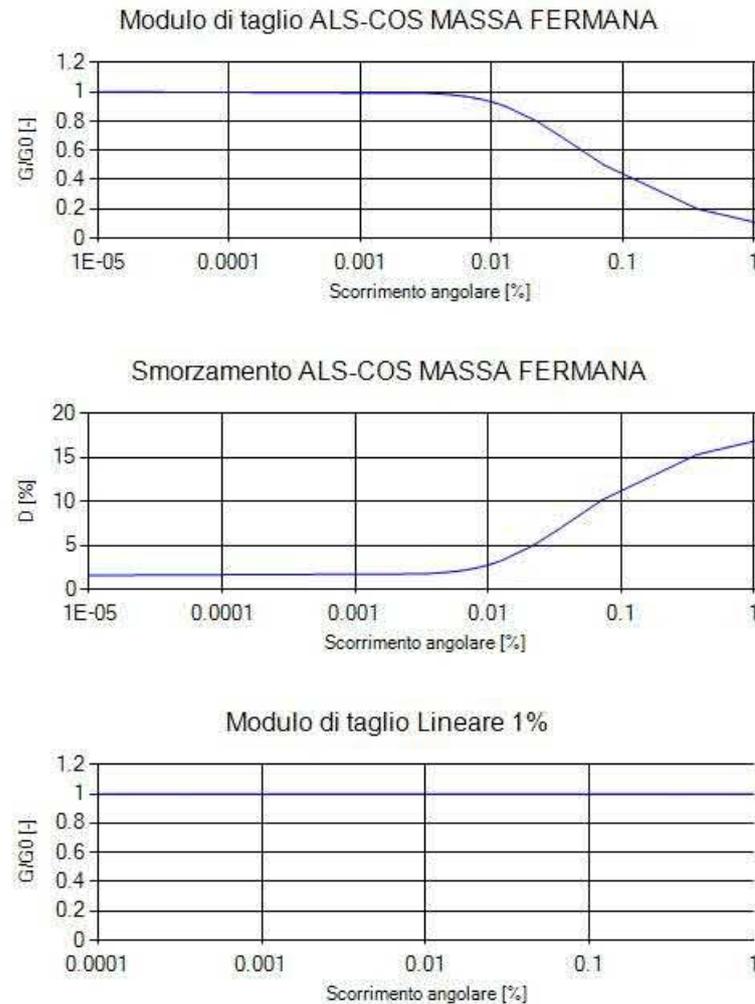


4.1 - Curve di Decadimento dei Materiali

All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio G ed un aumento del rapporto di smorzamento D . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento una relativa a G ed una D .

Di seguito si riportano le curve di riferimento utilizzate nell'analisi:





4.2 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati

Sulla base del cosiddetto volume significativo di terreno interessato dal problema in esame, viene definita una stratigrafia di progetto che rappresenta l'andamento delle singole lenti di terreno in una sezione verticale.

Tale stratigrafia viene rappresentata nel piano verticale X-Z mediante una serie di spezzate ognuna delle quali identifica l'andamento del singolo strato. La prima di tali spezzate serve ad identificare l'orografia della porzione di sito oggetto di studio.

Di seguito si riporta una rappresentazione grafica della stratigrafia di progetto:

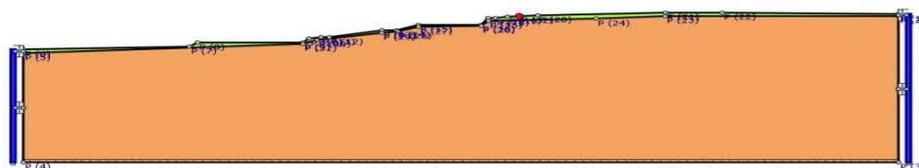


Figura 7. Stratigrafia di progetto.

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

Strato	Descrizione	ρ [Kg/m ³]	V_s [m/s]	γ	Curva decadimento
ML		1950.00	260.00	0.43	MLec-Colmurano
ALS		2100.00	576.00	0.42	ALS-COS MASSA FERMANA

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche strati.

dove:

- ρ = densità di massa del singolo strato;
- V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato;

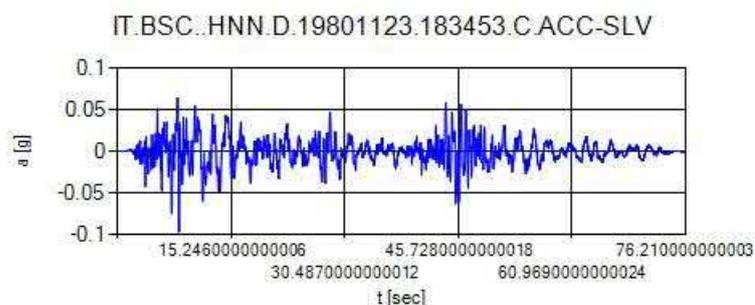
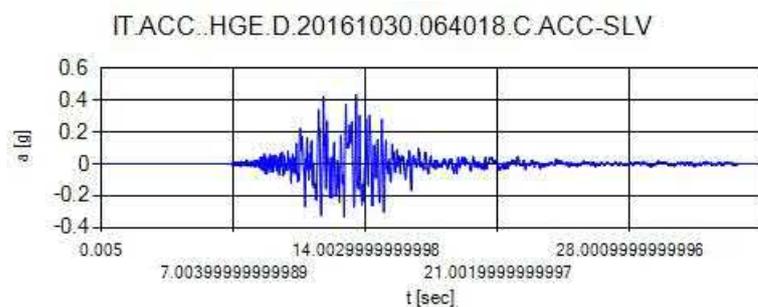
Ai lati della sezione sono state applicate delle colonne unidimensionali che simulano la condizione free field.

4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input

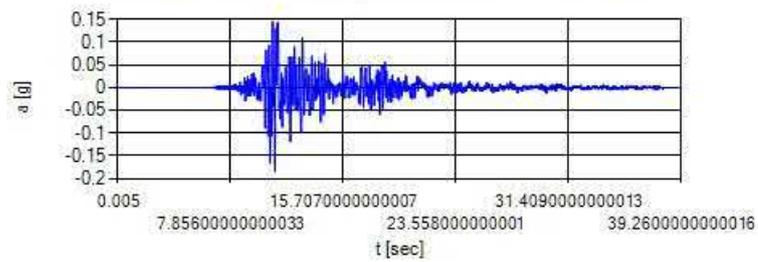
Gli accelerogrammi di input relativi allo stato limite in esame (ad esempio SLV) possono essere ottenuti tramite un'analisi con l'utilizzo dell'applicativo software Rexelite, versione semplificata del software Rexel (Iervolino e altri 2009) sviluppato da I.Iervolino e C.Galasso, dell'Università Federico II di Napoli. Il programma ad oggi contiene i records degli accelerogrammi relativi ai sismi verificatisi in Italia (scegliendo Italian Building code) compresi gli eventi sismici del 2016 (Italia centrale). Il database utilizzato è disponibile sul sito <http://itaca.mi.ingv.it>.

Di seguito si riportano gli accelerogrammi di progetto riferiti ad una condizione detta di "outcrop"

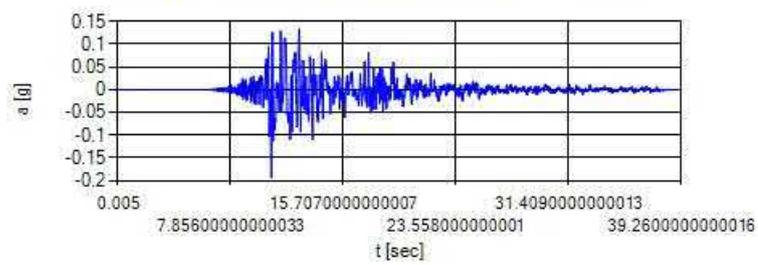
SLV



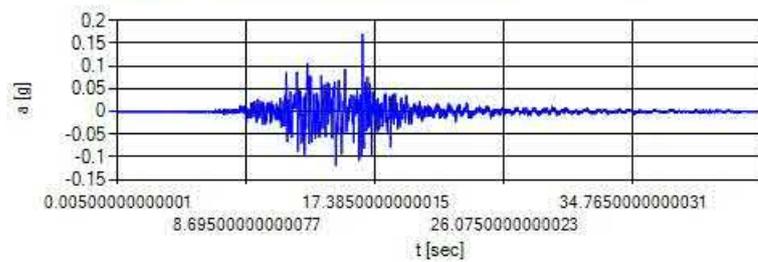
IT.CLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC-SLV



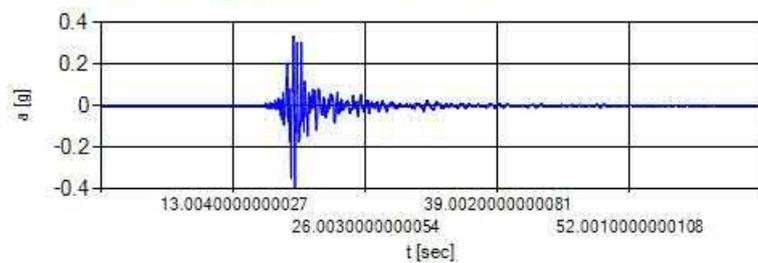
IT.CLO..HGN.D.20161026.191806.C.ACC-SLV



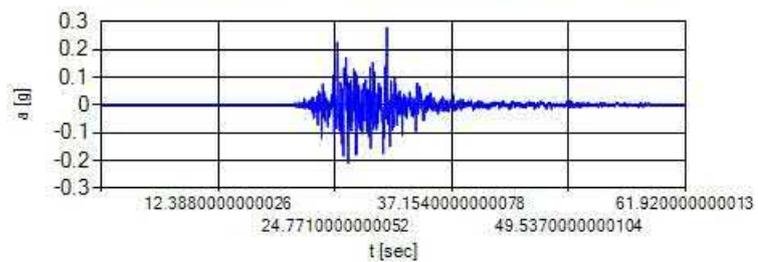
IT.MMO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC-SLV



IV.ILLI..HNN.D.20100816.125447.C.ACC-SLV

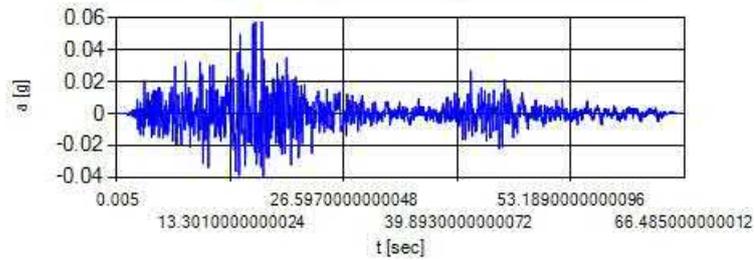


IV.T1212..HNN.D.20161030.064018.C.ACC-SLV

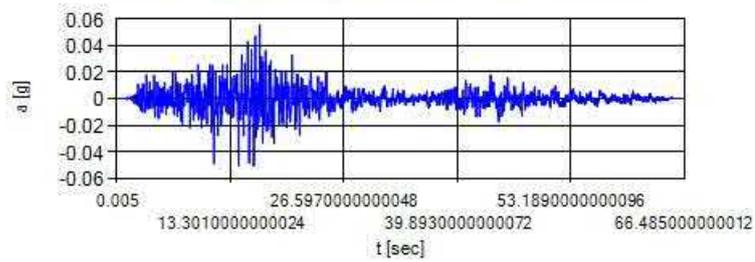


SLD

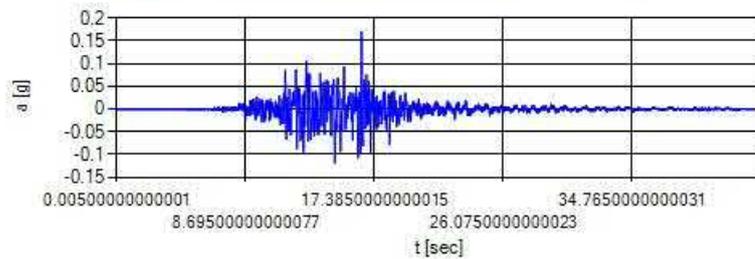
IT.ALT..HNE.D.19801123.183453.C.ACC-SLD



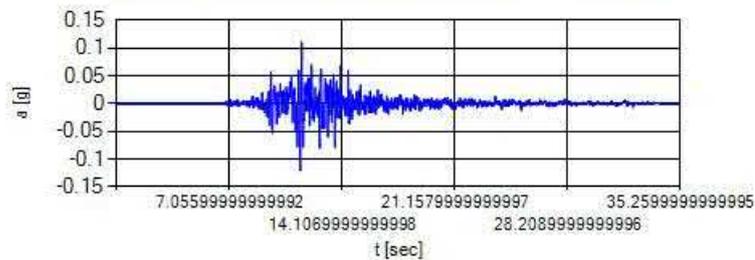
IT.ALT..HNN.D.19801123.183453.C.ACC-SLD



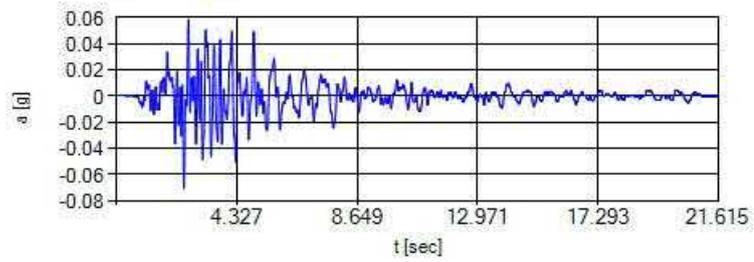
IT.MMO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC-SLD



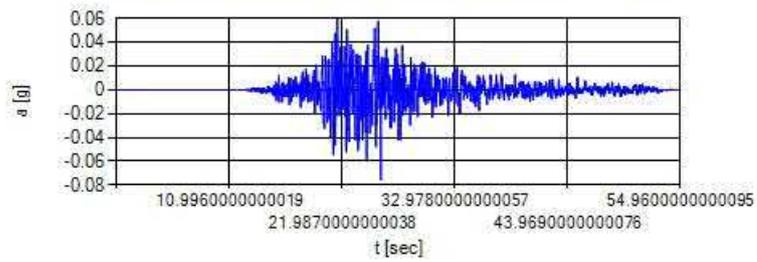
IT.MNF..HGE.D.20161026.191806.C.ACC-SLD



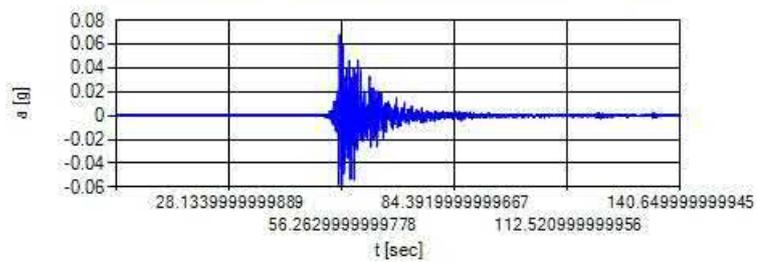
IT.VGG.HNE.D.19980909.112800.C.ACC-SLD



IV.T1211.HNN.D.20161030.064018.C.ACC-SLD

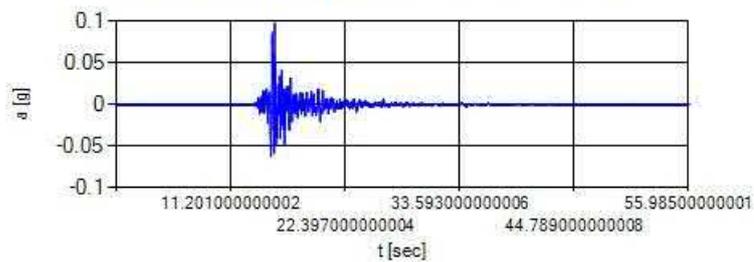


IV.T1212.HNE.D.20161026.191806.C.ACC-SLD

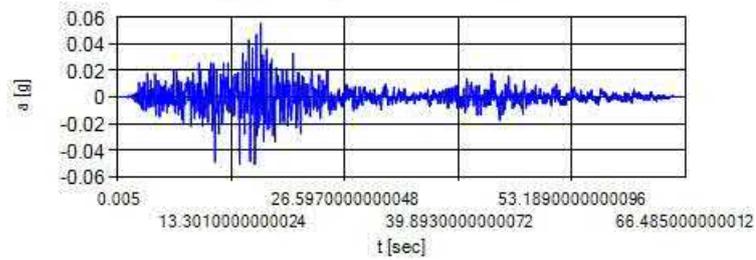


SLO

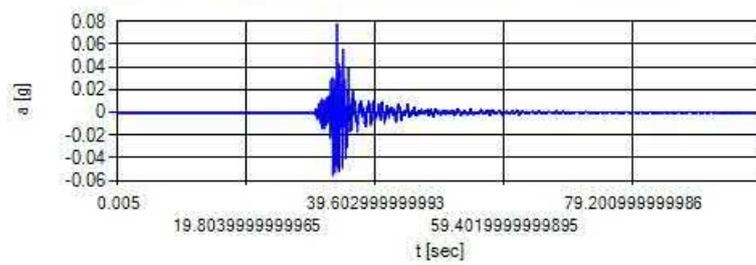
IT.0LAI.HGE.D.20121025.230524.C.ACC-SLO



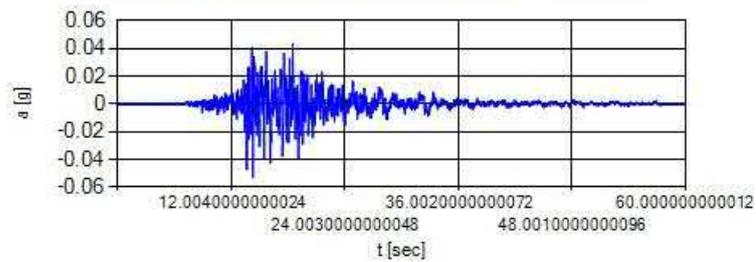
IT.ALT..HNN.D.19801123.183453.C.ACC-SLO



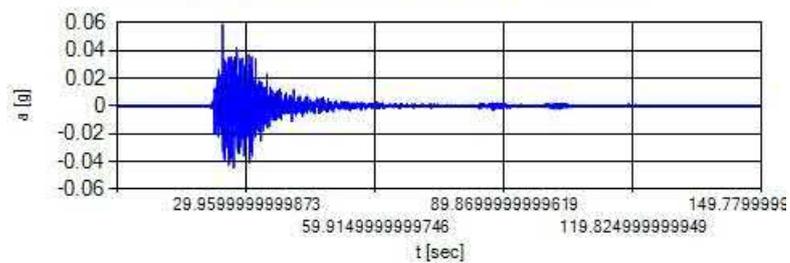
IT.AQP..HNN.D.20090409.005259.C.ACC-SLO



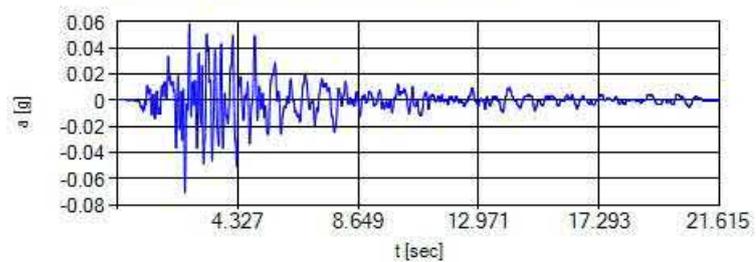
IT.LSS..HGN.D.20161030.064018.C.ACC-SLO

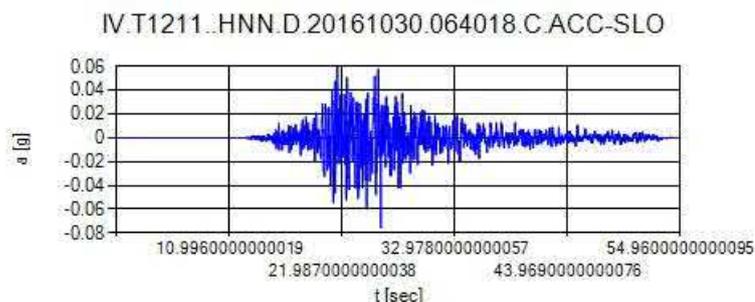


IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC-SLO



IT.VGG..HNE.D.19980909.112800.C.ACC-SLO





4.4 - Modello di Calcolo FEM

Il modello di calcolo agli elementi finiti da utilizzare per lo studio della problematica in esame viene di seguito descritto.

Per ogni analisi, nel caso più generale, è necessario specificare due componenti di sollecitazione. In particolare vi sono, per ogni condizione, un accelerogramma di in direzione X (Orizzontale), ed uno in direzione Z (Verticale).

Ad ogni analisi corrispondono una serie di condizioni di carico. Per ognuna di esse vengono specificate due componenti di accelerazione di input in outcrop. In tabella vengono riportate le condizioni di carico relative al caso in esame:

SLV

Condizione	Accelerogramma X	Accelerogramma Z
CDC (2)	IT.BSC..HNN.D.19801123.183453.C.ACC-SLV	Zero
CDC (3)	IT.CLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC-SLV	Zero
CDC (4)	IT.CLO..HGN.D.20161026.191806.C.ACC-SLV	Zero
CDC (5)	IT.MMO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC-SLV	Zero
CDC (7)	IV.T1212..HNN.D.20161030.064018.C.ACC-SLV	Zero
CDC (1)	IT.ACC..HGE.D.20161030.064018.C.ACC-SLV	Zero

Tabella 2. Condizioni di carico.

SLD

Condizione	Accelerogramma X	Accelerogramma Z
CDC (1)	IT.ALT..HNE.D.19801123.183453.C.ACC-SLD	Zero
CDC (2)	IT.ALT..HNN.D.19801123.183453.C.ACC-SLD	Zero
CDC (4)	IT.MNF..HGE.D.20161026.191806.C.ACC-SLD	Zero
CDC (5)	IT.VGG..HNE.D.19980909.112800.C.ACC-SLD	Zero
CDC (6)	IV.T1211..HNN.D.20161030.064018.C.ACC-SLD	Zero
CDC (7)	IV.T1212..HNE.D.20161026.191806.C.ACC-SLD	Zero

Tabella 3. Condizioni di carico.

SLO

Condizione	Accelerogramma X	Accelerogramma Z
CDC (1)	IT.OLAI..HGE.D.20121025.230524.C.ACC-SLO	Zero
CDC (2)	IT.ALT..HNN.D.19801123.183453.C.ACC-SLO	Zero
CDC (3)	IT.AQP..HNN.D.20090409.005259.C.ACC-SLO	Zero
CDC (4)	IT.LSS..HGN.D.20161030.064018.C.ACC-SLO	Zero

CDC (5)	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC-SLO	Zero
CDC (6)	IT.VGG..HNE.D.19980909.112800.C.ACC-SLO	Zero
CDC (7)	IV.T1211..HNN.D.20161030.064018.C.ACC-SLO	Zero

Tabella 4. Condizioni di carico.

Il modello FEM viene ottenuto mediante una discretizzazione con elementi finiti piani a tre o a quattro nodi del dominio. Il passo ed i rapporti di infittimento della mesh in corrispondenza dei punti di controllo sono dati di input e possono variare a seconda del caso. Il passo della mesh deve soddisfare la seguente relazione:

$$p \leq \frac{V_{s,min}}{8f_{max}}$$

dove:

- p = passo della mesh;
- $V_{s,min}$ = velocità delle onde di taglio minima presente nel modello;
- f_{max} = frequenza massima che si vuole analizzare;

Di seguito si riportano i nodi del modello con le rispettive coordinate nel riferimento X-Z:

Nodo	X [m]	Z [m]
1	432.01	0.00
2	432.01	0.00
3	432.01	0.00
10934	41.33	0.00
10935	44.86	0.00
10936	37.54	0.00

Tabella 5. Nodi del modello FEM.

Di seguito gli elementi:

Elemento	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
1	16	421	154	-
2	16	26	421	-
3	26	155	420	-
Ecc.	---	---	---	---

Tabella 5bis. Elementi del modello FEM.

Le condizioni al contorno del problema in esame (posizione del bedrock) vengono prese in considerazione sul modello FEM mediante l'applicazione di smorzatori viscosi sui nodi facenti parte della porzione di terreno a contatto con il bedrock. Tali smorzatori esprimono due componenti (una orizzontale ed una verticale) di forza proporzionali alla velocità. Le costanti di smorzamento C_x e C_z sono rispettivamente:

$$C_x = \rho b * V_{sb} * V_{sb} \text{ e } C_z = \rho b * V_{pb} * V_{pb}$$

dove:

- ρb = densità di massa del substrato;
- V_{sb} = velocità delle onde di taglio del substrato;
- V_{pb} = velocità delle onde p del substrato;

Sul modello possono essere applicati dei vincoli fissi nel caso in cui il substrato lo si volesse modellare come infinitamente rigido o per simulare un comportamento monodimensionale. In tal caso vengono applicati su tutti i nodi del modello dei vincoli in direzione verticale, in modo da consentire solo deformazioni di taglio.

Di seguito vengono indicati i vincoli applicati al modello (B: "bloccato"; L: "libero") :

Nodo	Direzione X	Direzione Z
1	L	B
2	L	B
3	L	B
744	L	B
745	L	B

Tabella 6. Vincoli esterni del Modello FEM.

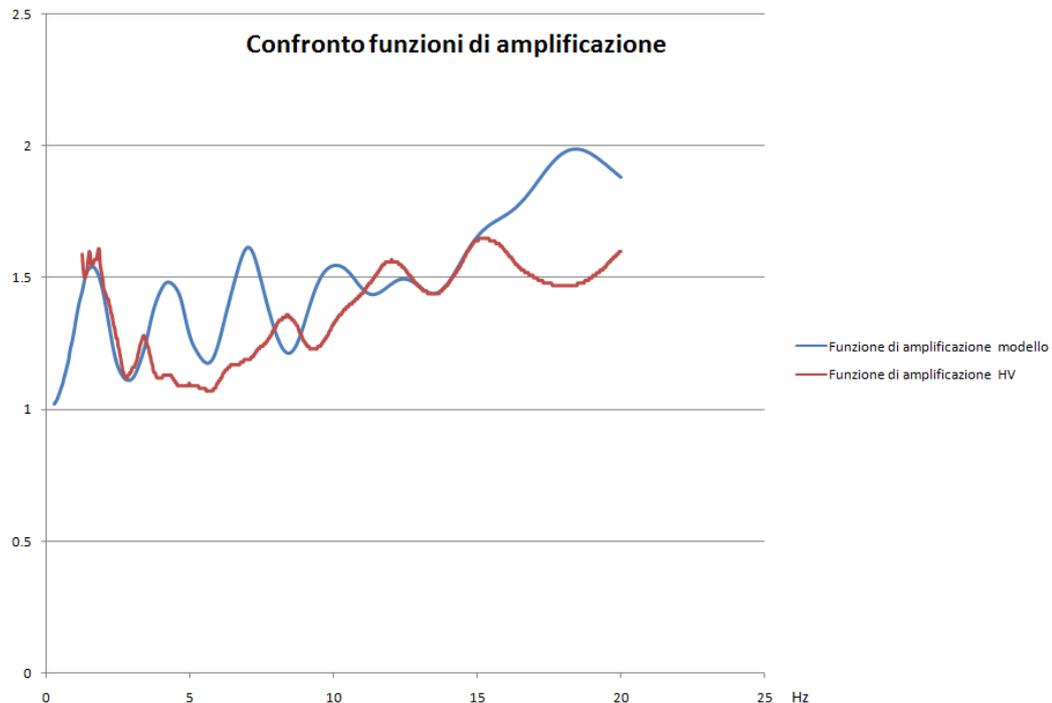
I cinematismi di controllo, in corrispondenza dei quali vengono monitorate le storie temporali, sono di seguito riportati:

ID Nodo	Target in X	Target in Z
1	NO	NO
2	NO	NO
3	NO	NO
10935	NO	NO
10936	NO	NO

Tabella 7. Cinematismi di controllo.

4.5 - Taratura del modello

Il modello è stato tarato confrontando la funzione di amplificazione calcolata attribuendo ai terreni una condizione elastico lineare con deformazione 1% e la curva hv2 misurata in sito tramite l'indagine sismica passiva.



Si ritiene che l'andamento delle due curve sia congruente e accettabile l'errore tra la misura reale e quella calcolata.

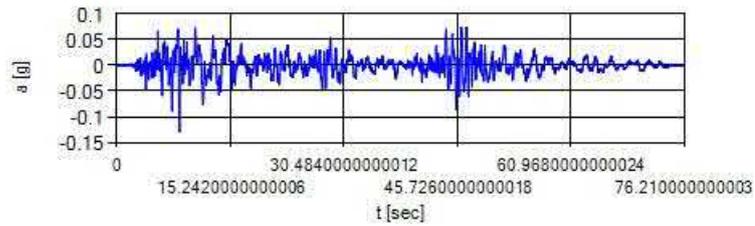
5 - Output

Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai risultati del calcolo.

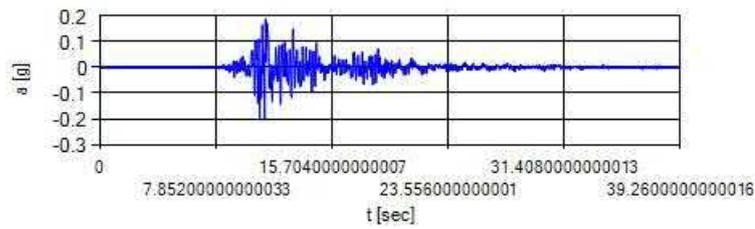
5.1 - Accelerogrammi Output

Di seguito vengono riportati gli accelerogrammi relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

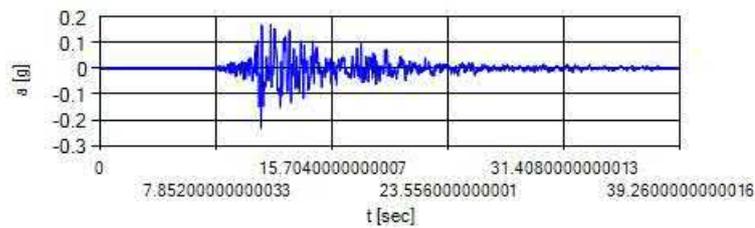
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 32DirezioeX)



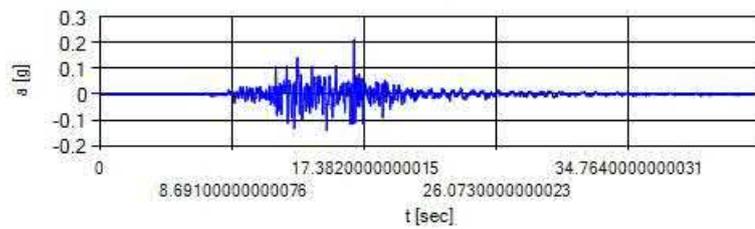
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 32DirezioeX)



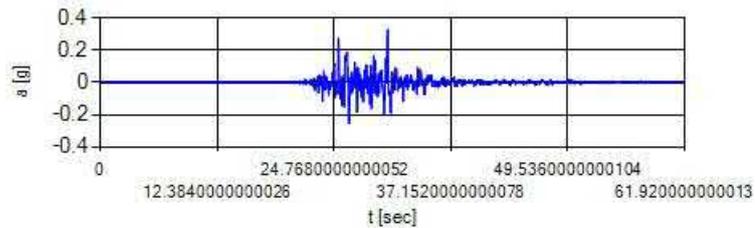
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione3) - (Nodo 32DirezioeX)



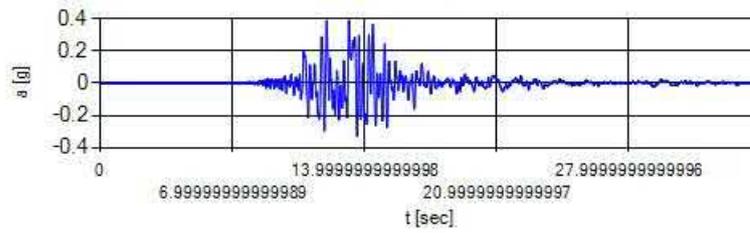
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 32DirezioeX)



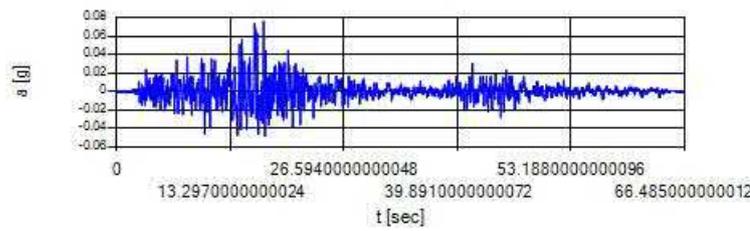
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 32DirezioeX)



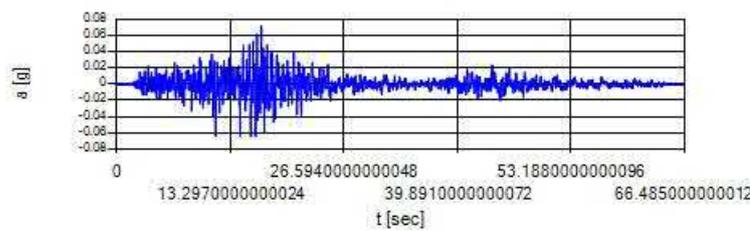
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 32DirezioeX)



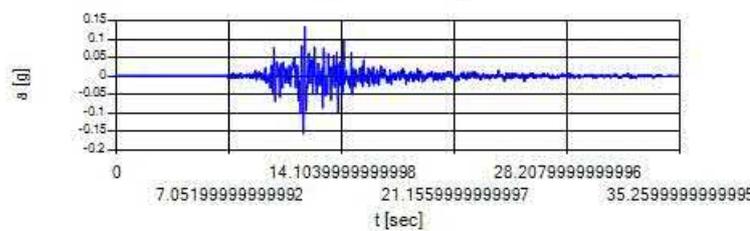
Accelerogramma Output (SLD) - (Condizione8) - (Nodo 32DirezioeX)



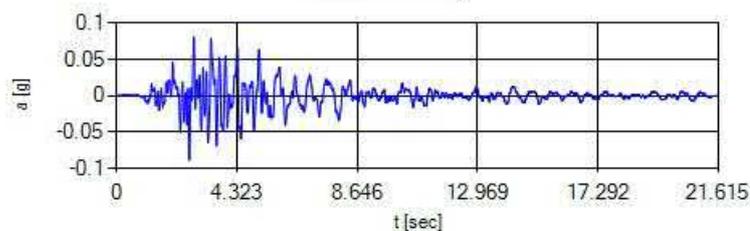
Accelerogramma Output (SLD) - (Condizione9) - (Nodo 32DirezioeX)



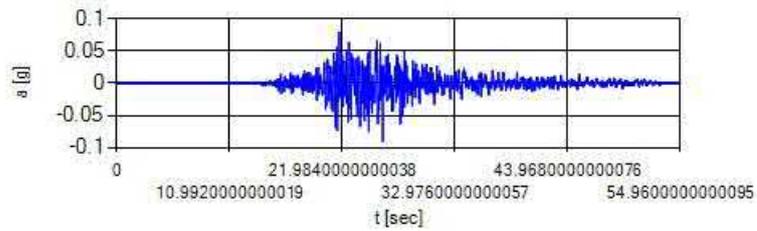
Accelerogramma Output (SLD) - (Condizione10) - (Nodo 32DirezioeX)



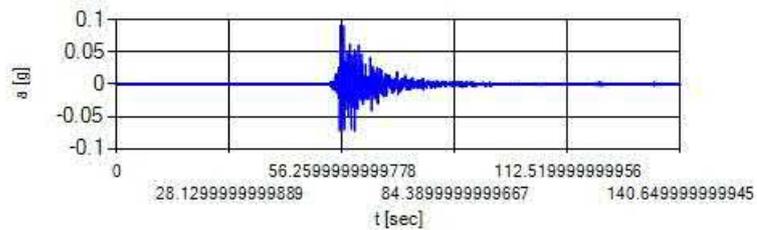
Accelerogramma Output (SLD) - (Condizione11) - (Nodo 32DirezioeX)



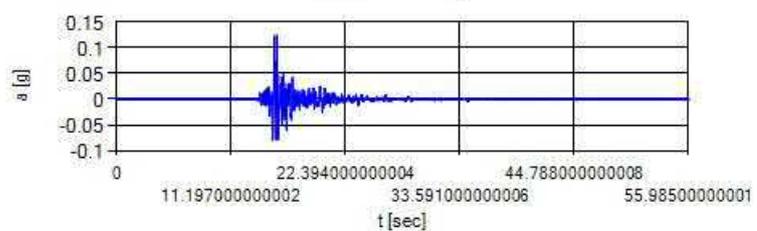
Accelerogramma Output (SLD) - (Condizione12) - (Nodo 32DirezioneX)



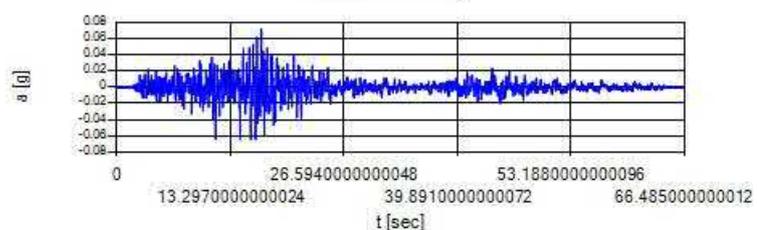
Accelerogramma Output (SLD) - (Condizione13) - (Nodo 32DirezioneX)



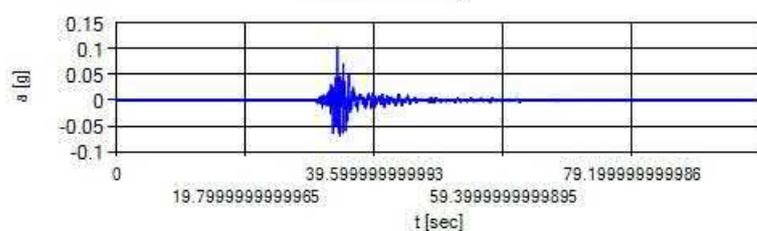
Accelerogramma Output (SLO) - (Condizione15) - (Nodo 32DirezioneX)



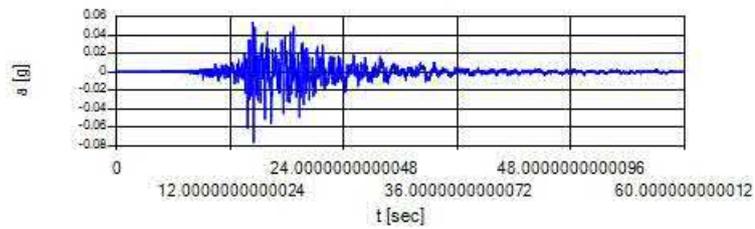
Accelerogramma Output (SLO) - (Condizione16) - (Nodo 32DirezioneX)



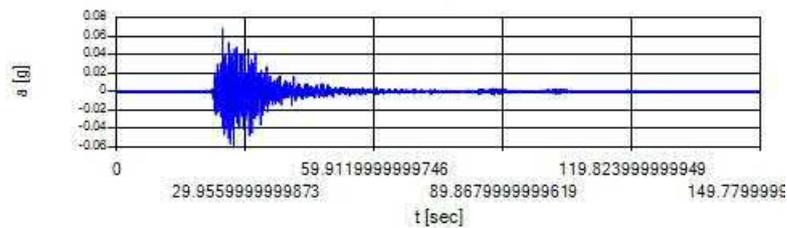
Accelerogramma Output (SLO) - (Condizione17) - (Nodo 32DirezioneX)



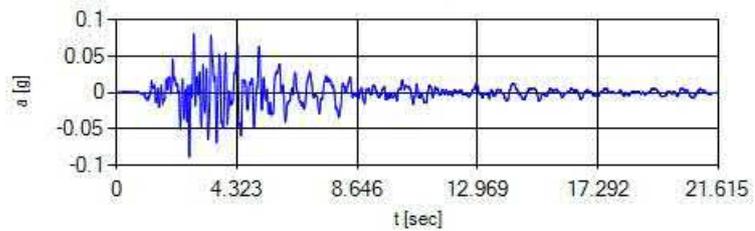
Accelerogramma Output (SLO) - (Condizione18) - (Nodo 32DirezioneX)



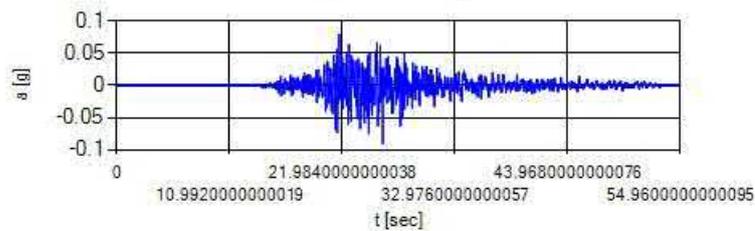
Accelerogramma Output (SLO) - (Condizione19) - (Nodo 32DirezioneX)



Accelerogramma Output (SLO) - (Condizione20) - (Nodo 32DirezioneX)



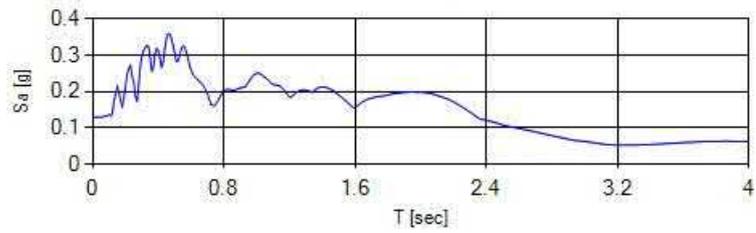
Accelerogramma Output (SLO) - (Condizione21) - (Nodo 32DirezioneX)



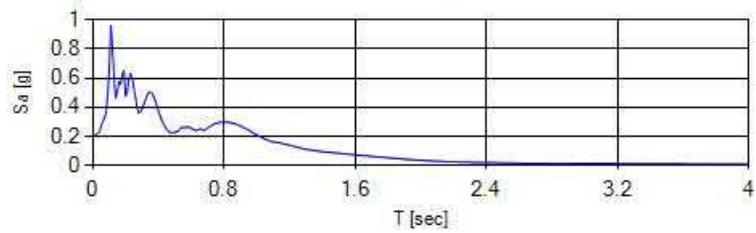
5.2 - Spettri Output

Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

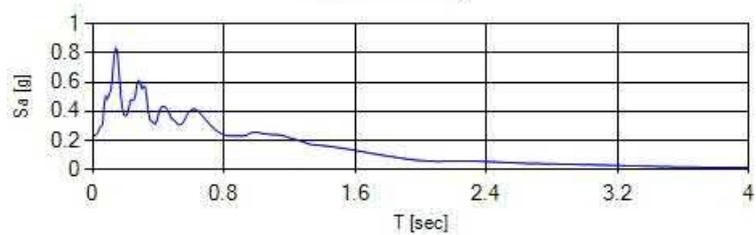
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 32DirezioeX)



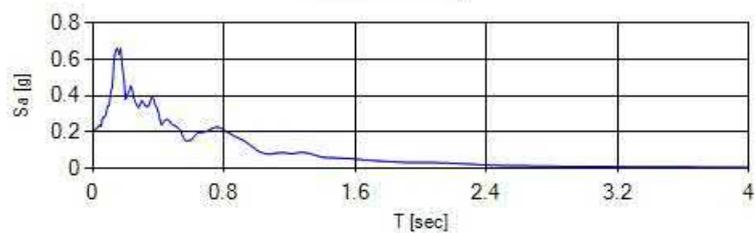
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 32DirezioeX)



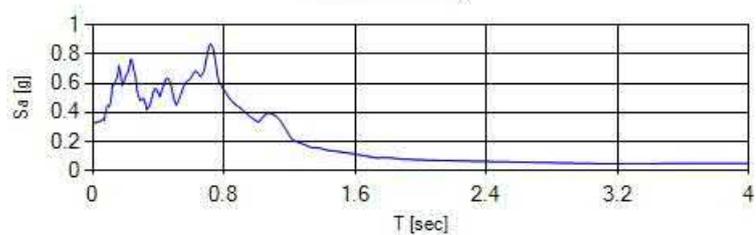
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione3) - (Nodo 32DirezioeX)



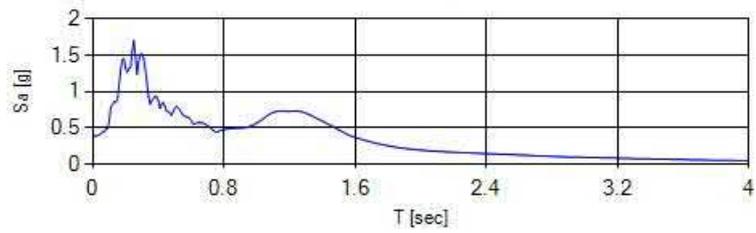
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 32DirezioeX)



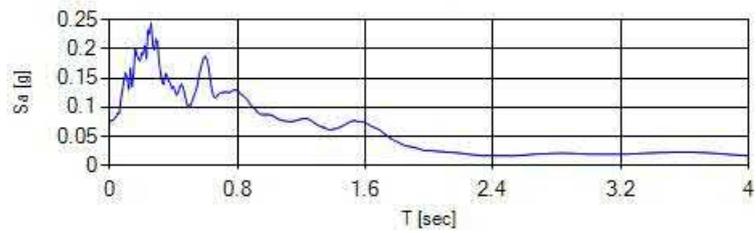
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 32DirezioeX)



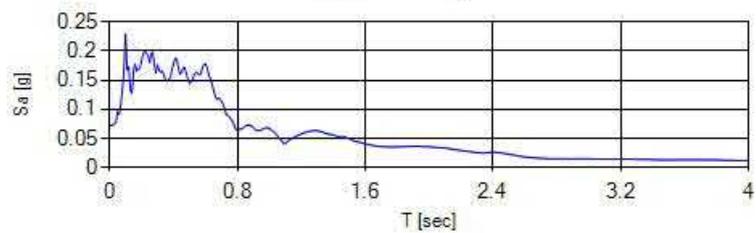
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 32DirezioeX)



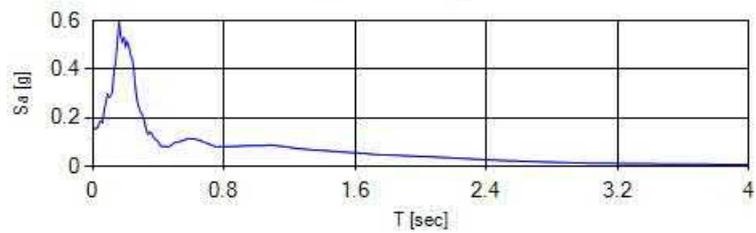
Accelerazione spettrale Output (SLD) - (Condizione8) - (Nodo 32DirezioeX)



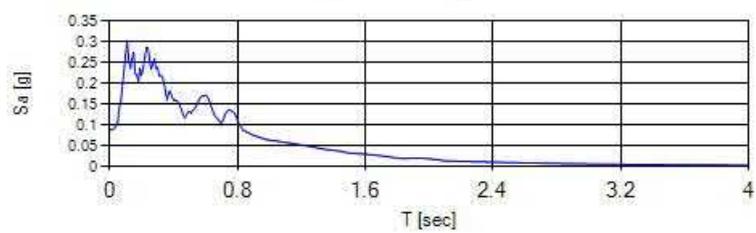
Accelerazione spettrale Output (SLD) - (Condizione9) - (Nodo 32DirezioeX)



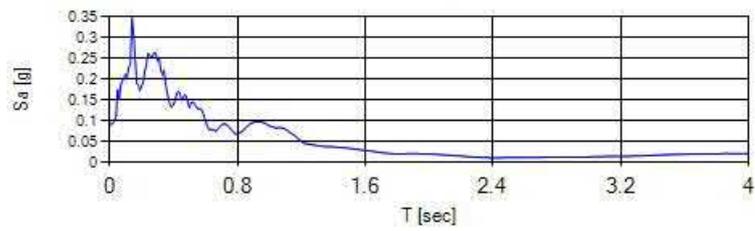
Accelerazione spettrale Output (SLD) - (Condizione10) - (Nodo 32DirezioeX)



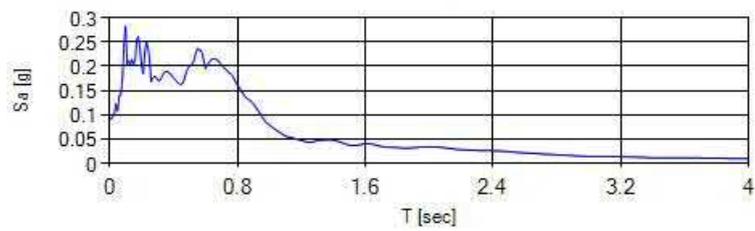
Accelerazione spettrale Output (SLD) - (Condizione11) - (Nodo 32DirezioeX)



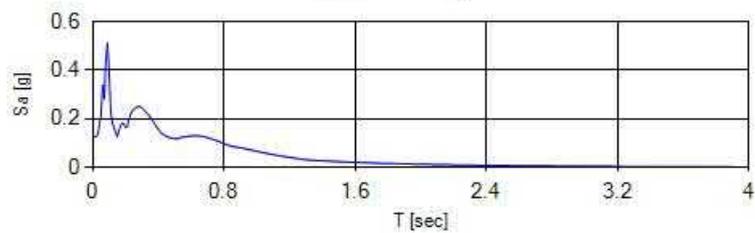
Accelerazione spettrale Output (SLD) - (Condizione12) - (Nodo 32DirezioeX)



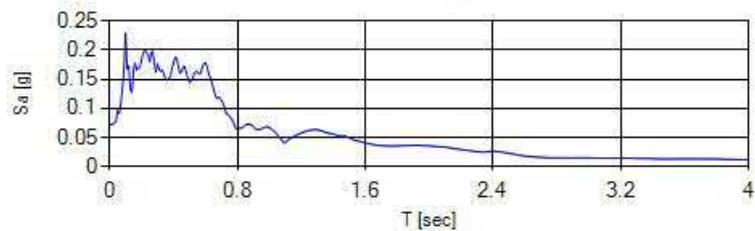
Accelerazione spettrale Output (SLD) - (Condizione13) - (Nodo 32DirezioeX)



Accelerazione spettrale Output (SLO) - (Condizione15) - (Nodo 32DirezioeX)



Accelerazione spettrale Output (SLO) - (Condizione16) - (Nodo 32DirezioeX)



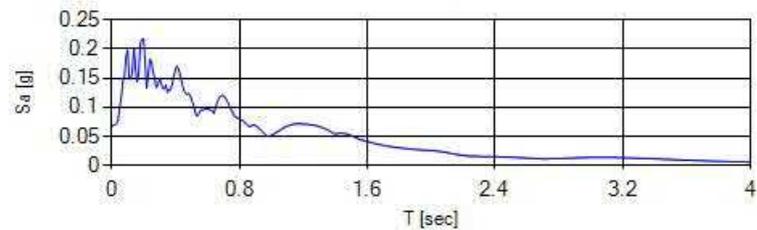
Accelerazione spettrale Output (SLO) - (Condizione17) - (Nodo 32DirezioeX)



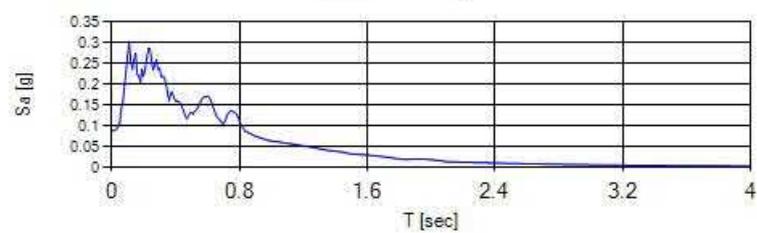
Accelerazione spettrale Output (SLO) - (Condizione18) - (Nodo 32DirezioneX)



Accelerazione spettrale Output (SLO) - (Condizione19) - (Nodo 32DirezioneX)



Accelerazione spettrale Output (SLO) - (Condizione20) - (Nodo 32DirezioneX)



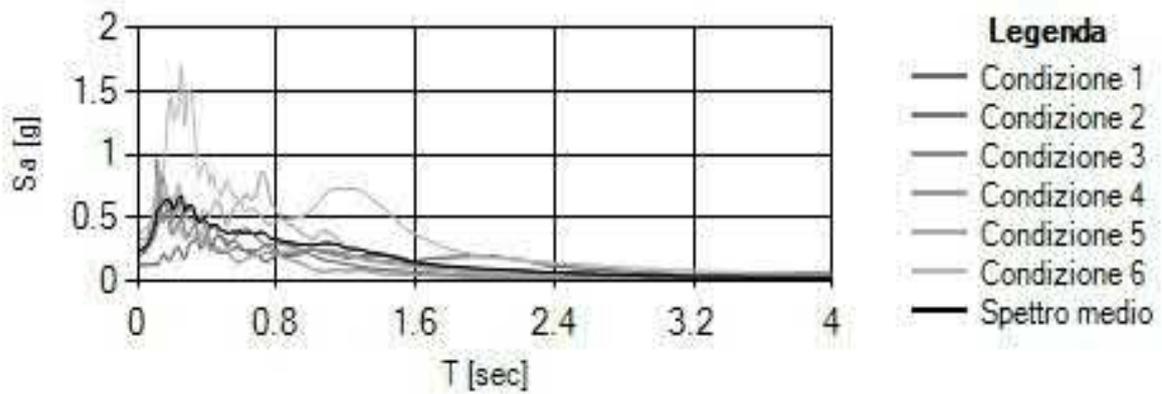
Accelerazione spettrale Output (SLO) - (Condizione21) - (Nodo 32DirezioneX)



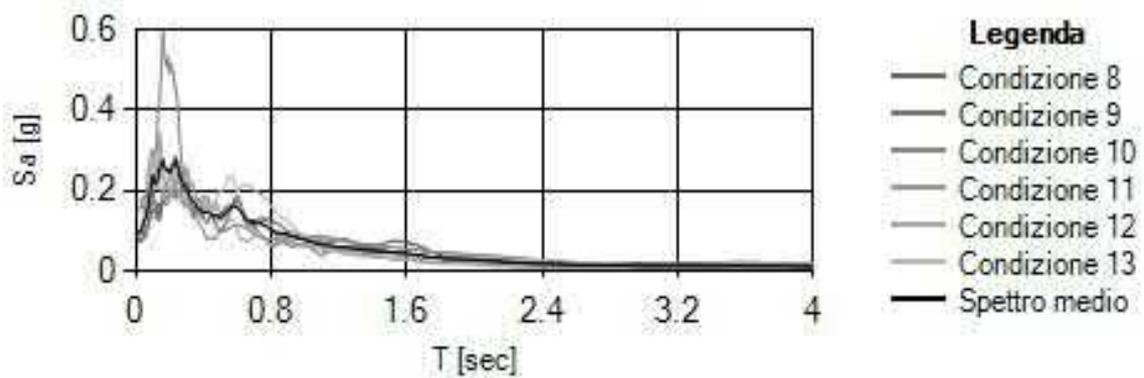
5.3 - Interpretazione dei risultati

Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

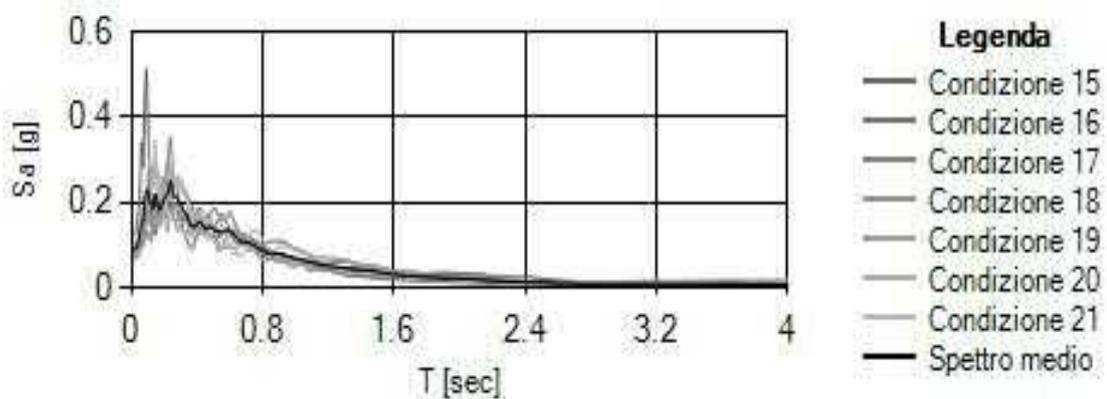
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 32DirezioneX)



Accelerazione spettrale media Output (SLD) - (Nodo 32DirezioneX)



Accelerazione spettrale media Output (SLO) - (Nodo 32DirezioneX)



5.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL

La parametrizzazione degli spettri di risposta ottenuti nei vari punti di controllo viene condotta mediante la procedura suggerita dagli "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica" (GdL MS, 2008 – parti I e II – punto 2.5.4.3.1 pag 92). Partendo dallo spettro di risposta medio in accelerazione rappresentativo dei 7 accelerogrammi, tale procedura prevede:

- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in accelerazione (TA);
- il calcolo del valor medio dello spettro in accelerazione (SA) nell'intorno tra $0.5 TA - 1.5 TA$;
- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in pseudovelocità (TV);
- il calcolo del valor medio dello spettro in pseudovelocità (SV) nell'intorno tra $0.8 TV - 1.2 TV$;
- il calcolo del valore di $T_c = 2\pi \frac{SV}{SA}$;
- il calcolo del valore di $T_b = 1/3 T_c$;
- il calcolo del valore $T_d = 4 a_g + 1.6$ con a_g uguale al valore di accelerazione a T uguale a zero;
- l'applicazione delle equazioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) per la determinazione dei tratti dello spettro tra T_0, T_b, T_c, T_d, T_4 .

Di seguito vengono riportati, per ogni analisi, i parametri degli spettri parametrizzati per i vari punti di controllo presenti nella sezione oggetto di studio.

SLV

Punto di controllo	A_g [g]	F0	S	A_{max} [g]	T_b [sec]	T_c [sec]	T_d [sec]
P (32)	0.202	2.594	1.133	0.229	0.174	0.522	2.408

dove:

- A_g : accelerazione orizzontale massima al sito;
- F0 : valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- S : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- A_{max} : punto di ancoraggio a T=0 dello spettro di output;
- T_b : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_c : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- T_d : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.



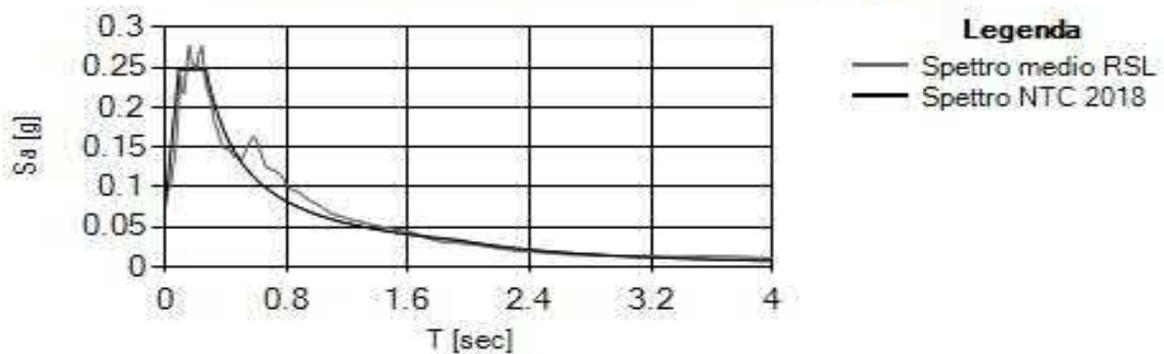
SLD

Punto di controllo	A_g [g]	$F0$	S	A_{max} [g]	T_b [sec]	T_c [sec]	T_d [sec]
P (32)	0.082	3.207	0.939	0.077	0.089	0.267	1.93

dove:

- A_g :accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F0$:valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- S :coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- A_{max} :punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output;
- T_b :periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_c :periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- T_d :periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

Parametrizzazione spettro (SLD) - (P (32))



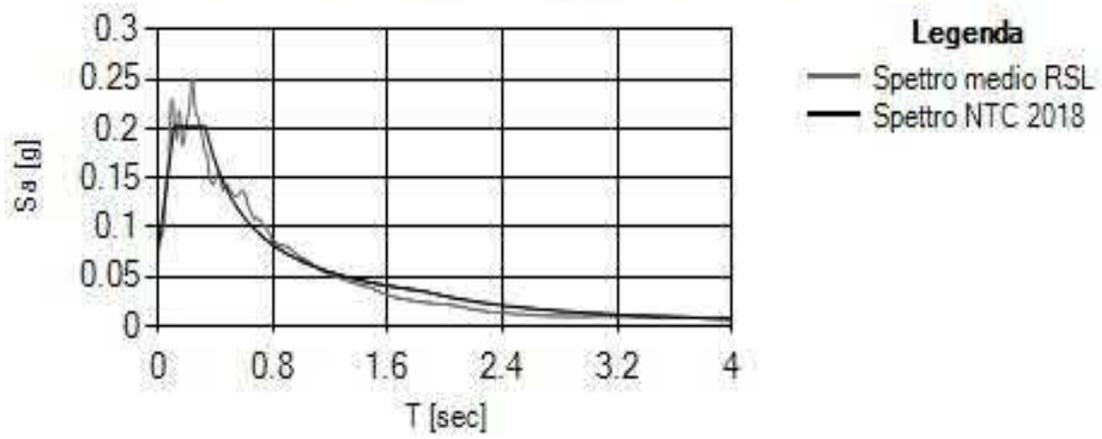
SLO

Punto di controllo	A_g [g]	$F0$	S	A_{max} [g]	T_b [sec]	T_c [sec]	T_d [sec]
P (32)	0.066	2.585	1.184	0.078	0.109	0.327	1.93

dove:

- A_g :accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F0$:valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- S :coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- A_{max} :punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output;
- T_b :periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_c :periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- T_d :periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

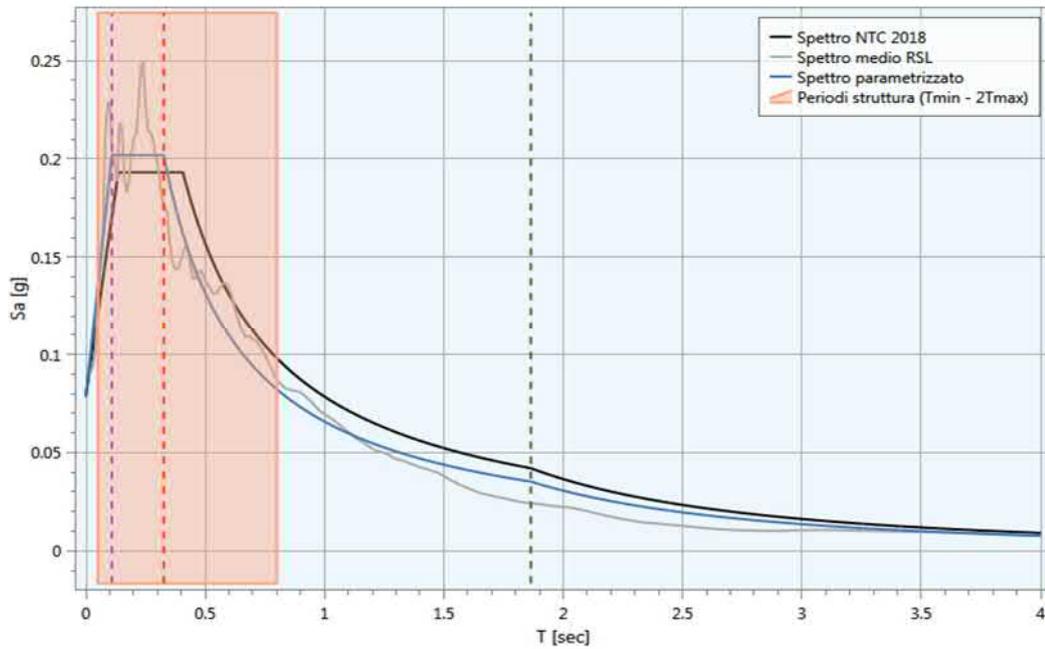
Parametrizzazione spettro (SLO) - (P (32))



Ubicazione sito: Via del Pino – Petriolo (MC)
Coordinate (datum WGS84): lon. 13.465 lat. 43.221

RELAZIONE DI CALCOLO

REGOLARIZZAZIONE SPETTRI DI RISPOSTA SLO



Archivio: SLO.rsp - Data : 28/11/2018

Oggetto: Analisi di Risposta Sismica Locale per la verifica di vulnerabilità dell'edificio sede della scuola dell'infanzia "Savini" a Petriolo

Committente

Settore Lavori Pubblici
del comune di Petriolo

Progettista

Dott. Geol. Fabrizio Raffaelli

Sommario

1 Introduzione	2
2 Normativa di riferimento	2
3 Parametri sismici di base.....	2
3.1 Pericolosità sismica del sito in esame	3
4 Spettro di risposta approccio semplificato NTC18.....	4
4.1 Stratigrafia e spettro di risposta NTC18	5
5 Regolarizzazione spettro di risposta ottenuto da analisi RSL.....	7
6 Confronto tra gli spettri di risposta MS3 e NTC18 (§ 3.2 Ordinanza n. 55 24/4/2018)	21

1 Introduzione

Di seguito vengono riportati i risultati del confronto tra gli spettri di risposta proposti dal nuovo testo unico sulle costruzioni (NTC18), mediante l'approccio semplificato, e quelli forniti dalle analisi di risposta sismica locale (microzonazione sismica di III livello). Tali confronti vengono condotti secondo quanto indicato all'interno dell'**Ordinanza n. 55 del 24 aprile 2018**.

2 Normativa di riferimento

La normativa di riferimento per lo studio del problema in esame sono:

- D.M. del 17 Gennaio 2018 (Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni");
- Ordinanza n. 55 del 24 aprile 2018.

3 Parametri sismici di base

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale ed attraverso le ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{V_R} , nel periodo di riferimento V_R , come definito nel § 2.4. Tali forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{V_R} nel periodo di riferimento V_R a partire dai seguenti parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I valori suddetti possono essere calcolati con riferimento a quattro diversi stati limite ai quali corrispondono le seguenti probabilità di superamento:

Tab. 3.2.I – Probabilità di superamento P_{V_R} in funzione dello stato limite considerato

Stati Limite	P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Stabilito il periodo di riferimento della costruzione mediante la seguente relazione:

$$V_R = V_N C_U$$

dove:

- V_N vita nominale della costruzione;
- C_U coefficiente d'uso della costruzione.

è possibile, per ciascuno stato limite, ricavare il periodo di ritorno T_R del sisma utilizzando la seguente:

$$T_R = \frac{-V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

In funzione del periodo di ritorno dell'evento T_R i parametri della pericolosità sismica di base sono forniti a partire da un reticolo di riferimento disponibile sul sito <http://esse1.mi.ingv.it/>; un punto (che individua la posizione del sito di interesse) interno a tale reticolo può essere processato mediante media pesata dei valori assunti dal generico parametro nei vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici, attraverso la seguente espressione:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

dove:

- p valore del parametro di interesse nel punto in esame;
- p_i valore del parametro di interesse nell' i -esimo punto della maglia elementare contenente il punto in esame;
- d_i è la distanza del punto in esame dall' i -esimo punto della maglia suddetta.

3.1 Pericolosità sismica del sito in esame

Per il sito in esame si ottiene:

Latitudine (Datum ED50) [°]	43°.2217
Longitudine (Datum ED50) [°]	13°.4644
Altitudine [s.l.m.]:	270.00
Tipo di opera	Opere ordinarie
Classe d'uso	III
Vita nominale [anni]	50
Coefficiente d'uso	1.5

Sui quattro punti del reticolo di riferimento risulta:

Identificativi e coordinate (Datum ED50) dei punti che includono il sito		
Numero punto	Latitudine [°]	Longitudine [°]
22533	43.2350	13.4900
22754	43.1849	13.4215
22755	43.1850	13.4901
22532	43.2349	13.4214

Da cui, attraverso l'interpolazione per il sito in esame, si ottiene:

	Parametri dello spettro di risposta orizzontale			
	SLV	SLC	SLD	SLO
Tempo di ritorno	712	1462	75	45
Accelerazione sismica	0.202	0.258	0.082	0.066
Coefficiente Fo	2.446	2.494	2.442	2.439
Periodo T_c*	0.341	0.348	0.298	0.288

4 Spettro di risposta approccio semplificato NTC18

L'approccio semplificato proposto dall'NTC18 consente di ottenere degli spettri di risposta che tengano conto degli effetti di sito (§3.2.2 NTC18). In particolare, tali effetti vengono classificati in:

- Effetti stratigrafici;
- Effetti topografici.

Per entrambi la normativa consente di associare rispettivamente una categoria stratigrafica ed una categoria topografica. La prima, in base alla stratigrafia in esame, viene valutata in funzione del parametro:

$$V_{S,Eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Dove:

- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da V_S non inferiore a 800 m/s.

Le categorie di sottosuolo che consentono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite nella seguente tabella:

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Deposit</i> di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Deposit</i> di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Per valutare gli effetti topografici è possibile far riferimento, nel caso di configurazioni semplici (creste e dorsali allungati con altezza superiore a 30 m), alle seguenti categorie:

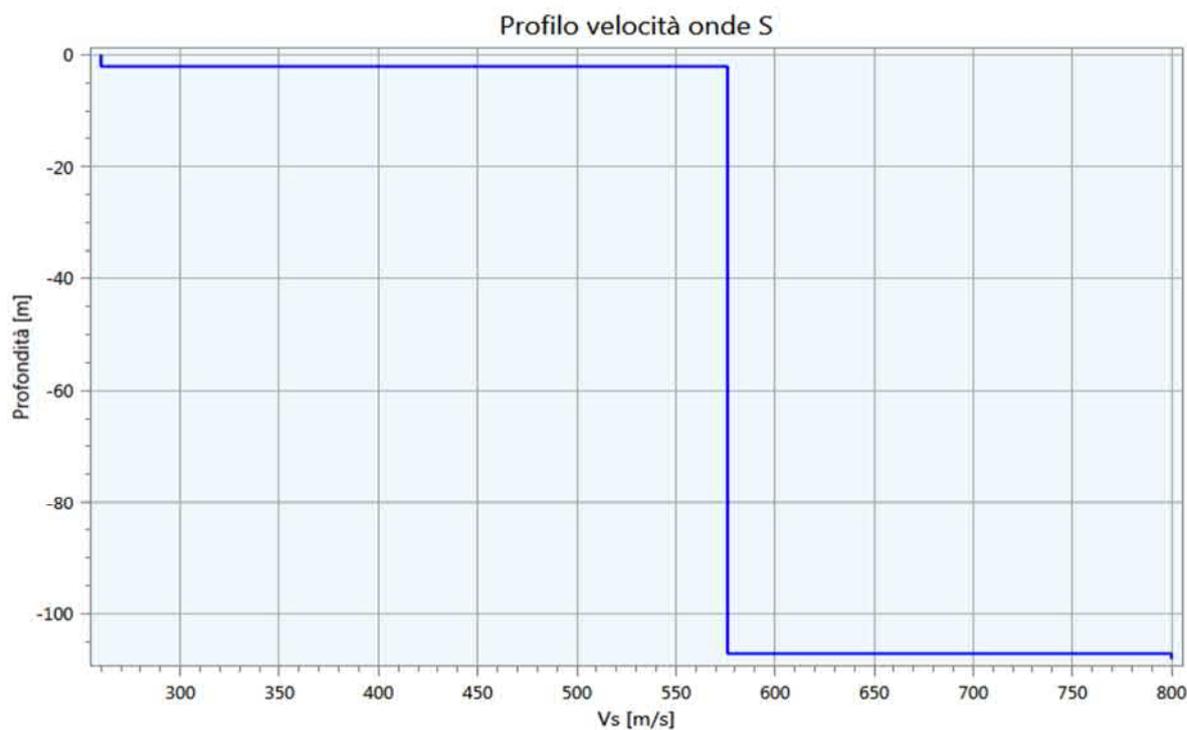
Tab. 3.2.III – Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

4.1 Stratigrafia e spettro di risposta NTC18

Nel caso specifico la stratigrafia considerata risulta:

Nome	Descrizione	Spessore [m]	Profondità [m]	Vs [m/s]
Strato (1)	Strato (1)	2.11	2.11	260.00
Strato (2)	Strato (2)	105.00	107.11	576.00
Strato (3)	Strato (3)	1.00	108.11	800.00

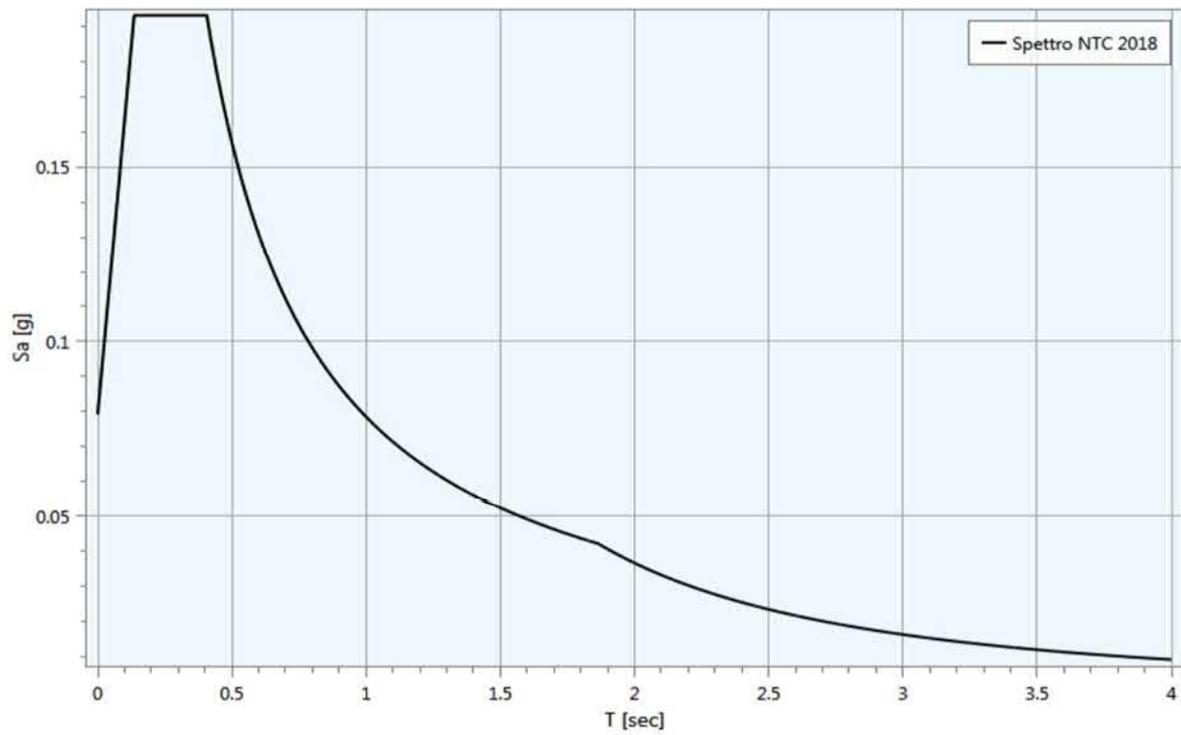


Da cui:

H [m]	$V_{S,Eq}$ [m/s]	Categoria stratigrafica
108.11	564.08	B

La categoria topografica risulta: **T1**;

Lo spettro di risposta in pseudo-accelerazione per lo stato limite per lo stato limite **SLO** e per uno smorzamento di riferimento $\xi = 5\%$ viene di seguito riportato.



5 Regolarizzazione spettro di risposta ottenuto da analisi RSL

Mediante la procedura di regolarizzazione proposta nell'appendice 1 dell'ordinanza n. 55 del 24 Aprile 2018 è possibile trasformare lo spettro di risposta, risultato di simulazioni numeriche di risposta sismica locale, in uno spettro con forma standard (secondo NTC18). In particolare, tale procedura fornisce i parametri per l'inserimento dello spettro elastico all'interno di codici di calcolo per l'analisi strutturale finalizzati alla progettazione delle strutture in zona sismica. Tali parametri sono:

- S coefficiente di amplificazione che tiene conto delle condizioni stratigrafiche e delle condizioni topografiche da cui è possibile stimare $a_{max} = S a_g$ dove a_{max} e a_g rappresentano rispettivamente l'accelerazione d'angoraggio dello spettro di risposta con effetti di sito e l'accelerazione orizzontale massima su suolo di tipo A;
- T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro;
- T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro;
- F_0 fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale.

Di seguito vengono riportati i vari steps della procedura:

- a) Si calcola lo spettro di pseudoaccelerazione (S_A) e si determina il periodo proprio (T_A) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudoaccelerazione;
- b) Si calcola il valore medio dello spettro ($S_{A,m}$) nell'intorno di T_A tra $0.5 T_A$ e $1.5 T_A$, questo valore sarà assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard:

$$S_{A,m} = \frac{1}{T_A} \int_{0.5 T_A}^{1.5 T_A} S_A(T) dT$$

- c) Si determina lo spettro di pseudovelocità (S_V) a partire da quello di accelerazione, moltiplicando le ordinate spettrali di quest'ultimo per l'inverso della corrispondente frequenza circolare $\omega = 2\pi/T$:

$$S_V(T) = S_A(T) \frac{T}{2\pi}$$

e quindi si individua il periodo (T_V) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudovelocità;

- d) Si calcola il valore medio dello spettro ($S_{V,m}$) nell'intorno di T_V nell'intorno tra $0.8 T_V$ e $1.2 T_V$:

$$S_{V,m} = \frac{1}{0.4 T_V} \int_{0.8 T_V}^{1.2 T_V} S_V(T) dT$$

- e) Si determina il periodo in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante:

$$T_C = 2\pi \frac{S_{V,m}}{S_{A,m}}$$

- f) Si determina $T_B = \frac{1}{3}T_C$, $T_D = 4.0 \frac{a_g}{g} + 1.6$ ed $S = \frac{a_{max}}{a_g}$ con a_{max} punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output. Poiché il valore di a_{max} non è generalmente fornito nello spettro delle simulazioni numeriche si procede per estrapolazione lineare, secondo la seguente equazione:

$$a_{max} = \left(\frac{S_e(T = 0.01s)}{S_{A,m}} - \frac{0.01}{T_B} \right) \left(\frac{S_{A,m}}{1 - \frac{0.01}{T_B}} \right)$$

con $S_e(T = 0.01s)$ ordinata dello spettro di accelerazione per $T = 0.01s$, primo valore del periodo nello spettro elastico delle simulazioni numeriche.

Infine, una volta stabilito lo smorzamento di riferimento ξ , le ordinate dello spettro in pseudo-accelerazione vengono ottenute mediante le seguenti relazioni:

$$0 \leq T \leq T_B S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C S_e(T) = a_g S \eta F_0$$

$$T_C \leq T \leq T_D S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T \leq T_D S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

nelle quali:

- T periodo proprio di vibrazione;
- η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali B diversi dal 5%, mediante la relazione:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55$$

Di seguito si riportano i punti dello spettro di risposta ottenuto dalle simulazioni numeriche:

	T [sec]	Sa [g]
1	0.00	0.078
2	0.1086	0.202
3	0.3259	0.202
4	0.3259	0.202
5	0.3337	0.197
6	0.3415	0.193
7	0.3493	0.188
8	0.3571	0.184
9	0.3649	0.18

10	0.3727	0.177
11	0.3805	0.173
12	0.3883	0.169
13	0.3961	0.166
14	0.4039	0.163
15	0.4117	0.16
16	0.4195	0.157
17	0.4274	0.154
18	0.4352	0.151
19	0.443	0.149
20	0.4508	0.146
21	0.4586	0.144
22	0.4664	0.141
23	0.4742	0.139
24	0.482	0.137
25	0.4898	0.134
26	0.4976	0.132
27	0.5054	0.13
28	0.5132	0.128
29	0.521	0.126
30	0.5289	0.124
31	0.5367	0.123
32	0.5445	0.121
33	0.5523	0.119
34	0.5601	0.118
35	0.5679	0.116
36	0.5757	0.114
37	0.5835	0.113
38	0.5913	0.111
39	0.5991	0.11
40	0.6069	0.108
41	0.6147	0.107
42	0.6226	0.106
43	0.6304	0.104
44	0.6382	0.103
45	0.646	0.102
46	0.6538	0.101

47	0.6616	0.099
48	0.6694	0.098
49	0.6772	0.097
50	0.685	0.096
51	0.6928	0.095
52	0.7006	0.094
53	0.7084	0.093
54	0.7162	0.092
55	0.7241	0.091
56	0.7319	0.09
57	0.7397	0.089
58	0.7475	0.088
59	0.7553	0.087
60	0.7631	0.086
61	0.7709	0.085
62	0.7787	0.085
63	0.7865	0.084
64	0.7943	0.083
65	0.8021	0.082
66	0.8099	0.081
67	0.8177	0.08
68	0.8256	0.08
69	0.8334	0.079
70	0.8412	0.078
71	0.849	0.078
72	0.8568	0.077
73	0.8646	0.076
74	0.8724	0.075
75	0.8802	0.075
76	0.888	0.074
77	0.8958	0.073
78	0.9036	0.073
79	0.9114	0.072
80	0.9193	0.072
81	0.9271	0.071
82	0.9349	0.07
83	0.9427	0.07

84	0.9505	0.069
85	0.9583	0.069
86	0.9661	0.068
87	0.9739	0.068
88	0.9817	0.067
89	0.9895	0.067
90	0.9973	0.066
91	1.0051	0.065
92	1.0129	0.065
93	1.0208	0.064
94	1.0286	0.064
95	1.0364	0.064
96	1.0442	0.063
97	1.052	0.063
98	1.0598	0.062
99	1.0676	0.062
100	1.0754	0.061
101	1.0832	0.061
102	1.091	0.06
103	1.0988	0.06
104	1.1066	0.059
105	1.1144	0.059
106	1.1223	0.059
107	1.1301	0.058
108	1.1379	0.058
109	1.1457	0.057
110	1.1535	0.057
111	1.1613	0.057
112	1.1691	0.056
113	1.1769	0.056
114	1.1847	0.056
115	1.1925	0.055
116	1.2003	0.055
117	1.2081	0.054
118	1.2159	0.054
119	1.2238	0.054
120	1.2316	0.053

121	1.2394	0.053
122	1.2472	0.053
123	1.255	0.052
124	1.2628	0.052
125	1.2706	0.052
126	1.2784	0.051
127	1.2862	0.051
128	1.294	0.051
129	1.3018	0.051
130	1.3096	0.05
131	1.3175	0.05
132	1.3253	0.05
133	1.3331	0.049
134	1.3409	0.049
135	1.3487	0.049
136	1.3565	0.049
137	1.3643	0.048
138	1.3721	0.048
139	1.3799	0.048
140	1.3877	0.047
141	1.3955	0.047
142	1.4033	0.047
143	1.4111	0.047
144	1.419	0.046
145	1.4268	0.046
146	1.4346	0.046
147	1.4424	0.046
148	1.4502	0.045
149	1.458	0.045
150	1.4658	0.045
151	1.4736	0.045
152	1.4814	0.044
153	1.4892	0.044
154	1.497	0.044
155	1.5048	0.044
156	1.5126	0.044
157	1.5205	0.043

158	1.5283	0.043
159	1.5361	0.043
160	1.5439	0.043
161	1.5517	0.042
162	1.5595	0.042
163	1.5673	0.042
164	1.5751	0.042
165	1.5829	0.042
166	1.5907	0.041
167	1.5985	0.041
168	1.6063	0.041
169	1.6141	0.041
170	1.622	0.041
171	1.6298	0.04
172	1.6376	0.04
173	1.6454	0.04
174	1.6532	0.04
175	1.661	0.04
176	1.6688	0.039
177	1.6766	0.039
178	1.6844	0.039
179	1.6922	0.039
180	1.70	0.039
181	1.7078	0.039
182	1.7157	0.038
183	1.7235	0.038
184	1.7313	0.038
185	1.7391	0.038
186	1.7469	0.038
187	1.7547	0.038
188	1.7625	0.037
189	1.7703	0.037
190	1.7781	0.037
191	1.7859	0.037
192	1.7937	0.037
193	1.8015	0.037
194	1.8093	0.036

195	1.8172	0.036
196	1.825	0.036
197	1.8328	0.036
198	1.8406	0.036
199	1.8484	0.036
200	1.8562	0.035
201	1.864	0.035
202	1.864	0.035
203	1.8748	0.035
204	1.8856	0.035
205	1.8964	0.034
206	1.9072	0.034
207	1.9179	0.033
208	1.9287	0.033
209	1.9395	0.033
210	1.9503	0.032
211	1.9611	0.032
212	1.9719	0.032
213	1.9827	0.031
214	1.9935	0.031
215	2.0042	0.031
216	2.015	0.03
217	2.0258	0.03
218	2.0366	0.03
219	2.0474	0.029
220	2.0582	0.029
221	2.069	0.029
222	2.0798	0.028
223	2.0905	0.028
224	2.1013	0.028
225	2.1121	0.028
226	2.1229	0.027
227	2.1337	0.027
228	2.1445	0.027
229	2.1553	0.026
230	2.1661	0.026
231	2.1768	0.026

232	2.1876	0.026
233	2.1984	0.025
234	2.2092	0.025
235	2.22	0.025
236	2.2308	0.025
237	2.2416	0.024
238	2.2524	0.024
239	2.2632	0.024
240	2.2739	0.024
241	2.2847	0.024
242	2.2955	0.023
243	2.3063	0.023
244	2.3171	0.023
245	2.3279	0.023
246	2.3387	0.022
247	2.3495	0.022
248	2.3602	0.022
249	2.371	0.022
250	2.3818	0.022
251	2.3926	0.021
252	2.4034	0.021
253	2.4142	0.021
254	2.425	0.021
255	2.4358	0.021
256	2.4465	0.02
257	2.4573	0.02
258	2.4681	0.02
259	2.4789	0.02
260	2.4897	0.02
261	2.5005	0.02
262	2.5113	0.019
263	2.5221	0.019
264	2.5328	0.019
265	2.5436	0.019
266	2.5544	0.019
267	2.5652	0.019
268	2.576	0.018

269	2.5868	0.018
270	2.5976	0.018
271	2.6084	0.018
272	2.6192	0.018
273	2.6299	0.018
274	2.6407	0.018
275	2.6515	0.017
276	2.6623	0.017
277	2.6731	0.017
278	2.6839	0.017
279	2.6947	0.017
280	2.7055	0.017
281	2.7162	0.017
282	2.727	0.016
283	2.7378	0.016
284	2.7486	0.016
285	2.7594	0.016
286	2.7702	0.016
287	2.781	0.016
288	2.7918	0.016
289	2.8025	0.016
290	2.8133	0.016
291	2.8241	0.015
292	2.8349	0.015
293	2.8457	0.015
294	2.8565	0.015
295	2.8673	0.015
296	2.8781	0.015
297	2.8888	0.015
298	2.8996	0.015
299	2.9104	0.014
300	2.9212	0.014
301	2.932	0.014
302	2.9428	0.014
303	2.9536	0.014
304	2.9644	0.014
305	2.9752	0.014

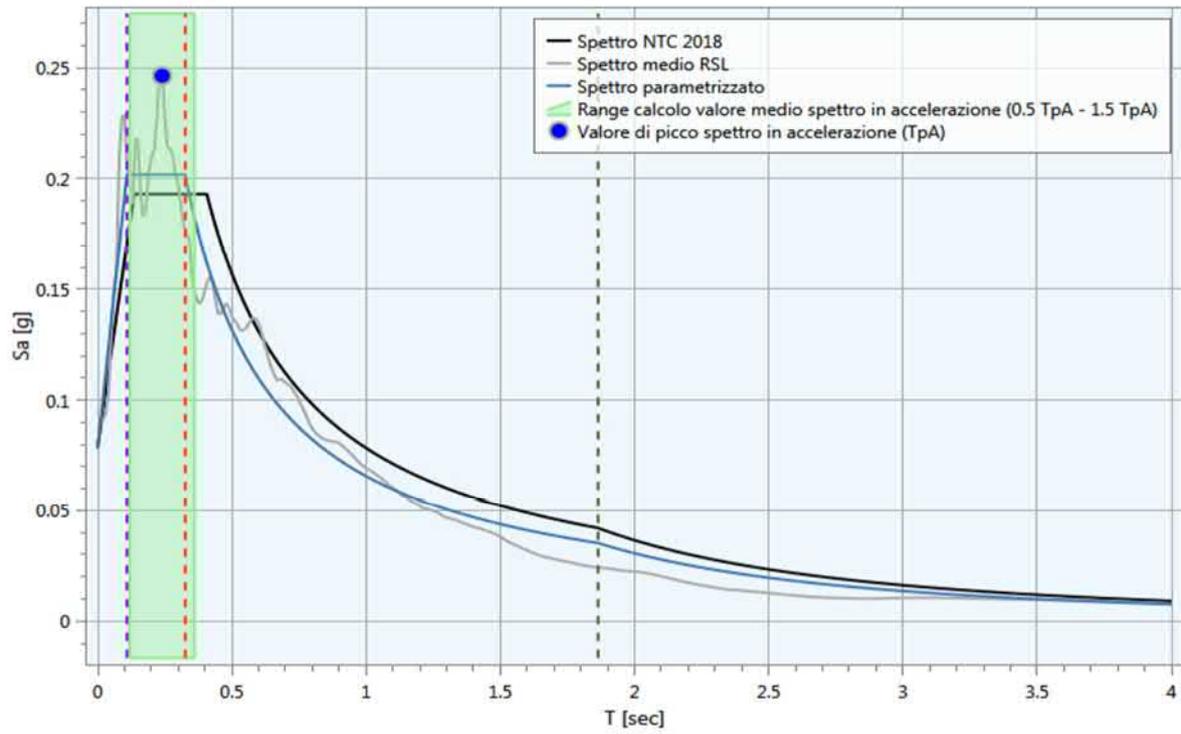
306	2.9859	0.014
307	2.9967	0.014
308	3.0075	0.014
309	3.0183	0.013
310	3.0291	0.013
311	3.0399	0.013
312	3.0507	0.013
313	3.0615	0.013
314	3.0722	0.013
315	3.083	0.013
316	3.0938	0.013
317	3.1046	0.013
318	3.1154	0.013
319	3.1262	0.013
320	3.137	0.012
321	3.1478	0.012
322	3.1585	0.012
323	3.1693	0.012
324	3.1801	0.012
325	3.1909	0.012
326	3.2017	0.012
327	3.2125	0.012
328	3.2233	0.012
329	3.2341	0.012
330	3.2448	0.012
331	3.2556	0.012
332	3.2664	0.011
333	3.2772	0.011
334	3.288	0.011
335	3.2988	0.011
336	3.3096	0.011
337	3.3204	0.011
338	3.3312	0.011
339	3.3419	0.011
340	3.3527	0.011
341	3.3635	0.011
342	3.3743	0.011

343	3.3851	0.011
344	3.3959	0.011
345	3.4067	0.011
346	3.4175	0.011
347	3.4282	0.01
348	3.439	0.01
349	3.4498	0.01
350	3.4606	0.01
351	3.4714	0.01
352	3.4822	0.01
353	3.493	0.01
354	3.5038	0.01
355	3.5145	0.01
356	3.5253	0.01
357	3.5361	0.01
358	3.5469	0.01
359	3.5577	0.01
360	3.5685	0.01
361	3.5793	0.01
362	3.5901	0.01
363	3.6008	0.009
364	3.6116	0.009
365	3.6224	0.009
366	3.6332	0.009
367	3.644	0.009
368	3.6548	0.009
369	3.6656	0.009
370	3.6764	0.009
371	3.6872	0.009
372	3.6979	0.009
373	3.7087	0.009
374	3.7195	0.009
375	3.7303	0.009
376	3.7411	0.009
377	3.7519	0.009
378	3.7627	0.009
379	3.7735	0.009

380	3.7842	0.009
381	3.795	0.009
382	3.8058	0.008
383	3.8166	0.008
384	3.8274	0.008
385	3.8382	0.008
386	3.849	0.008
387	3.8598	0.008
388	3.8705	0.008
389	3.8813	0.008
390	3.8921	0.008
391	3.9029	0.008
392	3.9137	0.008
393	3.9245	0.008
394	3.9353	0.008
395	3.9461	0.008
396	3.9568	0.008
397	3.9676	0.008
398	3.9784	0.008
399	3.9892	0.008
400	4.00	0.008

Dalla procedura di regolarizzazione risulta:

Parametrizzazione RSL		
TpA	[sec]	0.24
0.5 TpA	[sec]	0.12
1.5 TpA	[sec]	0.36
Sa,medio	[g]	0.20
TpV	[sec]	1.12
0.8 TpV	[sec]	0.90
1.2 TpV	[sec]	1.34
Sv,medio	[g*s]	0.01
Parametri spettro regolarizzato		
F0		2.59
S		1.18
Tb	[sec]	0.11
Tc	[sec]	0.33
Td	[sec]	1.86



6 Confronto tra gli spettri di risposta MS3 e NTC18 (§ 3.2 Ordinanza n. 55 24/4/2018)

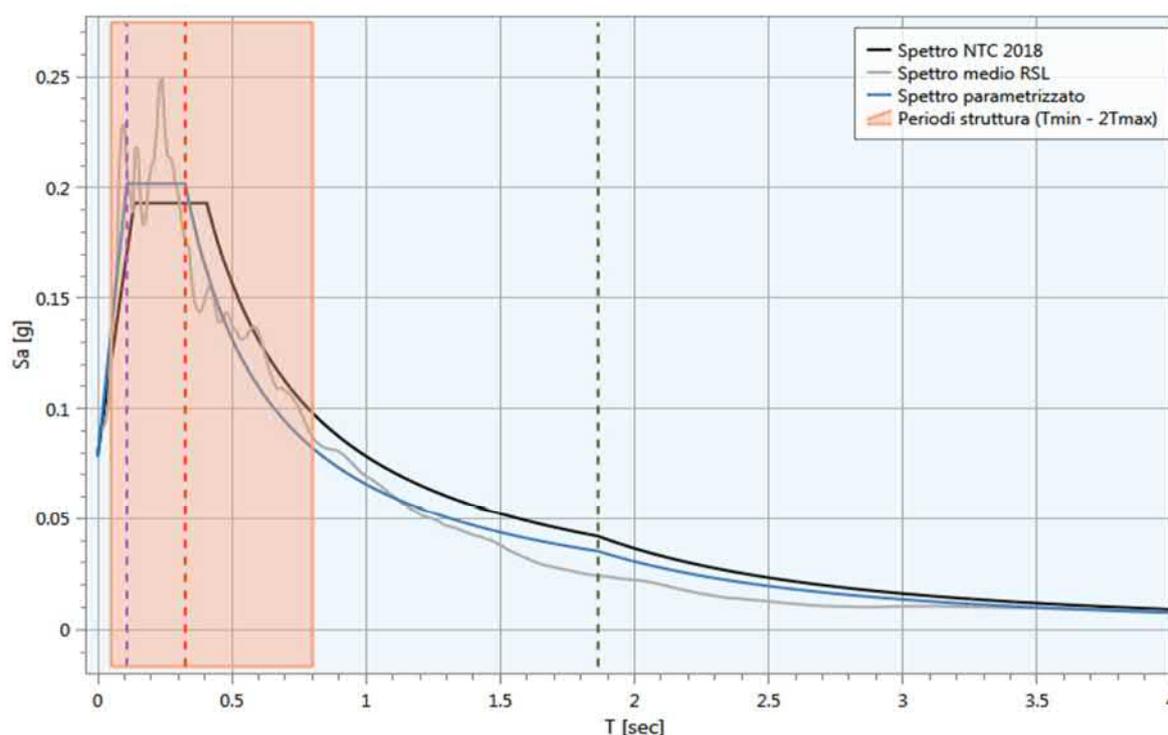
Al fine di definire lo spettro elastico di progetto, il progettista delle strutture dovrà confrontare lo spettro di risposta medio regolarizzato (secondo il metodo riportato in Appendice 1) ottenuto dallo studio di MS3 della microzona di interesse con quello ottenuto con l'approccio semplificato della normativa sismica, per la categoria di sottosuolo in corrispondenza del manufatto e per il tempo di ritorno di 475 anni. L'intervallo di periodi da considerare per il confronto tra lo spettro di MS3 e quello di norma dell'approccio semplificato è determinato considerando i periodi di vibrazione di interesse dell'opera nelle due direzioni principali, ossia il minore, T_{min} e il maggiore, T_{max} , dei tre periodi di vibrazione dell'edificio (inteso come struttura tridimensionale) con massa partecipante più elevata, tenendo anche conto dell'elongamento degli stessi durante la risposta sismica. Tale intervallo è compreso tra T_{min} e $2 T_{max}$.

In questo intervallo dovranno essere valutate le seguenti due condizioni:

1. lo spettro di MS3 supera puntualmente in misura maggiore del 30% lo spettro semplificato di norma;
2. l'integrale dello spettro di MS3 è superiore del 20% rispetto al corrispondente integrale dello spettro semplificato di norma.

Nel caso specifico risulta:

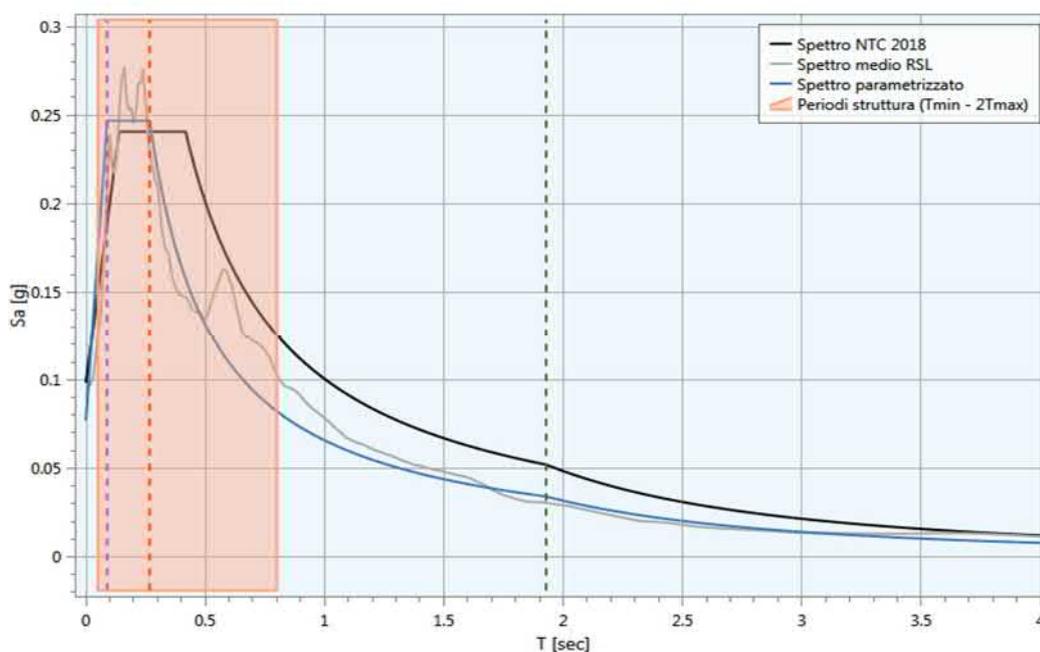
T_{min} [sec]	T_{max} [sec]	Rapporto puntuale [%]	Rapporto integrale [%]	Esito
0.05	0.40	4.57	-0.26	Lo spettro semplificato di norma può essere utilizzato per la progettazione.



Ubicazione sito: Via del Pino – Petriolo (MC)
Coordinate (datum WGS84): lon. 13.465 lat. 43.221

RELAZIONE DI CALCOLO

REGOLARIZZAZIONE SPETTRI DI RISPOSTA SLD



Archivio: SLD.rsp - Data : 28/11/2018

Oggetto: Analisi di Risposta Sismica Locale per la verifica di vulnerabilità dell'edificio sede della scuola dell'infanzia "Savini" a Petriolo

Committente

Settore Lavori Pubblici
del comune di Petriolo

Progettista

Dott. Geol. Fabrizio Raffaeli

Sommario

1 Introduzione	2
2 Normativa di riferimento	2
3 Parametri sismici di base.....	2
3.1 Pericolosità sismica del sito in esame	3
4 Spettro di risposta approccio semplificato NTC18.....	4
4.1 Stratigrafia e spettro di risposta NTC18	5
5 Regolarizzazione spettro di risposta ottenuto da analisi RSL.....	7
6 Confronto tra gli spettri di risposta MS3 e NTC18 (§ 3.2 Ordinanza n. 55 24/4/2018)	Errore. Il segnalibro non è definito.

1 Introduzione

Di seguito vengono riportati i risultati del confronto tra gli spettri di risposta proposti dal nuovo testo unico sulle costruzioni (NTC18), mediante l'approccio semplificato, e quelli forniti dalle analisi di risposta sismica locale (microzonazione sismica di III livello). Tali confronti vengono condotti secondo quanto indicato all'interno dell'**Ordinanza n. 55 del 24 aprile 2018**.

2 Normativa di riferimento

La normativa di riferimento per lo studio del problema in esame sono:

- D.M. del 17 Gennaio 2018 (Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni");
- Ordinanza n. 55 del 24 aprile 2018.

3 Parametri sismici di base

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale ed attraverso le ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{V_R} , nel periodo di riferimento V_R , come definito nel § 2.4. Tali forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{V_R} nel periodo di riferimento V_R a partire dai seguenti parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I valori suddetti possono essere calcolati con riferimento a quattro diversi stati limite ai quali corrispondono le seguenti probabilità di superamento:

Tab. 3.2.I – Probabilità di superamento P_{V_R} in funzione dello stato limite considerato

Stati Limite	P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Stabilito il periodo di riferimento della costruzione mediante la seguente relazione:

$$V_R = V_N C_U$$

dove:

- V_N vita nominale della costruzione;
- C_U coefficiente d'uso della costruzione.

è possibile, per ciascuno stato limite, ricavare il periodo di ritorno T_R del sisma utilizzando la seguente:

$$T_R = \frac{-V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

In funzione del periodo di ritorno dell'evento T_R i parametri della pericolosità sismica di base sono forniti a partire da un reticolo di riferimento disponibile sul sito <http://esse1.mi.ingv.it/>; un punto (che individua la posizione del sito di interesse) interno a tale reticolo può essere processato mediante media pesata dei valori assunti dal generico parametro nei vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici, attraverso la seguente espressione:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

dove:

- p valore del parametro di interesse nel punto in esame;
- p_i valore del parametro di interesse nell' i -esimo punto della maglia elementare contenente il punto in esame;
- d_i è la distanza del punto in esame dall' i -esimo punto della maglia suddetta.

3.1 Pericolosità sismica del sito in esame

Per il sito in esame si ottiene:

Latitudine (Datum ED50) [°]	43°.2217
Longitudine (Datum ED50) [°]	13°.4644
Altitudine [s.l.m.]:	264.00
Tipo di opera	Opere ordinarie
Classe d'uso	III
Vita nominale [anni]	50
Coefficiente d'uso	1.5

Sui quattro punti del reticolo di riferimento risulta:

Identificativi e coordinate (Datum ED50) dei punti che includono il sito		
Numero punto	Latitudine [°]	Longitudine [°]
22533	43.2350	13.4900
22754	43.1849	13.4215
22755	43.1850	13.4901
22532	43.2349	13.4214

Da cui, attraverso l'interpolazione per il sito in esame, si ottiene:

	Parametri dello spettro di risposta orizzontale			
	SLV	SLC	SLD	SLO
Tempo di ritorno	712	1462	75	45
Accelerazione sismica	0.202	0.258	0.082	0.066
Coefficiente Fo	2.446	2.494	2.442	2.439
Periodo T_c*	0.341	0.348	0.298	0.288

4 Spettro di risposta approccio semplificato NTC18

L'approccio semplificato proposto dall'NTC18 consente di ottenere degli spettri di risposta che tengano conto degli effetti di sito (§3.2.2 NTC18). In particolare, tali effetti vengono classificati in:

- Effetti stratigrafici;
- Effetti topografici.

Per entrambi la normativa consente di associare rispettivamente una categoria stratigrafica ed una categoria topografica. La prima, in base alla stratigrafia in esame, viene valutata in funzione del parametro:

$$V_{S,Eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Dove:

- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da V_S non inferiore a 800 m/s.

Le categorie di sottosuolo che consentono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite nella seguente tabella:

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Per valutare gli effetti topografici è possibile far riferimento, nel caso di configurazioni semplici (creste e dorsali allungati con altezza superiore a 30 m), alle seguenti categorie:

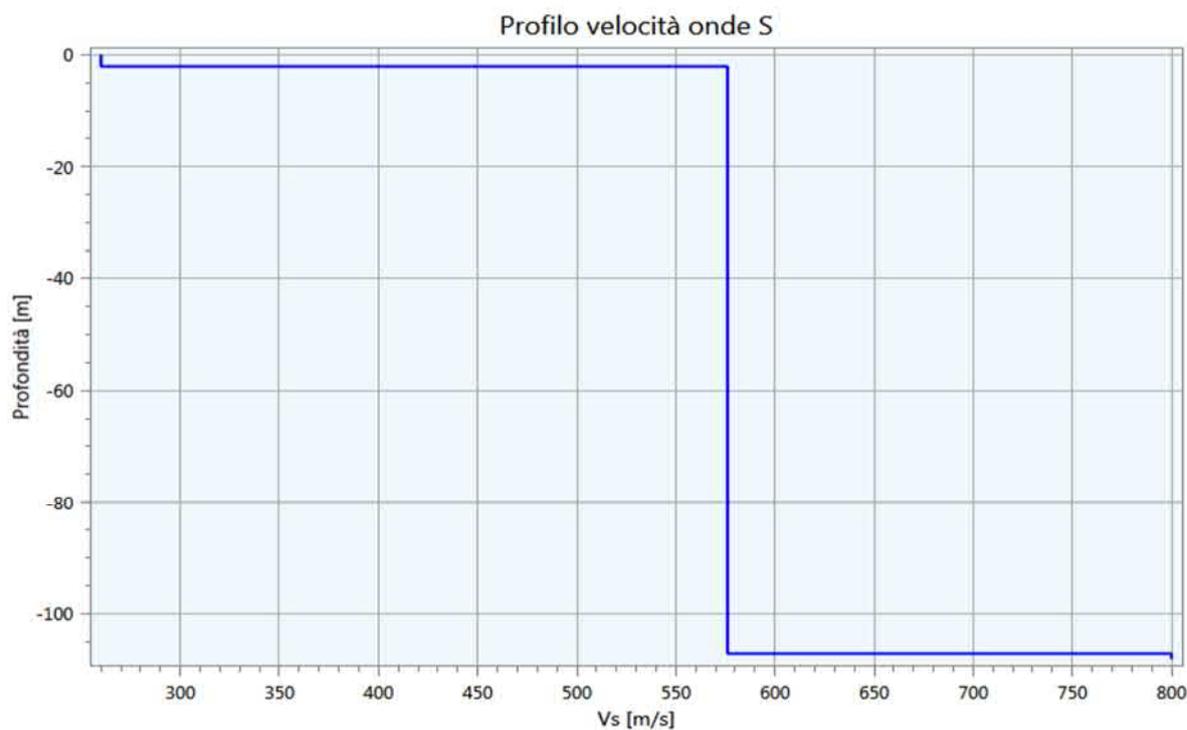
Tab. 3.2.III – Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

4.1 Stratigrafia e spettro di risposta NTC18

Nel caso specifico la stratigrafia considerata risulta:

Nome	Descrizione	Spessore [m]	Profondità [m]	Vs [m/s]
Strato (1)	Strato (1)	2.11	2.11	260.00
Strato (2)	Strato (2)	105.00	107.11	576.00
Strato (3)	Strato (3)	1.00	108.11	800.00

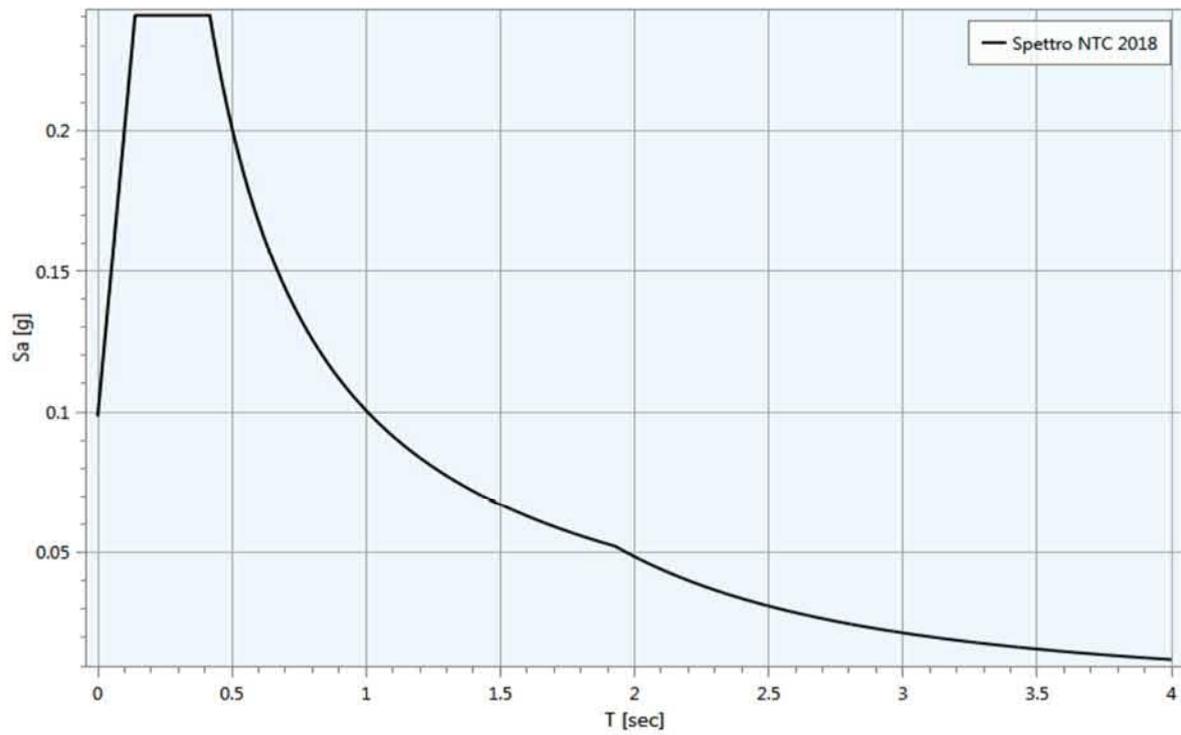


Da cui:

H [m]	$V_{S,Eq}$ [m/s]	Categoria stratigrafica
108.11	564.08	B

La categoria topografica risulta: **T1**;

Lo spettro di risposta in pseudo-accelerazione per lo stato limite per lo stato limite **SLD** e per uno smorzamento di riferimento $\xi = 5\%$ viene di seguito riportato.



5 Regolarizzazione spettro di risposta ottenuto da analisi RSL

Mediante la procedura di regolarizzazione proposta nell'appendice 1 dell'ordinanza n.55 del 24 Aprile 2018 è possibile trasformare lo spettro di risposta, risultato di simulazioni numeriche di risposta sismica locale, in uno spettro con forma standard (secondo NTC18). In particolare, tale procedura fornisce i parametri per l'inserimento dello spettro elastico all'interno di codici di calcolo per l'analisi strutturale finalizzati alla progettazione delle strutture in zona sismica. Tali parametri sono:

- S coefficiente di amplificazione che tiene conto delle condizioni stratigrafiche e delle condizioni topografiche da cui è possibile stimare $a_{max} = S a_g$ dove a_{max} e a_g rappresentano rispettivamente l'accelerazione d'angoraggio dello spettro di risposta con effetti di sito e l'accelerazione orizzontale massima su suolo di tipo A;
- T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro;
- T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro;
- F_0 fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale.

Di seguito vengono riportati i vari steps della procedura:

- a) Si calcola lo spettro di pseudoaccelerazione (S_A) e si determina il periodo proprio (T_A) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudoaccelerazione;
- b) Si calcola il valore medio dello spettro ($S_{A,m}$) nell'intorno di T_A tra $0.5 T_A$ e $1.5 T_A$, questo valore sarà assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard:

$$S_{A,m} = \frac{1}{T_A} \int_{0.5 T_A}^{1.5 T_A} S_A(T) dT$$

- c) Si determina lo spettro di pseudovelocità (S_V) a partire da quello di accelerazione, moltiplicando le ordinate spettrali di quest'ultimo per l'inverso della corrispondente frequenza circolare $\omega = 2\pi/T$:

$$S_V(T) = S_A(T) \frac{T}{2\pi}$$

e quindi si individua il periodo (T_V) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudovelocità;

- d) Si calcola il valore medio dello spettro ($S_{V,m}$) nell'intorno di T_V nell'intorno tra $0.8 T_V$ e $1.2 T_V$:

$$S_{V,m} = \frac{1}{0.4 T_V} \int_{0.8 T_V}^{1.2 T_V} S_V(T) dT$$

- e) Si determina il periodo in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante:

$$T_C = 2\pi \frac{S_{V,m}}{S_{A,m}}$$

- f) Si determina $T_B = \frac{1}{3}T_C$, $T_D = 4.0 \frac{a_g}{g} + 1.6$ ed $S = \frac{a_{max}}{a_g}$ con a_{max} punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output. Poiché il valore di a_{max} non è generalmente fornito nello spettro delle simulazioni numeriche si procede per estrapolazione lineare, secondo la seguente equazione:

$$a_{max} = \left(\frac{S_e(T = 0.01s)}{S_{A,m}} - \frac{0.01}{T_B} \right) \left(\frac{S_{A,m}}{1 - \frac{0.01}{T_B}} \right)$$

con $S_e(T = 0.01s)$ ordinata dello spettro di accelerazione per $T = 0.01s$, primo valore del periodo nello spettro elastico delle simulazioni numeriche.

Infine, una volta stabilito lo smorzamento di riferimento ξ , le ordinate dello spettro in pseudo-accelerazione vengono ottenute mediante le seguenti relazioni:

$$0 \leq T \leq T_B S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C S_e(T) = a_g S \eta F_0$$

$$T_C \leq T \leq T_D S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T \leq T_D S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

nelle quali:

- T periodo proprio di vibrazione;
- η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali B diversi dal 5%, mediante la relazione:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55$$

Di seguito si riportano i punti dello spettro di risposta ottenuto dalle simulazioni numeriche:

	T [sec]	Sa [g]
1	0.00	0.077
2	0.0889	0.247
3	0.2667	0.247
4	0.2667	0.247
5	0.2751	0.239
6	0.2835	0.232
7	0.292	0.225
8	0.3004	0.219
9	0.3088	0.213

10	0.3173	0.207
11	0.3257	0.202
12	0.3341	0.197
13	0.3426	0.192
14	0.351	0.188
15	0.3594	0.183
16	0.3679	0.179
17	0.3763	0.175
18	0.3847	0.171
19	0.3932	0.167
20	0.4016	0.164
21	0.41	0.161
22	0.4185	0.157
23	0.4269	0.154
24	0.4353	0.151
25	0.4438	0.148
26	0.4522	0.146
27	0.4606	0.143
28	0.4691	0.14
29	0.4775	0.138
30	0.4859	0.135
31	0.4944	0.133
32	0.5028	0.131
33	0.5112	0.129
34	0.5197	0.127
35	0.5281	0.125
36	0.5365	0.123
37	0.545	0.121
38	0.5534	0.119
39	0.5618	0.117
40	0.5703	0.115
41	0.5787	0.114
42	0.5871	0.112
43	0.5956	0.111
44	0.604	0.109
45	0.6124	0.107
46	0.6209	0.106

47	0.6293	0.105
48	0.6377	0.103
49	0.6462	0.102
50	0.6546	0.101
51	0.663	0.099
52	0.6715	0.098
53	0.6799	0.097
54	0.6883	0.096
55	0.6968	0.094
56	0.7052	0.093
57	0.7136	0.092
58	0.7221	0.091
59	0.7305	0.09
60	0.7389	0.089
61	0.7474	0.088
62	0.7558	0.087
63	0.7642	0.086
64	0.7727	0.085
65	0.7811	0.084
66	0.7895	0.083
67	0.798	0.082
68	0.8064	0.082
69	0.8148	0.081
70	0.8233	0.08
71	0.8317	0.079
72	0.8401	0.078
73	0.8486	0.078
74	0.857	0.077
75	0.8654	0.076
76	0.8739	0.075
77	0.8823	0.075
78	0.8907	0.074
79	0.8991	0.073
80	0.9076	0.073
81	0.916	0.072
82	0.9244	0.071
83	0.9329	0.071

84	0.9413	0.07
85	0.9497	0.069
86	0.9582	0.069
87	0.9666	0.068
88	0.975	0.068
89	0.9835	0.067
90	0.9919	0.066
91	1.0003	0.066
92	1.0088	0.065
93	1.0172	0.065
94	1.0256	0.064
95	1.0341	0.064
96	1.0425	0.063
97	1.0509	0.063
98	1.0594	0.062
99	1.0678	0.062
100	1.0762	0.061
101	1.0847	0.061
102	1.0931	0.06
103	1.1015	0.06
104	1.11	0.059
105	1.1184	0.059
106	1.1268	0.058
107	1.1353	0.058
108	1.1437	0.058
109	1.1521	0.057
110	1.1606	0.057
111	1.169	0.056
112	1.1774	0.056
113	1.1859	0.056
114	1.1943	0.055
115	1.2027	0.055
116	1.2112	0.054
117	1.2196	0.054
118	1.228	0.054
119	1.2365	0.053
120	1.2449	0.053

121	1.2533	0.053
122	1.2618	0.052
123	1.2702	0.052
124	1.2786	0.051
125	1.2871	0.051
126	1.2955	0.051
127	1.3039	0.05
128	1.3124	0.05
129	1.3208	0.05
130	1.3292	0.05
131	1.3377	0.049
132	1.3461	0.049
133	1.3545	0.049
134	1.363	0.048
135	1.3714	0.048
136	1.3798	0.048
137	1.3883	0.047
138	1.3967	0.047
139	1.4051	0.047
140	1.4136	0.047
141	1.422	0.046
142	1.4304	0.046
143	1.4389	0.046
144	1.4473	0.045
145	1.4557	0.045
146	1.4642	0.045
147	1.4726	0.045
148	1.481	0.044
149	1.4895	0.044
150	1.4979	0.044
151	1.5063	0.044
152	1.5148	0.043
153	1.5232	0.043
154	1.5316	0.043
155	1.5401	0.043
156	1.5485	0.043
157	1.5569	0.042

158	1.5654	0.042
159	1.5738	0.042
160	1.5822	0.042
161	1.5907	0.041
162	1.5991	0.041
163	1.6075	0.041
164	1.616	0.041
165	1.6244	0.041
166	1.6328	0.04
167	1.6413	0.04
168	1.6497	0.04
169	1.6581	0.04
170	1.6666	0.039
171	1.675	0.039
172	1.6834	0.039
173	1.6919	0.039
174	1.7003	0.039
175	1.7087	0.039
176	1.7172	0.038
177	1.7256	0.038
178	1.734	0.038
179	1.7425	0.038
180	1.7509	0.038
181	1.7593	0.037
182	1.7678	0.037
183	1.7762	0.037
184	1.7846	0.037
185	1.7931	0.037
186	1.8015	0.037
187	1.8099	0.036
188	1.8184	0.036
189	1.8268	0.036
190	1.8352	0.036
191	1.8437	0.036
192	1.8521	0.036
193	1.8605	0.035
194	1.869	0.035

195	1.8774	0.035
196	1.8858	0.035
197	1.8943	0.035
198	1.9027	0.035
199	1.9111	0.034
200	1.9196	0.034
201	1.928	0.034
202	1.928	0.034
203	1.9385	0.034
204	1.9489	0.033
205	1.9594	0.033
206	1.9699	0.033
207	1.9803	0.032
208	1.9908	0.032
209	2.0013	0.032
210	2.0117	0.031
211	2.0222	0.031
212	2.0326	0.031
213	2.0431	0.03
214	2.0536	0.03
215	2.064	0.03
216	2.0745	0.029
217	2.085	0.029
218	2.0954	0.029
219	2.1059	0.029
220	2.1164	0.028
221	2.1268	0.028
222	2.1373	0.028
223	2.1478	0.028
224	2.1582	0.027
225	2.1687	0.027
226	2.1792	0.027
227	2.1896	0.026
228	2.2001	0.026
229	2.2105	0.026
230	2.221	0.026
231	2.2315	0.025

232	2.2419	0.025
233	2.2524	0.025
234	2.2629	0.025
235	2.2733	0.025
236	2.2838	0.024
237	2.2943	0.024
238	2.3047	0.024
239	2.3152	0.024
240	2.3257	0.023
241	2.3361	0.023
242	2.3466	0.023
243	2.3571	0.023
244	2.3675	0.023
245	2.378	0.022
246	2.3884	0.022
247	2.3989	0.022
248	2.4094	0.022
249	2.4198	0.022
250	2.4303	0.021
251	2.4408	0.021
252	2.4512	0.021
253	2.4617	0.021
254	2.4722	0.021
255	2.4826	0.021
256	2.4931	0.02
257	2.5036	0.02
258	2.514	0.02
259	2.5245	0.02
260	2.5349	0.02
261	2.5454	0.02
262	2.5559	0.019
263	2.5663	0.019
264	2.5768	0.019
265	2.5873	0.019
266	2.5977	0.019
267	2.6082	0.019
268	2.6187	0.019

269	2.6291	0.018
270	2.6396	0.018
271	2.6501	0.018
272	2.6605	0.018
273	2.671	0.018
274	2.6815	0.018
275	2.6919	0.018
276	2.7024	0.017
277	2.7128	0.017
278	2.7233	0.017
279	2.7338	0.017
280	2.7442	0.017
281	2.7547	0.017
282	2.7652	0.017
283	2.7756	0.016
284	2.7861	0.016
285	2.7966	0.016
286	2.807	0.016
287	2.8175	0.016
288	2.828	0.016
289	2.8384	0.016
290	2.8489	0.016
291	2.8594	0.016
292	2.8698	0.015
293	2.8803	0.015
294	2.8907	0.015
295	2.9012	0.015
296	2.9117	0.015
297	2.9221	0.015
298	2.9326	0.015
299	2.9431	0.015
300	2.9535	0.015
301	2.964	0.014
302	2.9745	0.014
303	2.9849	0.014
304	2.9954	0.014
305	3.0059	0.014

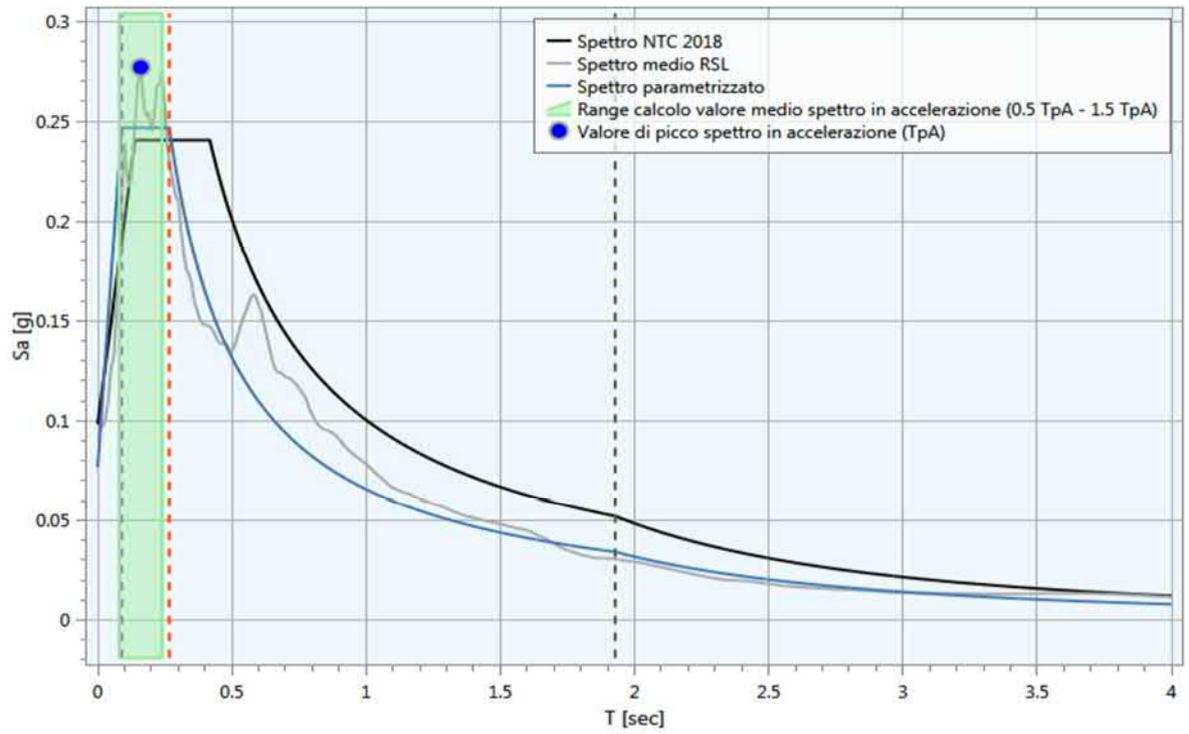
306	3.0163	0.014
307	3.0268	0.014
308	3.0373	0.014
309	3.0477	0.014
310	3.0582	0.014
311	3.0686	0.013
312	3.0791	0.013
313	3.0896	0.013
314	3.10	0.013
315	3.1105	0.013
316	3.121	0.013
317	3.1314	0.013
318	3.1419	0.013
319	3.1524	0.013
320	3.1628	0.013
321	3.1733	0.013
322	3.1838	0.013
323	3.1942	0.012
324	3.2047	0.012
325	3.2152	0.012
326	3.2256	0.012
327	3.2361	0.012
328	3.2465	0.012
329	3.257	0.012
330	3.2675	0.012
331	3.2779	0.012
332	3.2884	0.012
333	3.2989	0.012
334	3.3093	0.012
335	3.3198	0.012
336	3.3303	0.011
337	3.3407	0.011
338	3.3512	0.011
339	3.3617	0.011
340	3.3721	0.011
341	3.3826	0.011
342	3.3931	0.011

343	3.4035	0.011
344	3.414	0.011
345	3.4244	0.011
346	3.4349	0.011
347	3.4454	0.011
348	3.4558	0.011
349	3.4663	0.011
350	3.4768	0.01
351	3.4872	0.01
352	3.4977	0.01
353	3.5082	0.01
354	3.5186	0.01
355	3.5291	0.01
356	3.5396	0.01
357	3.55	0.01
358	3.5605	0.01
359	3.5709	0.01
360	3.5814	0.01
361	3.5919	0.01
362	3.6023	0.01
363	3.6128	0.01
364	3.6233	0.01
365	3.6337	0.01
366	3.6442	0.01
367	3.6547	0.01
368	3.6651	0.009
369	3.6756	0.009
370	3.6861	0.009
371	3.6965	0.009
372	3.707	0.009
373	3.7175	0.009
374	3.7279	0.009
375	3.7384	0.009
376	3.7488	0.009
377	3.7593	0.009
378	3.7698	0.009
379	3.7802	0.009

380	3.7907	0.009
381	3.8012	0.009
382	3.8116	0.009
383	3.8221	0.009
384	3.8326	0.009
385	3.843	0.009
386	3.8535	0.009
387	3.864	0.008
388	3.8744	0.008
389	3.8849	0.008
390	3.8954	0.008
391	3.9058	0.008
392	3.9163	0.008
393	3.9267	0.008
394	3.9372	0.008
395	3.9477	0.008
396	3.9581	0.008
397	3.9686	0.008
398	3.9791	0.008
399	3.9895	0.008
400	4.00	0.008

Dalla procedura di regolarizzazione risulta:

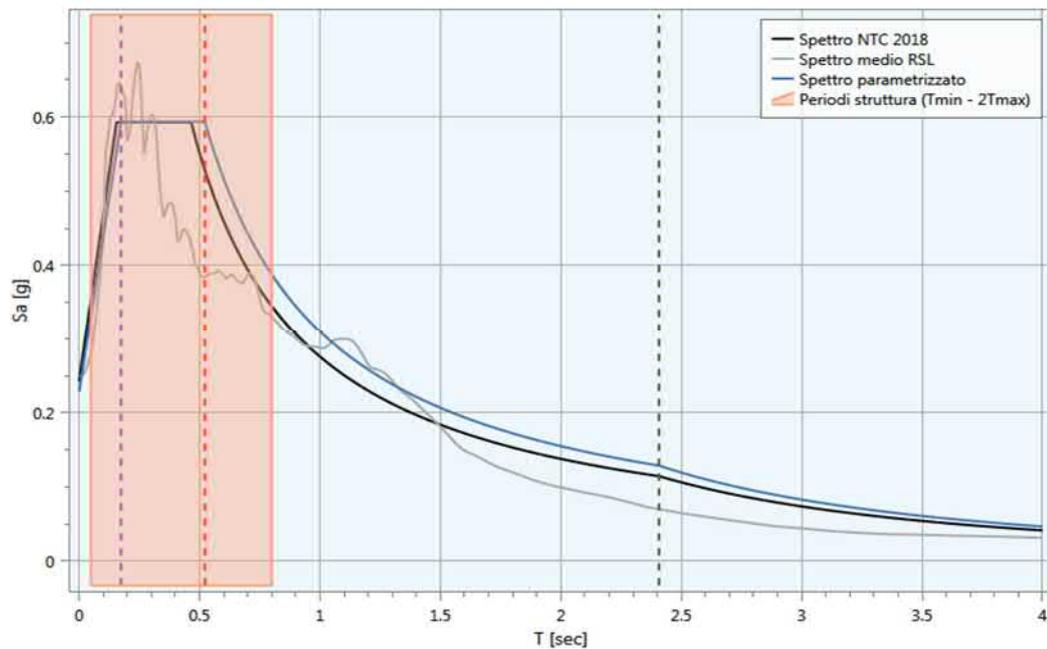
Parametrizzazione RSL		
TpA	[sec]	0.16
0.5 TpA	[sec]	0.08
1.5 TpA	[sec]	0.24
Sa,medio	[g]	0.25
TpV	[sec]	1.67
0.8 TpV	[sec]	1.34
1.2 TpV	[sec]	2.00
Sv,medio	[g*s]	0.01
Parametri spettro regolarizzato		
F0		3.21
S		0.94
Tb	[sec]	0.09
Tc	[sec]	0.27
Td	[sec]	1.93



Ubicazione sito:
Coordinate (datum WGS84): lon. 13.4635° lat. 43.2208°

RELAZIONE DI CALCOLO

REGOLARIZZAZIONE SPETTRI DI RISPOSTA SLV



Archivio: SLV.rsp - Data : 28/11/2018

Oggetto: Analisi di Risposta Sismica Locale per la verifica di vulnerabilità dell'edificio sede della scuola dell'infanzia "Savini" a Petriolo

Committente

Progettista

Settore Lavori Pubblici
del comune di Petriolo

Dott. Geol. Fabrizio Raffaeli

Sommario

1 Introduzione	2
2 Normativa di riferimento	2
3 Parametri sismici di base.....	2
3.1 Pericolosità sismica del sito in esame	3
4 Spettro di risposta approccio semplificato NTC18.....	4
4.1 Stratigrafia e spettro di risposta NTC18	5
5 Regolarizzazione spettro di risposta ottenuto da analisi RSL.....	7
6 Confronto tra gli spettri di risposta MS3 e NTC18 (§ 3.2 Ordinanza n. 55 24/4/2018)	Errore. Il segnalibro non è definito.

1 Introduzione

Di seguito vengono riportati i risultati del confronto tra gli spettri di risposta proposti dal nuovo testo unico sulle costruzioni (NTC18), mediante l'approccio semplificato, e quelli forniti dalle analisi di risposta sismica locale (microzonazione sismica di III livello). Tali confronti vengono condotti secondo quanto indicato all'interno dell'**Ordinanza n. 55 del 24 aprile 2018**.

2 Normativa di riferimento

La normative di riferimento per lo studio del problema in esame sono:

- D.M. del 17 Gennaio 2018 (Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni");
- Ordinanza n. 55 del 24 aprile 2018.

3 Parametri sismici di base

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale ed attraverso le ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{V_R} , nel periodo di riferimento V_R , come definito nel § 2.4. Tali forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{V_R} nel periodo di riferimento V_R a partire dai seguenti parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I valori suddetti possono essere calcolati con riferimento a quattro diversi stati limite ai quali corrispondono le seguenti probabilità di superamento:

Tab. 3.2.I – Probabilità di superamento P_{V_R} in funzione dello stato limite considerato

Stati Limite	P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Stabilito il periodo di riferimento della costruzione mediante la seguente relazione:

$$V_R = V_N C_U$$

dove:

- V_N vita nominale della costruzione;
- C_U coefficiente d'uso della costruzione.

è possibile, per ciascuno stato limite, ricavare il periodo di ritorno T_R del sisma utilizzando la seguente:

$$T_R = \frac{-V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

In funzione del periodo di ritorno dell'evento T_R i parametri della pericolosità sismica di base sono forniti a partire da un reticolo di riferimento disponibile sul sito <http://esse1.mi.ingv.it/>; un punto (che individua la posizione del sito di interesse) interno a tale reticolo può essere processato mediante media pesata dei valori assunti dal generico parametro nei vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici, attraverso la seguente espressione:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

dove:

- p valore del parametro di interesse nel punto in esame;
- p_i valore del parametro di interesse nell' i -esimo punto della maglia elementare contenente il punto in esame;
- d_i è la distanza del punto in esame dall' i -esimo punto della maglia suddetta.

3.1 Pericolosità sismica del sito in esame

Per il sito in esame si ottiene:

Latitudine (Datum ED50) [°]	43°.2217
Longitudine (Datum ED50) [°]	13°.4644
Altitudine [s.l.m.]:	264.00
Tipo di opera	Opere ordinarie
Classe d'uso	III
Vita nominale [anni]	50
Coefficiente d'uso	1.5

Sui quattro punti del reticolo di riferimento risulta:

Identificativi e coordinate (Datum ED50) dei punti che includono il sito		
Numero punto	Latitudine [°]	Longitudine [°]
22533	43.2350	13.4900
22754	43.1849	13.4215
22755	43.1850	13.4901
22532	43.2349	13.4214

Da cui, attraverso l'interpolazione per il sito in esame, si ottiene:

	Parametri dello spettro di risposta orizzontale			
	SLV	SLC	SLD	SLO
Tempo di ritorno	712	1462	75	45
Accelerazione sismica	0.202	0.258	0.082	0.066
Coefficiente Fo	2.446	2.494	2.442	2.439
Periodo T_c*	0.341	0.348	0.298	0.288

4 Spettro di risposta approccio semplificato NTC18

L'approccio semplificato proposto dall'NTC18 consente di ottenere degli spettri di risposta che tengano conto degli effetti di sito (§3.2.2 NTC18). In particolare, tali effetti vengono classificati in:

- Effetti stratigrafici;
- Effetti topografici.

Per entrambi la normativa consente di associare rispettivamente una categoria stratigrafica ed una categoria topografica. La prima, in base alla stratigrafia in esame, viene valutata in funzione del parametro:

$$V_{S,Eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Dove:

- h_i spessore dell'*i*-esimo strato;
- $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da V_S non inferiore a 800 m/s.

Le categorie di sottosuolo che consentono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite nella seguente tabella:

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Per valutare gli effetti topografici è possibile far riferimento, nel caso di configurazioni semplici (creste e dorsali allungati con altezza superiore a 30 m), alle seguenti categorie:

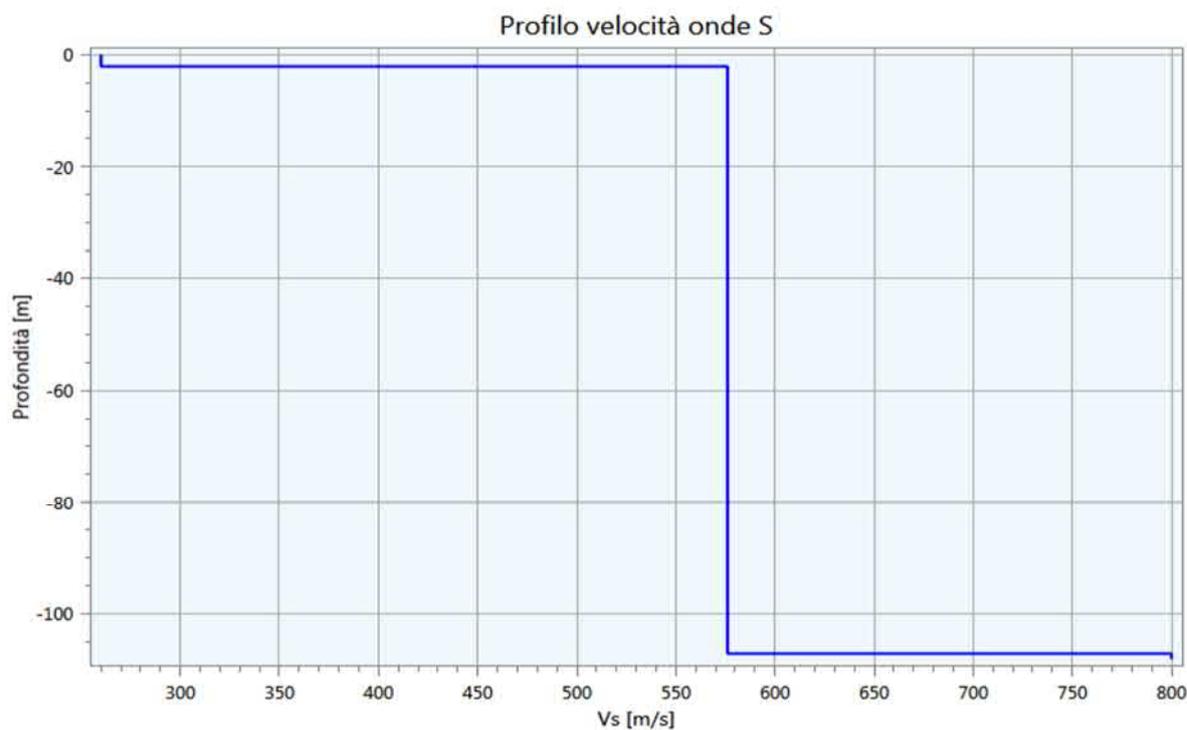
Tab. 3.2.III – Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

4.1 Stratigrafia e spettro di risposta NTC18

Nel caso specifico la stratigrafia considerata risulta:

Nome	Descrizione	Spessore [m]	Profondità [m]	Vs [m/s]
Strato (1)	Strato (1)	2.11	2.11	260.00
Strato (2)	Strato (2)	105.00	107.11	576.00
Strato (3)	Strato (3)	1.00	108.11	800.00

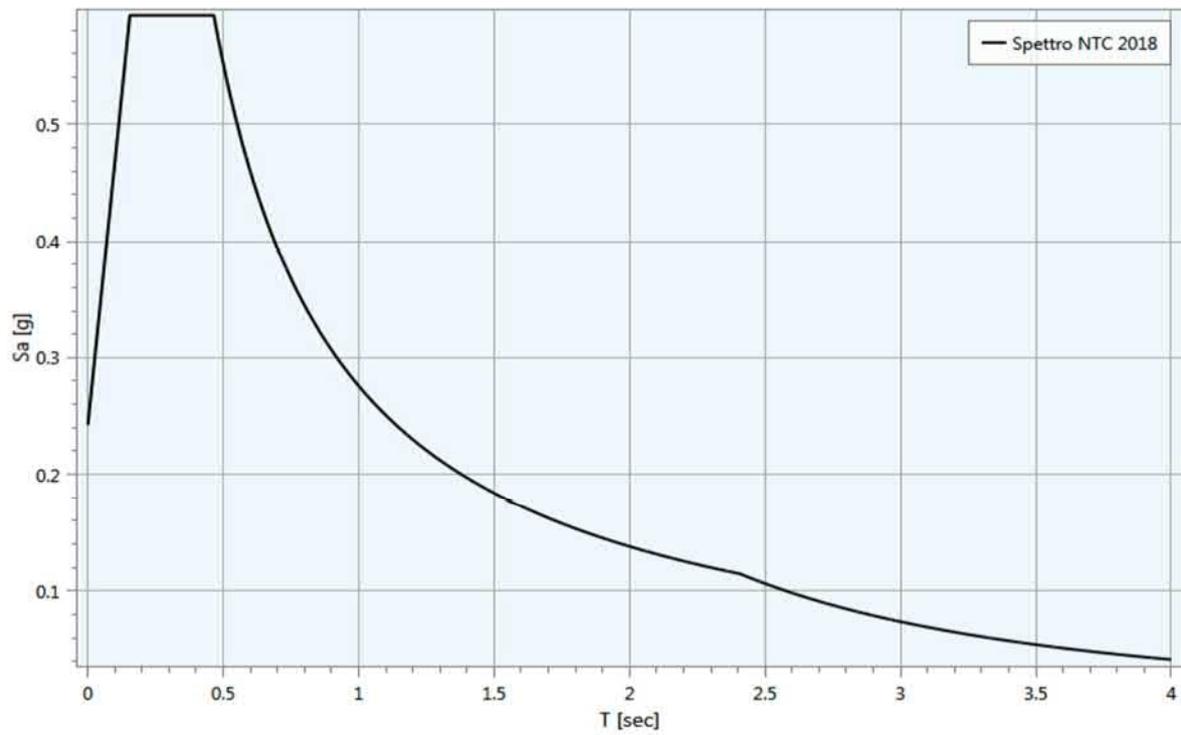


Da cui:

H [m]	$V_{S,Eq}$ [m/s]	Categoria stratigrafica
108.11	564.08	B

La categoria topografica risulta: **T1**;

Lo spettro di risposta in pseudo-accelerazione per lo stato limite per lo stato limite **SLV** e per uno smorzamento di riferimento $\xi = 5\%$ viene di seguito riportato.



5 Regolarizzazione spettro di risposta ottenuto da analisi RSL

Mediante la procedura di regolarizzazione proposta nell'appendice 1 dell'ordinanza n.55 del 24 Aprile 2018 è possibile trasformare lo spettro di risposta, risultato di simulazioni numeriche di risposta sismica locale, in uno spettro con forma standard (secondo NTC18). In particolare, tale procedura fornisce i parametri per l'inserimento dello spettro elastico all'interno di codici di calcolo per l'analisi strutturale finalizzati alla progettazione delle strutture in zona sismica. Tali parametri sono:

- S coefficiente di amplificazione che tiene conto delle condizioni stratigrafiche e delle condizioni topografiche da cui è possibile stimare $a_{max} = S a_g$ dove a_{max} e a_g rappresentano rispettivamente l'accelerazione d'angoraggio dello spettro di risposta con effetti di sito e l'accelerazione orizzontale massima su suolo di tipo A;
- T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro;
- T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro;
- F_0 fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale.

Di seguito vengono riportati i vari steps della procedura:

- a) Si calcola lo spettro di pseudoaccelerazione (S_A) e si determina il periodo proprio (T_A) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudoaccelerazione;
- b) Si calcola il valore medio dello spettro ($S_{A,m}$) nell'intorno di T_A tra $0.5 T_A$ e $1.5 T_A$, questo valore sarà assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard:

$$S_{A,m} = \frac{1}{T_A} \int_{0.5 T_A}^{1.5 T_A} S_A(T) dT$$

- c) Si determina lo spettro di pseudovelocità (S_V) a partire da quello di accelerazione, moltiplicando le ordinate spettrali di quest'ultimo per l'inverso della corrispondente frequenza circolare $\omega = 2\pi/T$:

$$S_V(T) = S_A(T) \frac{T}{2\pi}$$

e quindi si individua il periodo (T_V) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudovelocità;

- d) Si calcola il valore medio dello spettro ($S_{V,m}$) nell'intorno di T_V nell'intorno tra $0.8 T_V$ e $1.2 T_V$:

$$S_{V,m} = \frac{1}{0.4 T_V} \int_{0.8 T_V}^{1.2 T_V} S_V(T) dT$$

- e) Si determina il periodo in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante:

$$T_C = 2\pi \frac{S_{V,m}}{S_{A,m}}$$

- f) Si determina $T_B = \frac{1}{3}T_C$, $T_D = 4.0 \frac{a_g}{g} + 1.6$ ed $S = \frac{a_{max}}{a_g}$ con a_{max} punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output. Poiché il valore di a_{max} non è generalmente fornito nello spettro delle simulazioni numeriche si procede per estrapolazione lineare, secondo la seguente equazione:

$$a_{max} = \left(\frac{S_e(T = 0.01s)}{S_{A,m}} - \frac{0.01}{T_B} \right) \left(\frac{S_{A,m}}{1 - \frac{0.01}{T_B}} \right)$$

con $S_e(T = 0.01s)$ ordinata dello spettro di accelerazione per $T = 0.01s$, primo valore del periodo nello spettro elastico delle simulazioni numeriche.

Infine, una volta stabilito lo smorzamento di riferimento ξ , le ordinate dello spettro in pseudo-accelerazione vengono ottenute mediante le seguenti relazioni:

$$0 \leq T \leq T_B S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C S_e(T) = a_g S \eta F_0$$

$$T_C \leq T \leq T_D S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T \leq T_D S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

nelle quali:

- T periodo proprio di vibrazione;
- η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali B diversi dal 5%, mediante la relazione:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55$$

Di seguito si riportano i punti dello spettro di risposta ottenuto dalle simulazioni numeriche:

	T [sec]	Sa [g]
1	0.00	0.229
2	0.1741	0.594
3	0.5222	0.594
4	0.5222	0.594
5	0.5318	0.583
6	0.5414	0.573
7	0.551	0.563
8	0.5605	0.553
9	0.5701	0.544

10	0.5797	0.535
11	0.5892	0.526
12	0.5988	0.518
13	0.6084	0.51
14	0.618	0.502
15	0.6275	0.494
16	0.6371	0.487
17	0.6467	0.479
18	0.6563	0.472
19	0.6658	0.466
20	0.6754	0.459
21	0.685	0.453
22	0.6945	0.446
23	0.7041	0.44
24	0.7137	0.434
25	0.7233	0.429
26	0.7328	0.423
27	0.7424	0.418
28	0.752	0.412
29	0.7615	0.407
30	0.7711	0.402
31	0.7807	0.397
32	0.7903	0.392
33	0.7998	0.388
34	0.8094	0.383
35	0.819	0.379
36	0.8286	0.374
37	0.8381	0.37
38	0.8477	0.366
39	0.8573	0.362
40	0.8668	0.358
41	0.8764	0.354
42	0.886	0.35
43	0.8956	0.346
44	0.9051	0.343
45	0.9147	0.339
46	0.9243	0.335

47	0.9338	0.332
48	0.9434	0.329
49	0.953	0.325
50	0.9626	0.322
51	0.9721	0.319
52	0.9817	0.316
53	0.9913	0.313
54	1.0009	0.31
55	1.0104	0.307
56	1.02	0.304
57	1.0296	0.301
58	1.0391	0.298
59	1.0487	0.296
60	1.0583	0.293
61	1.0679	0.29
62	1.0774	0.288
63	1.087	0.285
64	1.0966	0.283
65	1.1062	0.28
66	1.1157	0.278
67	1.1253	0.276
68	1.1349	0.273
69	1.1444	0.271
70	1.154	0.269
71	1.1636	0.266
72	1.1732	0.264
73	1.1827	0.262
74	1.1923	0.26
75	1.2019	0.258
76	1.2114	0.256
77	1.221	0.254
78	1.2306	0.252
79	1.2402	0.25
80	1.2497	0.248
81	1.2593	0.246
82	1.2689	0.244
83	1.2785	0.243

84	1.288	0.241
85	1.2976	0.239
86	1.3072	0.237
87	1.3167	0.235
88	1.3263	0.234
89	1.3359	0.232
90	1.3455	0.23
91	1.355	0.229
92	1.3646	0.227
93	1.3742	0.226
94	1.3838	0.224
95	1.3933	0.223
96	1.4029	0.221
97	1.4125	0.22
98	1.422	0.218
99	1.4316	0.217
100	1.4412	0.215
101	1.4508	0.214
102	1.4603	0.212
103	1.4699	0.211
104	1.4795	0.21
105	1.489	0.208
106	1.4986	0.207
107	1.5082	0.206
108	1.5178	0.204
109	1.5273	0.203
110	1.5369	0.202
111	1.5465	0.201
112	1.5561	0.199
113	1.5656	0.198
114	1.5752	0.197
115	1.5848	0.196
116	1.5943	0.194
117	1.6039	0.193
118	1.6135	0.192
119	1.6231	0.191
120	1.6326	0.19

121	1.6422	0.189
122	1.6518	0.188
123	1.6614	0.187
124	1.6709	0.186
125	1.6805	0.185
126	1.6901	0.183
127	1.6996	0.182
128	1.7092	0.181
129	1.7188	0.18
130	1.7284	0.179
131	1.7379	0.178
132	1.7475	0.177
133	1.7571	0.176
134	1.7666	0.176
135	1.7762	0.175
136	1.7858	0.174
137	1.7954	0.173
138	1.8049	0.172
139	1.8145	0.171
140	1.8241	0.17
141	1.8337	0.169
142	1.8432	0.168
143	1.8528	0.167
144	1.8624	0.166
145	1.8719	0.166
146	1.8815	0.165
147	1.8911	0.164
148	1.9007	0.163
149	1.9102	0.162
150	1.9198	0.162
151	1.9294	0.161
152	1.939	0.16
153	1.9485	0.159
154	1.9581	0.158
155	1.9677	0.158
156	1.9772	0.157
157	1.9868	0.156

158	1.9964	0.155
159	2.006	0.155
160	2.0155	0.154
161	2.0251	0.153
162	2.0347	0.152
163	2.0442	0.152
164	2.0538	0.151
165	2.0634	0.15
166	2.073	0.15
167	2.0825	0.149
168	2.0921	0.148
169	2.1017	0.148
170	2.1113	0.147
171	2.1208	0.146
172	2.1304	0.146
173	2.14	0.145
174	2.1495	0.144
175	2.1591	0.144
176	2.1687	0.143
177	2.1783	0.142
178	2.1878	0.142
179	2.1974	0.141
180	2.207	0.14
181	2.2166	0.14
182	2.2261	0.139
183	2.2357	0.139
184	2.2453	0.138
185	2.2548	0.138
186	2.2644	0.137
187	2.274	0.136
188	2.2836	0.136
189	2.2931	0.135
190	2.3027	0.135
191	2.3123	0.134
192	2.3218	0.134
193	2.3314	0.133
194	2.341	0.132

195	2.3506	0.132
196	2.3601	0.131
197	2.3697	0.131
198	2.3793	0.13
199	2.3889	0.13
200	2.3984	0.129
201	2.408	0.129
202	2.408	0.129
203	2.416	0.128
204	2.4241	0.127
205	2.4321	0.126
206	2.4402	0.125
207	2.4482	0.125
208	2.4562	0.124
209	2.4643	0.123
210	2.4723	0.122
211	2.4804	0.121
212	2.4884	0.121
213	2.4964	0.12
214	2.5045	0.119
215	2.5125	0.118
216	2.5206	0.118
217	2.5286	0.117
218	2.5366	0.116
219	2.5447	0.115
220	2.5527	0.115
221	2.5608	0.114
222	2.5688	0.113
223	2.5768	0.112
224	2.5849	0.112
225	2.5929	0.111
226	2.601	0.11
227	2.609	0.11
228	2.6171	0.109
229	2.6251	0.108
230	2.6331	0.108
231	2.6412	0.107

232	2.6492	0.106
233	2.6573	0.106
234	2.6653	0.105
235	2.6733	0.104
236	2.6814	0.104
237	2.6894	0.103
238	2.6975	0.103
239	2.7055	0.102
240	2.7135	0.101
241	2.7216	0.101
242	2.7296	0.10
243	2.7377	0.10
244	2.7457	0.099
245	2.7537	0.098
246	2.7618	0.098
247	2.7698	0.097
248	2.7779	0.097
249	2.7859	0.096
250	2.7939	0.096
251	2.802	0.095
252	2.81	0.095
253	2.8181	0.094
254	2.8261	0.093
255	2.8341	0.093
256	2.8422	0.092
257	2.8502	0.092
258	2.8583	0.091
259	2.8663	0.091
260	2.8743	0.09
261	2.8824	0.09
262	2.8904	0.089
263	2.8985	0.089
264	2.9065	0.088
265	2.9145	0.088
266	2.9226	0.087
267	2.9306	0.087
268	2.9387	0.086

269	2.9467	0.086
270	2.9547	0.086
271	2.9628	0.085
272	2.9708	0.085
273	2.9789	0.084
274	2.9869	0.084
275	2.9949	0.083
276	3.003	0.083
277	3.011	0.082
278	3.0191	0.082
279	3.0271	0.081
280	3.0352	0.081
281	3.0432	0.081
282	3.0512	0.08
283	3.0593	0.08
284	3.0673	0.079
285	3.0754	0.079
286	3.0834	0.079
287	3.0914	0.078
288	3.0995	0.078
289	3.1075	0.077
290	3.1156	0.077
291	3.1236	0.077
292	3.1316	0.076
293	3.1397	0.076
294	3.1477	0.075
295	3.1558	0.075
296	3.1638	0.075
297	3.1718	0.074
298	3.1799	0.074
299	3.1879	0.073
300	3.196	0.073
301	3.204	0.073
302	3.212	0.072
303	3.2201	0.072
304	3.2281	0.072
305	3.2362	0.071

306	3.2442	0.071
307	3.2522	0.071
308	3.2603	0.07
309	3.2683	0.07
310	3.2764	0.07
311	3.2844	0.069
312	3.2924	0.069
313	3.3005	0.069
314	3.3085	0.068
315	3.3166	0.068
316	3.3246	0.068
317	3.3326	0.067
318	3.3407	0.067
319	3.3487	0.067
320	3.3568	0.066
321	3.3648	0.066
322	3.3728	0.066
323	3.3809	0.065
324	3.3889	0.065
325	3.397	0.065
326	3.405	0.064
327	3.4131	0.064
328	3.4211	0.064
329	3.4291	0.063
330	3.4372	0.063
331	3.4452	0.063
332	3.4533	0.063
333	3.4613	0.062
334	3.4693	0.062
335	3.4774	0.062
336	3.4854	0.061
337	3.4935	0.061
338	3.5015	0.061
339	3.5095	0.061
340	3.5176	0.06
341	3.5256	0.06
342	3.5337	0.06

343	3.5417	0.06
344	3.5497	0.059
345	3.5578	0.059
346	3.5658	0.059
347	3.5739	0.058
348	3.5819	0.058
349	3.5899	0.058
350	3.598	0.058
351	3.606	0.057
352	3.6141	0.057
353	3.6221	0.057
354	3.6301	0.057
355	3.6382	0.056
356	3.6462	0.056
357	3.6543	0.056
358	3.6623	0.056
359	3.6703	0.055
360	3.6784	0.055
361	3.6864	0.055
362	3.6945	0.055
363	3.7025	0.054
364	3.7105	0.054
365	3.7186	0.054
366	3.7266	0.054
367	3.7347	0.054
368	3.7427	0.053
369	3.7507	0.053
370	3.7588	0.053
371	3.7668	0.053
372	3.7749	0.052
373	3.7829	0.052
374	3.7909	0.052
375	3.799	0.052
376	3.807	0.052
377	3.8151	0.051
378	3.8231	0.051
379	3.8312	0.051

380	3.8392	0.051
381	3.8472	0.05
382	3.8553	0.05
383	3.8633	0.05
384	3.8714	0.05
385	3.8794	0.05
386	3.8874	0.049
387	3.8955	0.049
388	3.9035	0.049
389	3.9116	0.049
390	3.9196	0.049
391	3.9276	0.048
392	3.9357	0.048
393	3.9437	0.048
394	3.9518	0.048
395	3.9598	0.048
396	3.9678	0.047
397	3.9759	0.047
398	3.9839	0.047
399	3.992	0.047
400	4.00	0.047

Dalla procedura di regolarizzazione risulta:

▷ Parametrizzazione RSL		
TpA	[sec]	0.24
0.5 TpA	[sec]	0.12
1.5 TpA	[sec]	0.36
Sa,medio	[g]	0.59
TpV	[sec]	1.14
0.8 TpV	[sec]	0.91
1.2 TpV	[sec]	1.37
Sv,medio	[g*s]	0.05
▷ Parametri spettro regolarizzato		
F0		2.59
S		1.13
Tb	[sec]	0.17
Tc	[sec]	0.52
Td	[sec]	2.41

