

Sogliano Ambiente S.p.A

Piazza Garibaldi, 12
47030 Sogliano al Rubicone (FC)
Tel. 0541 948910
Fax 0541 948909
e-mail: info@soglianoambiente.it
sito web: www.soglianoambiente.it



**Sogliano
Ambiente**

DISCARICA PER RIFIUTI NON PERICOLOSI DENOMINATA "GINESTRETO 3"

Località Ginestreto - Comune di Sogliano al Rubicone (FC)

Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale

L.R. 4/18 e D.Lgs. 152/06 e s.m.i.

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

RISPOSTA SISMICA LOCALE (Geol. F. Stragapede)

Allegato:

E

Elaborato:

22

Progettazione:

ing. Maurizio Carbone - Sogliano Ambiente S.p.A.

Collaboratori alla progettazione:

dott. Nicholas Lazzarini - Sogliano Ambiente S.p.A.
ing. Maurizio Migliori - Sogliano Ambiente S.p.A.

Timbro e firma:

Consulenti per la progettazione:

ing. F. Forlani - Studio Sgai s.r.l., Morciano di R. (RN)
dott. geol. A. Ricci - S. Piero in Bagno (FC)
geom. R. Galeotti - Studio Geo-exe, Forlì (FC)
ing. D. Neri - Ingegneria ambientale, Forlì (FC)
dott. for. G. Grapeggia - Studio Verde, Forlì (FC)
ing. M. Orlati - Studio Tema, Forlì (FC)
ing. S. Bagli - Gecosistema, Rimini (RN)
ing. P. Bernabini - Cober S.r.l., S. Piero in Bagno (FC)

Codice documento: Ara G3 SIA GE 05.22

Rev.	Data	Redatto	Controllato	Approvato
0	set-22	AR	MC	MC

Geol.Francesco Stragapede

Via Vecchia Provinciale Montalbano 88 - Comune di Serravalle P.se (PT)

tel./fax 0573-929214 cell.335-1208356 email stragapede@soilpro.it

PEC stragapede.francesco@epap.sicurezzapostale.it



Comune di Sogliano al Rubicone
Provincia di Forlì-Cesena

relazione tecnica analisi risposta sismica locale

realizzazione briglia di tenuta area di stoccaggio
area G3 – Ginestreto

loc.Ginestreto

Serravalle P.se 03.02.2022

(geol.Francesco Stragapede)



Geol.Francesco Stragapede

Via Vecchia Provinciale Montalbano 88/c - Comune di Serravalle P.se (PT)
tel./ fax 0573-929214 cell.335-1208356 email stragapede@soilpro.it
PEC stragapede.francesco@epap.sicurezzapostale.it

RELAZIONE TECNICA ANALISI RISPOSTA SISMICA LOCALE

**realizzazione briglia di tenuta area di stoccaggio
area G3 – Ginestreto**

Comune di Sogliano al Rubicone (FC)

PREMESSA

La presente relazione riferisce l'analisi di risposta sismica locale sviluppata a supporto della realizzazione di briglia di tenuta di area di stoccaggio, da realizzare nell'ambito della discarica Ginestreto nella porzione di valle della vallecchia G3 in Comune di Sogliano al Rubicone (FC), in riferimento alle specifiche di cui al § 7.11.3 del DM 17.01.2018.

La necessità di effettuare una analisi specifica della risposta sismica locale deriva dalla tipologia e classe d'uso della struttura di progetto, per la quale non è previsto l'impiego di modelli di risposta elastica in fondazione di tipo semplificato, anche in relazione alle problematiche di locale amplificazione attese al sito, derivanti dalla natura dei terreni nel sottosuolo, dalla geometria del substrato lapideo e dalla posizione del luogo di intervento rispetto alle geometrie sepolte. Le condizioni di locale singolarità sono evidenziate nell'ambito dello studio geologico redatto a supporto degli interventi di progetto e nelle restituzioni dei rilievi geofisici specificatamente eseguiti nell'ambito dell'area di studio.

L'analisi è stata condotta in riferimento alla sollecitazione attesa per una realizzazione ricadente in "classe d'uso III", in riferimento alla § 2.4.2 del NTC18

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

e di “tipo 3”, in riferimento alla tabellazione 2.4.I del § 2.4.1 del NTC18

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

con “coefficiente d'uso” 1.5, in riferimento alla tabellazione 2.4.II del § 2.4.3 del NTC18

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

L'analisi è stata pertanto condotta attraverso la ricostruzione di dettaglio di una sezione trasversale alla briglia di progetto, direzione nella quale gli effetti dinamici attesi per la locale pericolosità di sito devono essere oggetto di implementazione nelle verifiche geotecniche dell'opera.

La sezione considerata è quella di progetto, in cui le geometrie del sottosuolo e le caratteristiche dei terreni sono state derivate dagli studi geologici, geofisici e geotecnici condotti nell'area di studio, attraverso l'esame e la correlazione di indagini geofisiche dirette ed indirette e sondaggi geognostici, specificatamente sviluppati per la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo, come definito al § 7.11.3 del DM 17.01.2018.

Il modello sismo-stratigrafico di sito è stato sviluppato anche impiegando i dati acquisiti in differenti campagne geofisiche, adoperando opportunamente le informazioni disponibili agli strumenti di pianificazione e reperibili nei pubblici database consultati.

ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

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.

L'analisi della risposta attesa in fondazione, per le singolarità stratigrafiche e la variabilità areale delle geometrie nel sottosuolo, è stata condotta con modellazione 2D, impiegando software Stacec-LRS2D, svolgendo le seguenti fasi:

1. Definizione dell'input sismico;
2. Stima dell'accelerazione di base;
3. Analisi dei dati di disaggregazione;
4. Estrazione, conversione e normalizzazione accelerogrammi di input;
5. Inserimento sismostratigrafia di input;
6. Esecuzione dell'analisi e restituzione grafica.

Nel caso in esame l'analisi numerica che valuta gli effetti del sito nell'amplificazione delle onde sismiche è di tipo bidimensionale;

L'approccio impiegato è stato reso necessario dalla ricorrenza di situazioni in cui il sottosuolo presenta una geometria variabile in cui, oltre alla profondità, è importante considerare un'altra delle due restanti dimensioni spaziali, condizione necessaria nelle aree marginali delle valli alluvionali o, come nel caso in esame, lungo un versante con geometrie non regolari ed inclinazioni importanti ai fini delle modalità di propagazione ed amplificazione sismica locale.

L'analisi è stata svolta in riferimento al punto di controllo centrale lo sviluppo della briglia di progetto, alla quota di imposta dell'elemento geotecnico di studio, anche considerando il piano di imposta soggetto al sovraccarico della realizzazione.

METODO DI ANALISI E CODICE DI CALCOLO LSR_2D

Il codice di calcolo LSR_2d 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.

Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso ed è 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.

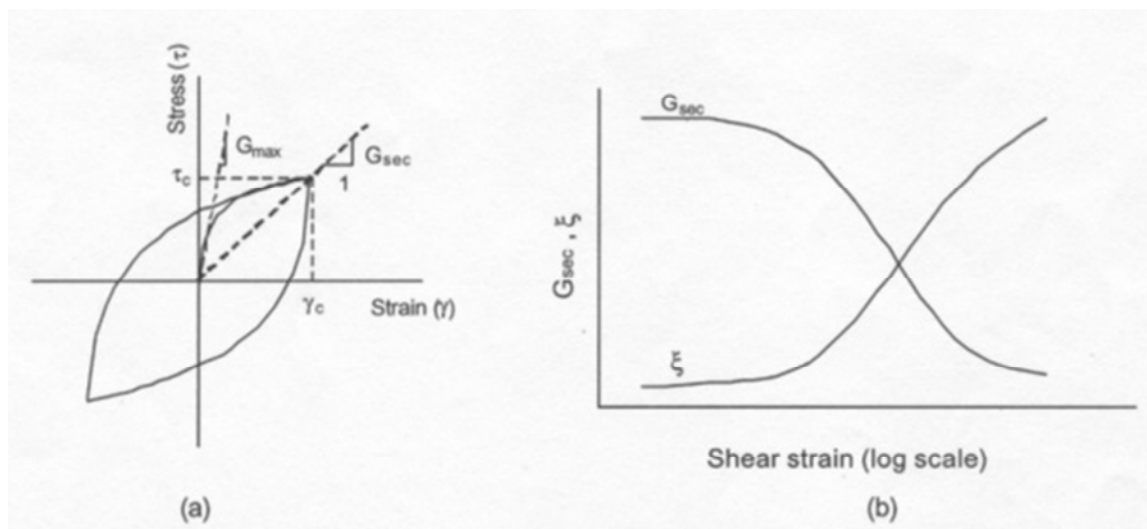
La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo particolarmente 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 di seguito, dove la tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata $\dot{\gamma}$, secondo la relazione:

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

dove G è il Modulo di taglio
 η è la viscosità del mezzo



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 poco sopra; 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:

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

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

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

dove ΔW^{dissp} è la quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
 W^{max} è la 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.

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 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.

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

dove M è matrice di massa del sistema;
 C è matrice di smorzamento del sistema;
 K è matrice di rigidezza del sistema;
 \ddot{u}, \dot{u}, u sono vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;
 a_g è vettore di accelerazione alla base;

Tale equazione vale per ogni istante di tempo t_n e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni t_n 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 è l'incremento temporale tra l'istante di tempo t_n e t_{n-1} ;
 β è il parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25;
 γ è il parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50;

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 sono i 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 è la 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 è la frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

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. 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:

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

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

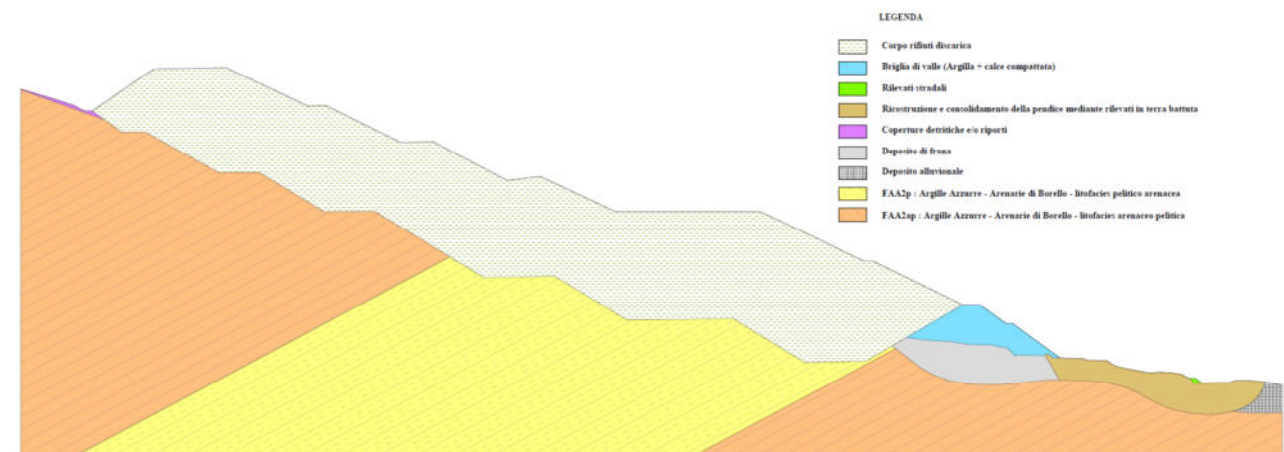
dove ρ è la densità di massa del terreno adiacente alla frontiera laterale;
 V_p è la velocità delle onde P del terreno adiacente alla frontiera laterale;
 V_s è la velocità delle onde S del terreno adiacente alla frontiera laterale;
 A è l'area di influenza relativa al nodo su cui agisce lo smorzatore;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

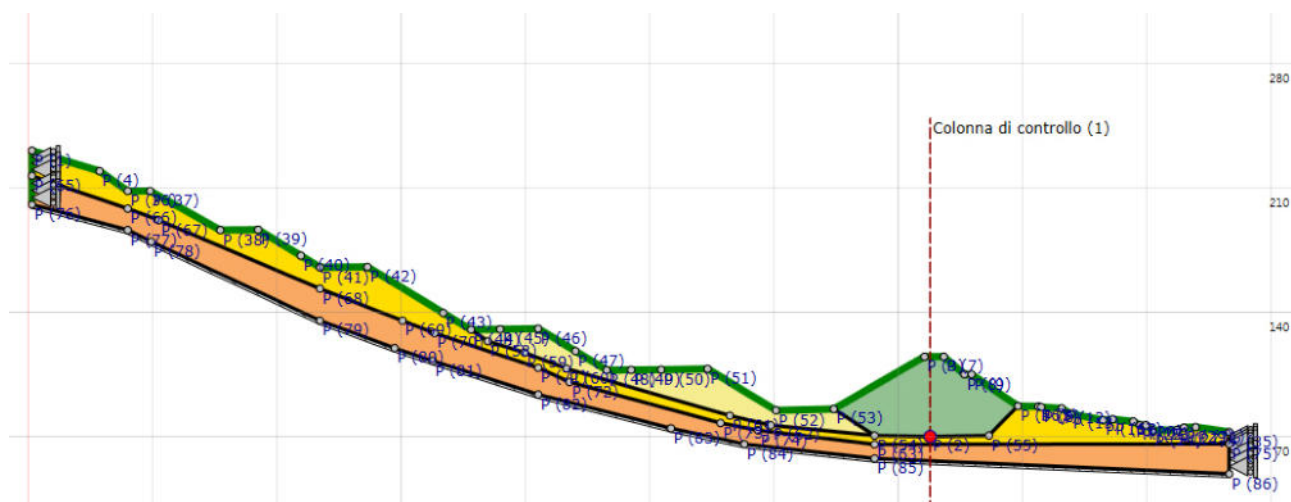
Procedimento iterativo

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 sezione geologica redatta per l'area di studio, implementata nella modellazione



restituito in forma grafica sintetica, con indicazione della verticale di controllo,



sezione sismo-stratigrafica dell'area di studio con posizione del punto e della colonna di controllo

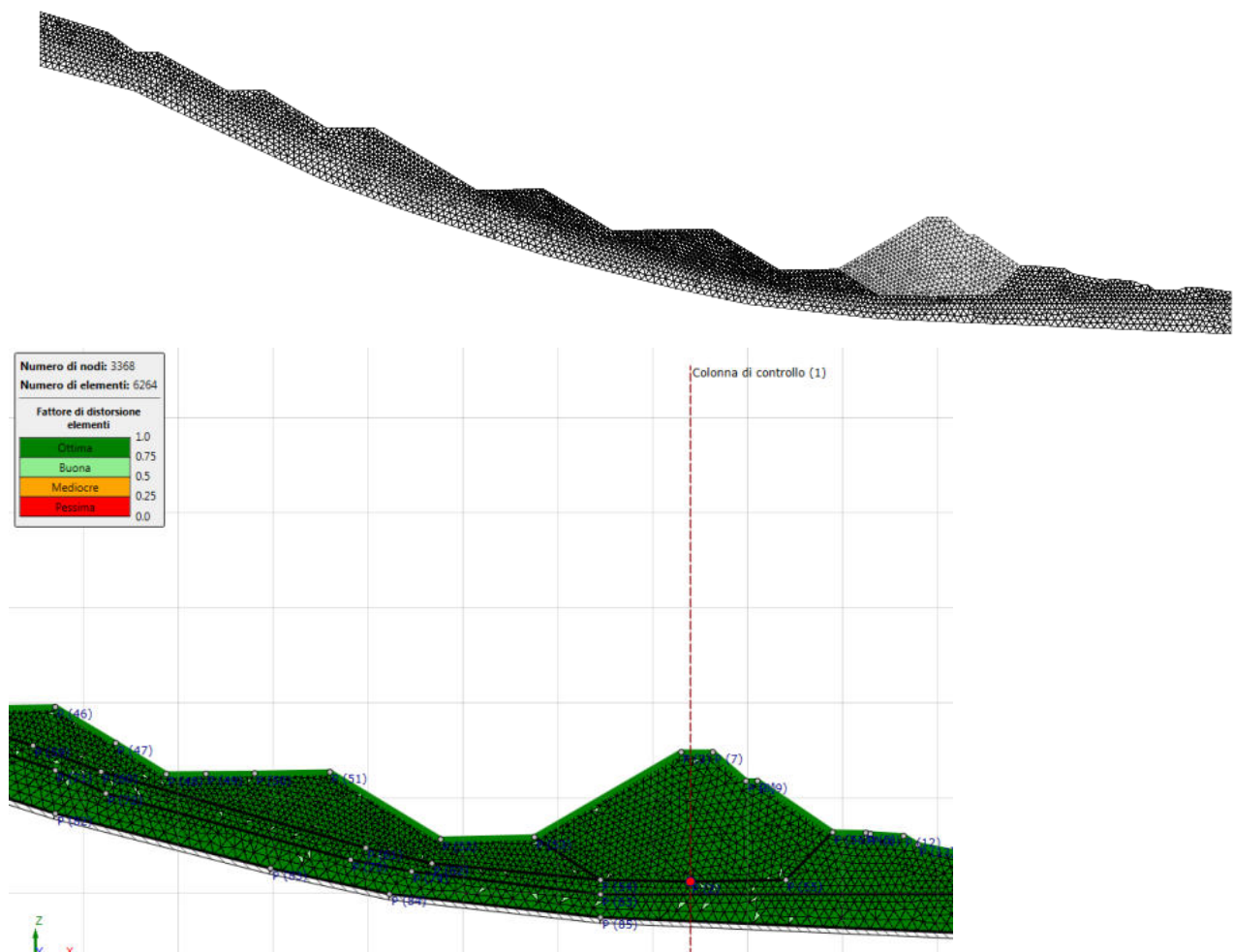
si definisce lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico

attraverso:

- 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 $G_1 = G(\gamma_1)$ e $D_1 = D(\gamma_1)$;
- iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$).

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, come di seguito graficamente descritto negli elementi in cui è discretizzata la sezione di studio



Modello FEM sezione di studio e dettaglio degli elementi, griglia ottimizzata con passo inferiore a m 2

DATI DI INPUT

Le informazioni relative ai dati di input utilizzati per lo studio della risposta sismica locale sono reperiti attraverso le specifiche modalità che consentono di implementare il comportamento dissipativo degli specifici suoli presenti nel sottosuolo dell'area in esame e di riferire alle sollecitazioni al sito quelle caratteristiche della sismicità sito dipendente.

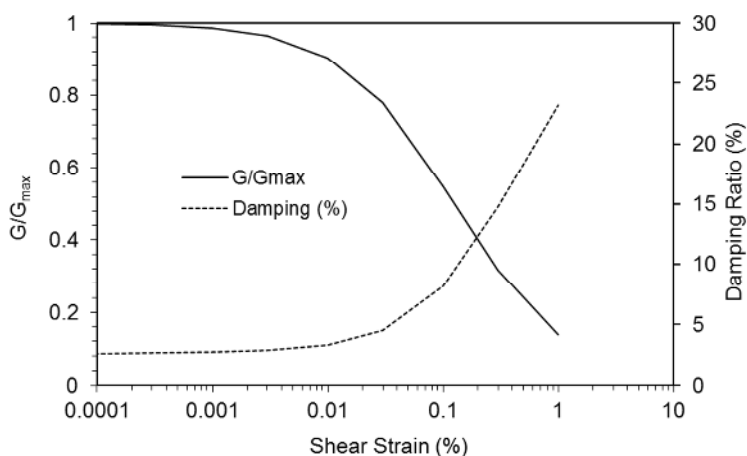
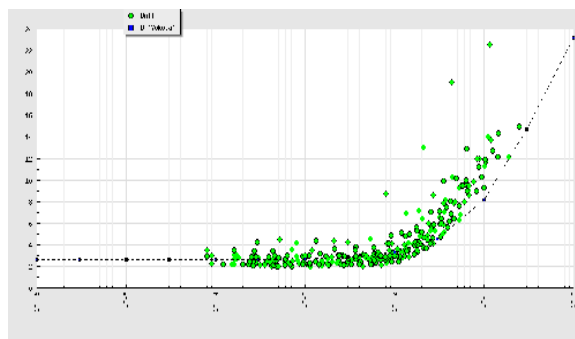
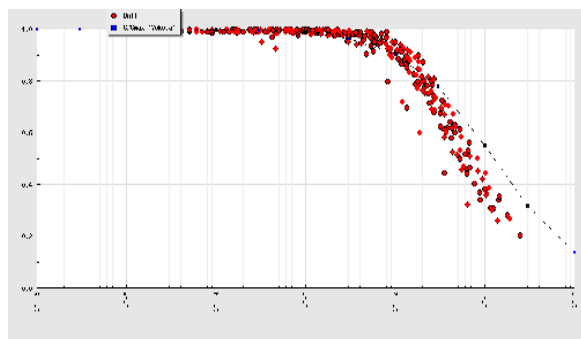
Curve di Decadimento dei Materiali

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 .

Per le tipologie litologiche individuate nel sottosuolo, sulla base dei dati geognostici e geofisici considerati, si impiegano le curve di seguito descritte graficamente:

CURVA DI DEGRADO IMPIEGATA

terreni pelitico arenacei e arenaceo pelitici - Argille Azzurre ([prove di CR e TTC sulla formazione](#))



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 dei diversi terreni 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.

In riferimento alla rappresentazione grafica della stratigrafia di progetto già innanzi riportata, si relazionano i diversi strati con le caratteristiche geomeccaniche a questi associate:

Strato	Descrizione	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
	arenarie e peliti	1900	350	0.40	prove di CR e TTC sulla formazione FAA
		2000	460	0.38	
		2200	650	0.35	
	bedrock sismico	2400	800	0.25	

Nella tabella sono riportate le seguenti caratteristiche peculiari dei diversi orizzonti litotecnici discriminati nel sottosuolo

- 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;

Accelerogrammi e Spettri di Input

L'analisi di risposta sismica locale è svolta in riferimento alla pericolosità sismica di sito, impiegando accelerogrammi reali campionati dal **European Strong-motion Database** on line <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/>.

La ricerca ed il campionamento degli eventi è stato condotto impiegando il software **REXEL** ver.3.5 (Iervolino, Galasso e Cosenza), che analizza i database implementati "Internet-Site for European Strong-Motion Data" e "Working Group ITACA" seguendo criteri legati alla pericolosità di sito ed alla spettro compatibilità dei risultati con lo spettro di risposta di riferimento prescelto.

I criteri adottati nella ricerca sono stati definiti sulla base delle condizioni di locale pericolosità sismica allo scuotimento di sito, descritte dal valore dell'accelerazione al suolo con la probabilità di superamento per la strategia di progettazione richiesta e per la classe e vita media della struttura, come indicato dal tecnico progettista:

Stato limite salv.della vita SLV probabilità di superamento 10% Tr anni 1424

Il valore dell'accelerazione al sito è determinato in riferimento al reticolo a maglia regolare già predeterminato per la pericolosità di base, consultabile in rete attraverso mappe interattive di pericolosità sismica presso il sito dell'INGV, all'indirizzo internet <http://esse1-gis.mi.ingv.it>, alle coordinate long. 12.3328° E e lat. 43.9704° N

In tal modo viene verificato il valore dell'accelerazione atteso al sito, quale valore dell'accelerazione al suolo con le probabilità di superamento relative alla tipologia strutturale impiegata ed allo stato limite della progettazione richiesta.

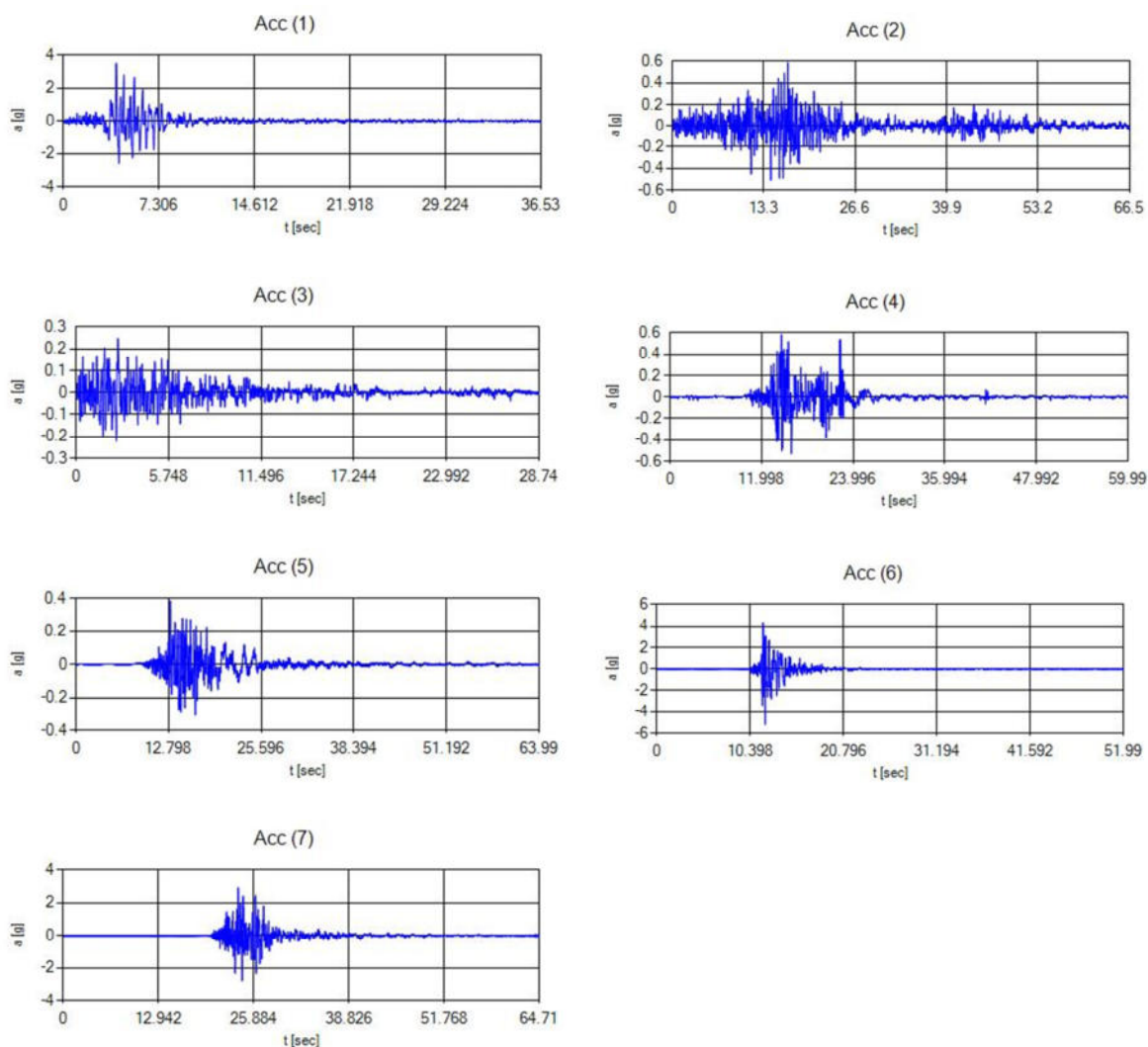
In riferimento al “grafico di disaggregazione”, riferito alle coordinate di ricerca al sito, che definisce il contributo percentuale alla pericolosità sismica di eventi a differente magnitudo e differente distanza epicentrale ed al grafico della frequenza di superamento del valore di accelerazione al variare del percentile annuo, si determinano i criteri di ricerca degli accelerogrammi spettro compatibili nel European Strong-motion Database, definiti da una Magnitudo compresa tra 4 e 6 e da una distanza di Km 0-20.

La ricerca è condotta in riferimento ad uno spettro di target definito dalla risposta di sito su suolo di classe “A”, in condizioni topografiche di potenziale amplificazione T1, per uno scenario relativo ad una struttura definita di tipo 3, con vita media nominale pari o superiore a 100 anni e con classe d'uso III^a, alla quale compete un coefficiente di riferimento pari a 1.5, alle condizioni limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

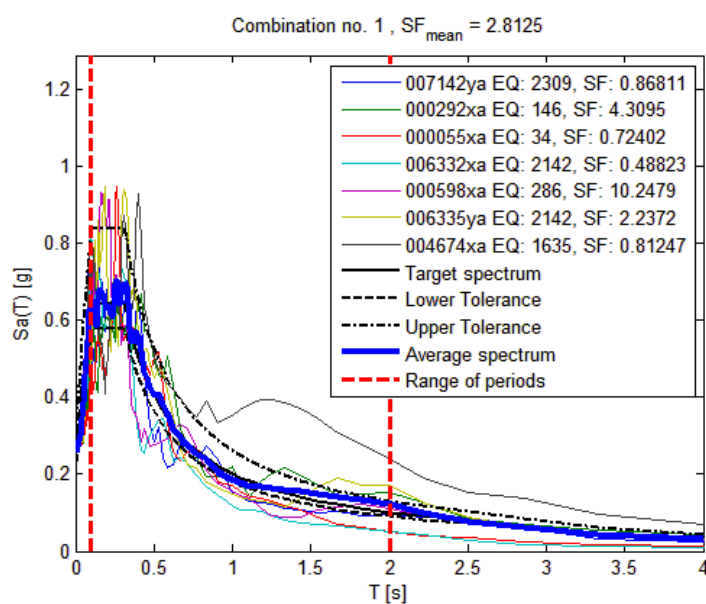
Per lo stato limite sono selezionati i seguenti eventi, rappresentati dai record di registrazione come di seguito identificati:

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Epicentral Distance [km]
7142	2309	ST539	Bingol	01/05/2003	6.3	14
292	146	ST98	Campano Lucano	23/11/1980	6.9	25
55	34	ST20	Friuli	06/05/1976	6.5	23
6332	2142	ST2483	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	6
598	286	ST222	Umbria Marche	26/09/1997	6	27
6335	2142	ST2557	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	15
4674	1635	ST2486	South Iceland	17/06/2000	6.5	5

i cui accelerogrammi sono graficamente riportati di seguito.



che presentano valore della media spettro-compatibile allo spettro di target considerato



e che risultano, variamente scalati, concorrenti alla definizione dello spettro di sito nello stato limite considerato.

Modello di Calcolo FEM

Il modello di calcolo agli elementi finiti utilizzato 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.

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:

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

dove:

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

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:

- ρ_b = 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.

RISULTATI DELLE ANALISI

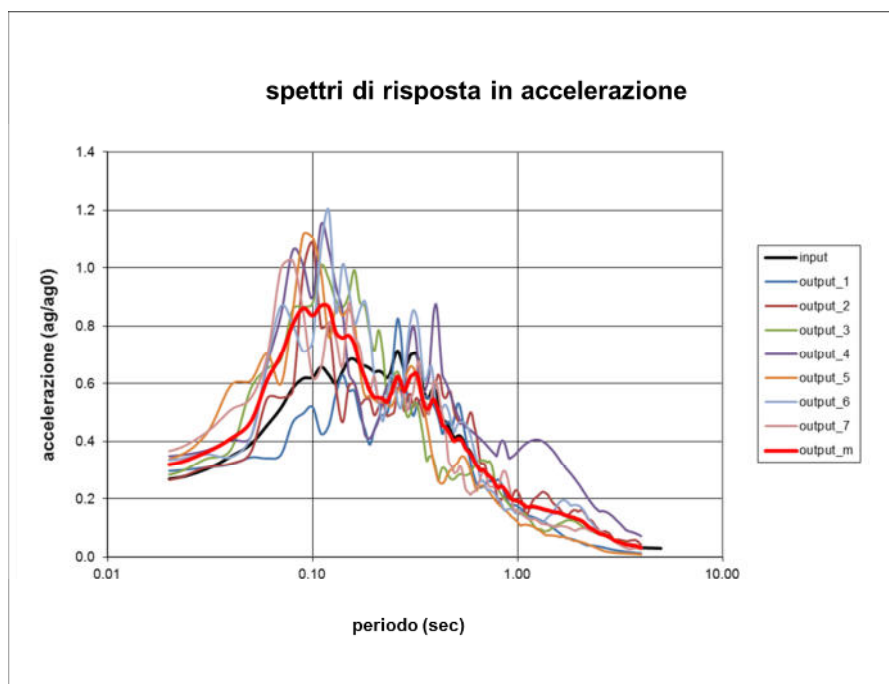
L'analisi di risposta sismica locale è stata svolta applicando al tetto del bedrock sismo-stratigrafico locale il moto di riferimento, rappresentato dai n.7 accelerogrammi di riferimento, ricercati nei database on line in modo che la loro combinazione consentisse di restituire uno spettro medio compatibile con quello che descrive le condizioni di pericolosità di sito.

Lo sforzo e la deformazione degli strati, restituita dalla funzione di trasferimento attraverso il modello FEM in cui è stato discretizzato il sottosuolo, dalla quota dell'input del moto sismico alla quota dei punti di controllo prescelti al piano di riferimento, è stata analizzata alla quota minima di soggiacenza della quota fondale, corrispondente alla base dei sedimenti di copertura e riporto; a tale quota si colloca il limite superiore del semispazio in cui è modellata la propagazione degli eventi.

Si restituisce pertanto, alla quota di "riferimento", lo spettro elastico del moto atteso, per un evento sito dipendente, per uno scenario relativo ad un edificio di classe III con vita media di anni 50, amplificato per effetti stratigrafici e di geometrie sepolte specifiche, attraverso il quale è possibile determinare lo spettro di progetto, quale rapporto

$$\text{spettro di progetto} = \frac{\text{spettro elastico in fondazione}}{\text{fattore di struttura } q \text{ (duttilità, isotropia, ecc)}}$$

Nella strategia di progettazione allo Stato limite della Salvaguardia della Vita, lo spettro medio risultante dall'analisi risulta come di seguito graficato



Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL

La parametrizzazione dello spettro di risposta ottenuto nel punto di controllo viene condotta mediante la procedura indicata 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 al valore di accelerazione a T 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 .

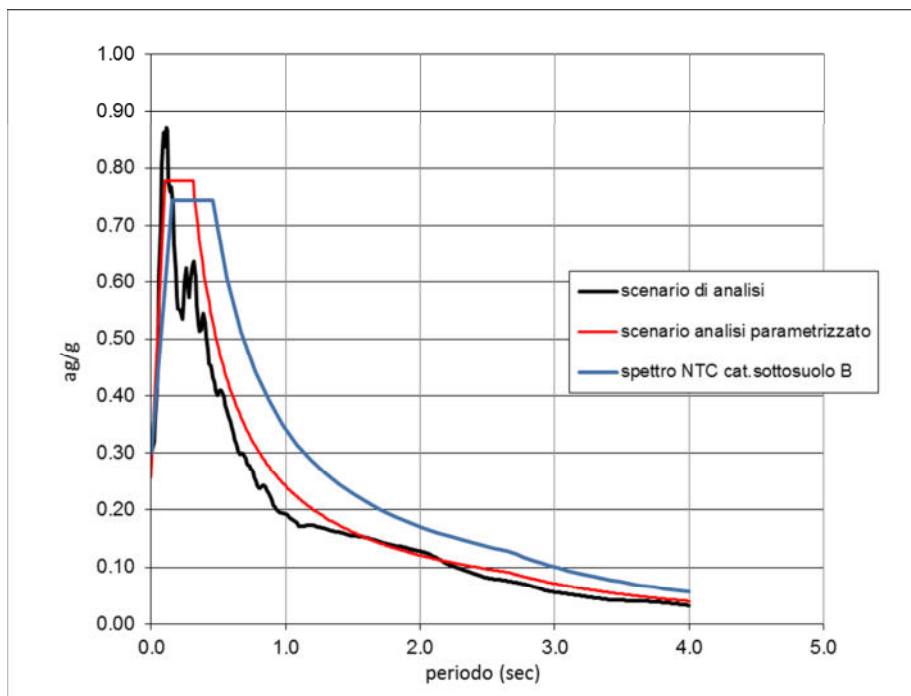
Lo spettro di analisi relativo allo stato limite alla salvaguardia della vita viene quindi restituito secondo il modello di Newmark attraverso i seguenti parametri

$A_g [g]$	$F0$	S	$A_{max} [g]$	$T_b [sec]$	$T_c [sec]$	$T_d [sec]$
0.263	3.024	0.979	0.257	0.104	0.311	2.652

- 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.

In tal modo è possibile confrontare lo spettro medio non parametrizzato risultante dalla Risposta Sismica Locale ed a quello semplificato, restituito in riferimento alla categoria di sottosuolo di cui alla tabella 3.2.II del NTC2018, in presenza di amplificazioni stratigrafiche senza alcuna singolarità areale delle geometrie del sottosuolo.

Dal confronto grafico tra spettro di calcolo per lo Stato Limite alla Salvaguardia della Vita e quelli normalizzato e da abaco NTC18, per la categoria di sottosuolo corrispondente



si rileva che la risposta di sito, rispetto allo scenario descritto dall'abaco delle NTC_2018, è caratterizzata da una amplificazione dell'azione sismica a periodi inferiori a 0.15 sec, mentre per periodi maggiori è evidente una attenuazione dell'azione dinamica attesa.

ANALISI COMPLEMENTARI ALLO STUDIO DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

L'analisi di risposta sismica locale viene riproposta nelle medesime modalità e procedure sopra indicate, determinando l'azione potenziale in fondazione conseguente la locale sismo-stratigrafica e le singolarità delle geometrie del sottosuolo, per i seguenti ulteriori stati limite

Stato limite di operatività SLO probabilità di superamento 81% Tr anni 90

Stato limite di danno SLD probabilità di superamento 63% Tr anni 151

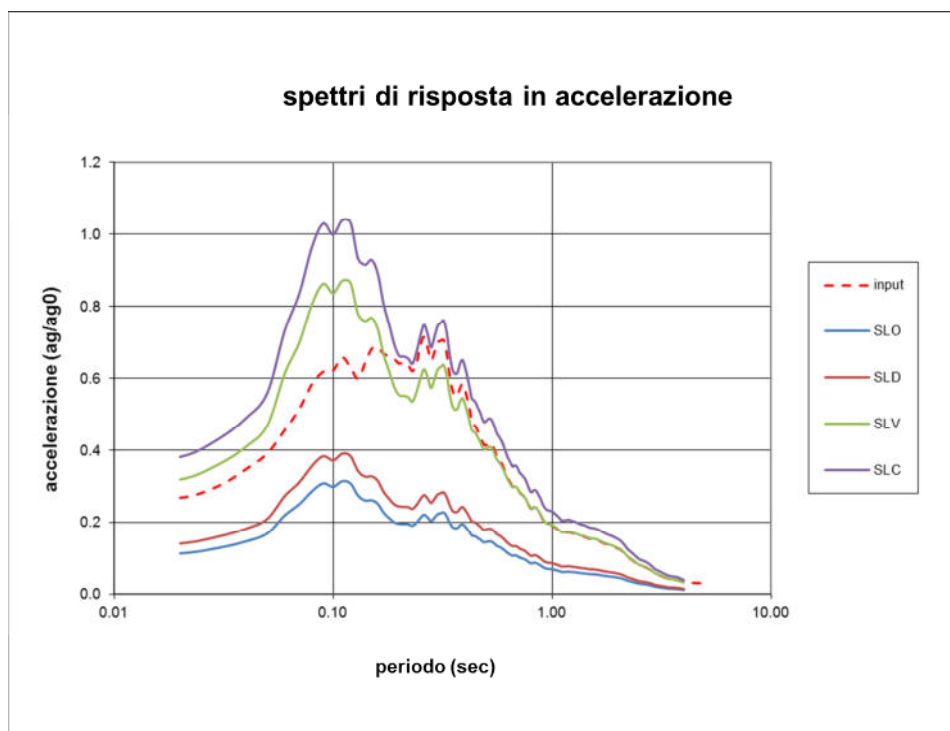
Stato limite di collasso SLC probabilità di superamento 5% Tr anni 2475

L'analisi consente di proporre, per gli stati limite determinati, i seguenti parametri per la restituzione degli spettri in accelerazione elastici in fondazione,

STATO LIMITE	A_g [g]	$F0$	S	A_{max} [g]	T_b [sec]	T_c [sec]	T_d [sec]
SLO	0.094	3.014	0.969	0.091	0.105	0.315	1.976
SLD	0.117	3.018	0.969	0.113	0.105	0.315	2.068
SLV	0.263	3.024	0.979	0.257	0.104	0.311	2.652
SLC	0.314	3.027	0.981	0.308	0.103	0.309	2.856

- 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.

che sono graficamente rappresentati assieme nella seguente restituzione



Gli spettri così definiti, ai sensi del capo 3.2.3.2 comma 2 del NTC 2018, possono essere utilizzati per strutture con periodo fondamentale minore o uguale a 4,0 secondi.

Per strutture con periodi fondamentali superiori l'azione sismica deve essere descritta mediante storie temporali del moto del terreno.

Tale circostanza ricorre anche nel caso si debba considerare una variabilità spaziale del moto, condizione che ricorre in opere con sviluppo planimetrico significativo; in tale condizione il moto sismico può avere caratteristiche differenti, a causa del carattere asincrono del fenomeno di propagazione, e si richiede l'impiego di accelerogrammi, in riferimento al capo 3.2.4.1 del NTC 2018.

Per quanto sopra, il presente documento prevede la restituzione degli spettri in accelerazione da analisi di risposta sismica locale, per i diversi stati limite di calcolo, e gli accelerogrammi di output, relativi allo stato limite SLV di verifica richiesto.

Serravalle P.se 03.02.2022

(Stragapede geol.Francesco)

