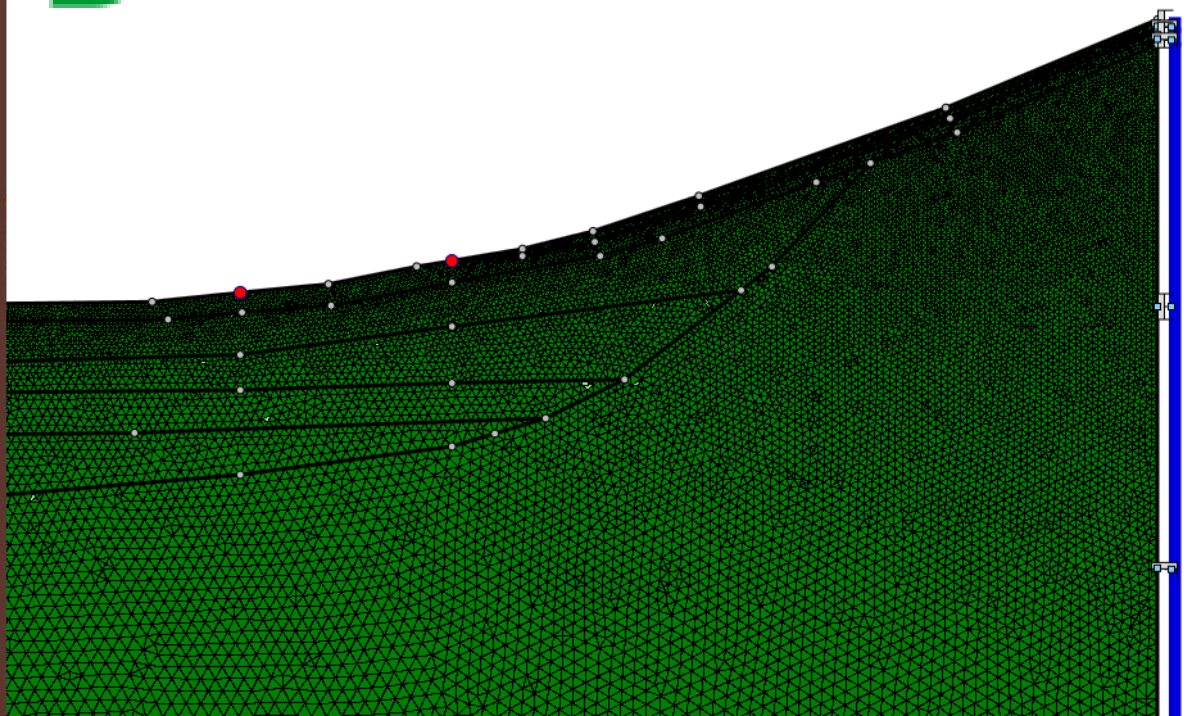
GUIDA
OPERATIVA

LSR2D

STACEC



www.stacec.com

Manuale utente

LOCAL SEISMIC RESPONSE 2D

Versione 2025

Sommario

Introduzione 4
1. Cenni teorici 5
1.1 Natura dei terremoti 5
1.2 L'importanza delle onde S 6
1.3 Analisi della risposta sismica locale 7
1.4 Modellazione numerica 10
2. Il codice di calcolo LSR2D 13
2.1 Discretizzazione del dominio 13
2.2 Equzioni del moto 13
2.3 Moto sismico di input 14
2.4 Free-field boundaries 14
2.5 Matrice di smorzamento 15
2.6 Integrazione nel dominio del tempo 17
3. Guida all'uso 19
3.1 Interfaccia grafica 19
3.2 Funzioni principali 20
3.2.1 File 20
3.2.2 Home 21
3.2.3 Modellazione 22
3.3 Editors di gestione 28
3.3.1 Editor dei dati generali 28
3.3.2 Editor degli accelerogrammi 30
3.3.3 Editor delle curve di decadimento 36
3.3.4 Editor delle curve di resistenza dei materiali 40
3.3.5 Editor delle analisi 43
3.4 Generazione guidata di un modello 1D di risposta sismica locale 47
3.5 Modellazione di una sezione 2D di risposta sismica locale 49
3.5.1 Caratteristiche topologiche dei sismostrati che costituiscono la sezione 2D 49
3.5.2 Inserimento poligonale 49
3.5.3 Inserimento punti di controllo 54

3.5.4 Inserimento colonne di controllo 57
3.5.5 Definizione condizioni al contorno 57
3.6 Generazione del modello agli elementi finiti 61
3.7 Esecuzione delle analisi 62
3.8 Output dei risultati 65
3.8.1 Storie temporali e spettri di risposta 65
3.8.2 Regolarizzazione dello spettro medio di Output 67
3.8.3 Funzione di amplificazione 70
3.8.4 Risultati sul modello FEM 72
3.8.5 Fattori di amplificazione 73
3.8.6 Relazione di calcolo 74

Introduzione

La valutazione delle caratteristiche del moto del terreno in superficie a seguito di un terremoto è di fondamentale importanza per la progettazione di strutture in grado di resistere alle azioni sismiche. Come è noto, in assenza di manufatti, tali caratteristiche possono essere attribuite a tre meccanismi fondamentali: meccanismo di sorgente, propagazione delle onde dalla sorgente al sito e risposta sismica locale. In modo particolare, quest'ultima è responsabile 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]**.

Il fenomeno della risposta sismica locale è stato oggetto di numerosi studi negli ultimi trent'anni, basati sull'analisi delle registrazioni di eventi sismici e su modellazioni di carattere numerico, a tal punto da essere introdotto nei moderni codici normativi. Lo stesso testo NTC2018 (Cap. 3.2.2) propone, come via ufficiale, un approccio numerico (monodimensionale o bidimensionale a seconda dei casi) per la valutazione della reale risposta sismica stratigrafica del deposito di terreno alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico.

L'analisi numerica per la valutazione della risposta sismica locale, oltre ad essere più accurata rispetto all'approccio semplificato descritto dall'NTC2008 (categorie di sottosuolo), consente di identificare l'amplificazione stratigrafica nel caso specifico individuando intervalli di periodo più limitati rispetto a quelli di normativa e di conseguenza ottenere dimensionamento strutturale più economico.

Il software LSR 2D *(Local Seismic Response 2**D**)* consente di effettuare una modellazione bidimensionale di tale problematica mediante un approccio agli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando un modello meccanico di sottosuolo alla Kelvin-Voigt.

1. Cenni teorici

In questo capitolo vengono forniti all'utilizzatore dell'applicativo alcuni cenni teorici in merito al problema della risposta sismica locale ed al metodo degli elementi finiti, implementato all'interno del motore di calcolo di LSR2D, per la valutazione quantitativa di tale fenomeno.

1.1 Natura dei terremoti

I terremoti più violenti sono di origine tettonica e sono associati allo scorrimento di grandi fratture o faglie presenti nella crosta terrestre, oppure alla improvvisa rottura di ammassi rocciosi. Gli scorrimenti e/o la rottura derivano dalla tendenza dei blocchi crostali a muoversi l'uno rispetto all'altro determinando l'insorgere di sforzi di taglio, e il conseguente accumulo di energia elastica, sino al raggiungimento della resistenza limite al taglio del materiale in un punto detto *ipocentro* o *fuoco*. Una volta raggiunto lo stato limite si innesca un brusco scorrimento tra i lembi della superficie di rottura con una ridistribuzione delle tensioni di taglio su di essa. Il *terremoto* è quindi associato alla improvvisa liberazione dell'energia di deformazione accumulata nel periodo precedente alla rottura.

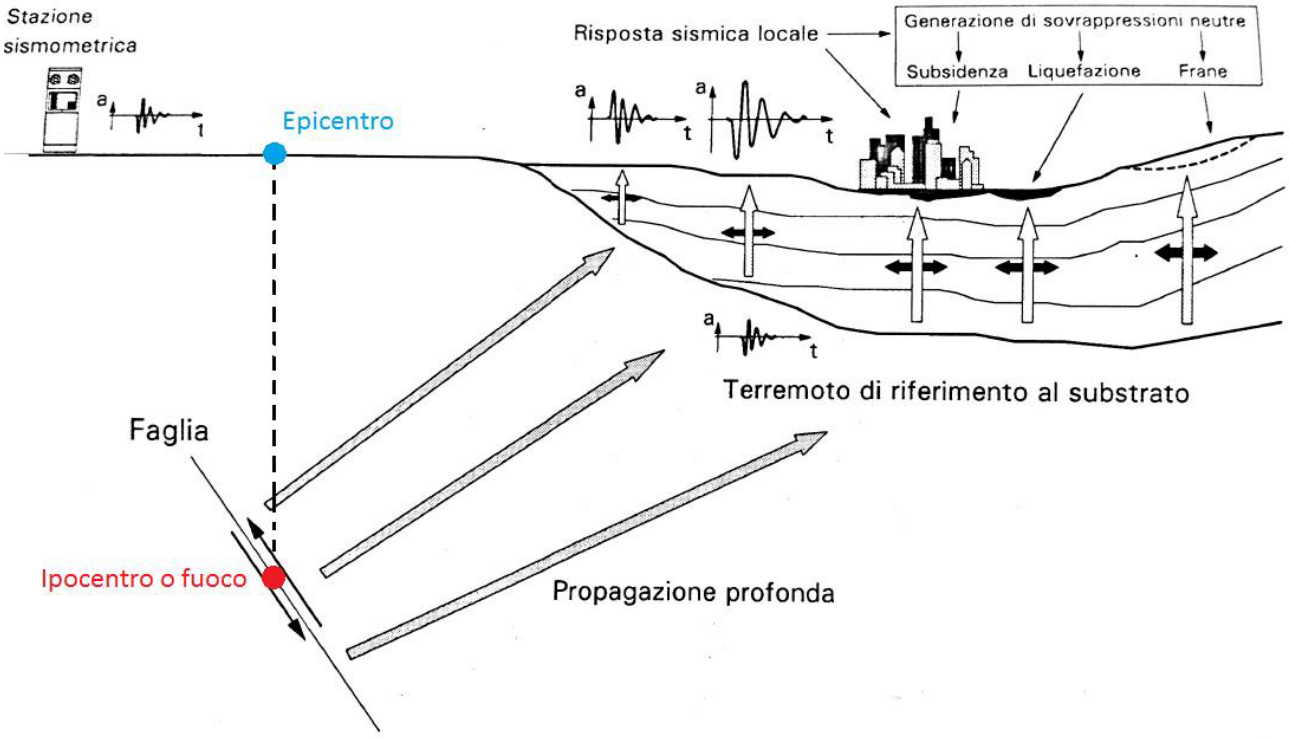


Figura 1. Schema di propagazione di un evento sismico.

Il fenomeno di vibrazione prodotto dall'evento sismico è il risultato della propagazione a distanza dall'ipocentro di onde elastiche di volume, che in profondità attraversano ammassi di roccia lapidea ed in superficie in genere interessano formazioni di terreni sciolti. Lo studio dell'equilibrio dinamico del mezzo elastico ideale mostra che le onde elastiche prodotte dall'evento sismico sono di due tipi: le onde P (onde longitudinali o di compressione) che producono spostamenti nella sola direzione di propagazione dell'onda e le onde S (onde trasversali o di taglio) che inducono spostamenti ortogonali alla direzione di propagazione ed a differenza delle onde P non si propagano nell'acqua. Le velocità di propagazione sono rispettivamente:

$$V_P = \sqrt{\frac{M_v}{\rho}};\ V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad (1)$$

Dove M_v rappresenta il modulo di rigidezza a compressione monodimensionale, ρ la densità di massa del mezzo e G il modulo di rigidezza a taglio.

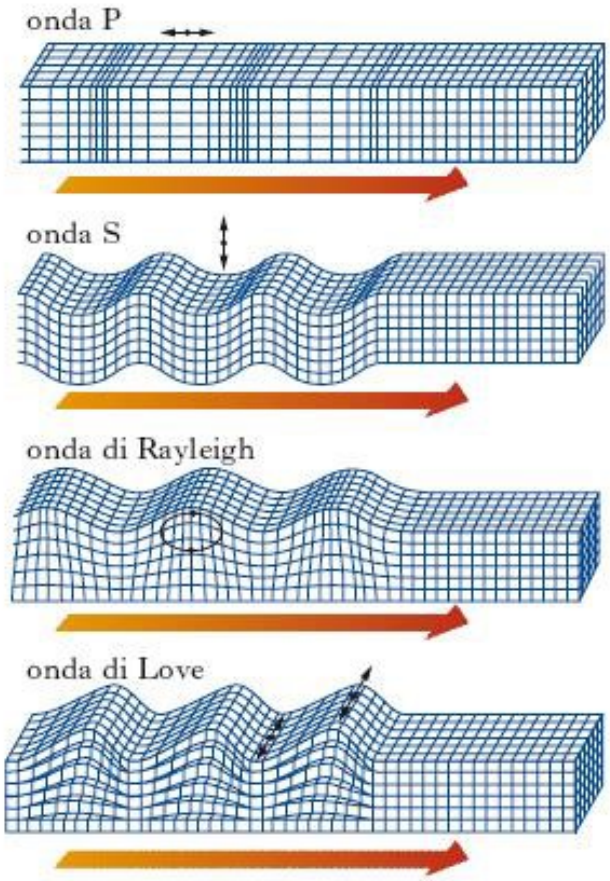


Figura 2. Stati deformativi prodotti dalle onde sismiche.

In un continuo indefinito elastico omogeneo ed isotropo le onde P e le onde S sono le sole onde presenti e sono dette *onde di volume.*

In un semispazio elastico, alle onde P ed S si aggiungono le cosiddette *onde di superficie* classificabili in *onde di Love* (onde L) e *onde di Rayleigh* (onde R). Le prime, analoghe alle onde S anche se prive della componente verticale, provocano deformazioni ortogonali a quella di propagazione dell'onda sismica.

Le seconde sono onde verticali con una traccia del movimento pari ad un ellisse e sono formate dalla sovrapposizione delle onde superficiali e di quelle riflesse.

1.2 L'importanza delle onde S

Le onde sismiche si propagano nelle formazioni rocciose e nei depositi di terreni sciolti, costituiti da uno scheletro solido e dai fluidi interstiziali (acqua e gas). Nell'ipotesi che gli spazi intergranulari siano

interamente occupati dall'acqua, il terreno può essere assimilato a un mezzo poroso bifase (solido-liquido). Assumendo l'incompressibilità dei granuli solidi e dell'acqua interstiziale, la deformazione volumetrica di un elemento di terreno è possibile solo se c'è variazione del contenuto in acqua. In condizioni dinamiche, infatti, la velocità di applicazione delle azioni è alta rispetto alla capacità dell'acqua di fluire tra i granuli. Ne consegue che le deformazioni volumetriche sono ridotte, per cui sono modesti gli effetti prodotti dalle onde P, tranne che in prossimità dell'epicentro. Al contrario le deformazioni prodotte dalle onde S sono condizionate dalla rigidezza dello scheletro solido e risultano di norma molto maggiori. Quindi è ragionevole assumere che i principali effetti del sisma sono legati alle sole onde di taglio.

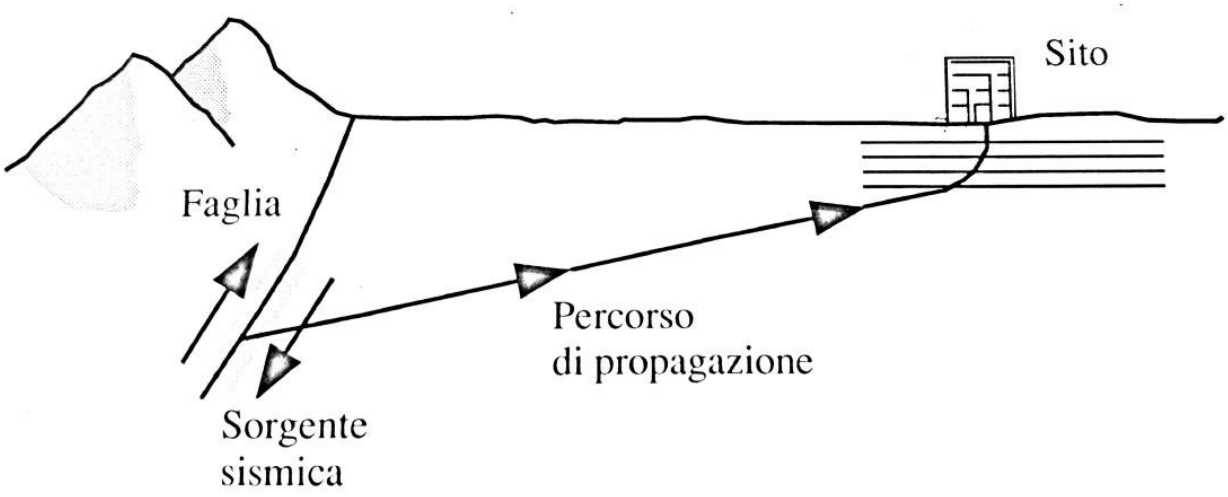


Figura 3. Percorso di propagazione di un evento sismico dalla sorgente al sito.

Le onde S raggiungono la superficie dopo avere attraversato i depositi di terreni sciolti che ne modificano le caratteristiche in dipendenza delle loro proprietà meccaniche e della morfologia superficiale e sepolta del sito. Nel propagarsi verso la superficie le onde incontrano mezzi di rigidezza variabili e subiscono fenomeni di rifrazione e riflessione che ne modificano in contenuto energetico e la direzione di propagazione. In particolare, per stratificazioni orizzontali le onde tendono a disporsi secondo una direzione di propagazione verticale o sub-verticale. In definitiva, nella maggior parte dei casi, un terremoto può essere schematizzato come la semplice propagazione di un treno di onde S polarizzate in orizzontale (dette anche ***onde SH***) le quali generano in cosiddetto ***moto ondulatorio***.

1.3 Analisi della risposta sismica locale

Dal punto di vista strettamente fisico, per analisi di risposta sismica locale si intende la valutazione quantitativa delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza subite da un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base (R), attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie (S). Dal punto di vista tecnico, è forse più significativa una valutazione alternativa di tale fenomeno, cioè quella che assume come moto sismico di riferimento quello relativo ad un ipotetico (o reale) affioramento della formazione rocciosa di base (A) [Lanzo G. et al., 1999].

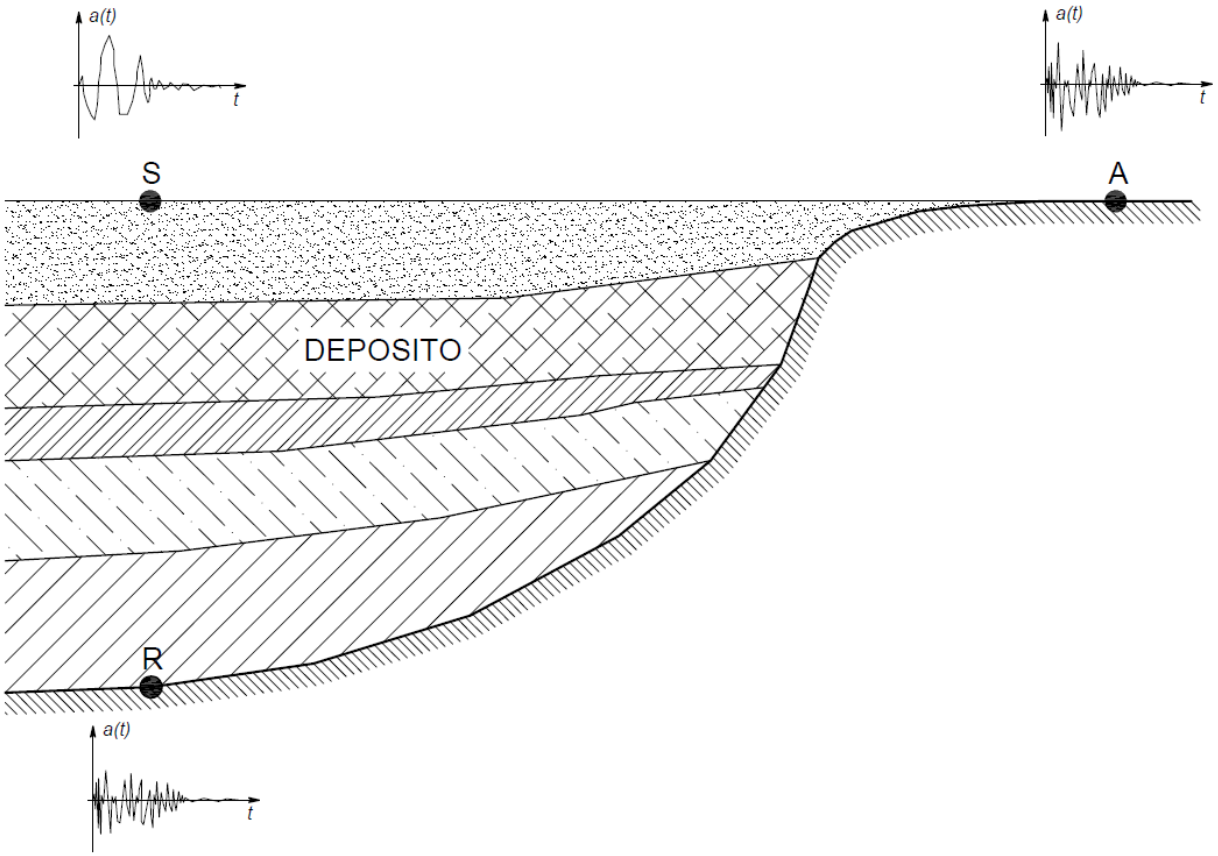


Figura 4. Schema di riferimento per la valutazione della risposta sismica locale.

La *valutazione quantitativa* della risposta sismica locale può quindi effettuarsi sulla base del confronto tra le diverse grandezze rappresentative del moto sismico alla superficie del terreno e quello di riferimento (roccia di base o affiorante), nel dominio del tempo o delle frequenze. Nel dominio del tempo un parametro spesso utilizzato è il *fattore di amplificazione*:

$$FA = \frac{a_{max,S}}{a_{max,A}} \tag{2}$$

dove $a_{max,S}$ rappresenta l'accelerazione massima registrata sulla superficie del deposito e $a_{max,A}$ l'accelerazione massima sulla roccia affiorante. Tale fattore può risultare maggiore o minore dell'unità identificando un effetto di amplificazione o di smorzamento. Il fattore di amplificazione così definito però ha il limite di non descrivere l'effetto di "filtraggio" esercitato dal deposito nei confronti del moto sismico di riferimento, ma si limita a descriverne soltanto gli effetti di amplificazione in termini di ampiezza. Operando nel dominio delle frequenze, un parametro spesso utilizzato ed in grado di superare i limiti del fattore di amplificazione è la cosiddetta *funzione di trasferimento*:

$$H(f) = \frac{F_S(f)}{F_A(f)} \tag{3}$$

dove $F_S(f)$ ed $F_A(f)$ sono entrambe funzioni complesse della frequenza e rappresentano rispettivamente lo spettro di Fourier del moto in superficie al deposito e lo spettro di Fourier del moto su roccia affiorante. Entrambe i termini del rapporto sono funzioni complesse e pertanto anche il loro rapporto (funzione di trasferimento) risulta una funzione complessa; è utile far riferimento al modulo di tale funzione (spettro di ampiezza) detto *funzione di amplificazione*:

$$A(f) = |H(f)| \tag{4}$$

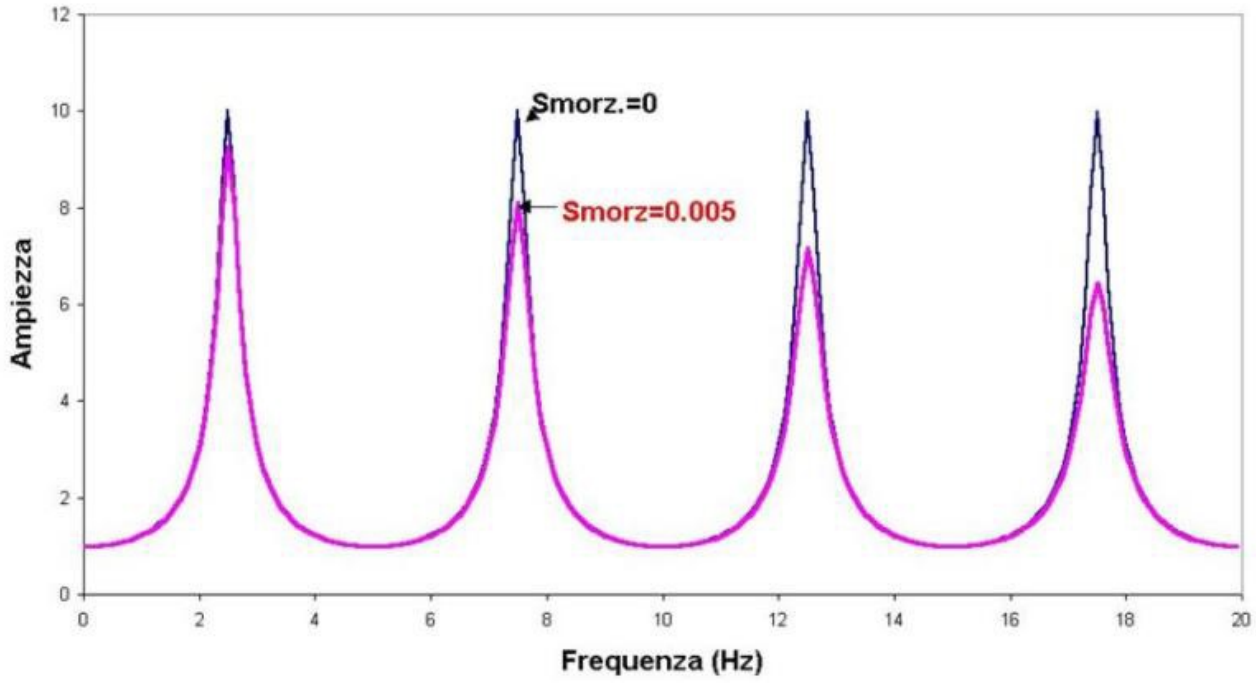


Figura 5. Funzione di amplificazione per diversi valori del rapporto di smorzamento viscoso.

Dal punto di vista fisico tale funzione è in grado di indicare quali componenti del moto sismico (in termini di frequenza), rispetto al moto di riferimento, sono state amplificate ed in che rapporto e quali componenti sono state smorzate. Tuttavia, è necessario osservare che è lecito applicare il principio di sovrapposizione degli effetti, e quindi le trasformate di Fourier, solo se la risposta meccanica del terreno è governata da leggi costitutive di tipo lineare. In tali ipotesi, amplificazione è una proprietà della geometria del sito e delle caratteristiche meccaniche dei materiali che lo costituiscono.

Operando nel dominio delle frequenze, nota la funzione di trasferimento, è possibile ottenere, mediante un'operazione detta di convoluzione, il moto in superficie a partire dal moto di riferimento.

$$F_S(f) = H(f)\, F_A(f) \tag{5}$$

Questo significa che il moto in superficie ottenuto è fortemente condizionato dal contenuto in frequenza del moto di riferimento, il quale a sua volta è caratterizzato da contenuti in frequenza dipendenti da meccanismo

di sorgente, magnitudo e percorso di propagazione. Si osservi inoltre, che la risposta meccanica di un sottosuolo reale non è affatto lineare e pertanto la funzione di trasferimento non può essere univoca, ma dipendente dal livello deformativo raggiunto dal terreno e quindi dalle caratteristiche del moto sismico che lo attraversa. In altre parole, se l'energia del moto sismico che attraversa il deposito è bassa, il livello deformativo raggiunto sarà lieve e viceversa se l'energia del moto è elevata; nei due casi le funzioni di trasferimento risultano differenti.

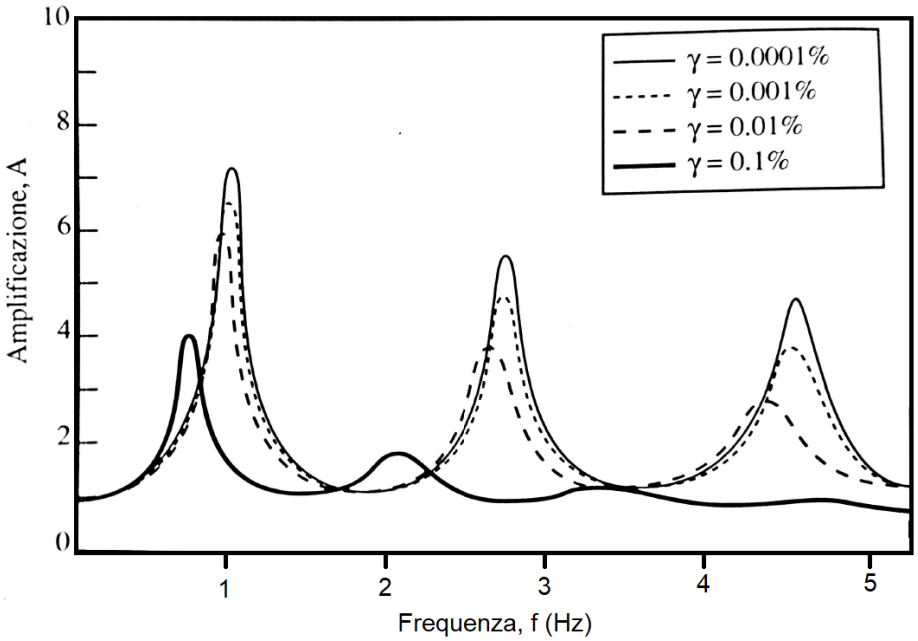


Figura 6. Influenza del comportamento non lineare del terreno sulla funzione di amplificazione.

Gli aspetti sopra esposti fanno si che una valutazione accurata della risposta sismica locale necessita, oltre ad una modellazione realistica del sottosuolo, una corretta valutazione del terremoto di riferimento.

Dal punto di vista ingegneristico, l'obiettivo finale dell'analisi di risposta sismica locale è quello di fornire uno spettro di risposta in accelerazione (associato ad un terremoto presunto e ad un predefinito livello di smorzamento strutturale) che tenga conto dell'effetto filtrante del deposito.

1.4 Modellazione numerica

Seppur in letteratura sono presenti delle formulazioni in forma chiusa per la valutazione degli effetti di amplificazione di un sottosuolo stratificato nell'ipotesi di comportamento lineare del terreno, quest'ultima ipotesi risulta scarsamente affidabile nella previsione del moto sismico in superficie. In primo luogo perché un'analisi lineare conduce ad una sottostima degli effetti di amplificazione alle basse frequenze (con conseguente sovrastima alle alte frequenze) ed in secondo luogo, per l'impossibilità di tenere conto degli effetti delle deformazioni permanenti e dell'accumulo delle sovrapressioni neutre. Pertanto, dovendo tener conto del comportamento non lineare del terreno, oltre che di aspetti legati alla topografia o alla morfologia sepolta, nei casi pratici è necessario ricorrere a delle procedure numeriche. Le possibili procedure utilizzate per tener conto del legame costitutivo non lineare nella soluzione dell'equilibrio dinamico del sistema di equazioni si distinguono in:

Analisi lineare equivalente che consiste nell'esecuzione di una serie di analisi lineari complete che utilizzano dei parametri di rigidezza e smorzamento secanti dei materiali, i quali vengono aggiornati fino al soddisfacimento di un certo criterio di convergenza;

Analisi non lineare incrementale che consiste nell'integrazione passo-passo delle equazioni del moto ottenute nel rispetto dei legami costitutivi non lineari del terreno.

Mentre il primo schema di analisi si presta ad una soluzione sia nel dominio del tempo che nel dominio delle frequenze, il secondo schema di analisi ricerca necessariamente la soluzione nel domino del tempo, vista l'impossibilità di applicare il principio di sovrapposizione degli effetti e quindi l'analisi di Fourier. A giocare un ruolo fondamentale nelle analisi numeriche di risposta sismica locale è la dimensionalità del problema. A tal proposito è possibile distinguere i modelli in:

- *Modelli monodimensionali* (1D): in grado di descrivere gli effetti stratigrafici del deposito;
- *Modelli bidimensionali* (2D): in grado di descrivere gli effetti stratigrafici, topografici e di valle;
- *Modelli tridimensionali* (3D): anch'essi in grado di descrivere gli effetti stratigrafici, topografici e di valle ma con una maggiore accuratezza seppur con un notevole incremento del costo computazionale.

Lo schema lineare equivalente e largamente adottato nella pratica professionale in quanto rappresenta il giusto compromesso tra l'accuratezza dei risultati ottenuti e l'onere computazionale. Sono infatti numerosi i codici di calcolo che adottano tale schema indipendentemente che si tratti di un problema monodimensionale, bidimensionale o tridimensionale. L'angoritmo lineare equivalente può essere sintetizzato nei seguenti passi:

1. Si assumono dei valori iniziali per i moduli elastici e per i rapporti di smorzamento viscoso dei materiali;

2. A partire dal terremoto di riferimento, schematizzato come accelerogramma in ingresso, si integrano le equazioni del moto dinamico in modo da ottenere le deformazioni massime γ_{max} in ogni punto del modello;
3. Dalle deformazioni massime si ottengono le deformazioni effettive mediante la relazione $\gamma_{eff} = \beta\, \gamma_{max}$ (β: rapporto di deformazione effettiva dipendente dalla magnitudo dell'evento sismico e variabile tra 0.6 e 0.7);
4. Dalle deformazioni effettive, mediante le curve che descrivono la non linearità del terreno (**Figura 7**), vengono ottenuti i valori aggiornati dei moduli di taglio e dei rapporti di smorzamento viscoso;
5. Con i valori dei parametri dei materiali così ottenuti si ritorna al punto 2. fintanto che non risulta soddisfatto il seguente criterio di convergenza:

$$\left|\frac{G(\gamma_{eff}^{k})/G_0 - G(\gamma_{eff}^{k-1})/G_0}{G(\gamma_{eff}^{k=0})/G_0}\right| \leq toll \tag{6}$$

$$\left|\frac{D(\gamma_{eff}^{k}) - D(\gamma_{eff}^{k-1})}{D(\gamma_{eff}^{k=0})}\right| \leq toll \tag{7}$$

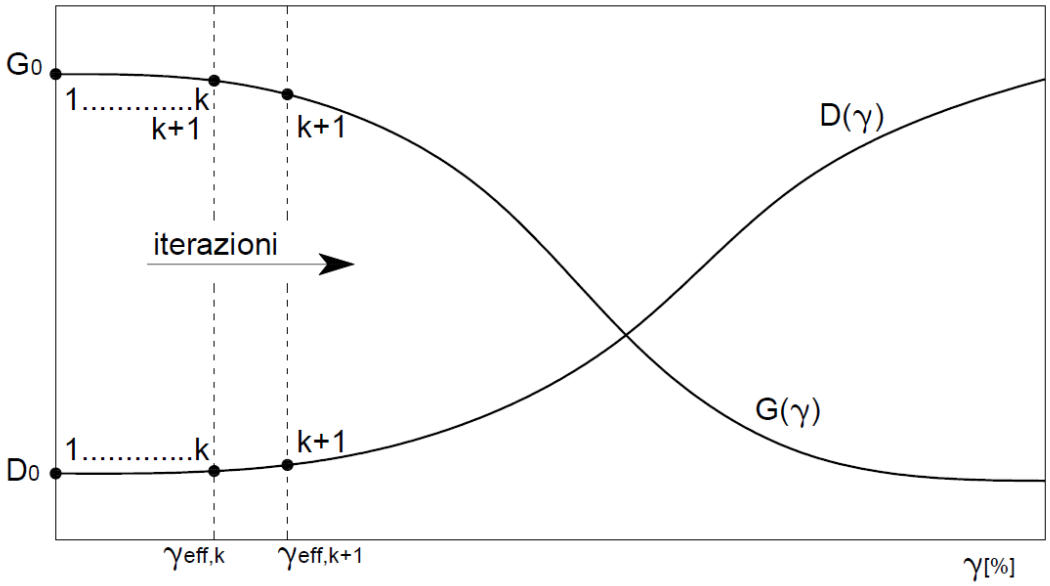


Figura 7. Curve che descrivono la non linearità del materiale utilizzate nell'analisi lineare equivalente.

2. Il codice di calcolo LSR2D

Nel caso specifico del codice di calcolo LSR2D lo schema di analisi adottato è quello lineare equivalente nel dominio del tempo e le equazioni del moto vengono assemblate mediante il metodo degli elementi finiti nell'ipotesi di materiale viscoelastico in tensioni totali. Il deposito viene discretizzato in una mesh di elementi di forma triangolare o, preferibilmente, quadrangolare, consentendo una efficace modellazione della variazione geometrica del contatto deposito-basamento, così come delle irregolarità della superficie topografica e dei contatti stratigrafici.

2.1 Discretizzazione del dominio

La scelta della griglia di calcolo rappresenta un punto fondamentale dell'analisi in quanto da essa dipende l'accuratezza della soluzione. In generale è possibile affermare che tanto più è fitta la mesh tanto più sarà accurata la soluzione, tuttavia una mesh troppo fitta fa aumentare notevolmente gli oneri computazionali; per contro una mesh troppo grossolana si traduce in un filtraggio delle componenti di alta frequenza poiché le piccole lunghezze d'onda non possono essere adeguatamente modellate da nodi troppo distanti tra loro. A tal proposito si raccomanda di scegliere la dimensione di ogni elemento in modo che sia inferiore ad a 1/8÷1/5 della più piccola lunghezza d'onda considerata nell'analisi:

$$h \leq \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{5}\right) \frac{V_S}{f_{max}} \tag{8}$$

dove V_S è la velocità di propagazione delle onde del materiale costituente l'elemento e f_{max} è la massima frequenza considerata nell'analisi (in genere 20-25 Hz).

2.2 Equzioni del moto

Una schematizzazione del modello agli elementi finiti adottato dal codice di calcolo LSR$_{2D}$ è riportata in **Figura 8**; l'equilibrio dinamico globale per tale sistema può essere espresso mediante la seguente relazione:

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}} + (\boldsymbol{C}_e + \boldsymbol{C}_b)\dot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{M}\boldsymbol{I}_x\ddot{\boldsymbol{u}}_{b,x}(t) - \boldsymbol{M}\boldsymbol{I}_z\ddot{\boldsymbol{u}}_{b,z}(t) + \boldsymbol{F}_{ff}(t) \tag{9}$$

dove:

- $\boldsymbol{M}$: matrice di massa globale del sistema;
- $\boldsymbol{C}_e$: matrice di smorzamento globale del sistema relativa agli elementi finiti;
- $\boldsymbol{C}_b$: matrice di smorzamento globale del sistema relativa agli smorzatori viscosi presenti alla base del modello;
- $\boldsymbol{K}$: matrice di rigidezza globale del sistema;
- $\ddot{\boldsymbol{u}}$: vettore delle accelerazioni globali del sistema;
- $\dot{\boldsymbol{u}}$: vettore delle velocità globali del sistema;
- $\boldsymbol{u}$: vettore degli spostamenti globali del sistema;
- $\boldsymbol{I}_x$: vettore globale di trascinamento in direzione orizzontale;
- $\boldsymbol{I}_z$: vettore globale di trascinamento in direzione verticale;
- $\ddot{\boldsymbol{u}}_{b,x}(t)$: storia temporale in direzione orizzontale dell'accelerazione in input;
- $\ddot{\boldsymbol{u}}_{b,z}(t)$: storia temporale in direzione verticale dell'accelerazione in input;
- $\boldsymbol{F}_{ff}(t)$: forze dinamiche dovute alle condizioni free-field.

-

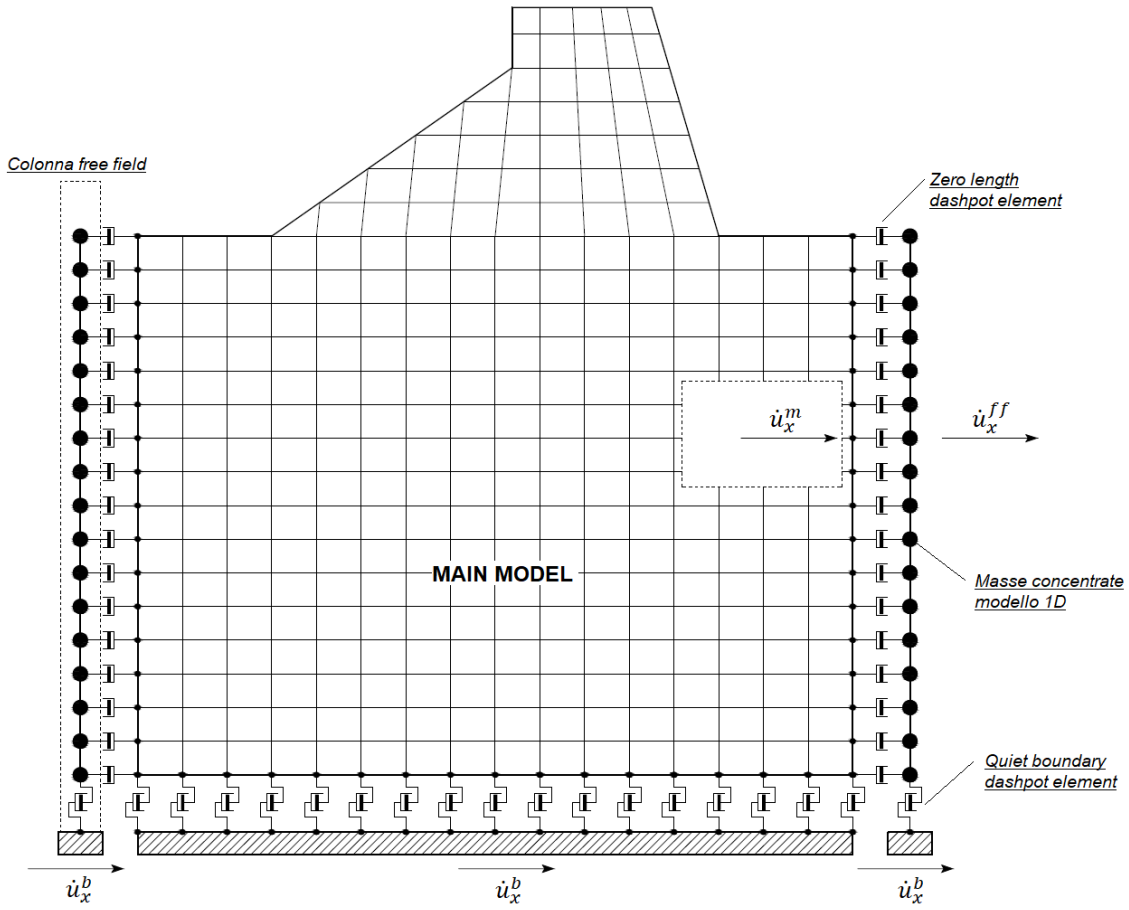


Figura 8. Schematizzazione modello agli elementi finiti implementato nel codice di calcolo LSR2D.

2.3 Moto sismico di input

Il moto sismico di input $\ddot{u}b$ viene applicato simultaneamente a tutti i nodi della base sotto forma di onde trasversali SV e/o onde di compressione P (in plane motion) con direzione di propagazione verticale ed ha il significato fisico di un moto registrato su affioramento piano del basamento (outcropping bedrock). Per tenere conto della perdita di energia per radiazione alla base del modello sono presenti degli smorzatori viscosi lineari aventi costanti di smorzamento pari a:

$$\boldsymbol{C_x = \rho_b V_{S,b};\quad C_y = \rho_b V_{P,b}} \tag{10}$$

Nel sistema di equazioni globale tali coefficienti vengono assemblati all'interno della matrice di smorzamento $\boldsymbol{C_b}$.

2.4 Free-field boundaries

Gli spostamenti in corrispondenza delle frontiere laterali del modello dovrebbero essere uguali a quelli di una colonna di terreno isolata in condizioni di campo libero. Se lo smorzamento del terreno è relativamente alto, tale condizione può essere raggiunta semplicemente allontanando di una certa distanza dalla regione di interesse le frontiere laterali ed assegnando delle restrizioni cinematiche nei confronti della componente

verticale (condizione 1). Tuttavia, se lo smorzamento del terreno è basso la distanza necessaria per il raggiungimento della condizione desiderata risulta molto elevata, producendo un notevole incremento dei costi computazionali. Un metodo alternativo, è quello di "applicare" il moto di campo libero in modo tale che le frontiere agiscano come un sistema in grado di assorbire le onde riflesse che altrimenti verrebbero artificialmente reintrodotte nel modello. Nel codice LSR2D questo è implementato 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 sono uguali. È necessario, per il corretto funzionamento di tali condizioni al contorno, che le frontiere laterali del modello siano perfettamente verticali. Le forze interne agli smorzatori vengono ottenute mediante le seguenti equazioni:

$$\boldsymbol{F_x = -\rho\, V_p \left(\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff}\right) A;} \quad \boldsymbol{F_y = -\rho V_S \left(\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff}\right) A} \tag{11}$$

dove:

- $\boldsymbol{\rho}$**:** densità di massa del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $\boldsymbol{V_p}$**:** velocità delle onde P del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $\boldsymbol{V_S}$**:** velocità delle onde S del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $\boldsymbol{A}$**:** area di influenza relativa al nodo su cui agisce lo smorzatore;
- $\boldsymbol{\dot{u}_x^m}$**:** velocità del nodo del modello in direzione x;
- $\boldsymbol{\dot{u}_y^m}$**:** velocità del nodo del modello in direzione y;
- $\boldsymbol{\dot{u}_x^{ff}}$**:** velocità del nodo della colonna free-field in direzione x;
- $\boldsymbol{\dot{u}_y^{ff}}$**:** 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 (11). Tali forze vengono assemblate all'interno del vettore $\boldsymbol{F_{ff}(t)}$ presente a secondo menbro delle equazioni globali del moto.

2.5 Matrice di smorzamento

Le risposta dissipativa del terreno viene modellata mediante il modello lineare viscoso e quindi, dal punto di vista matematico, attraverso la matrice di smorzamento globale $\boldsymbol{C_e}$. Essa viene ottenuta mediante una procedura di assemblaggio delle matrici locali di smorzamento degli elementi finiti presenti nel modello, le quali al loro volta sono ottenute mediante lo schema di smorzamento classico (alla Rayleigh). Per elemento *e*-esimo, questo prevede:

$$\boldsymbol{C_e = \alpha_{R,e}\, M_e + \beta_{R,e}\, K_e} \tag{12}$$

dove $\alpha_{R,e}$ e $\beta_{R,e}$ sono i coefficienti di *Rayleigh*, $\boldsymbol{M_e}$ e $\boldsymbol{K_e}$ rappresentano rispettivamente le matrici di massa e di rigidezza del singolo elemento finito.

La formulazione alla Rayleigh presenta una dipendenza dello smorzamento dalla frequenza che può condizionare in maniera sensibile i risultati dell'analisi numerica. Tuttavia si è visto, già nell'applicativo *QUAD4M* (Hudson et al.,1994), che calcolando i coefficienti di Rayleigh in funzione delle due frequenze circolari ω_n e ω_m, dove ω_n rappresenta la prima frequanza naturale del deposito, e $\omega_m = n\,\omega_n$ essendo n l'intero dispari che approssima per eccesso il rapporto tra la frequenza predominante dell'input sismico ω_I e la frequenza ω_n, si riesce a minimizzare tale effetti perché si limita la variabilità dello smorzamento nell'intorno delle frequenze di maggior interesse (vedi **Figura 9**).

Sulla base delle suddette frequenze circolari, i coefficienti di Rayleigh per il singolo elemento vengono determinati mediante le seguenti relazioni:

$$\alpha_{R,e} = \xi_e \frac{2\,\omega_n\,\omega_m}{\omega_n + \omega_m} \tag{12}$$

$$\beta_{R,e} = \xi_e \frac{2}{\omega_n + \omega_m} \tag{13}$$

dove ξ_e: rapporto di smorzamento viscoso dell'*e*-esimo elemento finito.

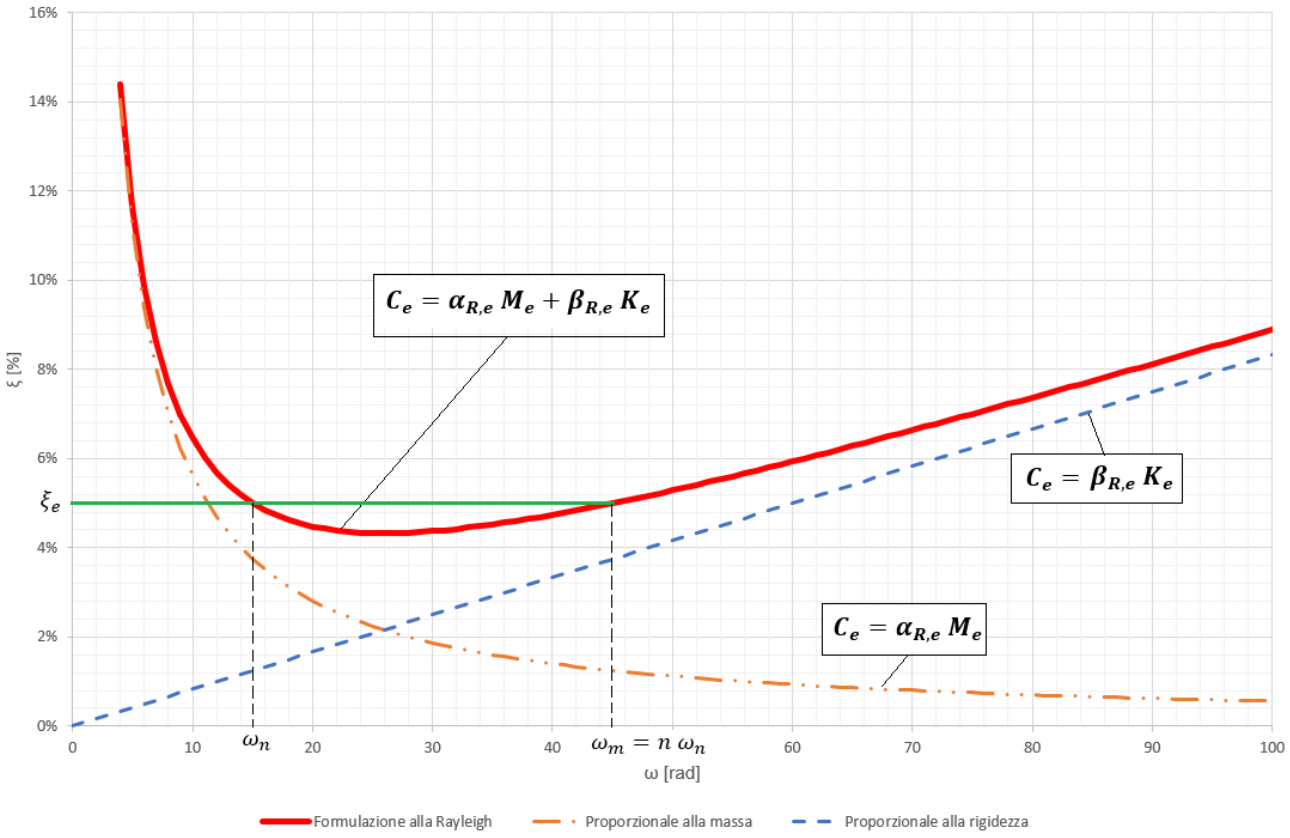


Figura 9. Variazione del rapporto di smorzamento modale con la frequenza naturale nel caso di formulazione di Rayleigh a doppia frequenza di controllo.

2.6 Integrazione nel dominio del tempo

La soluzione delle equazioni del moto all'n-simo istante di tempo viene ottenuta mediante un algoritmo di integrazione diretta nel dominio del tempo (metodo di Newmark). I metodi di integrazione facenti parti della famiglia dei metodi di Newmark si basano sulle seguenti espressioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t\,[(1-\gamma)\ddot{u}_{n-1} + \gamma\,\ddot{u}_n] \tag{14}$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t\,\dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2}[(1-2\beta)\ddot{u}_{n-1} + 2\,\ddot{u}_n] \tag{15}$$

Nel codice di calcolo LSR2D viene utilizzato il metodo *CAA* (*Constant Average Acceleration Method*) che risulta incondizionatamente stabile e non introdurre alcun damping numerico nella soluzione **[Hughes, 1987]**. In tal caso i coefficienti del γ e β valgono rispettivamente 0.5 e 0.25.

Riscrivendo l'equazione del moto nella seguente forma:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p \tag{16}$$

l'algoritmo di soluzione numerica viene di seguito illustrato.

Note le condizioni iniziali in termini di spostamento e di velocità, si determina l'accelerazione iniziale attraverso la relazione:

$$\ddot{u}_0 = M^{-1}(p_0 - C\dot{u}_0 - Ku_0) \tag{17}$$

Assegnata l'ampiezza Δt dell'intervallo di integrazione, si calcolano le seguenti costanti:

$$\widehat{K} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}M + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}C + K \tag{18}$$

$$A = \frac{1}{\beta\Delta t}M + \frac{\gamma}{\beta}C \tag{19}$$

$$B = \frac{1}{2\beta}M + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)C \tag{20}$$

Per ogni intervallo di integrazione si calcolano le quantità:

$$\Delta\hat{p}_n = \Delta p_n + A\,\dot{u}_n + B\,\ddot{u}_n \tag{21}$$

$$\Delta u_n = \frac{\Delta\hat{p}_n}{\widehat{K}} \tag{22}$$

$$\Delta\dot{u}_n = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\Delta u_n - \frac{\gamma}{\beta}\dot{u}_n - \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\ddot{u}_n \tag{23}$$

$$\Delta\ddot{u}_n = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\Delta u_n - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{u}_n - \frac{1}{2\beta}\ddot{u}_n \tag{24}$$

da cui si ottiene:

$$u_{n+1} = u_n + \Delta u_n \tag{25}$$

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta \dot{u}_n \tag{26}$$

$$\ddot{u}_{n+1} = \ddot{u}_n + \Delta \ddot{u}_n \tag{27}$$

Sostituendo n con $n + 1$, si ripete il procedimento per il successivo intervallo di integrazione, e così via per tutti gli istanti di tempo.

3. Guida all'uso

In questo capitolo vengono illustrate le principali funzioni del software LSR_{2D}.

3.1 Interfaccia grafica

L'interfaccia grafica di LSR2D è strutturata da un ambiente principale dal quale è possibile gestire le differenti fasi di lavoro. In particolare, con riferimento alla **Figura 10** si ha:

1. Toolbar contenente i pulsanti che gestiscono le funzioni il salvataggio ed undo/redo;
2. Toolbar contenente i pulsanti che gestiscono le funzioni di aggiornamento, impostazioni ed informazioni;
3. Ribbon contenente i comandi che gestiscono le funzioni principali del programma;
4. Pannello dedicato alle funzioni di input grafico;
5. Tabella delle proprietà generali del modello;
6. Tabella delle proprietà degli oggetti che costituiscono il modello;
7. Visualizzatore messaggi ed errori.

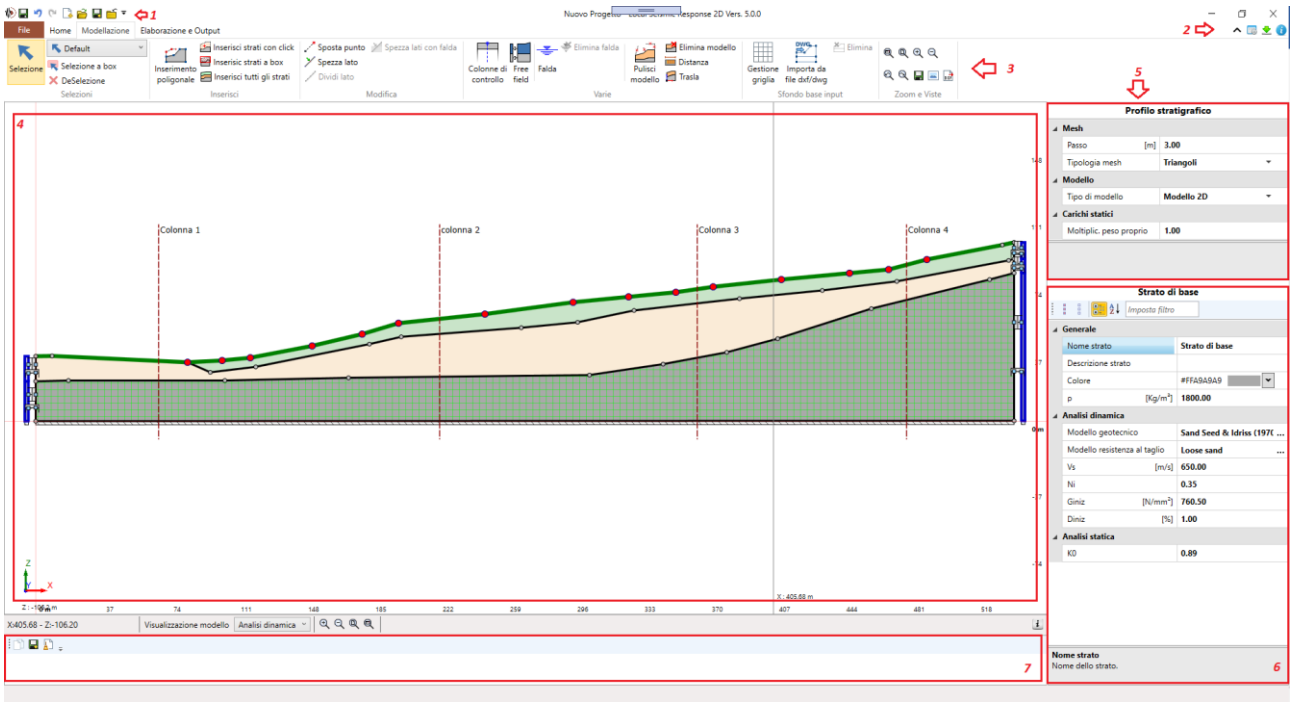


Figura 10. Interfaccia principale di LSR_{2D}.

3.2 Funzioni principali

Le funzioni principali del programma sono raggruppate come segue:

3.2.1 File

In alto a sinistra nell'interfaccia principale è disponibile un gruppo di comandi che riguardano la gestione del progetto corrente:

- Nuovo progetto;
- Apri progetto esistente;
- Salva progetto corrente;
- Salva con nome progetto corrente;
- Passo indietro;
- Passo avanti;
- Chiudi progetto corrente.

Dal comando "file" presente nella ribbon bar principale è inoltre possibile accedere alla gestione dei progetti recenti (vedi Figura 11).

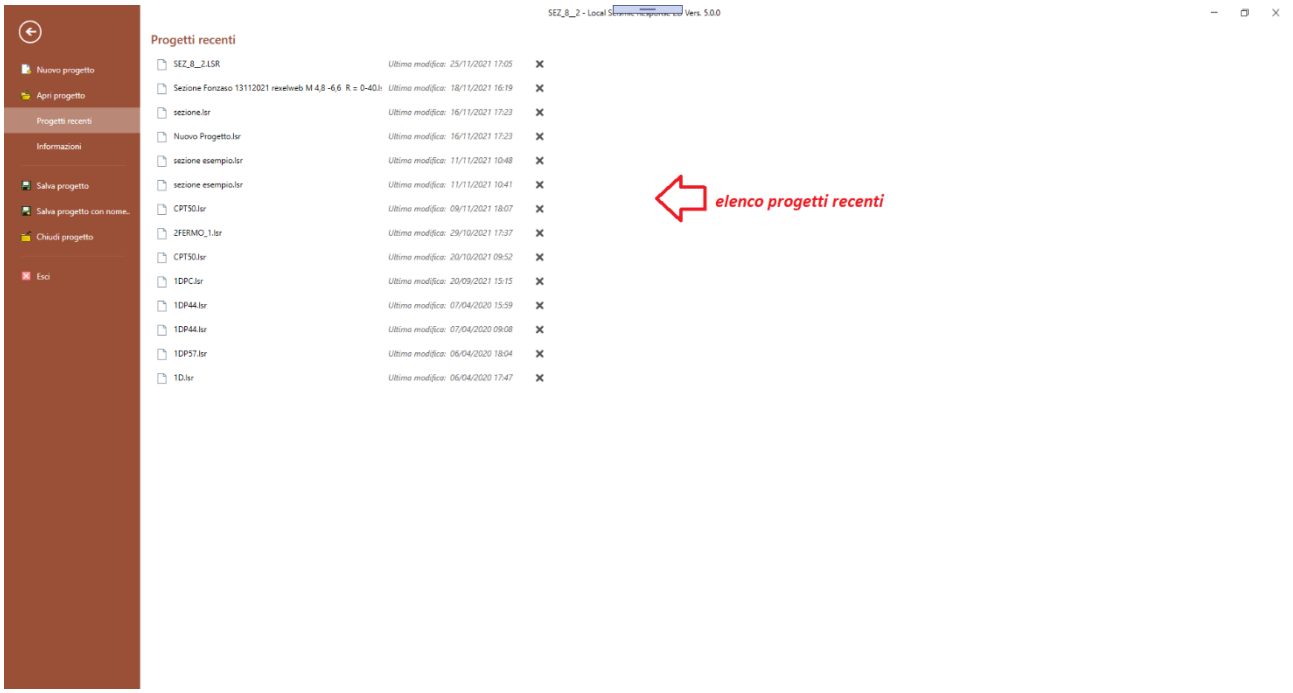


Figura 11. Gestione progetti recenti.

3.2.2 Home

Gruppo di comandi per la gestione dei dati generali, la definizione delle caratteristiche dei materiali e la definizione delle analisi di risposta sismica locale su cui basare le verifiche di liquefazione:

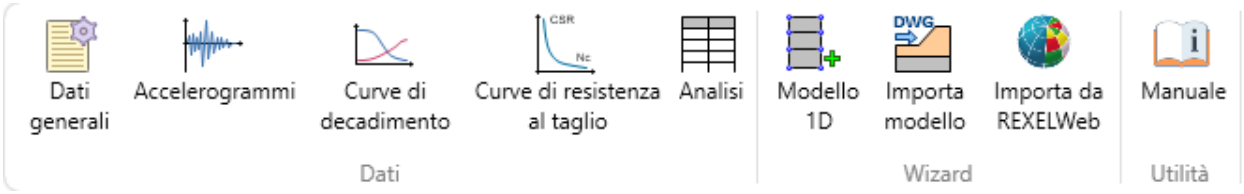


Figura 12. Scheda "Home".

In dettaglio:

- Comando *"Dati generali"*: avvia l'editor dei dati generali del progetto;
- Comando *"Accelerogrammi"*: avvia l'editor degli accelerogrammi presenti nel progetto;
- Comando *"Curve di decadimento"*: avvia il database contenente le curve di decadimento dei materiali presenti nel progetto, utilizzate i progetti precedenti e di letteratura;
-

Comando *"Curve di resistenza al taglio":* avvia il database contenente le curve di resistenza al taglio dei materiali presenti nel progetto, utilizzate i progetti precedenti e di letteratura;
- Comando *"Analisi"*: avvia l'editor per la definizione delle analisi di risposta sismica locale su cui basare le verifiche di liquefazione nel progetto corrente.
- Comando "*Modello 1D*": avvia un ambiente che gestisce la generazione di modelli monodimensionali per le analisi di RSL;
-

Comando "*Importa modello*": avvia la funzione di importazione di un profilo stratigrafico mediante file CAD (*.dxf o *.dwg).
- Comando "*Importa da REXELWeb*": consente di importare un file *.zip scaricato dall'applicativo in line REXELWeb. Dopo aver scelto il file verrà se aggiungere una nuova analilsi e l'eventuale nome. Il software provvederà ad importare tutti gli accelerogrammi presenti crerando anche una nuova analisi.
- Comando "*Manuale*": consente di visualizzare il manuale teorico ed operativo del software.

3.2.3 Modellazione

Gruppo di comandi per la modellazione della sezione stratigrafica:

Figura 13. Scheda "Modellazione".

Gruppo selezioni

Gruppo di comandi che consentono di selezionare le famiglie di oggetti che costituiscono la sezione stratigrafica.

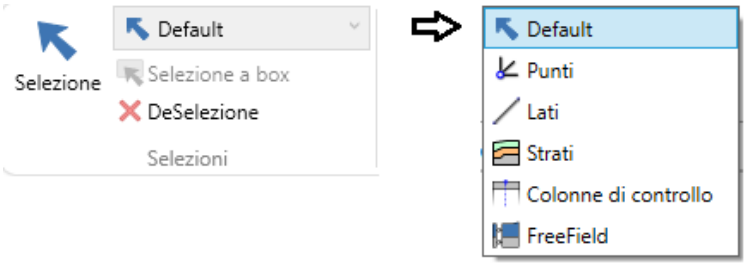


Figura 14. Gruppo comandi "Selezioni".

La selezione mediante click con tasto sinistro del mouse si attiva mediante il comando *"Selezione"* ed è di tipo additivo, la selezione multipla può avvenire anche attraverso il comando *"Selezione a box"* racchiudendo all'interno di un box gli oggetti che si vuole selezionare, per annullare tutte le selezioni è possibile procedere con il comando *"DeSelezione"* .

È disponibile un filtro di selezione grazia al quale è possibile scegliere quali oggetti si intende selezionare tra *punti* , *lati* , *strati* , *colonne di controllo* e *free-field* ; la scelta *default* di tale filtro consente di selezionare indistintamente tutti gli oggetti.

Gruppo inserisci

Gruppo di comandi che consentono l'inserimento dei sismostrati.

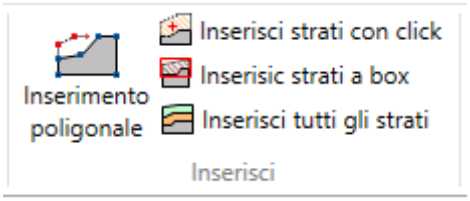


Figura 15. Gruppo comandi "Inserisci".

Il disegno del singolo sismostrato viene fatto mediante il comando *"Inserimento poligonale"* cliccando, e posizionando con l'ausilio di "snap" sui punti della griglia, su uno sfondo di base ottenuto mediante

importazione da file *.dwg / *.dxf o nel vuoto; se il poligono definito dall'utente si richiude su se stesso, ovvero se viene ripassato il primo punto, il software genera direttamente il sismostrato, viceversa se viene specificata una polilinea aperta si ottiene l'input di soli punti e lati ed il sismostrato (poligono) va inserito in una fase successiva. Si osservi **Figura 16**, nel *"CASO 1"* l'input poligonale termina da dove è cominciato ovvero sul punto n°1 e quel che si ottiene è un poligono che rappresenta un sismostrato, nel *"CASO 2"* l'input poligonale termina con l'inserimento del punto n°8 e quel che si ottiene è una sequenza di punti e lati.

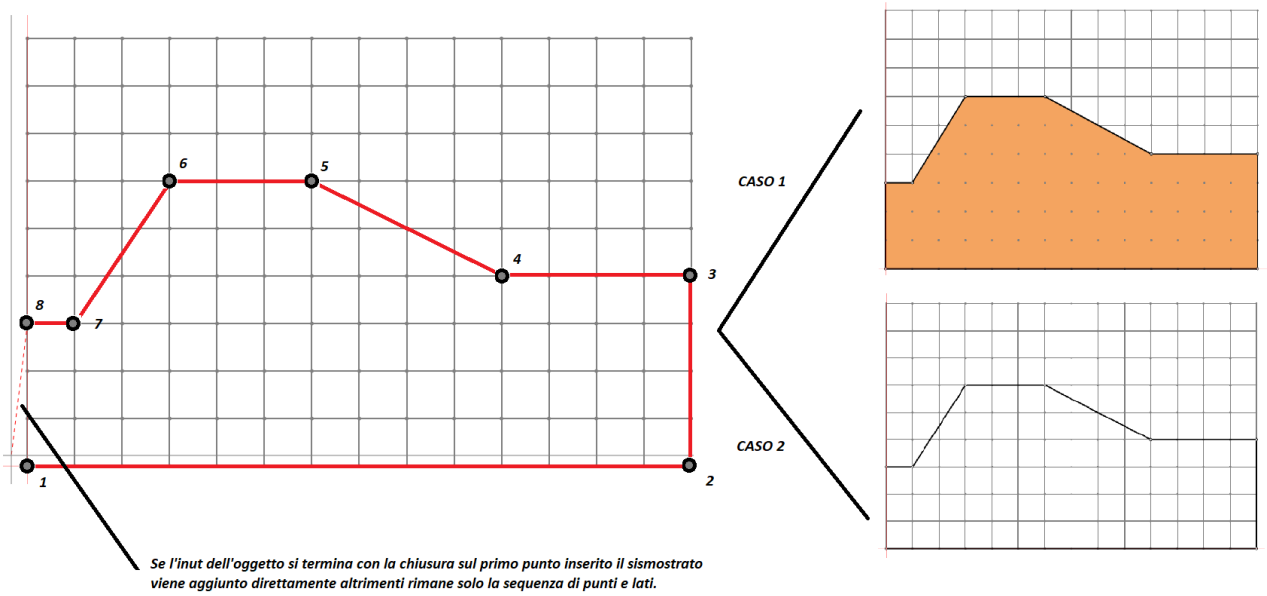


Figura 16. Inserimento poligonale.

Qualora si volesse inserire un sismostrato sulla base del contorno costituito da punti e lati è possibile farlo mediante il comando *"Inserisci strati con click"* semplicemente cliccando con il tasto sinistro del mouse all'interno di una maglia chiusa.

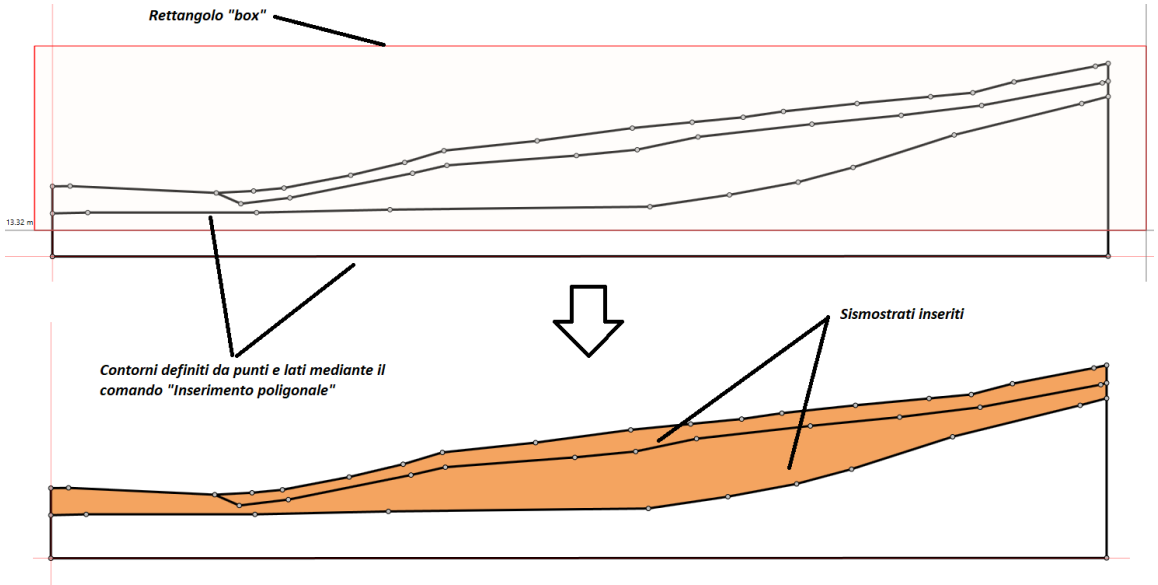


Figura 17. Inserimento a box.

Alternativamente l'inserimento può avvenire per uno o più strati contemporaneamente sfruttando il comando *"Inserisci strati a box"* racchiudendo uno o più poligoni all'interno di un rettangolo (vedi **Figura 17**). Infine, sempre facendo riferimento alla **Figura 17**, volendo inserire tutti gli strati contemporaneamente è possibile farlo mediante il comando "Inserisci tutti gli strati" .

Gruppo Modifica

Gruppo di comandi che consentono la modifica della geometria di oggetti inseriti in precedenza.

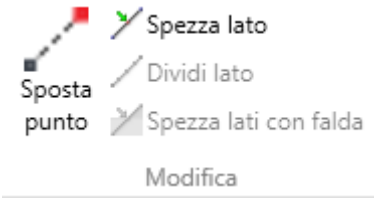


Figura 18. gruppo comandi "Modifica".

Di seguito la descrizione dei singoli comandi:

- *"Sposta punto"* : consente lo spostamento di un nodo mediante un primo click sul nodo da spostare ed un secondo click nel punto in cui si vuole riposizionare il nodo;
- *"Spezza lato"* *:* consente di spezzare un lato in due lati distinti cliccando in un punto appartenente ad esso;
- *"Dividi lato"* : una volta selezionato il lato da dividere viene chiesto in quanti lati spezzare il lato stesso;
- Spezza lati con falda : spezza tutti i lati su cui è attivo il check *"orografia"* nei punti di intersezione con la polilinea che definisce la falda; da notare che in assenza di falda il comando non risulta attivo.

Gruppo Falda e colonne

Gruppo di comandi che racchiude varie funzionalità.

Figura 19. gruppo comandi "Falda e colonne".

Di seguito la descrizione dei singoli comandi:

- *"Colonne di controllo" : consente l'inserimento di oggetti definiti ad una certa ascissa lungo la sezione stratigrafica aventi una duplice funzione: consentono la lettura dei risultati secondo una*

verticale, consentono l'esportazione di un modello stratigrafico 1D, in cui gli spessori dei singoli strati vengono ottenuti mediante intersezione tra i sismostrati della sezione 2D e la verticale della colonna stessa, verso altri applicativi (es. applicativo LIQUEFAZIONE);

- "*Free-field*" : consente di inserire delle condizioni al contorno di tipo free-field sulle frontiere laterali del modello;
- *"Falda"* : consente l'inserimento della linea di falda, mediante inserimento poligonale, utilizzata per i modelli di verifica nei confronti della liquefazione;
- *"Elimina falda"* : consente l'eliminazione della falda se presente;

Gruppo Varie

Gruppo di comandi che racchiude varie funzionalità.

Figura 20. Gruppo di comandi "Varie".

Di seguito la descrizione dei singoli comandi:

- *"Pulisci modello"* : qualora fossero presente degli elementi non connessi e che non rispettano le regole imposte dal software sui grafi ai fini della discretizzazione in elementi finiti, il comando consente di eliminarli;
- *"Elimina modello"* : consente di eliminare l'intera sezione stratigrafica;
- *"Distanza"* : misura la distanza tra due punti;
- *"Trasla"* *:* trasla la seazione stratigrafica posizionando l'origine degli assi cartesiani nel vertice in basso a sinistra del rettangolo di ingombro dell'intero modello.

Gruppo Sfondo base input

Gruppo di comandi da utilizzare per definire una griglia di lavoro o una base di disegno mediante importazione da file *.dwg / *.dxf.

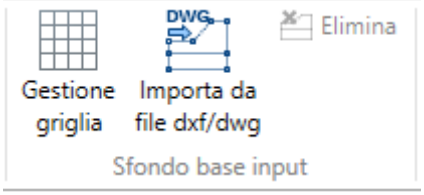


Figura 21. Gruppo di comandi "Sfondo base input".

Mediante il comando *"Gestione griglia"* è possibile definire la geometria di una griglia di lavoro che supporta l'utente durante le operazioni di inserimento poligonale dei vari strati che compongono la sezione. Eseguendo il comando viene richiesto (**Figura 22**):

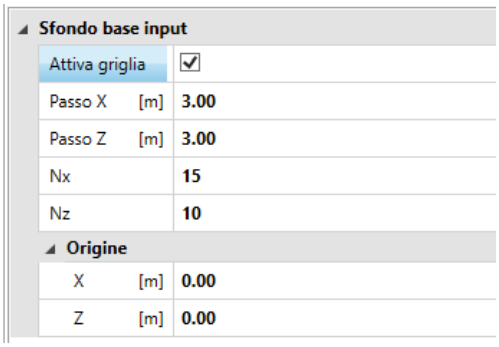


Figura 22. Parametri griglia di lavoro.

- *"Attivazione griglia":* se rendere visibile o meno la griglia;
- *"Passo X"*: distanza tra gli elementi verticali della griglia;
- *"Passo Z"*: distanza tra gli elementi orizzontali della griglia;
- *"Nx"*: numero di elementi verticali;
- *"Nz"*: numero di elementi orizzontali;
- *"Origine X"*: ascissa del vertice in basso a sinistra della griglia;
- *"Origine Z"*: ordinata del vertice in basso a sinistra della griglia.

Mediante il comando "Importa da dxf/dwg" è possibile importare un disegno precedentemente realizzato in CAD da utilizzare come base per l'inserimento poligonale dei sismostrati. Eseguendo il comando viene visualizzato l'ambiente di importazione del file (**Figura 23**):

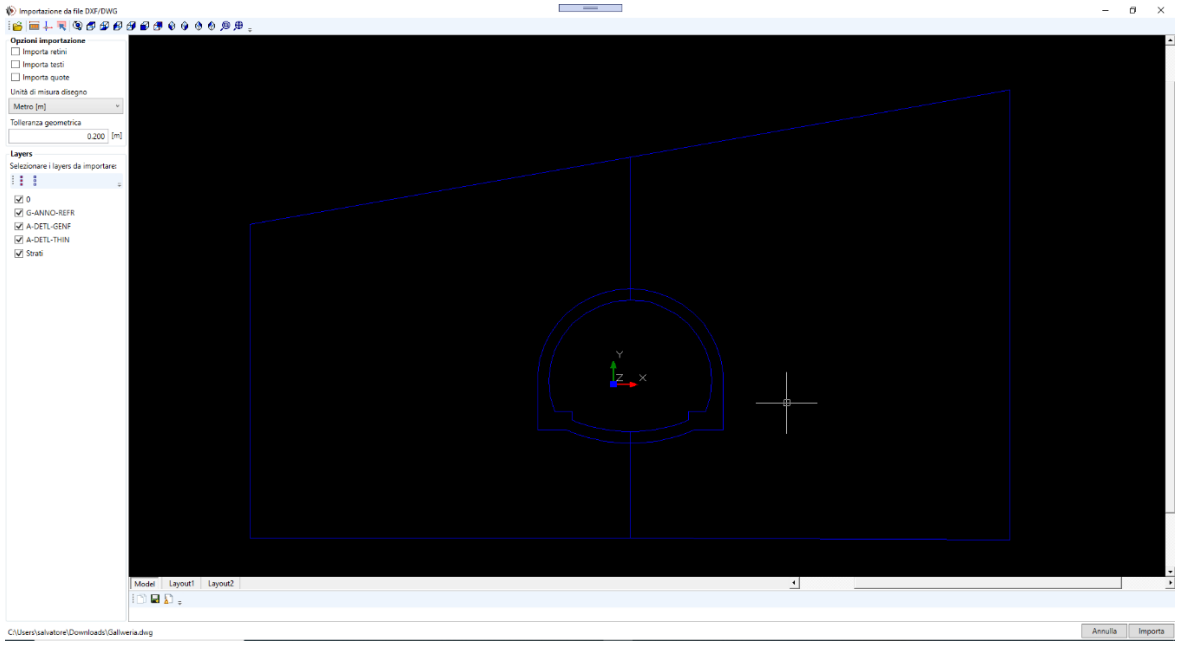


Figura 23. Importazione file CAD come base di inserimento.

Cliccando su "Importa" (pulsante in basso a destra nella finestra) vengono importati nell'ambiente principale del software gli oggetti linea e polilinea presenti nel disegno e su di essi sarà possibile eseguire il disegno degli elementi poligonali sfruttando le funzioni di snap (vedi **Figura 24**).

Infine il comando *"Elimina"* consente di eliminare lo sfondo importato da file CAD qualora presente.

L'uso dello sfondo di base importato da file è raccomandato nel caso di geometrie particolarmente complesse e sulle quali l'utente in fase di modellazione della sezione ne rivede la geometria. Qualora invece la geometria fosse già definita a priori all'interno di un file CAD è raccomandato l'uso del comando *"Importa modello"* presente nella scheda *Home* che consente l'importazione diretta dei sismostrati.

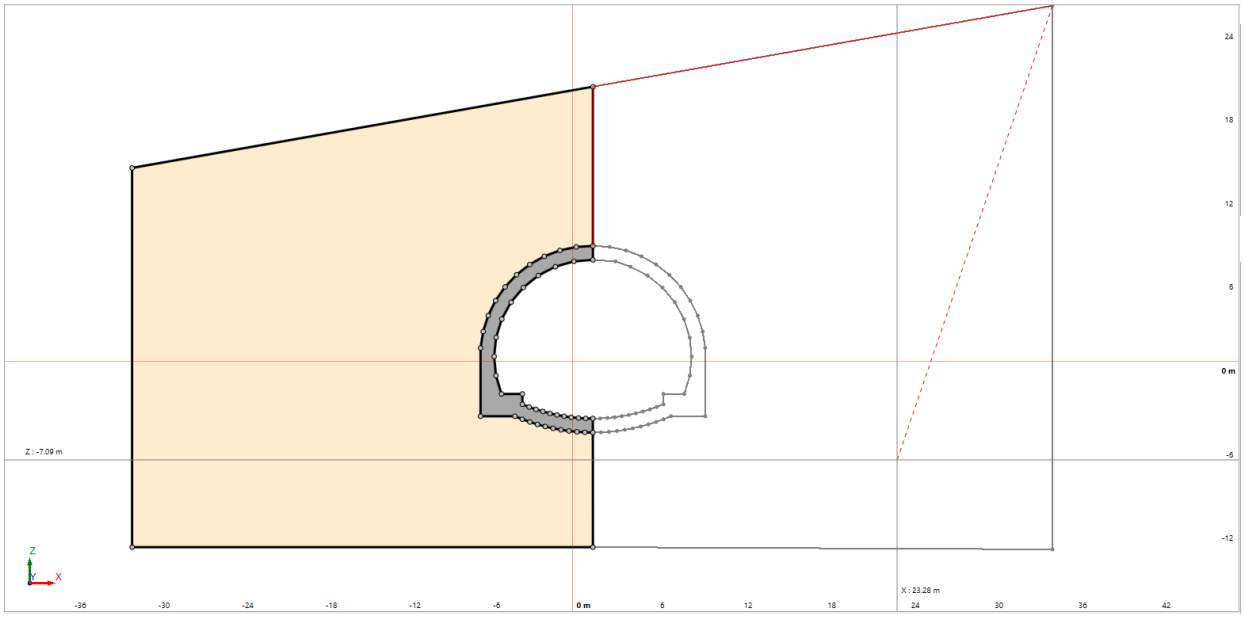


Figura 24. Inserimento poligonale su sfondo importato da file CAD.

Gruppo comandi Zoom e viste

Gruppo di comandi da utilizzare per adattare la visualizzazione della finestra di input grafico alle varie esigenze di inserimento e per l'esportazione del disegno in formato *.DXF.

Figura 25. Gruppo di comandi "Zoom e viste".

Di seguito i comandi disponibili:

- *"Zoom finestra"* : esegue lo zoom sulla base di un rettangolo definito dall'utente;
- *"Zoom estenzione"* : esegue uno zoom su tutta l'estensione del disegno adattandolo alla finestra corrente;
- *"Zoom in"* : zoom in avanti;
- *"Zoom out"* : zoom indietro;
- *"Imposta la visione precedente"* : torna alla vista precedente;
- *"Imposta la visione successiva"* : torna alla vista successiva;
- *"Salva la vista corrente"* : salva la vista corrente;
- *"Esporta nel formato JPG"* : consente di esportare un file *.JPG del disegno corrente;
- *"Esporta nel formato DXF"* : consente di esportare un file *.DXF del disegno corrente.

3.3 Editors di gestione

In questo paragrafo vengono descritti nel dettaglio gli editors relativi alla gestione delle differenti fasi di lavoro.

3.3.1 Editor dei dati generali

Mediante il comando *"Dati generali"* è possibile accedere all'editor dedicato alla gestione delle informazioni di carattere generale del progetto. In particolare, le informazioni in esso contenute sono suddivise in tre famiglie selezionabili mediante il tree view posto nel lato sinistro dell'ambiente di gestione. Di seguito vengono descritti i vari campi presenti.

Progetto

Si tratta di informazioni di carattere generale che riguardano l'oggetto, la data di compilazione, l'ubicazione, la committenza ed il progettista. In dettaglio si ha:

- *Oggetto*: titolo del progetto o dello studio di microzonazione;
- *Data*: data dell'elaborazione;
- *Localizza sito da **SismoGis:*** se attivo consente di specificare l'ubicazione del sito oggetto di studio mediante l'applicativo di Stacec "SismoGis" e con esso anche la classe d'uso e la vita nominale dell'opera in progetto, se disattivato l'ubicazione e le coordinate del sito devono essere specificate dall'utente;

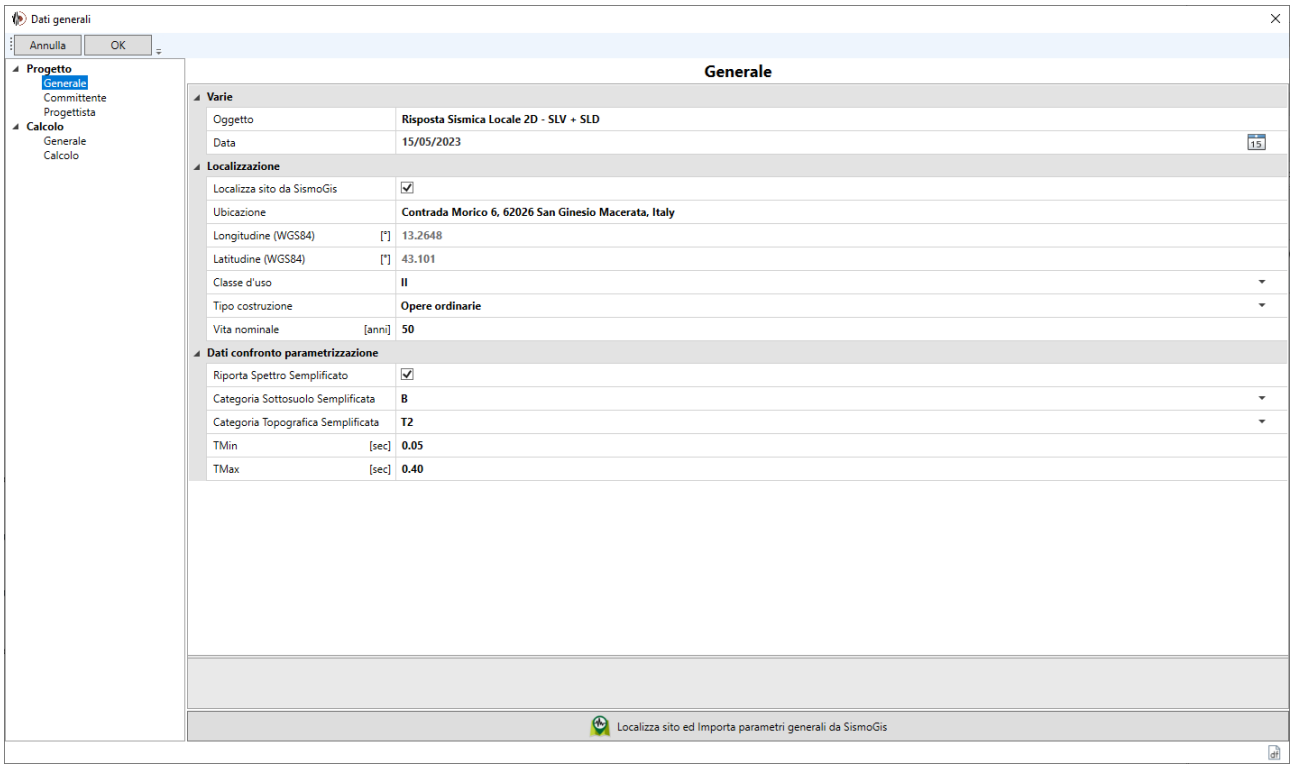


Figura 26. Compilazione delle informazioni relative al progetto nell'editor dei dati generali.

A seguire è possibile specificare l'anagrafica del committente e del progettista; se indicate tali informazioni vengono poi riportate nella relazione fornita dall'applicativo.

Calcolo

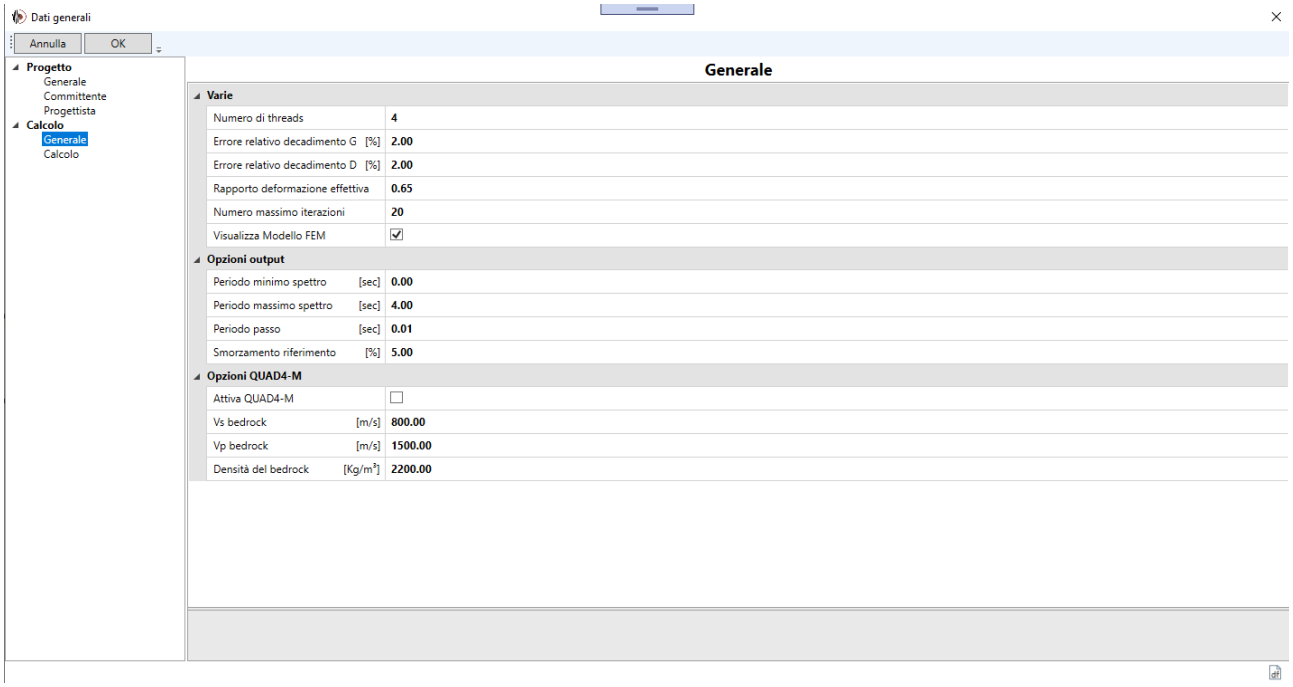


Figura 27. Parametri di gestione degli algoritmi di calcolo.

Si tratta di informazioni relative alla gestione degli algoritmi di calcolo per le analisi di risposta sismica locale ed in particolare:

- *Numero di threads*: specifica il numero di processori logici utilizzati nel calcolo;
- *Errore relativo decadimento **G***: specifica il valore percentuale massimo dell'errore relativo sul modulo di taglio G tollerato dal criterio di convergenza utilizzato dall'algoritmo lineare equivalente;
- *Errore relativo decadimento **D***: specifica il valore percentuale massimo dell'errore relativo sul rapporto di smorzamento viscoso ***D*** tollerato dal criterio di convergenza utilizzato dall'algoritmo lineare equivalente;
- *Rapporto di deformazione effettiva*: specifica il rapporto tra la deformazione a taglio effettiva e la deformazione massima per il generico elemento finito;
- *Visualizza modello FEM*: specifica se visualizzare il modello agli elementi finiti durante il calcolo;
- *Numero massimo di iterazioni*: specifica il massimo numero di iterazioni da effettuare durante la ricerca della convergenza della singola condizione di carico;
- *Periodo minimo spettro*: specifica il valore minimo del periodo all'interno del quale calcolare gli spettri di risposta;
- *Periodo massimo spettro*: specifica il valore massimo del periodo all'interno del quale calcolare gli spettri di risposta;
- *Periodo passo*: specifica il valore del passo con cui suddividere l'intervallo dei periodi all'interno del quale calcolare gli spettri di risposta;
- *Smorzamento di riferimento*: specifica il rapporto di smorzamento viscoso da utilizzare per il calcolo degli spettri di risposta;
- *Tolleranza calcolo autovalori*: specifica un valore di tolleranza assoluta dell'algoritmo di ARNOLDI utilizzato per la ricerca del primo autovalore del modello di risposta sismica locale;
- *Numero massimo di iterazioni autovalori*: specifica il massimo numero di iterazioni dell'algoritmo di ARNOLDI utilizzato per la ricerca del primo autovalore del modello di risposta sismica locale.

3.3.2 Editor degli accelerogrammi

Mediante il comando "Accelerogrammi" è possibile accedere all'editor di gestione degli accelerogrammi di input relativi al progetto corrente (**Figura 28**). Di seguito vengono illustrati i principali comandi di gestione.

Figura 28. Editor degli accelerogrammi di input del progetto.

Inserimento di una nuova settupla di accelerogrammi

Mediante il comando *"Inserisci accelerogramma"* , posto in alto a sinistra, viene visualizzata l'interfaccia di **Figura 28** in cui vengono richieste le unità di misura con cui gli accelerogrammi sono riportati nel file che si intende leggere.

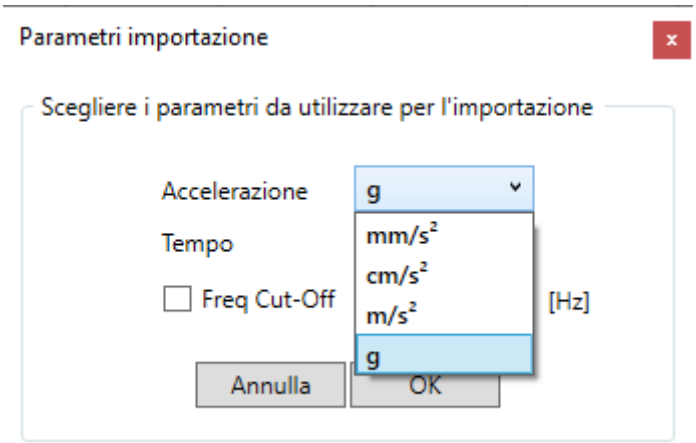


Figura 29. Scelta dei parametri di importazione degli accelerogrammi.

A questo punto mediante l'interfaccia di **Figura 29** viene richiesto all'utente di specificare la cartella in cui sono contenuti i files, il tipo di formato (*.txt oppure *.asc) e di selezionare i file da importare (anche più di uno contemporaneamente ed in questo caso utilizzare il tasto Ctrl della tastiera per la selezione multipla).

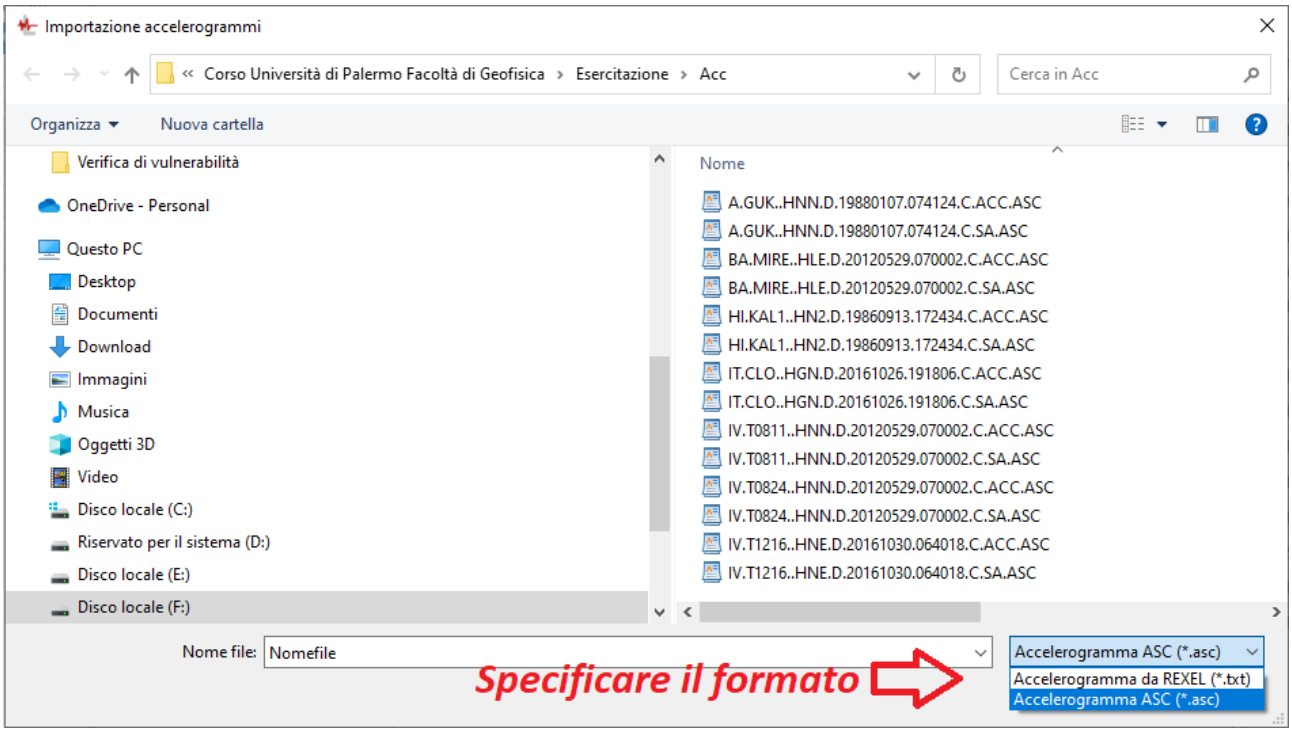


Figura 30. Selezione dei files e del tipo di formato da importare.

In merito alla formattazione dei files questa può essere di 2 tipi:

Il primo è un file di testo contenente due colonne separate da tabulazione in cui la prima colonna indica il generico istante di tempo e la seconda colonna il valore corrispondente di accelerazione;

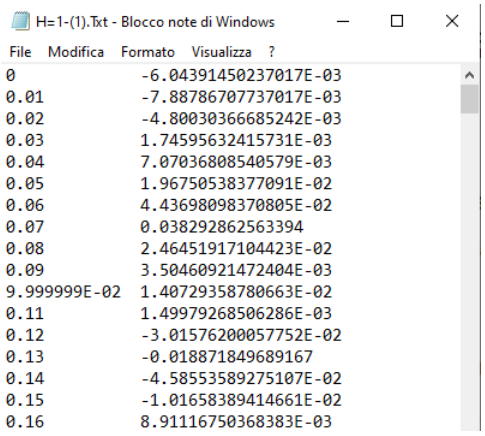


Figura 31. Formattazione file di testo per importazione accelerogrammi nel formato fornito da REXEL.

Da notare che questo tipo di file normalmente è quello fornito dall'applicativo REXEL https://www.reluis.it/it/progettazione/software/rexel.html.

Il secondo è un file di testo in formato .ASC (si veda **Figura 32**) contenente diverse informazioni relative all'evento sismico ed alla stazione, l'unità di misura dell'accelerazione è cm/s^2 ed viene normalmente fornito dall'applicativo REXEL Lite http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_31/#/data_and_services/tools/rexel.

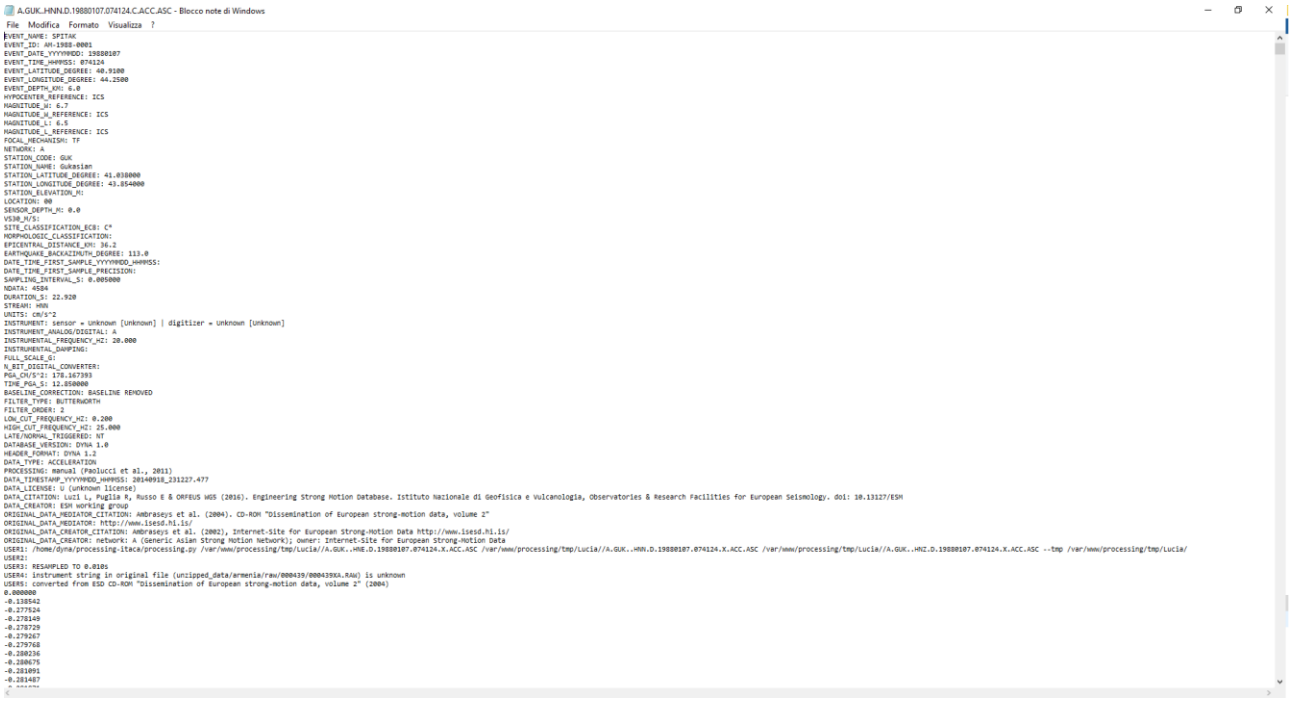


Figura 32. File di testo fornito dall'applicativo REXEL lite.

Una volta importato un certo numero di accelerogrammi, se l'operazione è andata a buon file e non si sono verificati errori di lettura, sarà presente una tabella simile a quella di **Figura 33**. In cui è possibile rinominare il singolo accelerogramma oltre a visualizzare il corrispondente valore di PGA (accelerazione di picco) in frazione di g.

Accelerogrammi

	Nome	PGA [g]
1	Zero	0.00
2	Acc (1)	0.43
3	Acc (2)	0.19
4	Acc (3)	0.17
5	Acc (4)	0.19
6	Acc (5)	0.09
7	Acc (6)	0.09
8	Acc (7)	0.79
9	**Acc (8)**	**0.18**

Figura 33. Tabella accelerogrammi importati.

Cliccando sui numeri progressivi della tabella di **Figura 33** è possibile selezionare il singolo accelerogramma e per esso visualizzare (Figura 34) la storia temporale delle accelerazioni ed i picchi degli emicicli positivi e

negativi che vengono considerati per il calcolo del numero di cicli equivalenti della procedura illustrata al §**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.

Figura 34. Visualizzazione storia temporale dell'accelerazione al suolo.

Per il singolo accelerogramma il software calcola l'andamento del parametro di Husid con il tempo (Figura 35), che definisce la quantità percentuale di energia associata al moto sismico fino all'istante t, rispetto all'energia totale

$$H_n(t) = \frac{\int_0^t [a(t)]^2}{\int_0^\infty [a(t)]^2} \times 100$$

Tale parametro è utile per individuare la durata della fase cosiddetta di "Strong motion" che risulta compresa tra il 5% ed il 95% dell'energia sviluppata rispetto al totale.

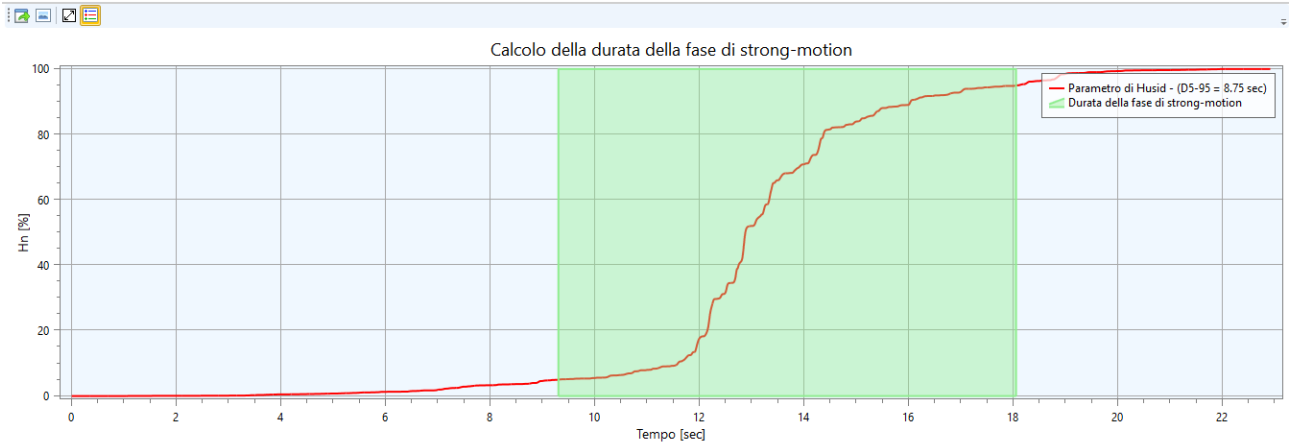


Figura 35. Parametro di Husid.

I dati relativi al singolo accelerogramma vengono riportati nella tabella riportata in **Figura 36**; questi in parte vengono letti all'interno del file importato qualora si tratti del formato *.ASC ed in parte vengono calcolati dal software. Il significato dei singoli dati viene di seguito specificato.

Dati Calcolati dal software

- a_{max}: accelerazione di picco dell'accelerogramma espressa in frazione di g;
- I_s: intensità di Arias espressa in cm/s;
- t_5: istante iniziale della fase di Strong motion;
- t_{95}: istante finale della fase di Strong motion;
- D_{95}: durata della fase di Strong motion;
- υ_0: frequenza di passaggi per lo zero all'interno della fase di Strong motion;
- N_{eq}: numero di cicli di carico che caratterizza la storia equivalente.

Dati accelerogramma

Info		
a_{max}	[g]	0.18
I_s	[cm/s]	31.0
t_5	[sec]	9.31
t_{95}	[sec]	18.06
D_{595}	[sec]	8.75
υ_0	[Hz]	8.3
Neq		9.7
Dati		
Nome evento		SPITAK
Id evento		AM-1988-0001
Data		07/01/1988
Mw		6.7
Ml		6.5
Sito EC8		C*
Nome stazione		Gukasian
Rep [km]		36.2

Figura 36. Dati letti e calcolati per il singolo accelerogramma.

Dati letti dal software (solo nel caso di file *.ASC)

- *Nome evento*: nome dell'evento sismico;
- *Id evento*: identificativo dell'evento sismico;
- *Data*: data dell'evento;
- M_w: magnitudo momento;
- M_l: magnitudo locale;
- *Sito EC8*: categoria di sottosuolo della stazione;
- E_{ep}*:* distanza epicentrale espressa in Km.

Taglio degli zeri di un accelerogramma

Una volta importati gli accelerogrammi è buona norma eliminare le sequenze di "zeri" all'inizio ed alla fine degli stessi; questa operazione velocizzerà notevolmente le analisi e renderà più leggibili i risultati.

Attraverso il comando *"Taglia gli estremi dell'accelerogramma selezionato"* , posto in alto a sinistra nella finestra principale, il software chiede all'utente di specificare gli istanti di tempo iniziale e finale che definiscono il range all'interno del quale l'accelerogramma presenta dei valori significativi di accelerazione (vedi **Figura 37**).

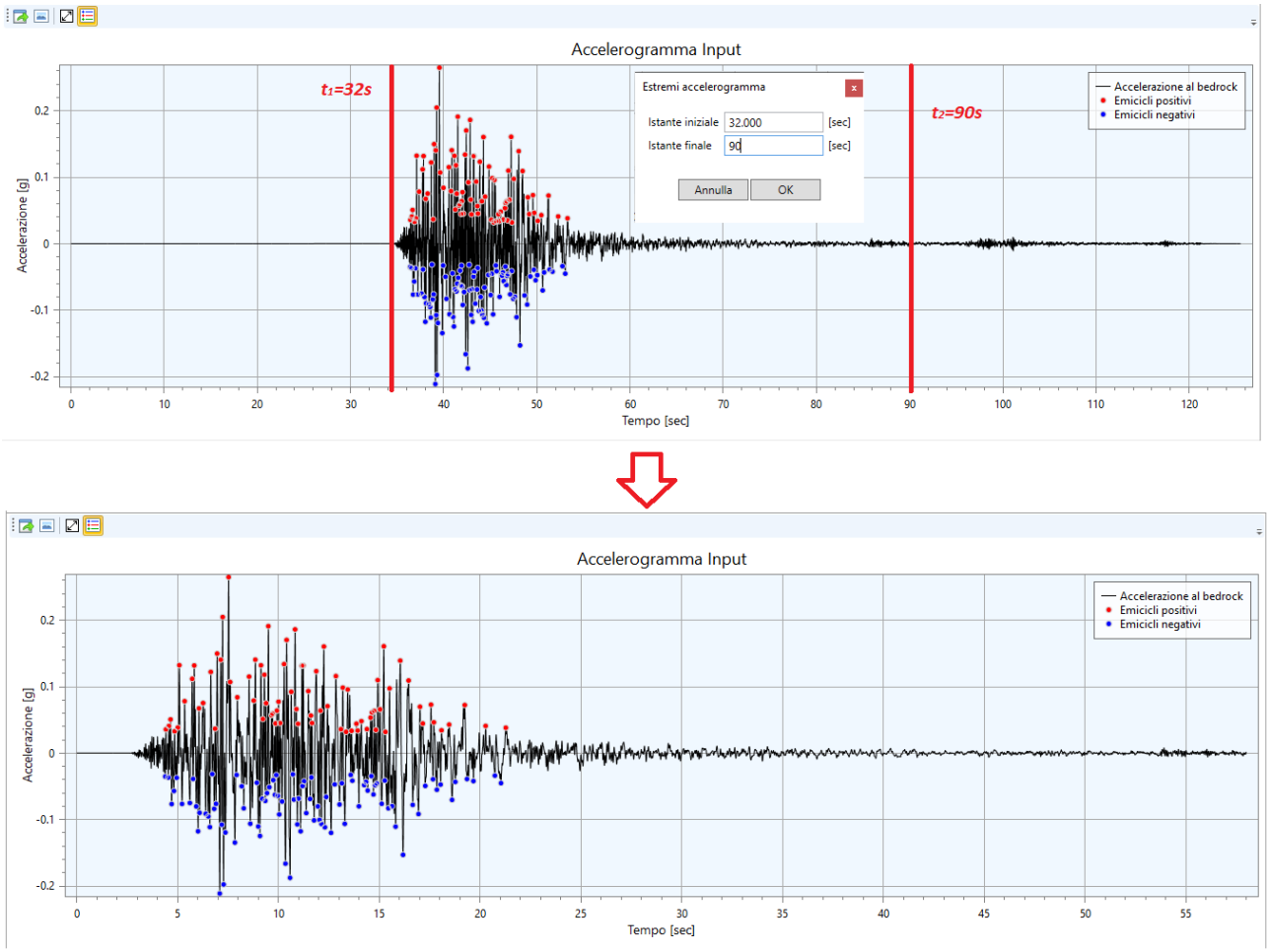


Figura 37. Procedura di taglio degli zeri di un accelerogramma.

3.3.3 Editor delle curve di decadimento

Il modello lineare equivalente, utilizzato per le analisi di risposta sismica locale, prende in considerazione le variazioni del modulo di taglio G e del rapporto di smorzamento viscoso D, con il livello deformativo γ del terreno. Tali caratteristiche devono essere attribuite ad ogni singolo sismo-strato in funzione suo comportamento meccanico sotto l'effetto di carichi ciclici.

All'interno dell'ambiente di gestione delle curve di decadimento sono presenti diverse curve predefinite che fanno riferimento a dei modelli di sottosuolo ben noti in letteratura ed adattabili in base alla natura del terreno oggetto di studio.

L'utente ha anche la possibilità di arricchire il database a sua disposizione aggiungendo nuovi modelli di letteratura oppure ottenendoli da prove sperimentali eseguite su campioni di terreno prelevati nel sito analizzato.

Attraverso il comando *"Curve di decadimento"* presente nella scheda *"Home"* è possibile accedere all'editor delle curve di decadimento riportato in Figura 38.

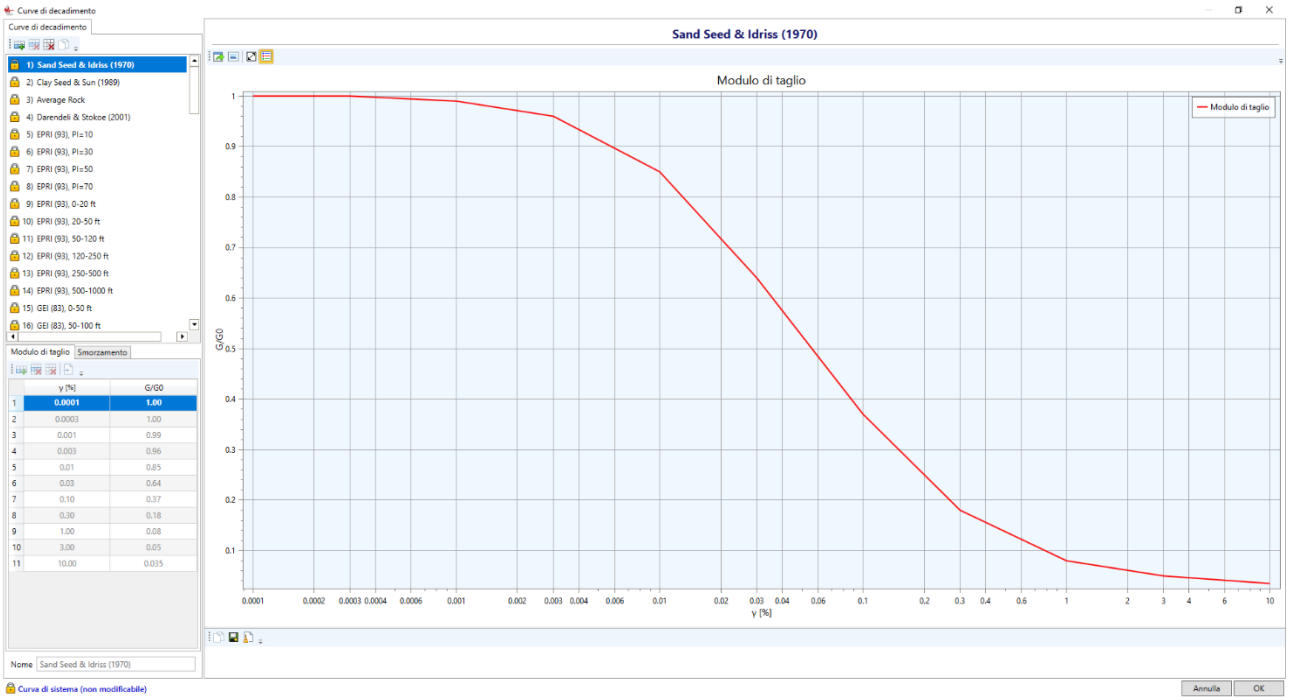


Figura 38. Editor delle curve di decadimento.

L'elenco delle curve di decadimento a disposizione dell'utente è riportato in alto a sinistra nella finestra principale (vedi **Figura 38**), per la singola curva, oltre al nome della stessa, è presente un'icona iniziale che specifica se si tratta di una *curva di sistema* o di una *curva utente* .

La differenza tra le due famiglie di curve sta nel fatto che mentre le curve appartenenti alla prima famiglia sono presenti all'atto dell'installazione dell'applicativo e non sono modificabili dall'utente, le curve appartenenti alla seconda famiglia non sono presenti all'atto dell'installazione e sono caricate dall'utente il quale le può ritrovare in tutti i suoi progetti perché salvate all'interno della directory in cui è presente l'applicativo.

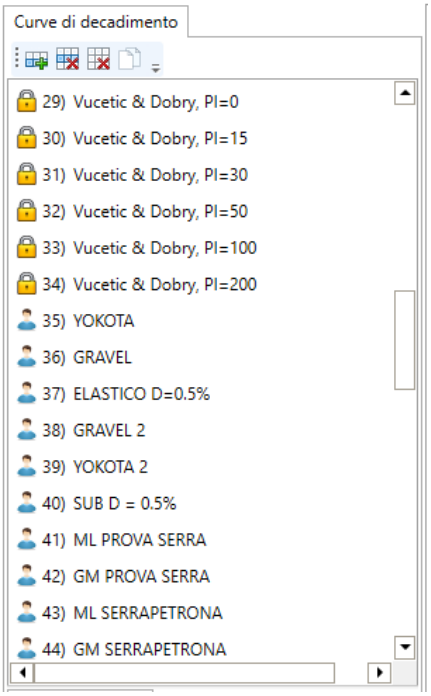


Figura 39. Elenco delle curve di decadimento disponibili.

Inserimento di una nuova curva di decadimento

Attraverso il comando "Inserisci curva" l'utente ha la possibilità di aggiungere un nuovo modello di curve di decadimento al proprio database. La fase di inserimento richiede che vengano forniti (vedi Figura 40), oltre al nome del nuovo modello, una lista di coppie di punti $(\gamma, G/G_0)$ ed una lista di punti (γ, D), dove la deformazione a taglio γ è espressa in percentuale (non può assumere valore nulla in quanto la rappresentazione è data in scala semilogaritmica), il rapporto tra il modulo di taglio ed il suo valore iniziale G/G_0 è un numero puro ed ha come primo valore l'unità ed il rapporto di smorzamento viscoso D è espresso in percentuale.

L'inserimento dei singoli punti per entrambe le curve (modulo di taglio e smorzamento viscoso) può avvenire in due modi:

- manualmente digitando i valori numerici e sfruttando il comando "Inserisci punto" ;
- attraverso la lettura di due file, (uno per il modulo di taglio ed uno per lo smorzamento) contenenti le sequenze di punti che descrivono le curve nel piano cartesiano, attraverso il comando *"Importa modello da file"* .

Qualora si volesse intraprendere quest'ultima strada il formato dei file da importare può essere in del tipo *.txt con i punti separati da tabulazione oppure in formato *.csv generato con programmi di gestione di dati tipo Excel di Microsoft.

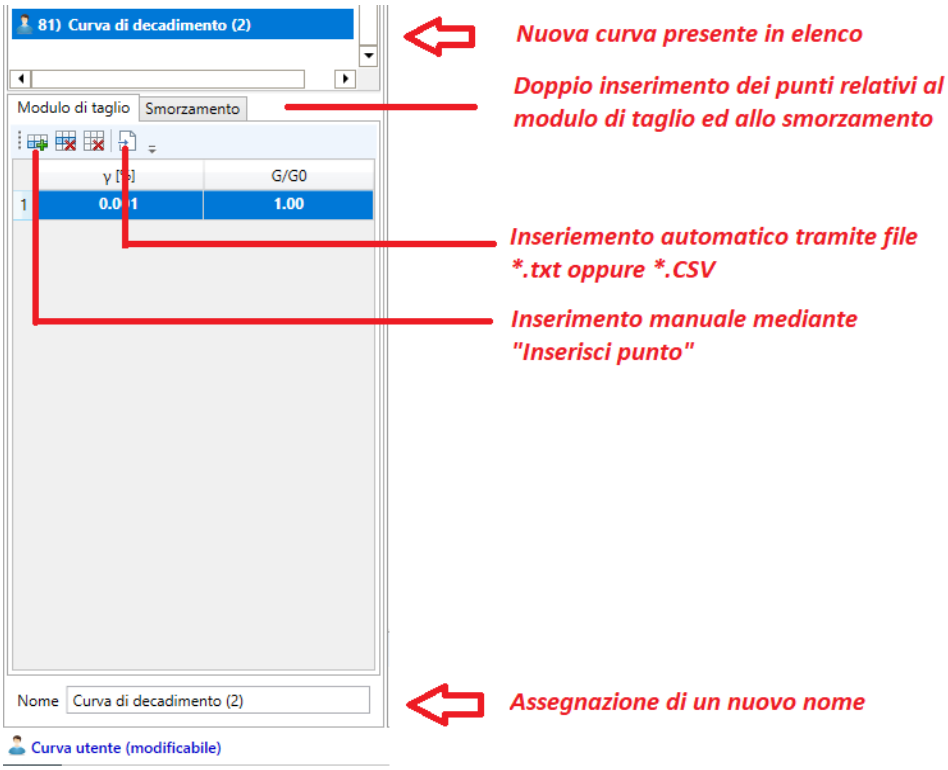


Figura 40. Inserimento di una nuova curva di decadimento.

Osservazioni nella definizione delle curve di decadimento

È buona regola fare attenzione al range di deformazione a taglio γ in cui vengono definiti i modelli appena descritti in quanto potrebbe capitare durante le analisi di risposta sismica locale, specialmente nel caso di sismi di elevata magnitudo, che il livello deformativo richiesto dall'algoritmo ricada fuori dal range di definizione facendo fallire lo stesso e di conseguenza non raggiungendo la convergenza per l'analisi che si sta provando a processare.

L'utende dovrebbe osservare lo stato della generica iterazione all'interno dell'analisi disponibile nella finestra d'avanzamento del calcolo (vedi Figura 41) e qualora il valore di γ dovesse eccerede il range di definizione della curva di decadimento definita estendere lo stesso aggiungendo dei punti in modo da includere il livello di deformazione richiesto per entrambe le curve (modulo di taglio e smorzamento viscoso).

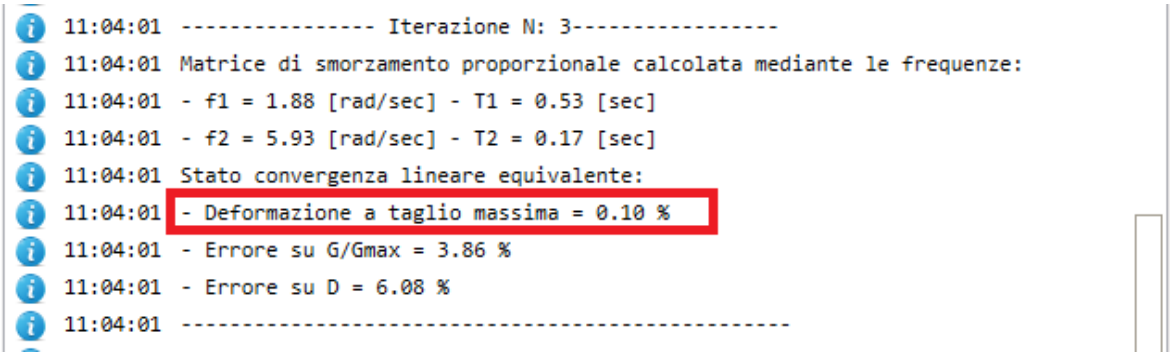


Figura 41. Livello di deformazione massimo per la singola iterazione all'interno dell'analisi corrente.

3.3.4 Editor delle curve di resistenza dei materiali

Il modello di analisi utilizzato dall'applicativo e descritto al §**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** n ecessita la definizione, per ogni sismostrato, di curve di resistenza al taglio in grado di descrivere l'insorgere di sovrappressioni interstiziali nel materiale in funzione di un certo livello di sollecitazione ciclica.

Mediante il comando "Curve di resistenza al taglio"

, presente nella scheda "Home", è possibile avviare l'editor delle curve di resistenza al taglio rappresentato in Figura **42**.

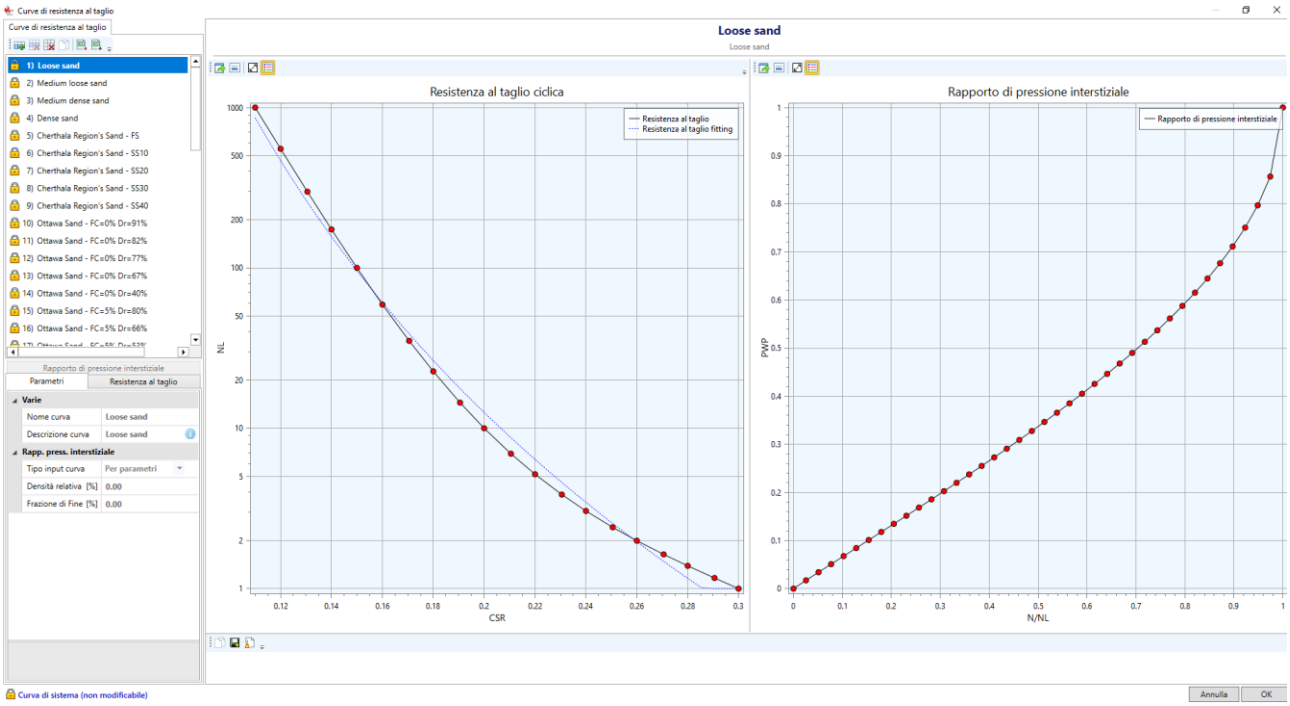


Figura 42. ***Editor delle curve di resistenza al taglio.***

L'elenco delle curve di resistenza al taglio a disposizione dell'utente è riportato in alto a sinistra nella finestra principale (vedi Figura **42**), per la singola curva, oltre al nome della stessa, è presente un'icona iniziale che specifica se si tratta di una *curva di sistema* o di una *curva utente* .

La differenza tra le due famiglie di curve sta nel fatto che mentre le curve appartenenti alla prima famiglia sono presenti all'atto dell'installazione dell'applicativo e non sono modificabili dall'utente, le curve appartenenti alla seconda famiglia non sono presenti all'atto dell'installazione e sono caricate dall'utente il quale le può ritrovare in tutti i suoi progetti perché salvate all'interno della directory in cui è presente l'applicativo.

<u>Inserimento di una nuova curva di resistenza al taglio</u>

Attraverso il comando "Inserisci curva" l'utente ha la possibilità di aggiungere un nuovo modello di curve di resistenza al taglio al proprio database. La fase di inserimento richiede che vengano forniti (vedi Figura 43), oltre al nome del nuovo modello, una lista di coppie di punti (CSR, N_L) ed il tipo di modello per il la definizione del rapporto di sovrappressione interstiziale.

Per quest'ultimo la scelta può essere di due tipi:

- *"Per parametri"*: in questo caso il rapporto di sovrappressione interstiziale viene ottenuto secondo quanto illustrato al §**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e quindi viene c hiesto di specificare la densità relativa del materiale DR e la frazione di fine FC entrambe in percentuale;
- "Per punti": in questo caso il rapporto di sovrappressione interstiziale viene fornito dall'utente mediante l'inserimento di una sequenza di punti.

L'inserimento dei singoli punti laddove richiesto può avvenire in due modi:

- manualmente digitando i valori numerici e sfruttando il comando "Inserisci punto" ;
- attraverso la lettura di due file, contenenti le sequenze di punti che descrivono le curve nel piano cartesiano, attraverso il comando *"Importa modello da file"* .

Qualora si volesse intraprendere quest'ultima strada il formato dei file da importare può essere in del tipo *.txt con i punti separati da tabulazione oppure in formato *.csv generato con programmi di gestione di dati tipo Excel di Microsoft.

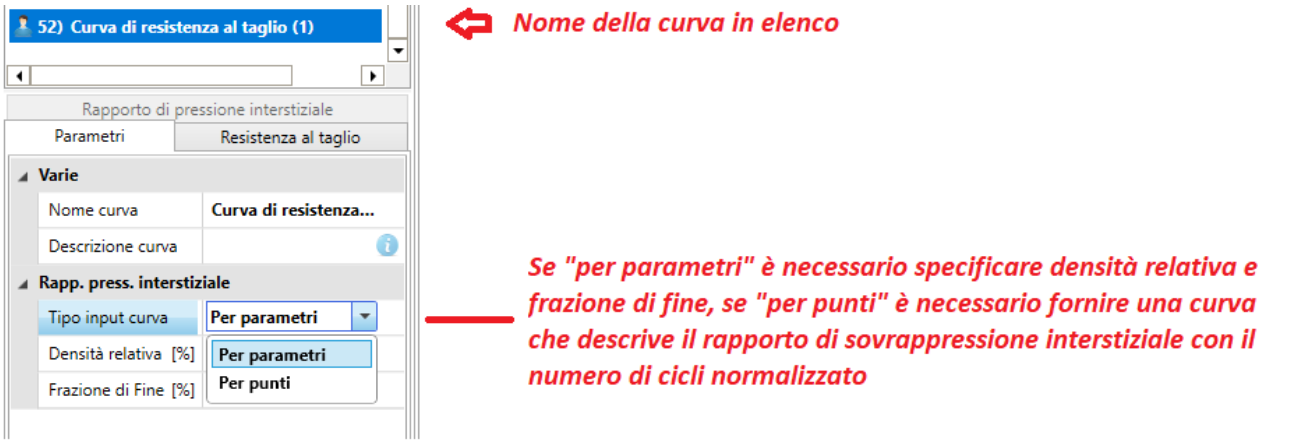


Figura 43. Inserimento di una nuova curva di resistenza al taglio.

Descrizione dei modelli di letteratura

Le curve di resistenza al taglio di sistema presenti nel database appena illustrato derivano da una ricerca bibliografica fatta nell'ambito di un progetto di ricerca tra l'azienda Stacec s.r.l. e ed il Dipartimento di Ingegneria e Geologia dell'Università degli Studi "Gabriele d'Annunzio" di Chieti-Pescara.

Tale ricerca è stata condotta su diverse riviste scientifiche, dall'anno 2003 al 2019: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (82 articoli), *Earthquake Spectra* (15 articoli), *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering* (65 articoli) e articoli non indicizzati da *Scopis e Web of Science* (24 articoli).

Per ogni curva di sistema è possibile visualizzare mediante il comando "Informazioni sulla curva di resistenza al taglio" una descrizione estesa del tipo di materiale a cui fa riferimento il modello (vedi **Figura 44**).

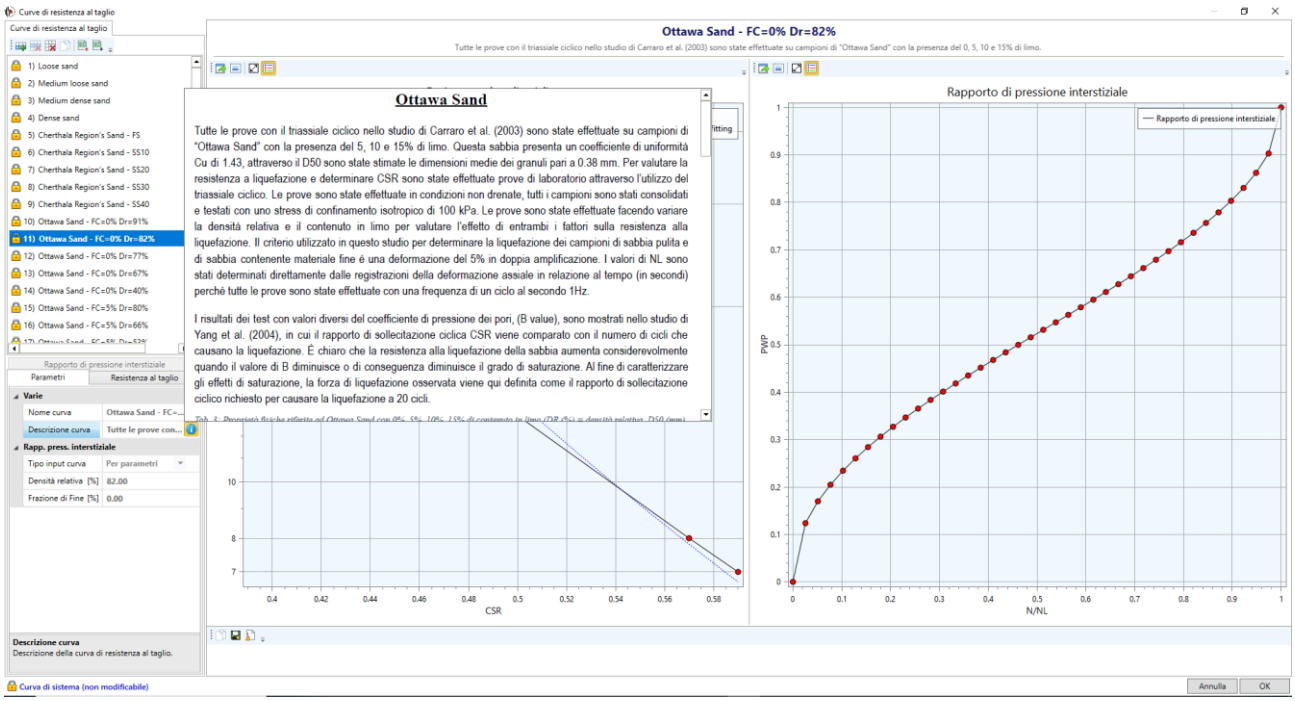


Figura 44. Informazioni relative alle curve di resistenza al taglio di sistema.

3.3.5 Editor delle analisi

Mediante il comando *"Analisi"* è possibile accedre all'ambiente rappresentato in Figura 45 che consente la definizione e la gestione delle analisi sismiche da effettuare sulla stratigrafia oggetto di studio per gli stati limite richiesti.

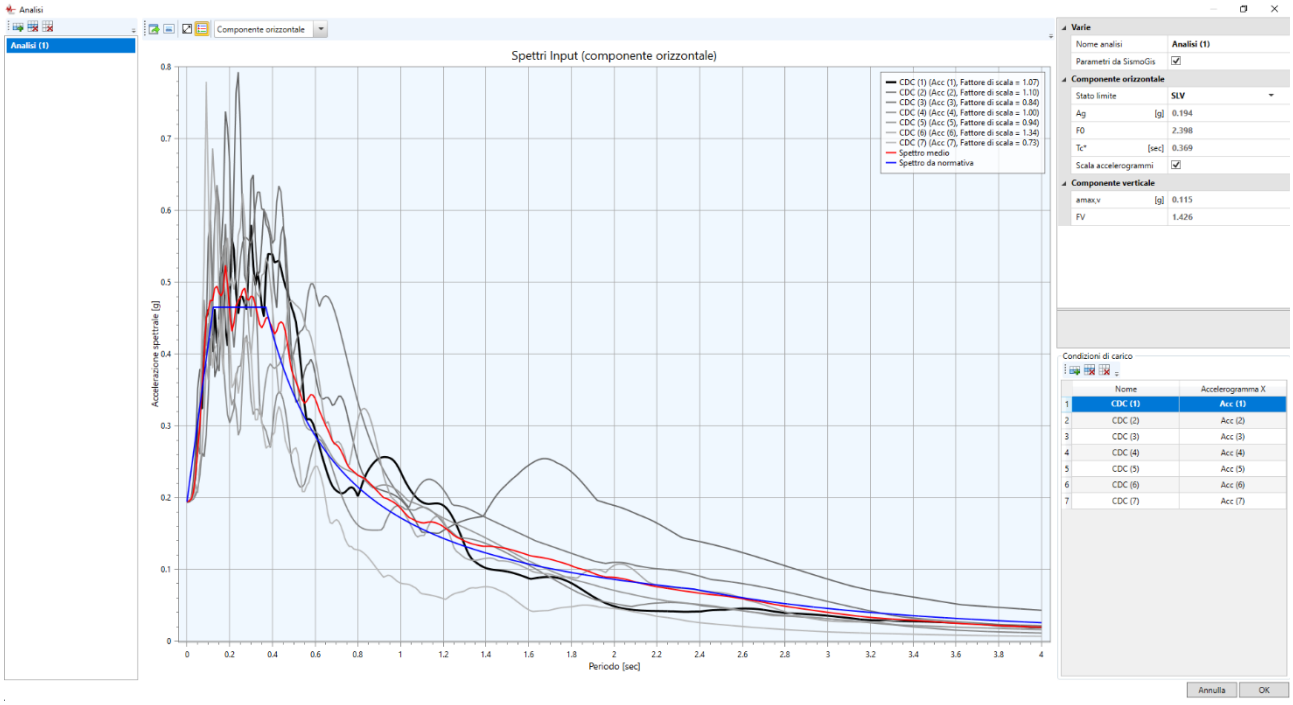


Figura 45. Editor delle analisi dirisposta sismica locale.

Inserimento di una nuova analisi

Mediante il comando *"Inserisci una nuova analisi"* è possibile aggiungere all'elenco rappresentato in Figura 46 una nuova analisi di risposta sismica locale relativa per esempio ad un particolare stato limite sismico secondo quanto previsto dalla normativa NTC18.

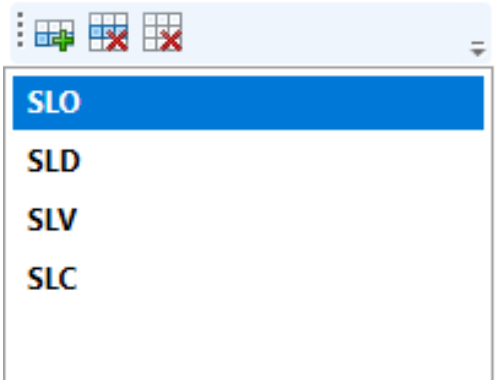


Figura 46. Elenco analisi di risposta sismica locale.

Per la singola analisi (vedi **Figura 44**) vengono richiesti i seguenti parametri:

- *Nome analisi*: viene assegnato un nome ed è buona norma che questo faccia riferimento allo stato limite sismico;
- *Parametri da SismoGis*: se attivo i parametri della pericolosità sismica di base vengono assegnati sulla base della posizione del sito, dalla classe d'uso e dalla vita nominale dell'opera specificati nei dati generali e dallo stato limite (richiesto come successivo parametro);
- a_g: se il flag "Parametri da SismoGis" è disattivato allora viene chiesto all'utente di specificare il valore della PGA della pericolosità sismica di base per l'analisi corrente;
- F_0: se il flag "Parametri da SismoGis" è disattivato allora viene chiesto all'utente di specificare tale valore per la pericolosità sismica di base per l'analisi corrente;
- T_c^*: se il flag "Parametri da SismoGis" è disattivato allora viene chiesto all'utente di specificare tale valore per la pericolosità sismica di base per l'analisi corrente;
- "Scala accelerogrammi": se attivo gli accelerogrammi associati a tale analisi vengono processati previa scalatura alla PGA specificata in precedenza, l'analisi viene condotta senza intervenire sugli accelerogrammi.

Varie		
Nome analisi		SLO
Parametri da SismoGis		☑
Componente orizzontale		
Stato limite		SLV
Ag	[g]	0.194
F0		2.398
Tc*	[sec]	0.369
Scala accelerogrammi		☐
Componente verticale		
amax,v	[g]	0.115
FV		1.426

Figura 47. Parametri richiesti per l'analisi corrente.

Osservazioni sulla scalatura degli accelerogrammi

La scelta da fare sul parametro *"Scala accelerogrammi"* deve essere compatibile con la settupla di accelerogrammi associati alla singola analisi in base a come questa è stata selezionata (normalmente viene utilizzato un applicativo esterno tipo REXEL o REXEL Lite). In particolare, se la selezione della settupla è stata fatta chiedendo all'applicativo esterno di non scalare alla PGA gli accelerogrammi allora non bisogna attivare la spunta *"Scala accelerogrammi",* viceversa se la settupla è stata ottenuta scalando gli accelerogrammi bisogna attivare la spunta. La differenza tra i due casi è rappresentata in Figura 48 in cui è possibile osservare che nel caso di accelerogrammi non scalati i fattori di scala sono tutti pari all'unità.

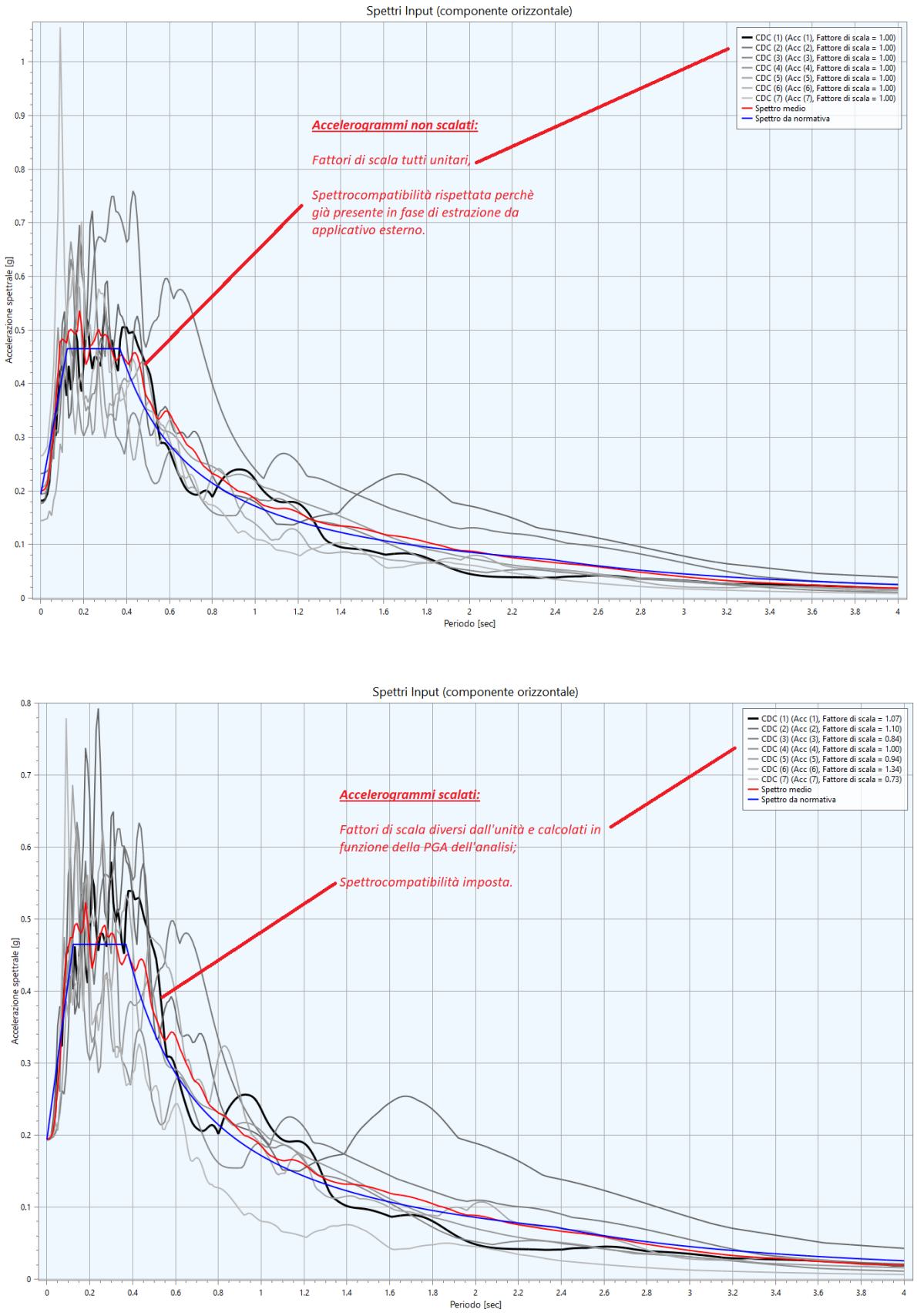


Figura 48. Differenza tra accelerogrammi scalati e non scalatati.

Associazione della settupla di accelerogrammi per la singola analisi

Per la singola analisi di risposta sismica locale viene chiesto di associare una serie di condizioni di carico (vedi **Figura 49**) e un accelerogramma per ognuna di esse.

Normalmente le condizioni di carico da aggiungere, mediante il comando *"Inserisci una nuova condizione di carico"* , sono 7 così come richiesto dalla normativa NTC18 (in modo da intepretare i risultati mediante valori medi); per ognuna di esse viene specificato un accelerogramma precedentemente caricato nell'apposito editor in base al nome dello stesso.

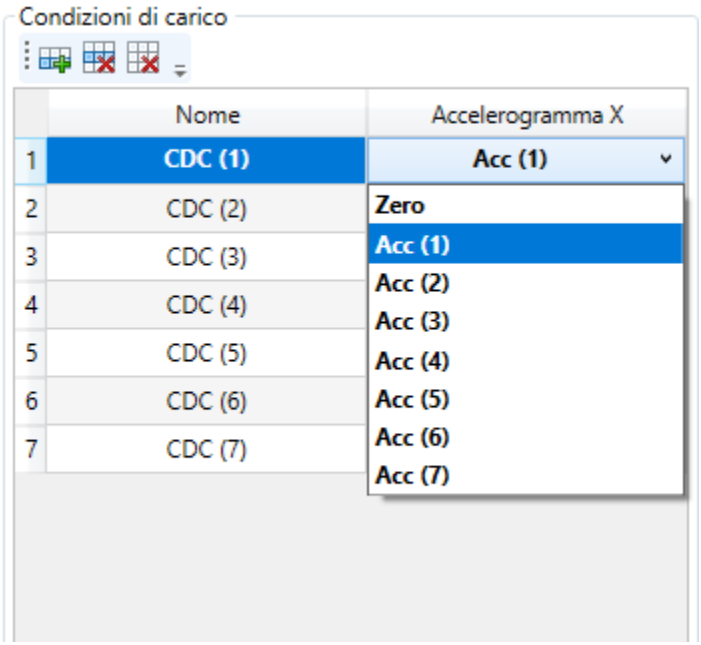


Figura 49. Associazione delle condizioni di carico per la singola analisi.

3.4 Generazione guidata di un modello 1D di risposta sismica locale

Per condurre un'analisi di risposta sismica locale monodimensionale l'applicativo LSR2D fornisce un veloce strumento per la generazione automatica di una colonna di terreno stratificata. Il modello analitico adottato presenta delle caratteristiche del tutto analoghe a quello utilizzato per il caso bidimensionale ad eccezione di determinate restrizioni cinematiche che impongono uno stato deformativo compatibile con il modello monodimensionale scelto (1D orizzontale oppure 1D verticale). In particolare, possono verificarsi le seguenti condizioni sulla base della scelta fatta sul campo *"Tipo di modello"* presente nella tabella delle proprietà generali del modello (vedi **Figura 50**).

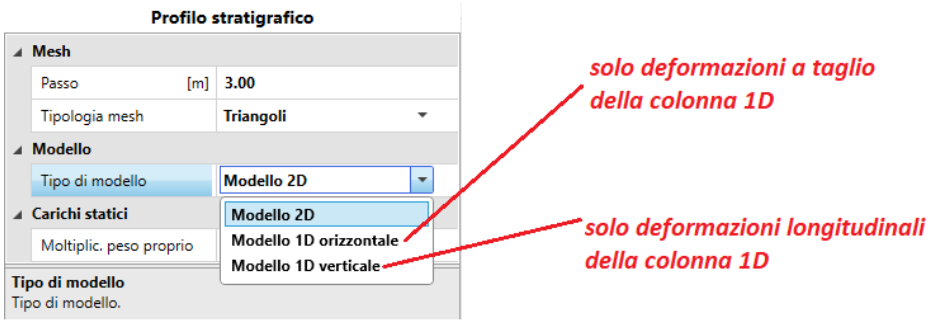


Figura 50. Scelta del tipo di modello di analisi.

- *"Modello 2D"*: modello per analisi bidimensionali della risposta sismica locale;
- *"Modello 1D orizzontale"*: modello FEM con spostamento verticale di tutti i nodi del modello impedito; così facendo l'unico stato deformativo compatibile con il sistema di vincoli adottato è quello che presenta solo deformazioni da taglio γ;
- *"Modello 1D verticale"*: modello FEM con spostamento orizzontale di tutti i nodi del modello impedito; così facendo l'unico stato deformativo compatibile con il sistema di vincoli adottato è quello che presenta solo deformazioni longitudinali ε.

La generazione della colonna 1D può avvenire attraverso il comando *"Modello 1D"* presente nella scheda *Home*, mediante il quale è possibile accedere all'ambiente rappresentato in **Figura 51.** Il modello monodimensionale di analisi RSL richiede la definizione di una sequenza stratigrafica dalla superficie verso la roccia madre, per ognuno di essi viene richiesto (vedi **Figura 51**):

- *Nome*: è buona norma identificare il sismostrato mediante un nome univoco;
- $Spessore$: spessore espresso in metri;
- ρ: densità di massa espressa in Kg/m^3;
- V_S: velocità delle onde S espressa in m/s;
- *Modello geotecnico*: curve di decadimento del materiale costituente il sismostrato;
- *Modello resistenza al taglio*: curve di resistenza al taglio del materiale costituente il sismostrato.

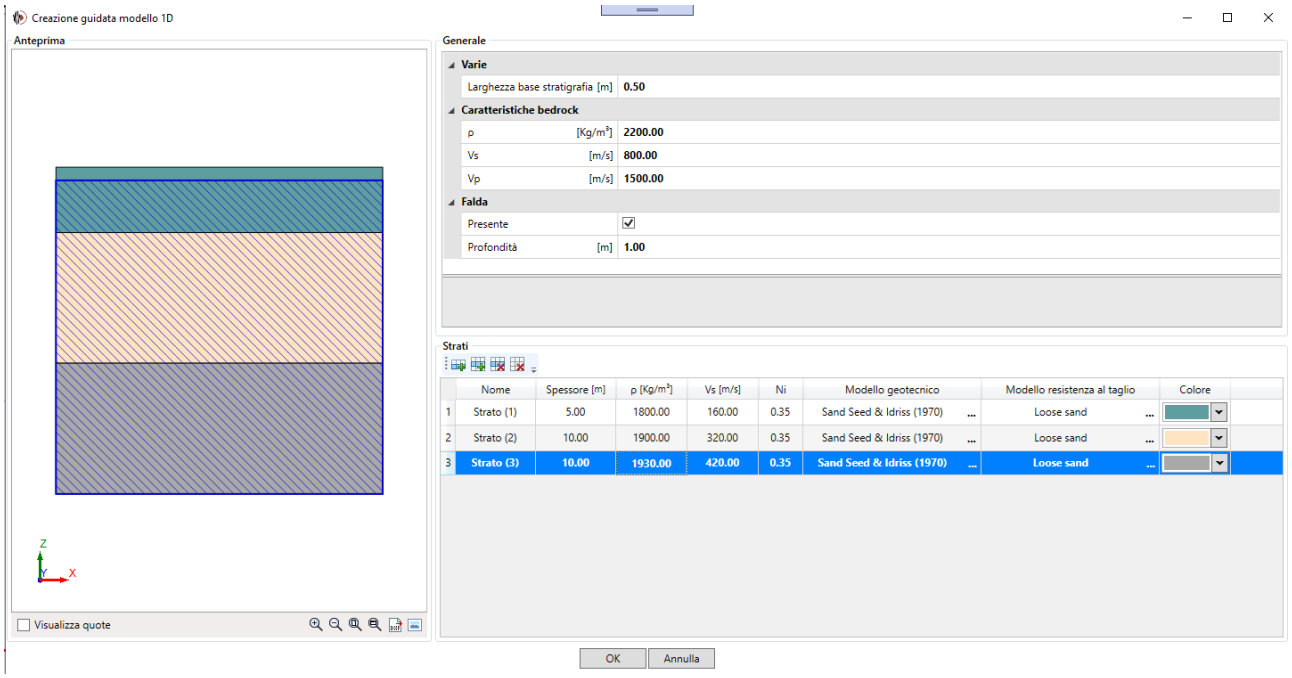


Figura 51. Wizard di inserimento modello 1D.

Vengono inoltre richiesti (vedi **Figura 52**):

- Densità di massa del bedrock espressa in Kg/m^3;
- Velocità delle onde di taglio del bedrock espressa in m/s (se si tratta di modello 1D orizzontale);
- Velocità delle onde P del bedrock espressa in m/s (se si tratta di modello 1D verticale);
- *"Falda presente"*: specifica se è presente la falda (da utilizzare per l'esportazione verso l'applicativo *LIQUEFAZIONE*);
- Profondità dellla falda rispetto alla superficie (da utilizzare per l'esportazione verso l'applicativo *LIQUEFAZIONE*).

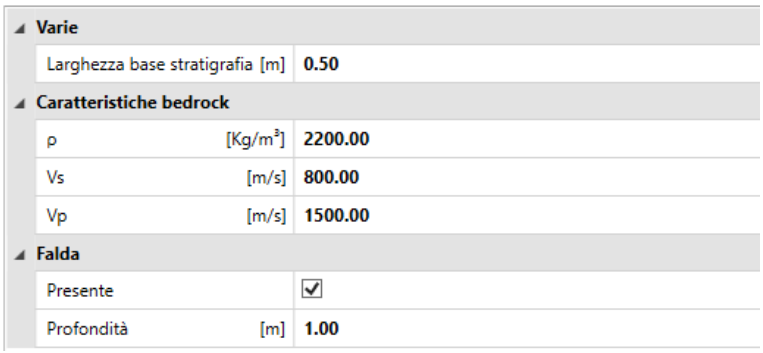


Figura 52. Parametri relativi al bedrock ed alla falda.

Dal punto di vista grafico nello stesso ambiente è presente un pannello dedicato alla rappresentazione della stratigrafia in cui è possibile visualizzare gli spessori dei singoli strati (distinti da un colore differente), la posizione della falda (rappresentata mediante un retino di colore azzurro) e la posizione del punto di controllo in superficie a cui fanno riferimento i risultati in termini di accelerogrammi e spettri di risposta.

3.5 Modellazione di una sezione 2D di risposta sismica locale

Nei prossimi paragrafi vengono riportati i passi che l'utente deve seguire ai fini della modellazione di una sezione 2D per le analisi di risposta sismica locale.

3.5.1 Caratteristiche topologiche dei sismostrati che costituiscono la sezione 2D

La fase di modellazione della sezione stratigrafica rappresenta un punto cruciale per il buon esito dell'analisi di risposta sismica locale in quanto possibili errori di carattere topologico, nella definizione dei sismostrati possono compromettere la generazione della mesh di elementi finiti e di conseguenza il risultato finale. Il modello della sezione stratigrafica è costituito da una struttura dati fatta da tre oggetti grafici principali: punti, lati e regioni (sismostrati). La singola regione, avente proprietà sismiche omogenee, si trova all'interno di una poligonale chiusa che a sua volta risulta costituita da una serie di segmenti, il singolo segmento connette due punti nel piano.

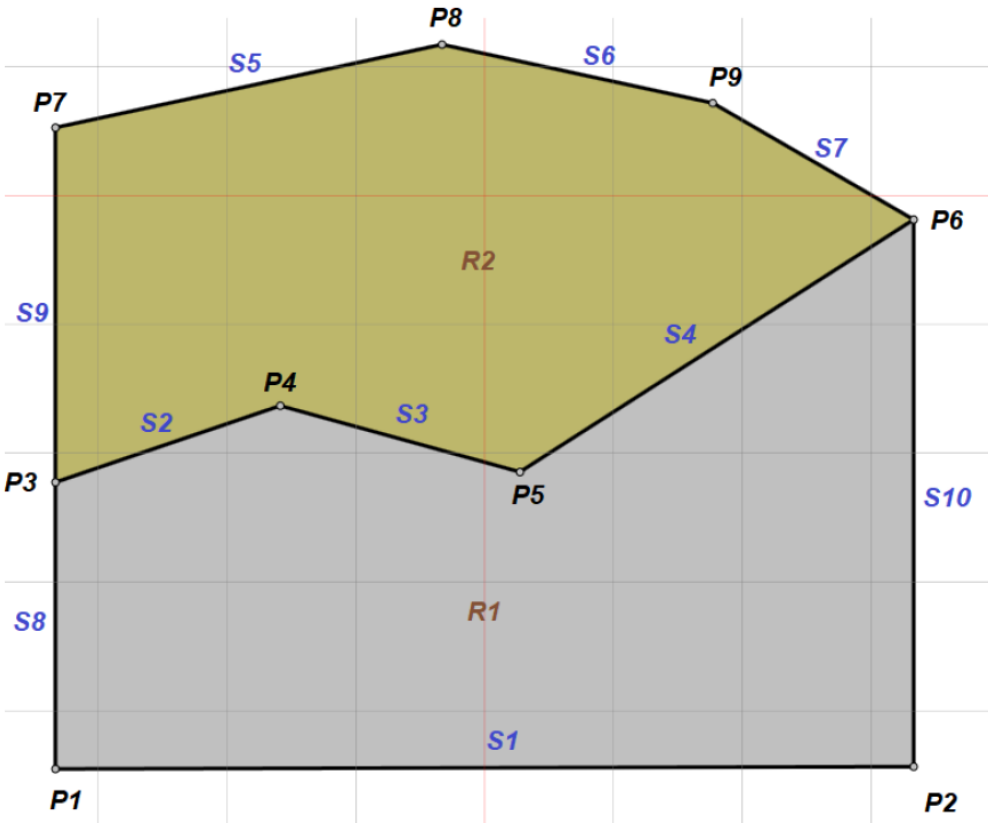


Figura 53. Struttura topologica della sezione stratigrafica.

Osservando la **Figura 53** è possibile notare come le due regioni adiacenti R1 e R2 hanno in comune i lati S2, S3 e S4. I Lati S8, S9 e S2 invece hanno in comune il punto 3; è necessario evitare situazioni con elementi ripetuti e/o sovrapposti.

3.5.2 Inserimento poligonale

Normalmente l'input dei sismostrati viene condotto mediante il comando *"Inserimento poligonale"* (descritto nei precedenti paragrafi) disegnando nell'ambiente grafico direttamente le regioni che costituiscono i sismostrati. Si osservi che nelle fasi di disegno è necessario rispettare le condizioni topologiche

richieste al paragrafo precedente. Il disegno di tali oggetti viene supportato da uno sfondo di base che può essere rappresentato da una griglia la cui geometria delle maglie viene impostata dall'utente o da uno sfondo di base ottenuto mediante importazione da file CAD (entrambi i comandi di supporto sono stati descritti nei paragrafi precedenti).

Esempio di inserimento

Si vuole modellare il rilevato rappresentato in **Figura 54** avente due sismostrati.

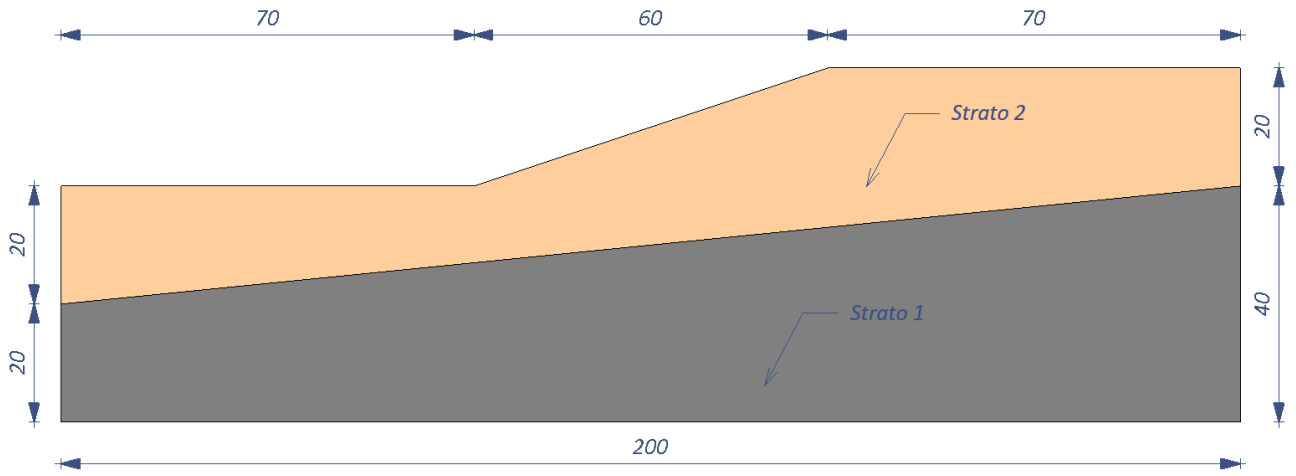


Figura 54. Sezione di un rilevato avente due sismostrati.

Si procede impostando una griglia di sfondo, mediante il comando *"Griglia"* presente nella scheda *"Modellazione"*, avente una dimensione totale di 200 metri in lunghezza e 60 metri in altezza ed un passo in orizzontale e verticale di 10 metri (vedi i parametri in **Figura 55**).

Sfondo base input		
Attiva griglia		☑
Passo X	[m]	10.00
Passo Z	[m]	10.00
Nx		21
Nz		7
Origine		
X	[m]	0.00
Z	[m]	0.00

Figura 55. Parametri della griglia utilizzata per l'inserimento poligonale del rilevato.

Si procede con l'inserimento del primo strato del rilevato mediante il comando *"Inserimento poligonale"* con la sequenza di clicks indicata in **Figura 56**; Si osservi che al fine di generare direttamente lo strato, quindi l'oggetto geometrico regione, è necessario che il *click 5* coincida con lo stesso punto del *click 1.* Completata la sequenza il comando, e quindi l'inserimento del primo strato, termina cliccando sul tasto destro del mouse. Successivamente è necessario specificare le caratteristiche fisiche e meccaniche dello strato appena inserito; pertanto si attiva il comando *"Seleziona"* e cliccando con il tasto sinistro in un punto interno allo strato

appena inserito (vedi **Figura 57**) si seleziona lo strato; successivamente vengono specificate tutte le proprietà relative allo stesso e riportate nella tabella dedicata.

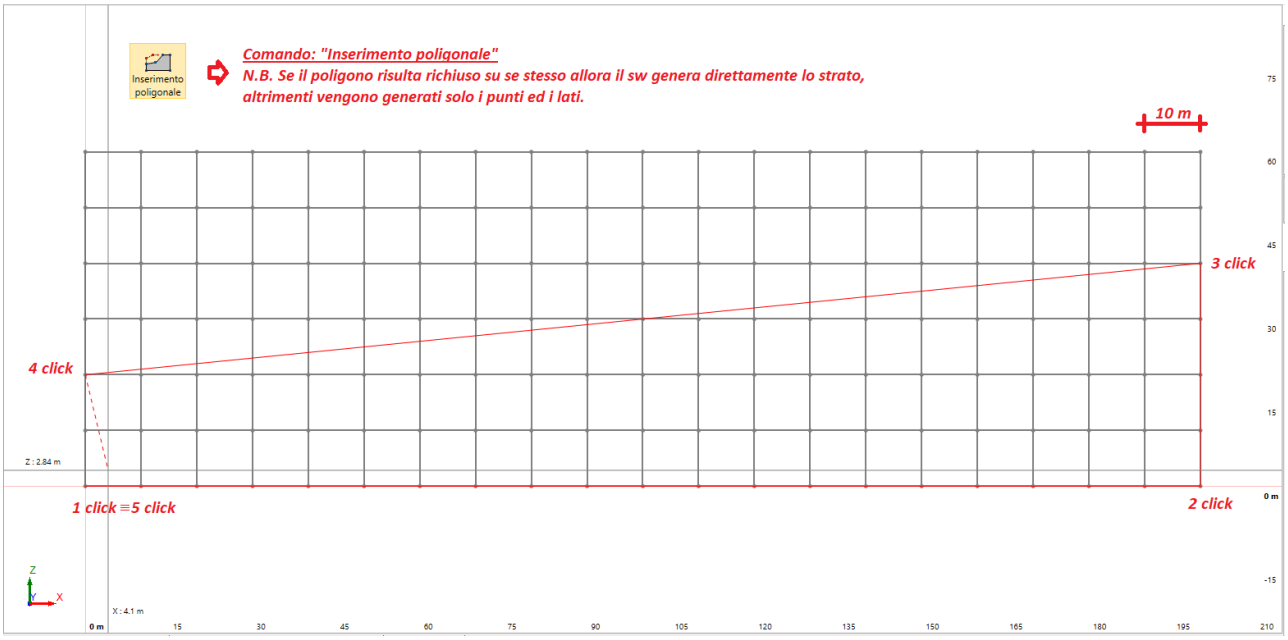


Figura 56. Generazione del primo strato del rilevato mediante il comando "Inserimento poligonale" sfruttando i punti della griglia di lavoro.

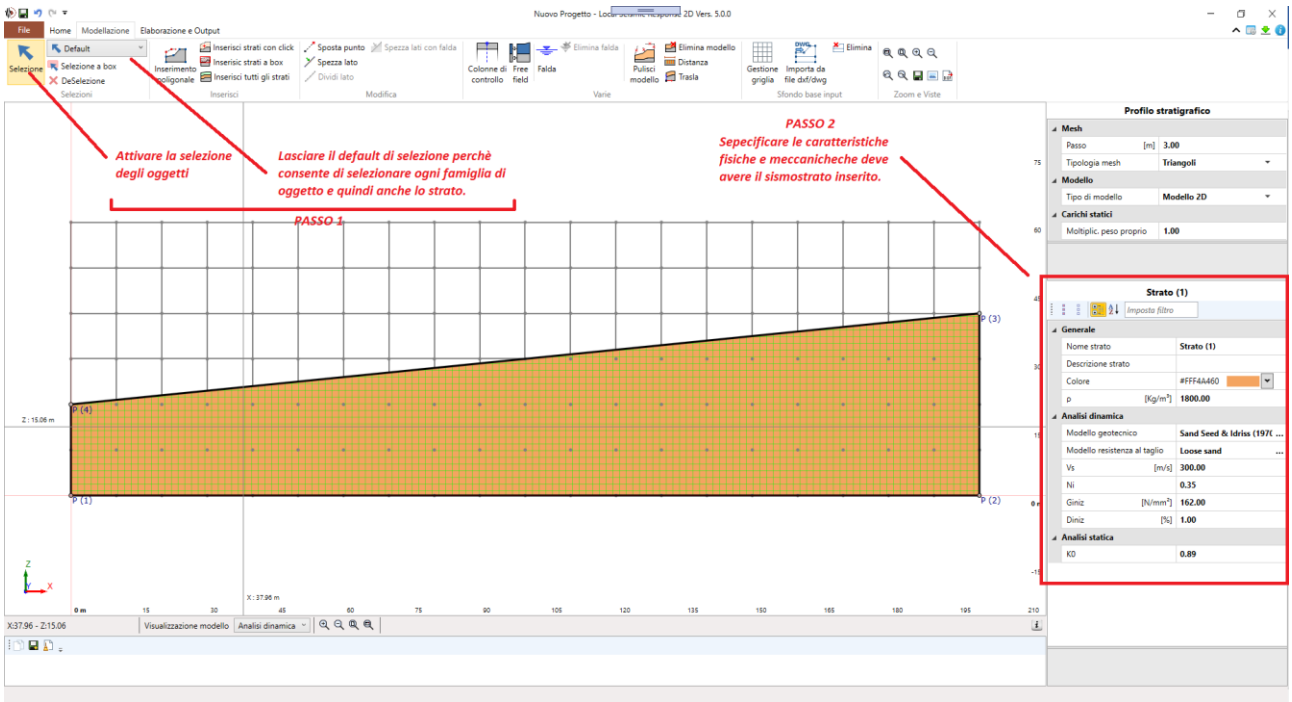


Figura 57. Selezione del sismostrato e definizione delle caratteristiche fisico meccaniche.

Di seguito vengono descritti i parametri richiesti per lo strato che si distinguono in

- **Generale:**
  - *"Nome strato"*: stringa di testo univoca che possa identificare l'elemento;
  - *"Descrizione strato"*: breve stringa di testo che descrive l'oggetto;
  - *"Colore"*: consente di definire un colore per il poligono che definisce la geometria dello strato;
  - *"ρ"*: densità di massa dello strato espressa in [Kg/m^3].
- **Analisi dinamica**:
  - *"Modello geotecnico"*: specifica le curve di decadimento dell modulo di taglio e del rapporto di smorzamento viscoso da utilizzare per questo materiale;
  - *"Modello resistenza al taglio"*: specifica le curve di resistenza al taglio da utilizzare per questo materiale nel caso di verifiche alla liquefazione da effettuare con modulo aggiuntivo;
  - "V_s": velocità delle onde di taglio espressa in [m/s];
  - "Poisson": coefficiente di Poisson del materiale;
  - "G_{iniz}": valore del modulo di taglio espresso in [N/mm^2] di primo tentativo nell'algoritmo lineare equivalente (viene calcolato automanticamente e non è necessario che venga specificato dall'utente);
  - "D_{iniz}": valore del rapporto di smorzamento di primo tentativo nell'algoritmo lineare equivalente equivalente (viene calcolato automanticamente e non è necessario che venga specificato dall'utente);
- **Analisi statica**:
  - **"*K0*":** coefficiente di spinta a riposo utilizzato per le analisi statiche.

Nel caso specifico dello strato 1 del rilevato che si sta modellando vengono dati i parametri riportati in **Figura 58**.

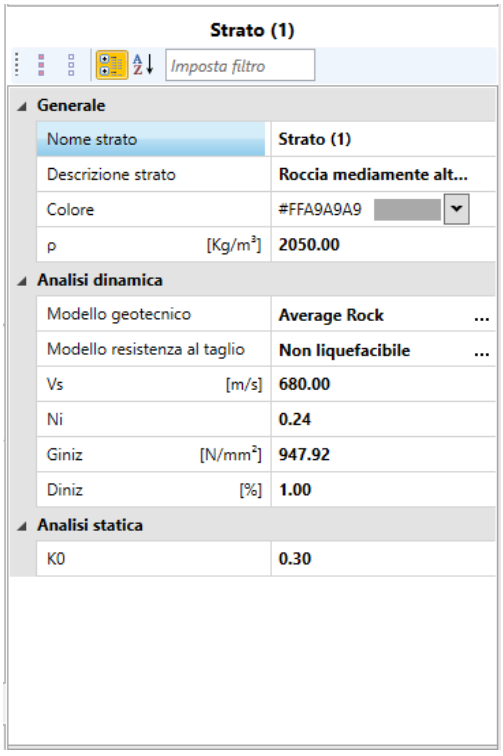


Figura 58. Parametri strato 1 del rilevato di esempio.

Il passo successivo riguarda l'inserimento dello strato 2; si procede con l'inserimento poligonale sfruttando i punti già inseriti sullo strato precedente e la griglia dell'ambiente di lavoro (vedi **Figura 59**). Si osservi che l'inserimento poligonale della sequenza aperta indicata nella figura seguente non genera la regione ma solo il contorno fatto da punti e nodi, pertanto l'utente dovrà generare la regione mediante il comando *"Inserisci strati a box"* racchiudendo tutti i punti del nuovo strato all'interno di un rettangolo (vedi **Figura 60**).

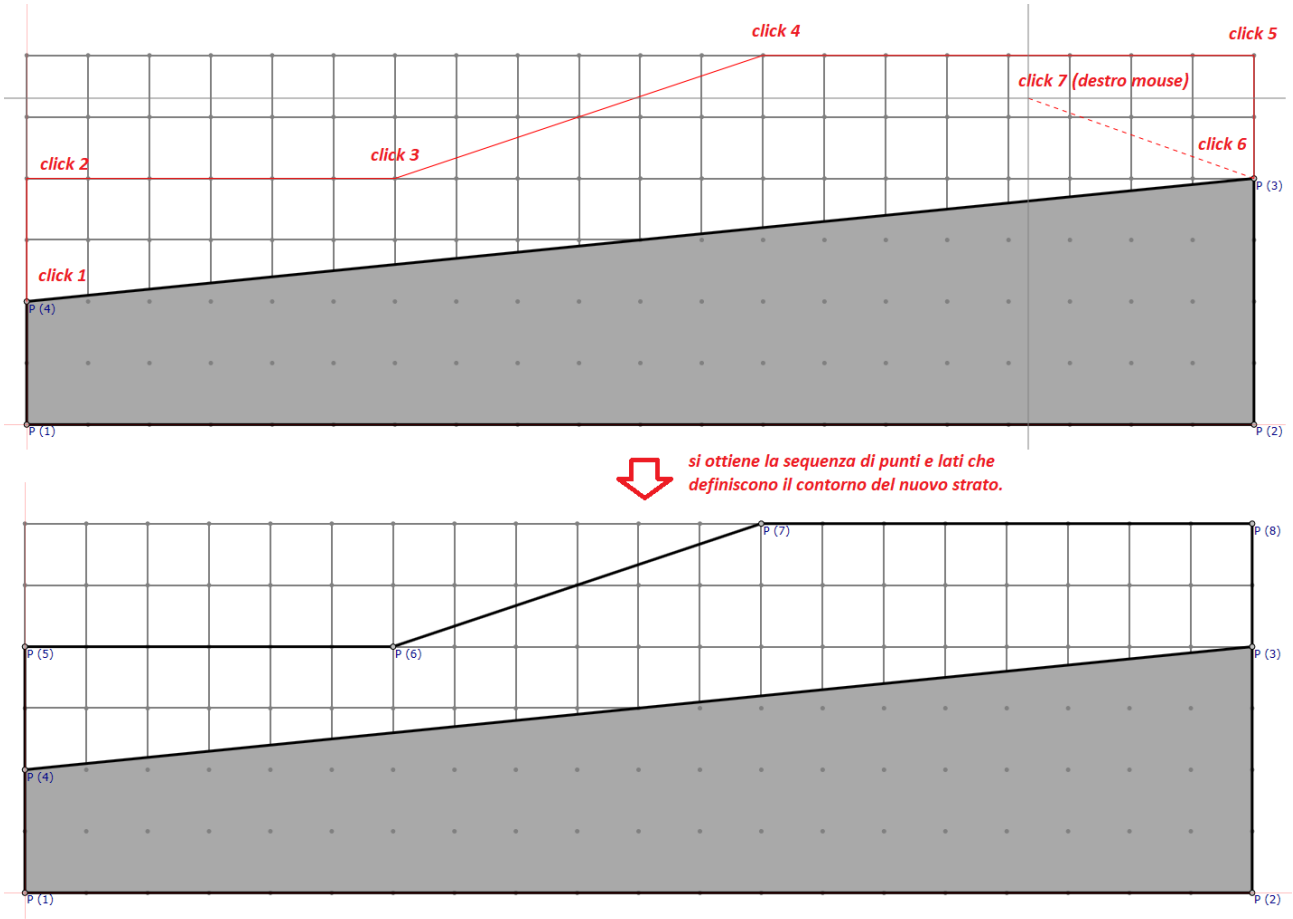


Figura 59. Definizione contorno dello sttrato 2.

Generato lo strato si procede specificando i parametri fisici e meccanici dello stesso mediante selezione e modifica sulla tabella dedicata per come visto per lo strato precedente; i valori assegnati sono riportati in **Figura 61**.

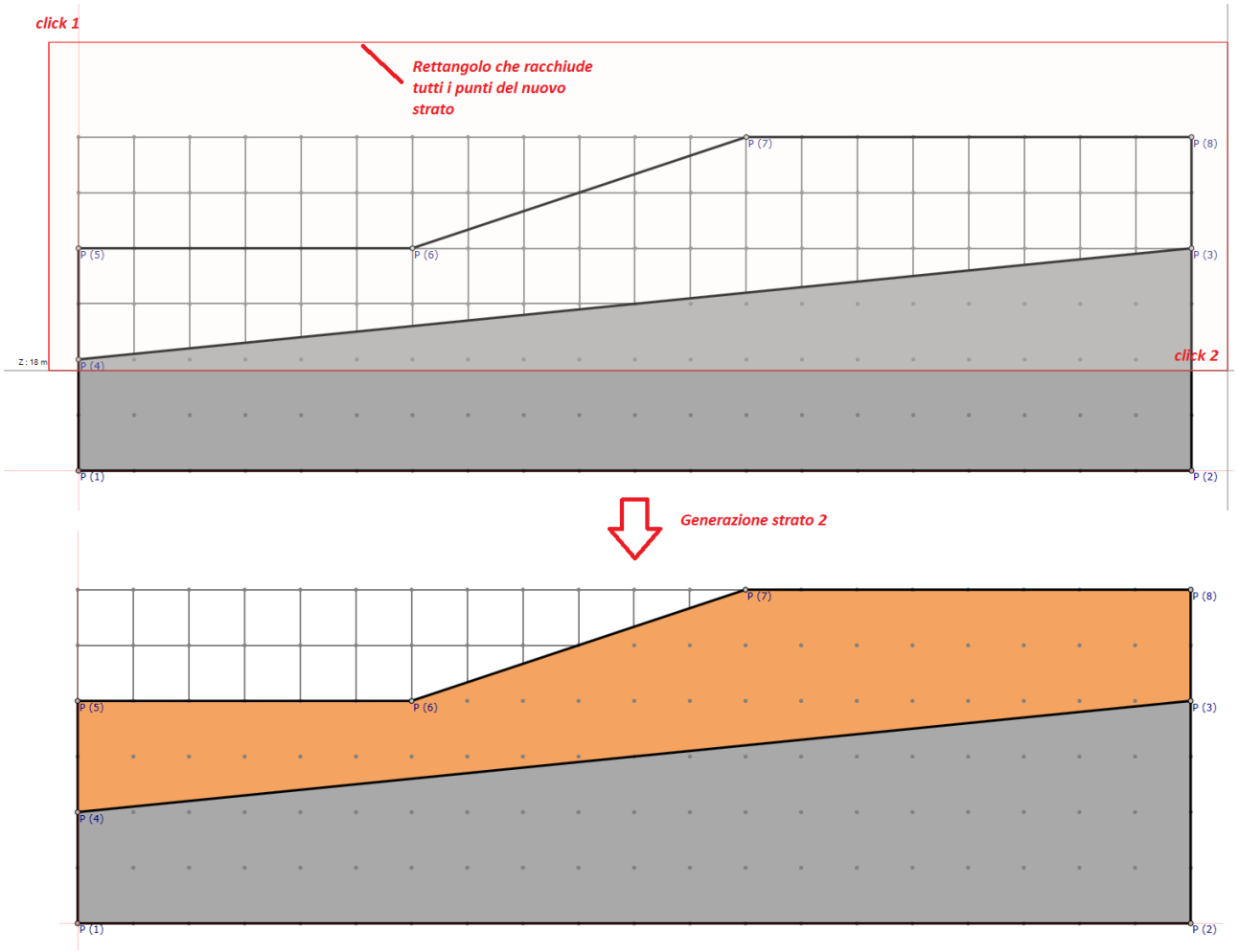


Figura 60. Generazione regione strato 2.

Generale		
Nome strato		**Strato (2)**
Descrizione strato		**Sabbia**
Colore		#FFFFEBCD
ρ	[Kg/m³]	**1900.00**
Analisi dinamica		
Modello geotecnico		**Sand Seed & Idriss (197(...**
Modello resistenza al taglio		**Loose sand ...**
Vs	[m/s]	**380.00**
Ni		**0.28**
Giniz	[N/mm²]	**274.36**
Diniz	[%]	**1.00**
Analisi statica		
K0		**0.89**

Figura 61. Parametri strato 2.

3.5.3 Inserimento punti di controllo

Tra gli obiettivi dell'analisi di risposta sismica locale bidimensionale vi è l'ottenimento degli spettri di risposta in superficie lungo vari punti del profilo orografico dai quali è poi possibile valutare i fattori di amplificazione richiesti negli studi di microzonazione sismica. Si procede pertanto alla definizione di diversi punti lungo il profilo orografico i quali hanno la particolare caratteristica di archiviare i risultati dell'analisi in modo da

consentire in una fase successiva all'analisi FEM i suddetti fattori di amplificazione. Di seuito verrà illustrata la procedura di inserimento dei punti di controllo con riferimento all'esempio del rilevato dei precedenti paragrafi.

Esempio di inserimento

In **Figura 62** vengono riepilogati i passi principali per l'inserimento dei punti di controllo.

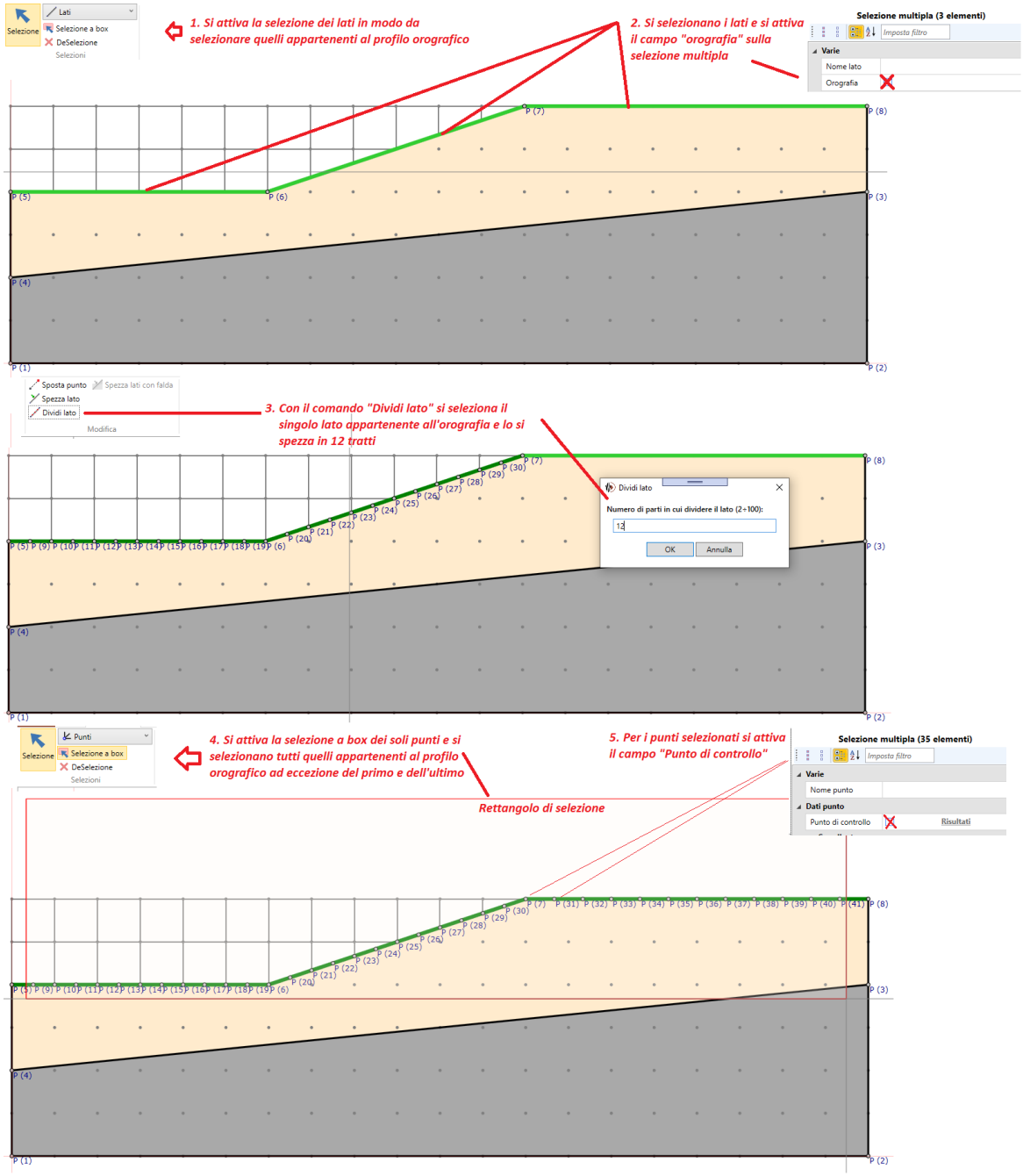


Figura 62. Passi per l'inserimento dei punti di controllo.

1. Si procede con la selezione dei 3 lati facenti parte del profilo orografico mediante l'attivazione del comando *"Seleziona"* con filtro *"Lati"* Lati;
2. si attiva il campo *"Orografia"* per la selezione multipla nella tabella delle proprietà Orografia;
3. mediante il comando *"Dividi lato"* si selezionano uno per solva i singoli lati e si spezza in 12 tratti in maniera da creare dei punti intermedi;
4. si attiva la selezione a box con filtro *"punti"* e si selezionano tutti i punti del profilo orografico tranne il primo e l'ultimo;
5. si attiva il campo *"Punto di controllo"* per la selezione multipla nella tabella delle proprietà per ottenere quanto riportato in **Figura 63**.

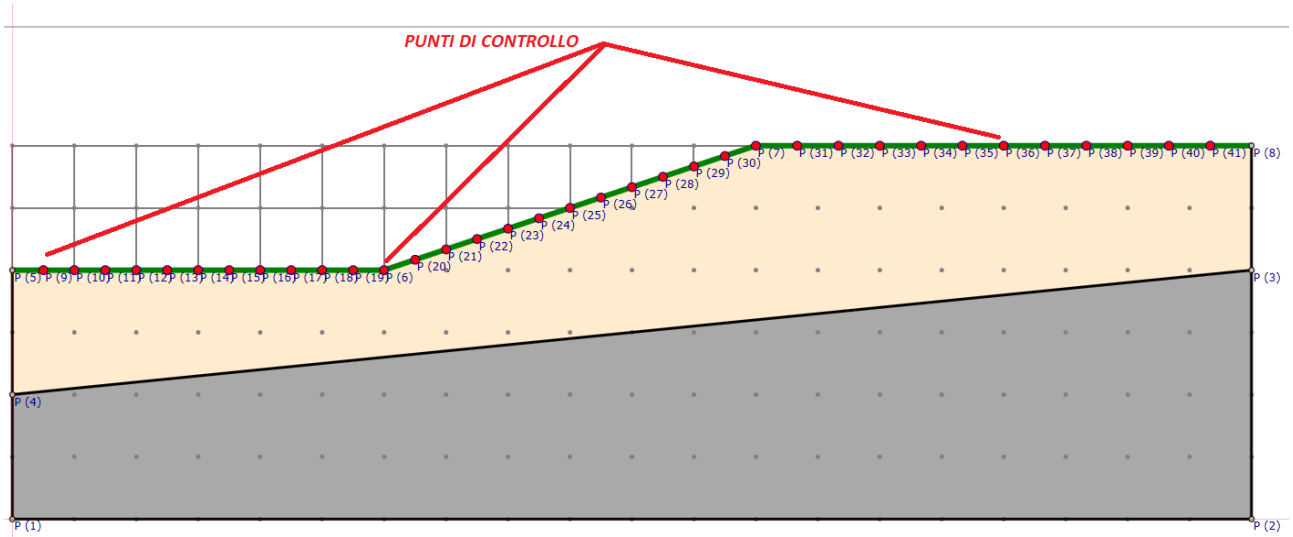


Figura 63. Sezione rilevato con punti di controllo.

3.5.4 Inserimento colonne di controllo

Per ottenere i risultati delle analisi RSL lungo determinate verticali di interesse, così da poter plottare i valori massimi di tutte le grandezze calcolate (spostamenti, velocità, accelerazioni, deformazioni, tensioni ecc) è utile definire degli oggetti dedicati mediante il comando *"Colonne di controllo"* .

Esempio di inserimento

Si procede cliccando con il tasto sinistro del mouse in corrispondenza di un lato appartenente all'orografia o di un punto così da ottenere quanto riportato in **Figura 64**.

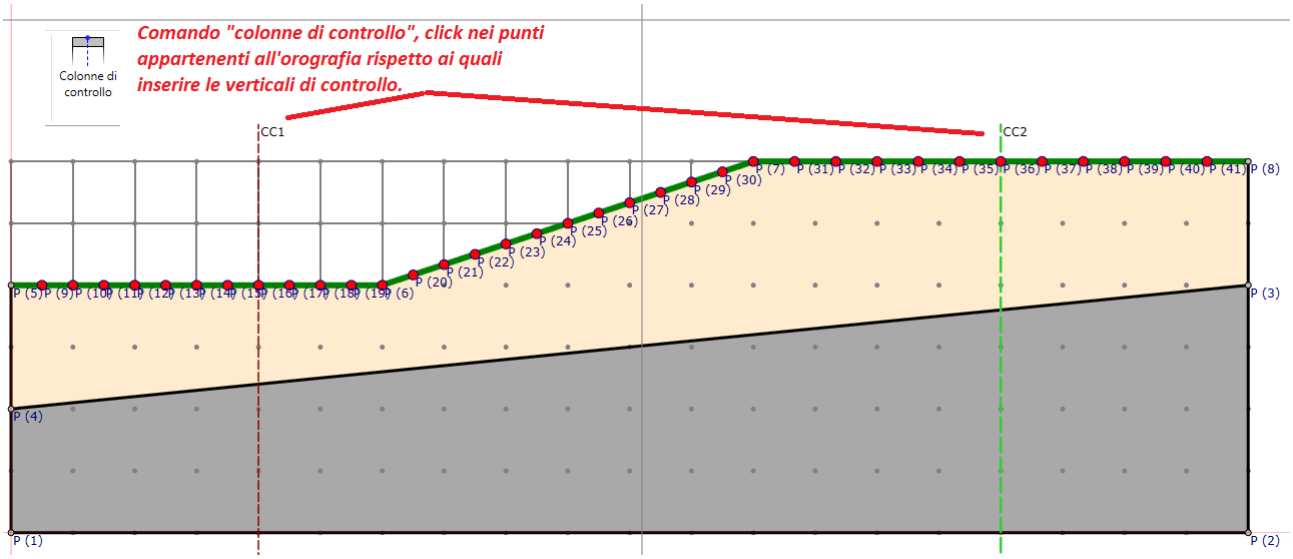
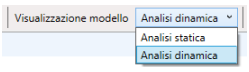


Figura 64. Inserimento colonne di controllo.

3.5.5 Definizione condizioni al contorno

Le condizioni al contorno del modello 2D della sezione stratigrafica vengono assegnate sugli oggetti "Lato" e possono essere di vario tipo inoltre queste sono diverse per le analisi dinamiche (analisi di risposta sismoca locale) e per le analisi statiche utilizzate per esempio per valutare lo stato tensionale litostatico al fine di effettuare le verifiche di liquefazione. Per variare la visualizzazione tra i due modelli (statico e dinamico) è possibile cambiare il campo *"Visualizzazione modello"* 

presente in basso a sinistra nella finestra principale dell'applicativo

3.5.5.1 Restrizioni cinematiche

Si tratta di vincoli fissi in grado di impedire le componenti del moto (spostamenti, velocità ed accelerazioni) in direzione orizzontale e/o verticale di tutti i nodi appartenenti al lato sul quale questi sono stati assegnati. L'assegnazione viene fatta una volta eseguita la selezione di uno o più lati mediante gli strumenti di selezione già visti specificando per il campo *"Vincoli"* (vedi **Figura 65**) un valore tra:

- *"Libero"*: non viene applicata alcuna restrizione;
- *"Vincolato X"*: si impediscono gli spostamenti orizzontali di tutti i nodi generati dal mesher ed appartenenti al lato;

- *"Vincolato Z"*: si impediscono gli spostamenti verticali di tutti i nodi generati dal mesher ed appartenenti al lato;
- *"Rigido"*: si impediscono gli spostamenti orizzontali e verticali di tutti i nodi generati dal mesher ed appartenenti al lato.

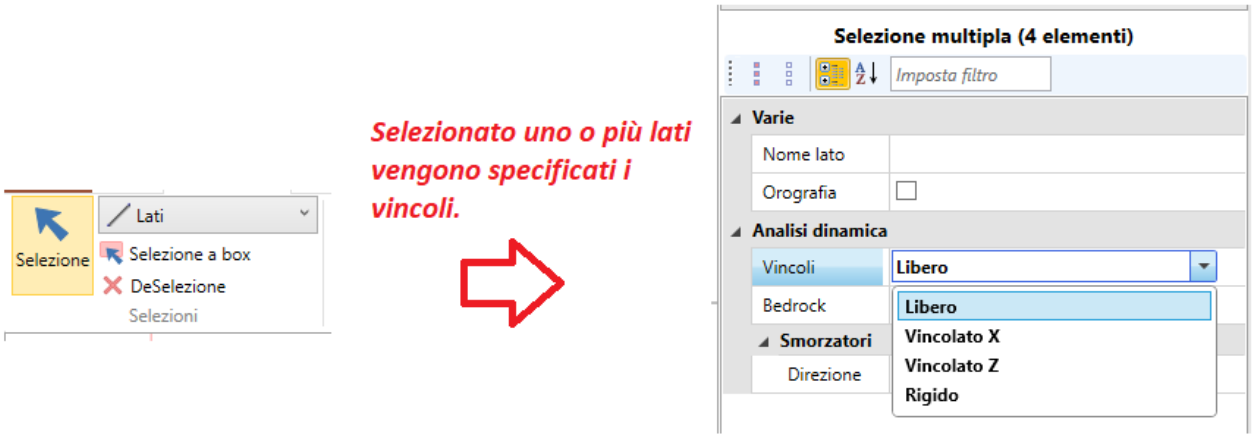


Figura 65. Assegnazione restrizioni cinematiche sul lato.

Esempio di inserimento

Si vogliono applicare al rilevato visto nei precedenti paragrafi delle restrizioni cinematiche valide per le sole analisi statiche sui lati esterni e sul lato di base. Scelto il campo *"Analisi statica"* in *"Visualizza modello"* si selezionano i lati di estremità e si scelga per il campo *"Vincoli"* il valore *"Vincolato X"*, successivamente, annullata la selezione dei lati di estremità con il comando *"DeSelezione"* ✕, si selezioni il lato di base e si scelga per il campo *"Vincoli"* il valore *"Vincolato Z"*, si dovrebbe ottenere quanto indicato in

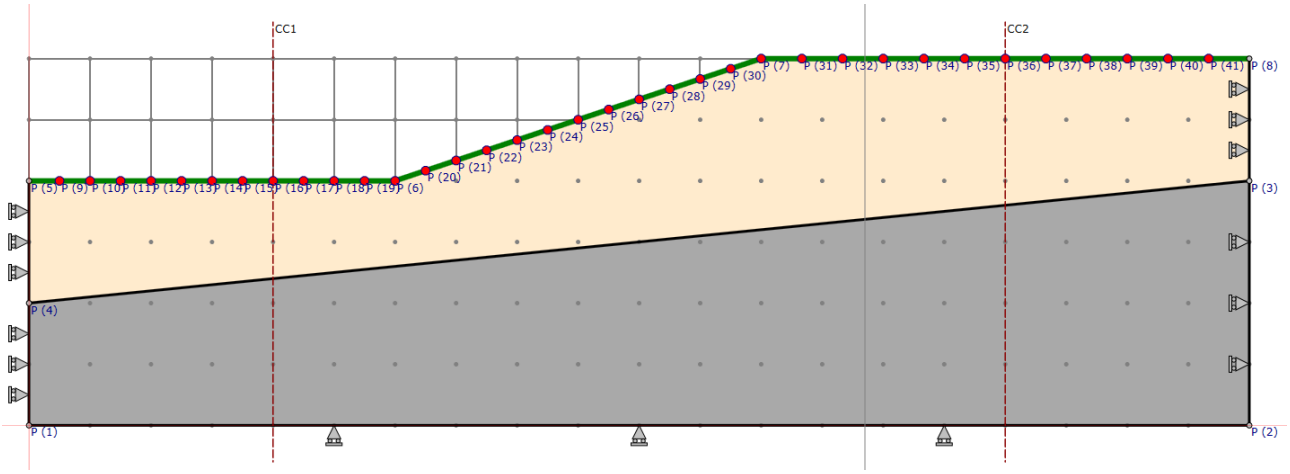


Figura 66. Assegnazioni vincoli per il modello di analisi statica.

Si osservi che, nell'esempio che si sta seguendo, le restrizioni cinematiche vengono applicate al solo modello di analisi statica e pertanto non vi è alcuna restrizione sul modello di analisi dinamica; per quel che riguarda le analisi dinamiche, spesso vengono applicate delle restrizioni cinematiche in direzione verticale per i lati di estremità al fine di simulare le condizioni di campo libero (free-field) sulle frontiere laterali di sezioni

stratigrafiche 2D, tuttavia esiste un'opzione migliore per simulare tale condizione e viene descritta nei paragrafi successivi.

3.5.5.2 Smorzatori viscosi

Una volta selezionatol'oggetto lato è possibile definire la presenza di smorzatori viscosi lineari in direzione orizzontale e/o verticale scegliendo tra le seguenti opzioni il campo *"Direzione"* alla voce *"Smorzatori"*:

- *"Nessuno"* (nessun elemento definito);
- *"Lungo X"* (direzione orizzontale);
- *"Lungo Z"* (direzione verticale);
- *"Lungo XZ" (entrambe le direzioni).*

Scelta la direzione è necessario specificare il valore della costante di smorzamento che viene espressa in *[m/s/m]* o in alternativa farla calcolare al software, sulla base delle caratteristiche fisiche dello strato adiacente al lato selezionato, mediante il comando "Calcola". In questo caso la costante di smorzamento viene calcolata come $C_x = \rho\, V_p$ per la direzione perpendicolare al lato e $C_z = \rho\, V_s$ per la direzione tangenziale al lato, dove ρ, V_s e $V_p$rappresentano rispettivamente la densità di massa, la velocità delle onde S e la velocità delle onde P dello strato adiacente al lato selezionato.

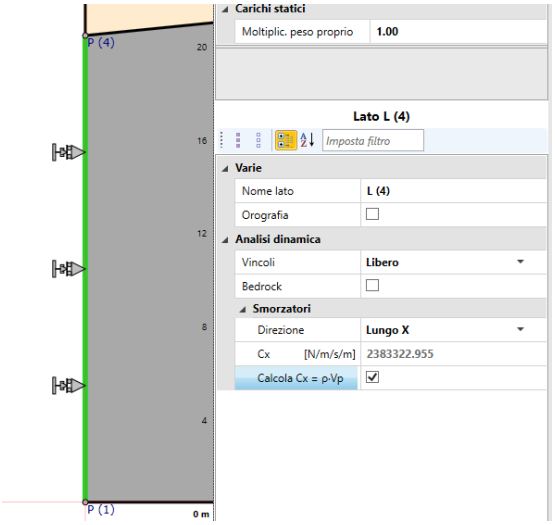


Figura 67. applicazione di smorzatori viscosi su un lato del modello e taratura della costante di smorzamanto sulla base delle proprietà fisiche dello strato adiacente.

3.5.5.3 Substrato

Questa tipologia di condizione al contorno è utilizzata per simulare l'assorbimento di energia per radiazione nel semispazio deformabile; questo avviene mediante l'applicazione di una serie di smorzatori in direzione orizzontale e verticale le cui costanti di smorzamento vengono assunte pari all'impedenza del bedrock. Anche in questo caso l'assegnazione viene fatta sui lati selezionati per poi attivare l'opzione *"Bedrock"* dalla tabella delle proprietà del lato. Inoltre, vengono richieste le caratteristiche elastiche del substrato in termini di:

- Densità di massa (ρ) espressa in Kg/m^3;
- Velocità delle onde S (V_s) espressa in m/s;
- Velocità delle onde P (V_P) espressa in m/s.

Esempio di inserimento

Si vuole applicare la condizione di substrato al lato di base del rilevato modellato nei paragrafi predenti. si procede selezionando il lato suddetto ed assegnando le caratteristiche indicate in

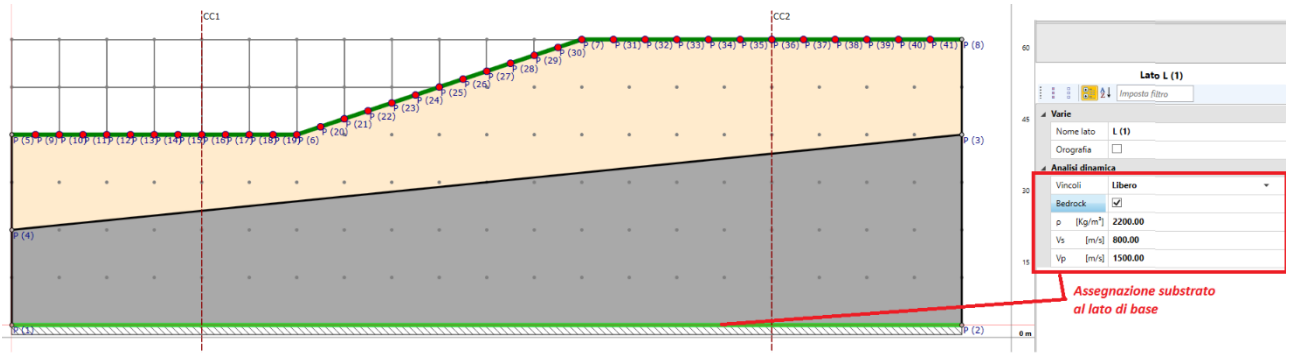


Figura 68. Assegnazione substrato al lato di base.

3.5.5.4 Colonne "Free-field"

Le condizioni al contorno illustrate nel §2.4 possono essere assegnate alle frontiere laterali del modello mediante il comando **Free-Field** selezionando in box i segmenti sui quali si vuole imporre tale condizione. È necessario, affinchè l'assegnazione vada a buon fine, che i segmenti in oggetto siano disposti in direzione verticale.

Esempio di inserimento

Si osservi la **Figura 69** in cui mediante selezione a box dei nodi appartenenti alle frontiere laterali sono state assegnate le condizioni di campo libero.

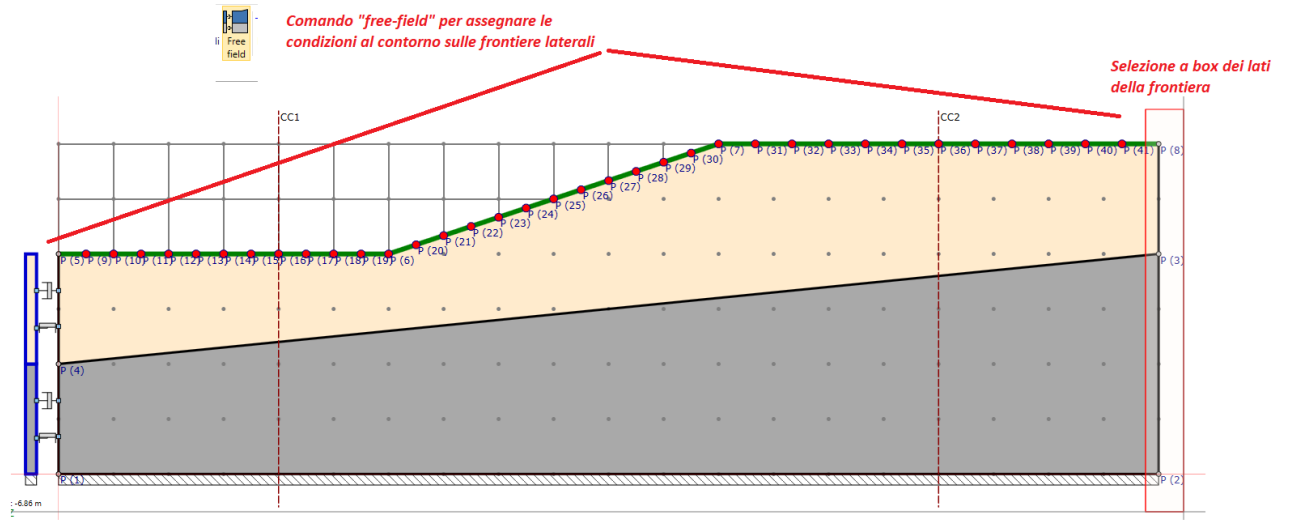


Figura 69. Assegnazione condizioni "free-field" sulle frontieri laterali del rilevato di esempio.

Vengono richieste per ogni colonna, oltre alla direzione degli smorzatori di collegamento tra il modello monodimensionale (colonna) ed il modello principale (main model), le caratteristiche del substrato in termini di densità e velocità. Si osservi che il software, in automatico, genera la stratigrafia della colonna monodimensionale e calcola le costanti degli smorzatori di collegamento.

3.6 Generazione del modello agli elementi finiti

La fase di discretizzazione del dominio in elementi finiti (vedi §2.1) viene eseguita in maniera semi-automatica dal software perchè necessita, da parte dell'utente, un controllo in termini di qualità della geometria degli elementi creati.

Una volta completato l'input della stratigrafia e definite le caratteristiche meccaniche dei sismostrati, attraverso il comando *"Ottimizza Mesh"* , disponibile nella scheda *"Elaborazione e Output"*, è possibile imporre un passo di discretizzazione ottimale in funzione della rigidezza di ogni sismostrato, al fine di evitare distorsioni da campionamento (aliasing). In particolare, questa funzione setta in automatico il campo "Passo mesh" presente nell'oggetto nodo sulla base di quanto visto nel §2.1. Una volta imposto il passo che la griglia deve avere in corrispondenza di ogni nodo, attivando la modalità di visualizzazione *"Mesh"* è possibile visualizzare la griglia generata in automatico dal software (**Figura 70**).

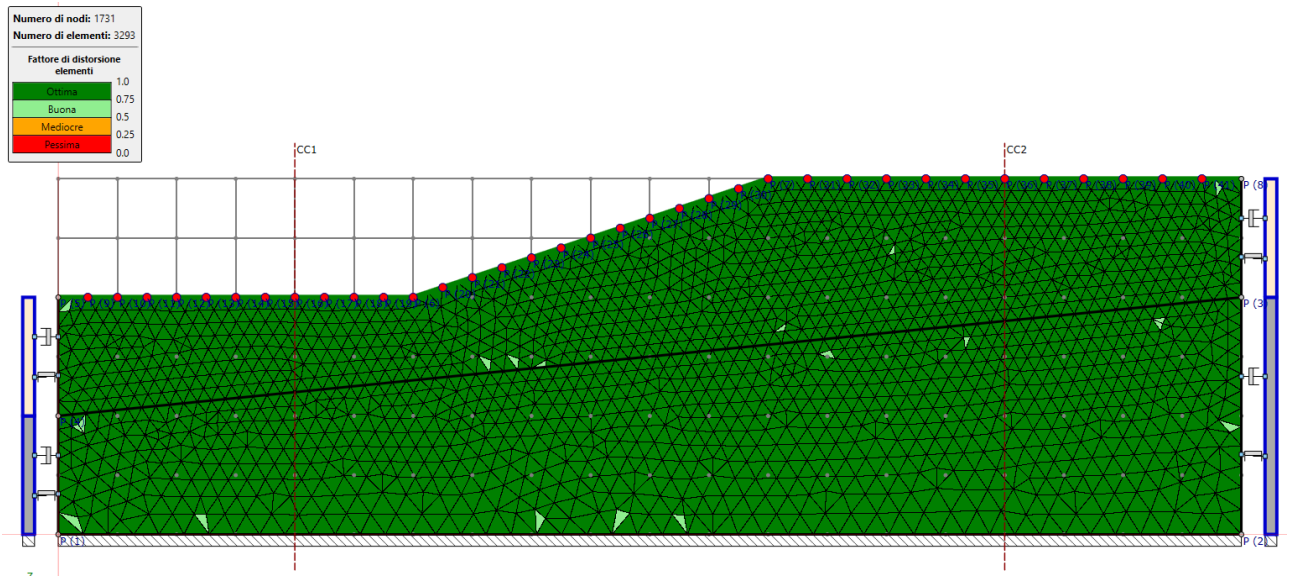
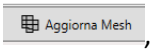


Figura 70. Modello FEM e qualità della mesh.

La forma degli elementi finiti viene scelta dall'utente dal campo (presente nella tabella delle proprietà) *"Tipologia mesh"* e può essere di tipo *"triangoli"* o *"quadrilateri"*. Sebbene la scelta di elementi quadrangolari è da preferire, vista la maggiore accuratezza delle funzioni di forma utilizzate nella formulazione di tali elementi, nel caso di geometrie molto irregolari questi presentano distorsioni di forma troppo elevate ed allora la tipologia triangolare rappresenta la scelta ottimale. La leggenda, rappresentata in alto a sinistra nella finestra di visualizzazione, consente all'utente di valutare il livello di distorsione degli elementi generati dal software in funzione del colore di rappresentazione distingue così quattro livelli di discretizzazione: *ottima*, *buona*, *mediocre* e *pessima*.

Laddove siano presenti elementi di colore arancio o rosso (livello mediocre o pessimo) l'utente può variare manualmente il campo *"passo"* di discretizzazione dei nodi adiacenti (dalle proprietà del punto) e quindi rigenerare la griglia di calcolo con il comando *"Aggiorna Mesh"* 

, fino ad ottenere una situazione che lo soddisfa.

3.7 Esecuzione delle analisi

Mediante il comando *"Calcolo"* è possibile aviare l'esecuzione dell'analisi di risposta sismica locale e di liquefazione definite in precedenza per la sezione stratigrafica oggetto di studio. In Figura 71 viene riportata la finestra dello stato di avanzamento del calcolo, all'interno della quale viene rappresentato il modello agli elementi finiti generato, una lista di stringhe di testo che si aggiorna ad ogni passo dell'analisi, un primo grafico che rappresenta gli spettri di risposta in input ed in output ed un secondo grafico che aggiorna l'utente sullo stato d'avanzameto del processo di convergenza dell'algoritmo lineare equivalente. Di seguito verranno descritte nel dettaglio le informazioni fornite all'utente.

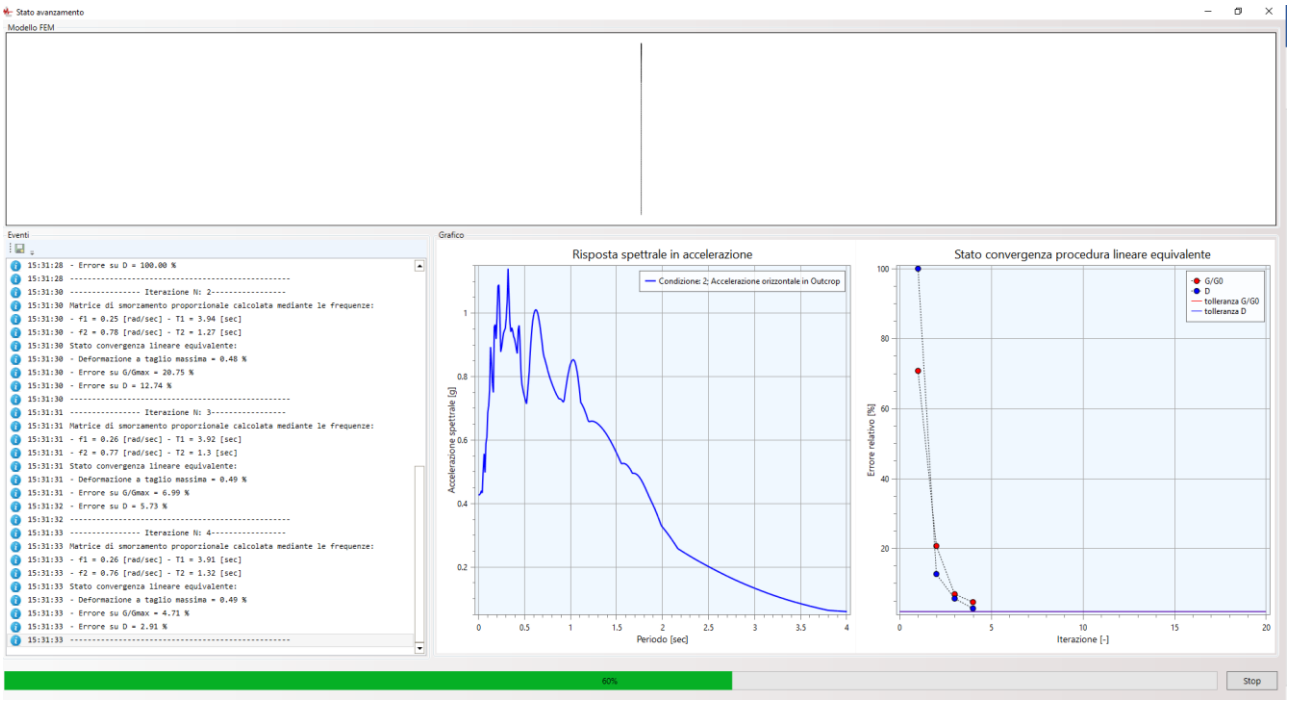


Figura 71. Finestra di avanzamento del calcolo.

Lista degli eventi

All'interno della finestra di avanzamento del calcolo (**Figura 71**) è presente un elenco di messaggi che aggiornano l'utente sullo stato delle analisi. Per come è possibile vedere dalla Figura 72, una volta eseguite delle analisi preventive sul modello FEM (una statica verticale ed un'analisi agli autovalori), il solutore comincia a processare le varie analisi di risposta sismica locale definite dall'utente ed in particolare le varie condizioni di carico associate ad ognuna di esse. All'interno dell'i-esima analisi di risposta sismica locale (che riguarda la generica condizione di carico relativa ad ogni accelerogramma associato) il solutore esegue una serie di iterazioni e per ognuna di esse fornisce:

- f_1: prima frequenza naturale nel modello espressa in Hz;
- f_2: seconda frequenza finalizzata all'assemblaggio della matrice di smorzamento secondo la formulazione classica di Rayleigh espressa in Hz;
- *Deformazione a taglio massima:* espressa in percentuale;
- $err(\frac{G(\gamma)}{G_0})_{max}$: errore relativo massimo sulle curve di decadimento del modulo di taglio;

- $err(D(\gamma))_{max}$: errore relativo massimo sulle curve di decadimento del rapporto di smorzamento viscoso.

Da notare che sia gli errori relativi che la deformazione a taglio massima vengono calcolate come il massimo valore riscontrato sull'intero modello alla *k*-esima iterazione.

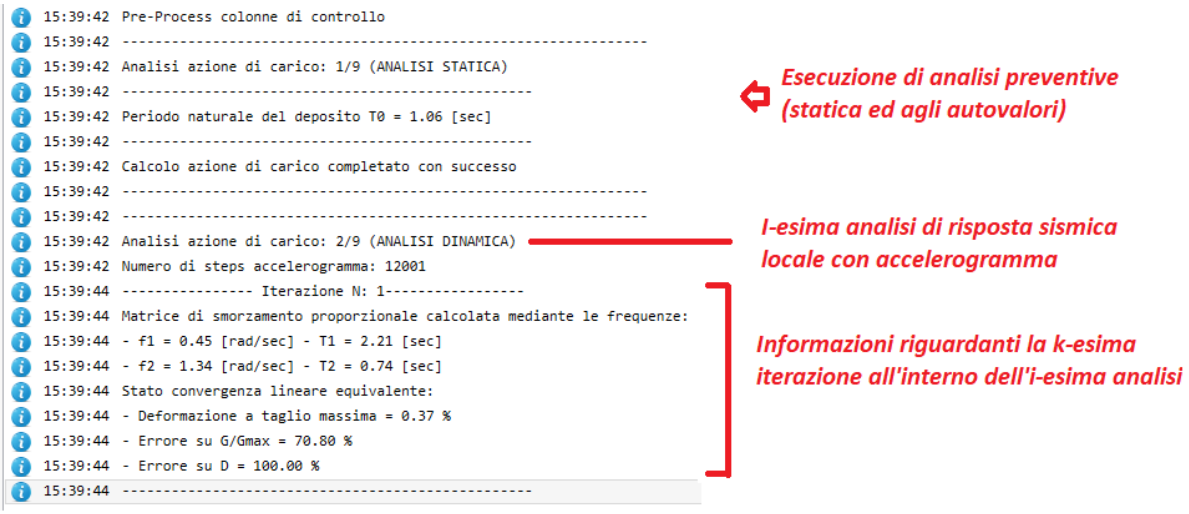


Figura 72. Lista degli eventi durante le analisi.

Grafico degli spettri di risposta

All'interno della finestra di avanzamento del calcolo (**Figura 71**) è presente un grafico che riporta per la condizione di carico corrente:

- Spettro di risposta in input (grafico in colore blue);
- Spettro di risposta in output (grafico in colore rosso visualizzato solo al raggiungimento della convergenza).

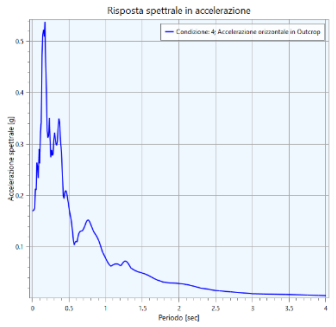


Figura 73. Grafico degli spettri di risposta in input ed in output per la condizione di carico corrente.

Grafico dello stato di convergenza della procedura lineare equivalente

All'interno della finestra di avanzamento del calcolo (**Figura 71**) è presente un grafico che riporta in ascissa il numero di iterazioni ed in ordinata gli errori relativi per il modulo di taglio e per lo smorzamento viscoso. Da notare che è presente anche una soglia orizzontale definita sulla base del valore minimo tollerato di errore

(valore di default 2%) e che quando le due curve scendono al di sotto di tale soglia la procedura iterativa si può dire conclusa.

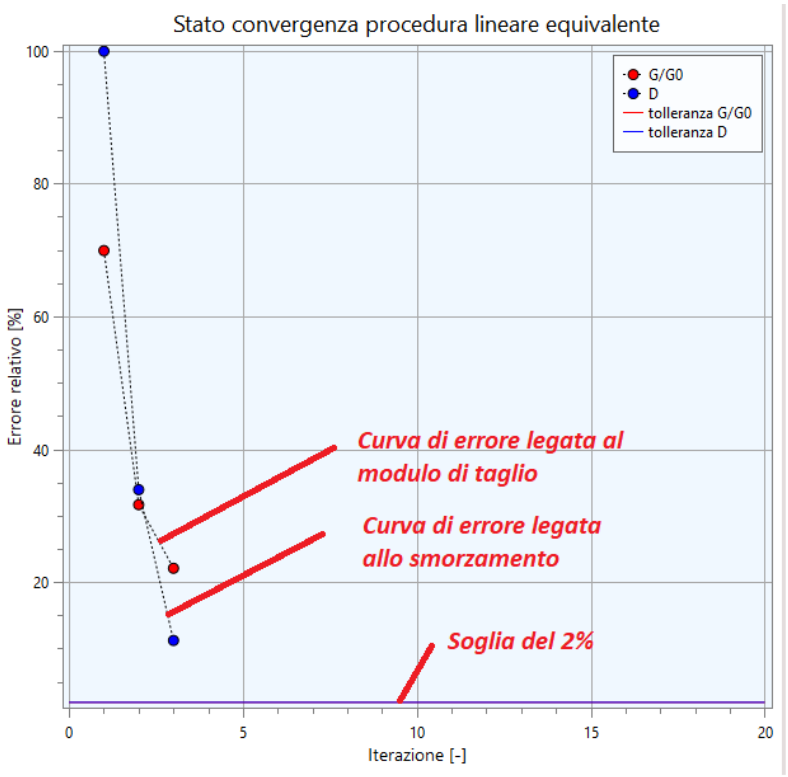


Figura 74. Stato di convergenza della procedura lineare equivalente.

In altre parole, dopo un certo numero di iterazioni (in genere tra 8 e 12) gli errori relativi sui moduli di taglio e sui rapporti di smorzamento viscoso raggiungono un valore inferiore alla soglia imposta dall'utente nei dati generali (valore di default 2%), a questo punto l'analisi della condizione di carico corrente si conclude e vengono rappresentati gli spettri di risposta relativi ai punti di controllo imposti. Una volta processate tutte le condizioni di carico relative a tutte le analisi, il calcolo risulta concluso, e in basso a destra il tasto di "Stop" si configura in "Esci".

3.8 Output dei risultati

I risultati delle analisi di risposta sismica locale possono essere ottenuti in termini di:

- Storie temporali e spettri di risposta delle componenti cinematiche del moto in direzione orizzontale (spostamenti, velocità ed accelerazioni) nel punto di controllo posto in superficie;
- Modulo della funzione di trasferimento (amplificazione) nel punto di controllo posto in superficie;
- Valori massimi di spostamenti, velocità ed accelerazione su tutti i nodi del dominio discretizzato;
- Valori massimi delle componenti dello stato tensionale e deformativo sui nodi del dominio;
- Valori del rapporto G/G_0 e del rapporto di smorzamento viscoso D raggiunti per ogni elemeno finito durante la ricerca della convergenza della procedura lineare equivalente.

I valori massimi possono essere rappresentati mediante:

- Colormaps su tutto il dominio discretizzato;
- Variazione lungo il profilo orografico (se definita l'orografia);
- Come profilo lungo la verticale (se definite delle colonne di controllo).

3.8.1 Storie temporali e spettri di risposta

Attraverso il comando "Spettri" presente nella scheda *"Elaborazione e Output"* è possibile accedere all'ambiente di visualizzazione dei risultati sui punti di controllo (vedi **Figura 75**). Per ottenere il grafico desiderato è possibile utilizzare il menù in alto a sinistra. Il primo menù riporta tutti i punti di controllo definiti (in questo caso solo quello posto in superficie), il secondo l'analisi condotta (ad esempio SLO, SLD o SLV) ed il terzo consente di scegliere tra le condizioni di carico presenti all'interno dell'analisi stessa.

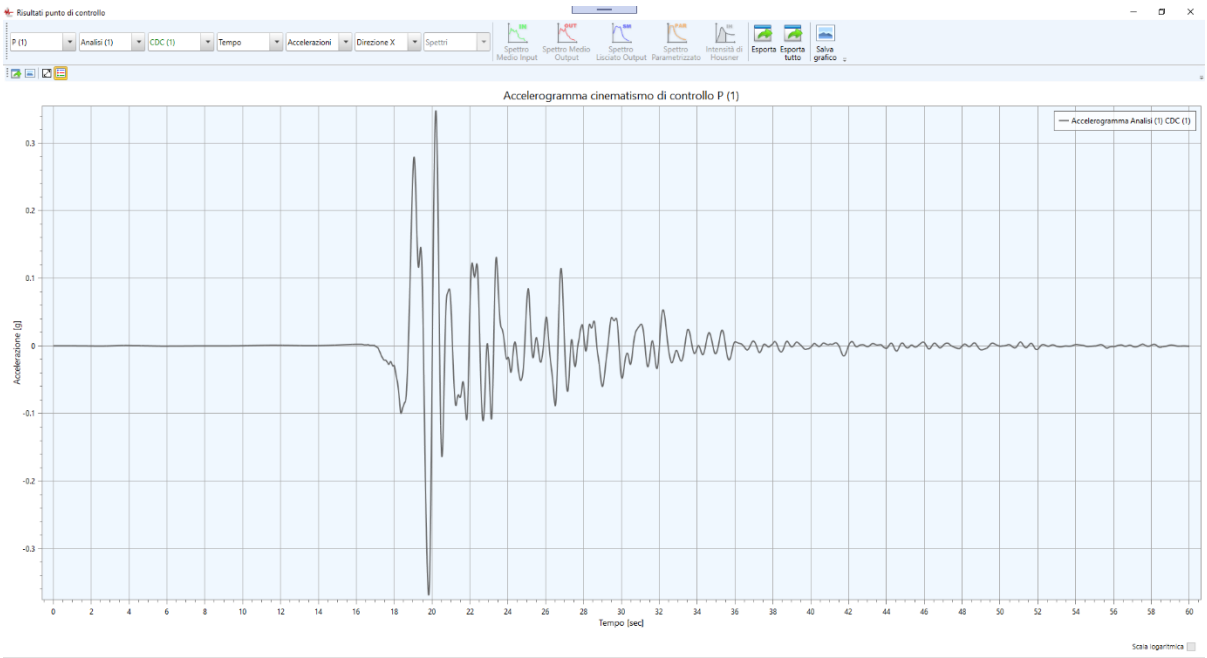


Figura 75. Ambiente di visualizzazione dei risultati sul punto di controllo posto in superficie.

Qualora si volessero visualizzare contemporaneamente tutte le condizioni di carico è possibile settare la voce *"Tutte"* nel terzo menù. La scelta della componente del moto (orizzontale o verticale) viene contotta utilizzando il penultimo menù.

Per visualizzare gli spettri di risposta corrispondenti alla componente/i selezionata basta settare il quarto menù da *"Tempo"* a *"Frequenza"*.

Per esportare i grafici visualizzati in formato testo (*.txt) o per Excel (*.csv) è possibile utilizzare il comando *"Esporta"* presente in alto a destra nella finestra, verrà chiesto all'utente (vedi **Figura 76**) di specificare, la curva da esportare (identificandola con un nome visibile nella legenda del grafico), il tipo di formato, l'unità di misura.

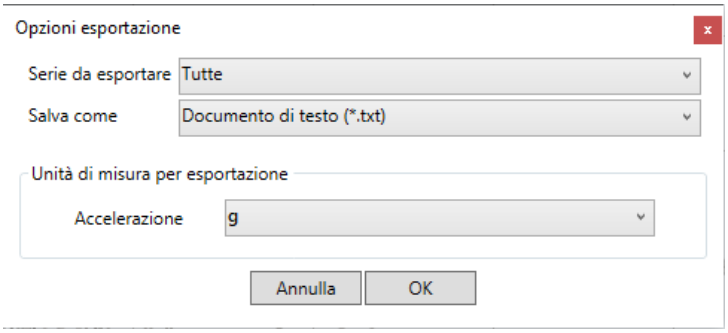


Figura 76. Richieste per l'esportazione dei grafici.

Esportazione dello spettro medio in accelerazione

Qualora l'utente avesse l'esigenza di esportare un file contenente i punti che descrivo lo spettro di risposta medio relativo ad una particolare analisi dovrà seguire la procedura illustrata in **Figura 77**. I passi da seguire sono i seguenti:

1. Specificare l'analisi sismica per la quale si intende esportare lo spettro medio;
2. Attivare la selezione che consente di visualizzare tutte le condizioni di carico dell'analisi e quindi tutti gli spettri;
3. Selezionare il campo *"Frequenza"* che consente di ottenere gli spettri di risposta sul grafico;
4. Selezionare il campo *"Accelerazioni"* che consente di visualizzare lo spettro in accelerazione piuttosto che in velocità o spostamenti;
5. Selezionare il campo *"Spettri"* che consente di visualizzare gli spettri di risposta piuttosto che le funzioni di amplificazione;
6. Eseguire il comando *"Spettro medio di Output"*;
7. Eseguire il comando *"Esporta"* selezionando la serie *"Spettro medio di Output"*.

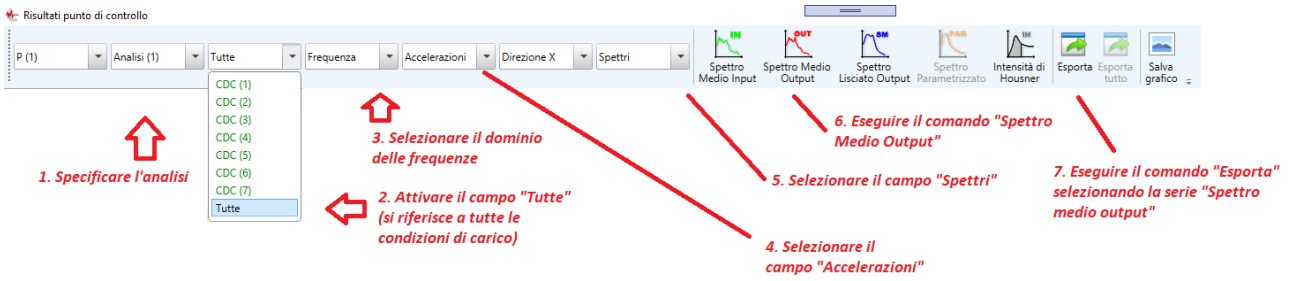


Figura 77. Procedura di esportazione dello spettro medio per punti.

3.8.2 Regolarizzazione dello spettro medio di Output

La procedura di regolarizzazione, che consente di trasformare lo spettro di risposta medio ottenuto da analisi numeriche di risposta sismica locale in uno spettro con forma standard (descritto dai parametri previsti dall'NTC18 ed all'EC8), implementata nell'applicativo è quella proposta da Newmark e Hall (1982), Romeo (2007), Liberatore e Pagliaroli (2014). Tale procedura di regolarizzazione, inoltre, è presente nell'Appendice 1 dell'Ordinanza n° 55 registrata il 24/04/2018 al n° 846 del Commissario Straordinario Ricostruzione Sisma 2016.

Nella pratica professionale la forma standardizza è molto utile perché utilizzata dalla maggior parte dei codici di calcolo per la progettazione e la verifica strutturale delle costruzioni ed è governata dai seguenti parametri:

- a_g: accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_B: periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_C: periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro;
- T_D: periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro;
- ξ: coefficiente di smorzamento viscoso (convenzionalmente pari al 5%);
- S: coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione stratigrafica e topografica del sito ogetto di studio;

Attraverso quest'ultimo coefficiente è possibile ottenere la pseudoaccelereazione spettrale per periodo nullo (accerazione di attacco):

$$a_{max} = S \cdot a_g$$

Di sefuito i passi dell'algoritmo di regolarizzazione:

1. Si calcola lo spettro di pseudoaccelerazione (SA) e si determina il periodo proprio (T_A) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudoaccelerazione;
2. Si calcola il valore medio dello spettro (SA_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:

$$SA_m = \frac{1}{T_A} \int_{0.5\ T_A}^{1.5\ T_A} SA(T)\ dT$$

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

$$SV(T) = SA(T) \cdot \frac{T}{2\pi}$$

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

4. Si calcola il valore medio dello spettro (SV_m) nell'intorno di T_V nell'intorno tra $0.8\ T_V$ e $1.2\ T_V$:

$$SV_m = \frac{1}{0.4\ \cdot T_V} \int_{0.8\ T_V}^{1.2\ T_V} SV(T)\ dT$$

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

$$T_C = 2\pi\ \frac{SV_m}{SA_m}$$

6. Si determinano:

$$T_B = \frac{1}{3} \cdot T_C$$

$$T_D = 4.0 \frac{a_g}{g} +\ 1.6$$

7. Poiché il valore di a_{max} non è generalmente fornito nello spettro delle simulazioni numeriche si procede per estrapolazione lineare, secondo la seguente equazione:

$$a_{max} = \left(\frac{S_e(T = 0.01s)}{SA_m} - \frac{0.01}{T_B}\right)\left(\frac{SA_m}{1 - \frac{0.01}{T_B}}\right)$$

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;

8. Si applicano le equazioni riportate in NTC18 per la determinazione dei tratti dello spettro tra $T_A = 0$, T_B, T_C, T_D, fino a un T di interesse;
9. Si termina il parametro F_0 come rapporto SA_m / a_{max}.

Per eseguire la procedura appena descritta mediante l'uso di quest'applicativo procedere con la visualizzazione dello "Spettro medio di output" secondo quanto illustrato al paragrafo precedente, così da rendere attivo il comando *"Visualizza Spettro Parametrizzato"*

; eseguire tale comando in modo da entrare nell'ambiente rappresentato in **Figura 78** e cliccare sul pulsante *"Parametrizza"*.

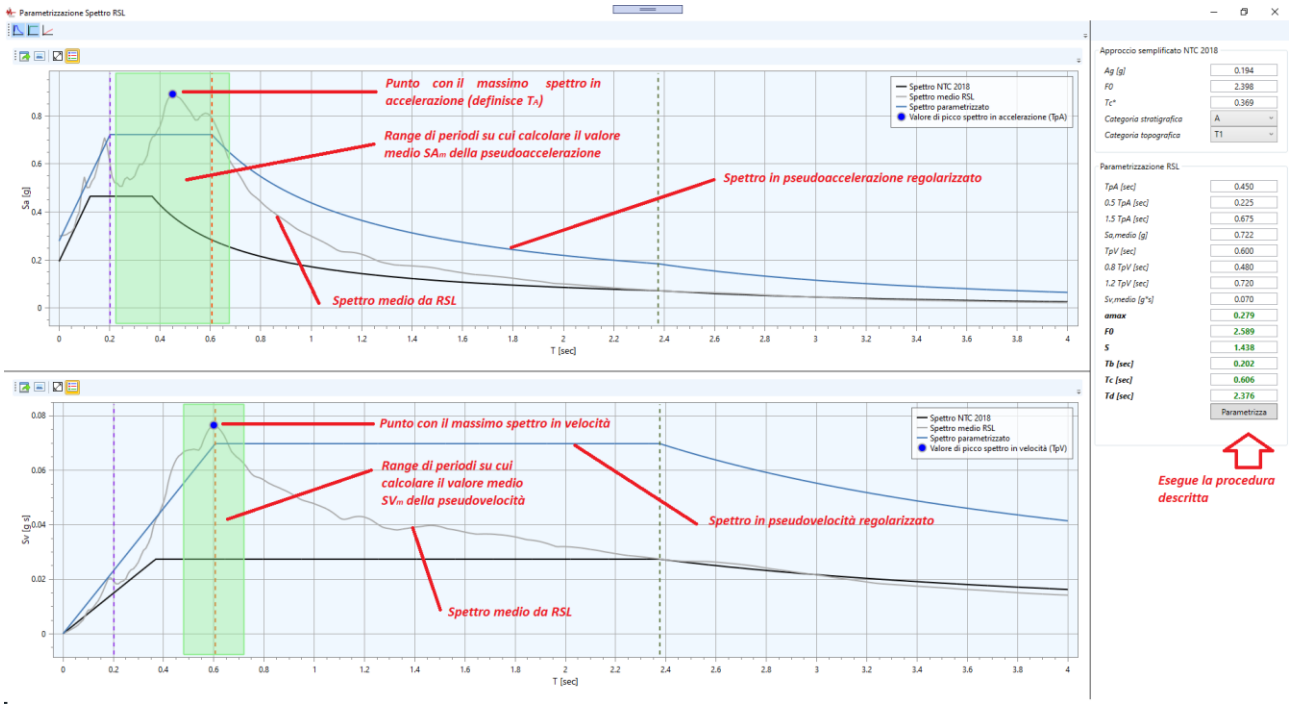


Figura 78. Interfaccia per la gestione della regolarizzazione dello spettro medio da RSL.

Eseguita la regolarizzazione l'utente può individuare i parametri che descrivolo la forma spettrale regolarizzata grazie al fatto che questi vengono evidenziati in colore verde.

Volendo effettuare un confronto tra lo spettro di risposta regolarizzato e quello che si otterrebbe se venisse utilizzato l'approccio semplificato delle categorie di sottosuolo descritto al §3.2.2 dell'NTC18 è possibile selezionare la **categoria stratigrafica** e la **categoria topografica** della stratigrafia in che si sta analizzando (vedi **Figura 79**) e quindi aggiornare all'interno dello stesso grafico la curva in colore nero che rappresenta proprio lo spettro da categoria di sottosuolo.

Le categorie sopracitate si riferiscono alle tabelle **Tab. 3.2.II** e **Tab. 3.2.III** dell'NTC18.

Il confronto tra gli spettri di risposta è utile all'utente per avere un ordine di grandezza dell'incremento (o decremento) di azione sismica che il progettista strutturale deve aspettarsi nell'utilizzare i risultati di un'analisi di risposta sismica locale, via maestra secondo quanto prescritto dalla stessa normativa, rispetto a quanto ottenuto mediante un approccio semplicistico.

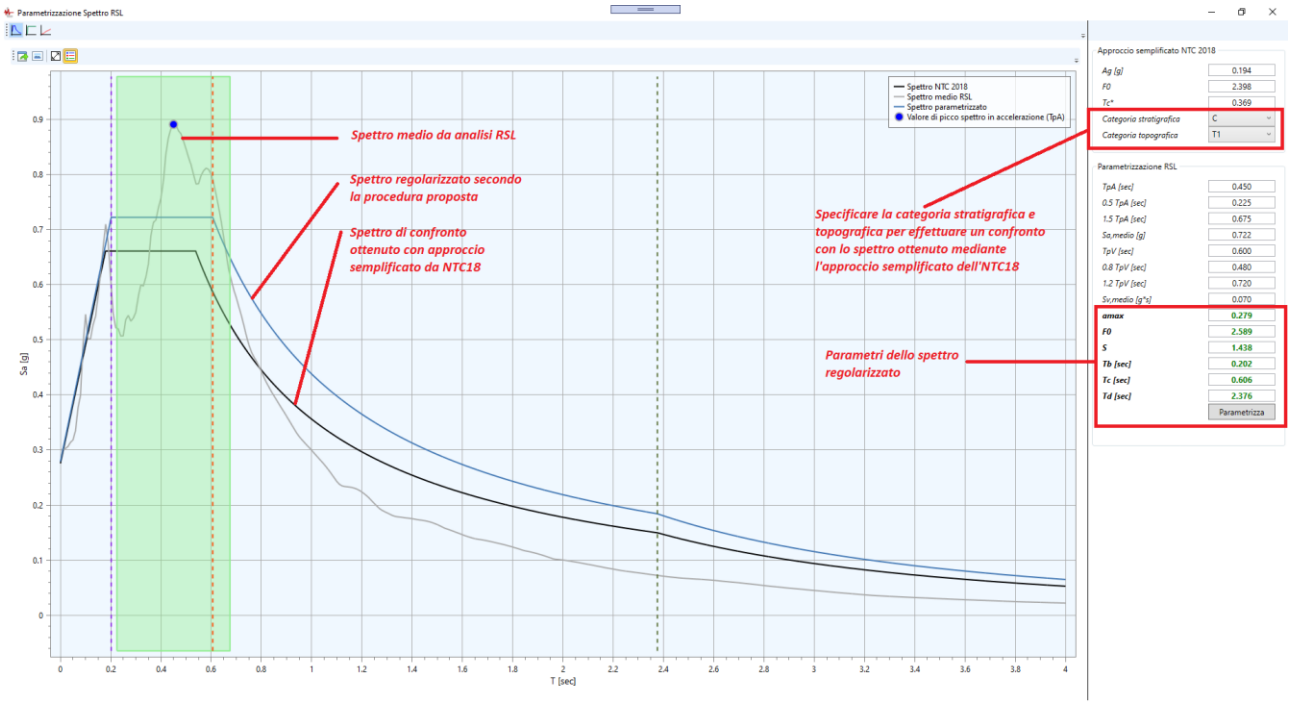


Figura 79. Confronto tra lo spettro regolarizzato e lo spettro ottenuto mediante l'approccio semplificato dell'NTC18.

3.8.3 Funzione di amplificazione

Si definisce *funzione di trasferimento* $H(f)$ nel dominio delle frequenze f la funzione ottenuta mediante la seguente espressione:

$$H(f) = \frac{F_s(f)}{F_A(f)}$$

dove $F_s(f)$ è lo spettro di Fourier ottenuto a partire dal segnale accelerometrico in superficie e $F_A(f)$ è lo spettro di Fourier ottenuto a partire da un moto sismico di riferimento ovvero quello relativo ad un ipotetico (o reale) affioramento della formazione rocciosa di base.

La funzione di trasferimento è definita nel campo dei numeri complessi e quindi non di immediata interpretazione, il suo modulo è chiaramente una funzione reale e viene detta *funzione di amplificazione*:

$$A(f) = |H(f)|$$

Dal punto di vista fisico tale funzione è in grado di indicare quali componenti del moto sismico (in termini di frequenza), rispetto al moto di riferimento, sono state amplificate ed in che rapporto e quali componenti sono state smorzate.

Per ottenere tale funzione mediante quest'applicativo è necessario seguire la procedura indicata in **Figura 80** che essenzialmente consiste nei seguenti punti:

1. Scegliere l'analisi di RSL;
2. Selezionare la condizione di carico e quindi l'accelerogramma desiderato tra i 7 dell'analisi;
3. Attivare la rappresentazione nel dominio delle frequenze;

4. Selezionare “Funzione di amplificazione”.

Si noti che la funzione di amplificazione dipende dalla condizione di carico selezionata e quindi dalla forzante con cui si carica il modello perché la risposta dello stesso è di tipo non lineare. Volendo visualizzare tutte le funzioni di amplificazione oltre che una funzione media è possibile selezionare la voce *“Tutte”* nel combo delle condizioni di carico.

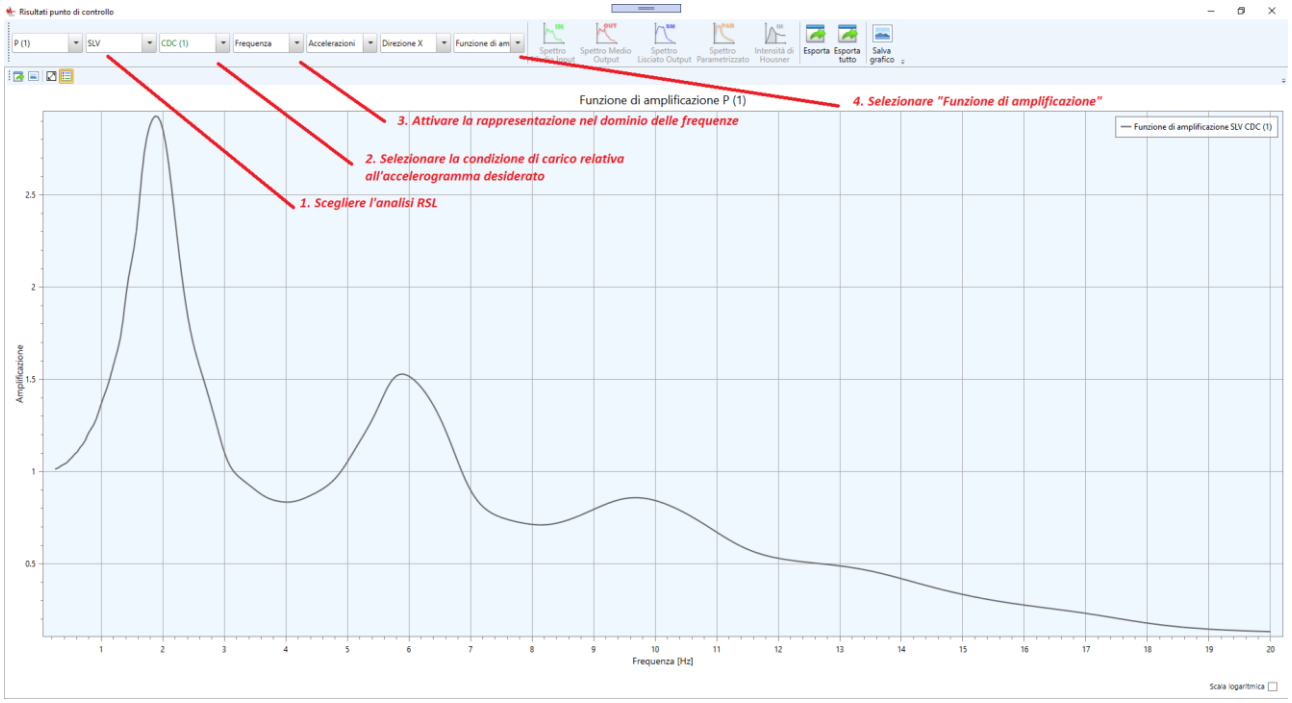


Figura 80. Procedura per la visualizzazione della funzione di amplificazione.

3.8.4 Risultati sul modello FEM

Mediante il comando *"Color Maps"* presente nella scheda "Elaborazione e Output" è possibile accedere all'ambiente di visualizzazione dei risultati dell'analisi dinamica in termini di valori massimi. Mediante i menù in alto a destra (**Figura 81**) è possibile settare l'analisi, la condizione di carico desiderata ed il campo da visualizzare.

Volendo visualizzare i valori medi di tutti i massimi delle condizioni di carico presenti nell'analisi selezionata è necessario settare il secondo menù a *"Valori medi"*.

Cliccando sul generico elemento finito della griglia di calcolo (mesh) è possibile avviare la finestra che elenca per ogni nodo dell'elemento selezionato lo stato tensionale ed i cerchi di Mohr.

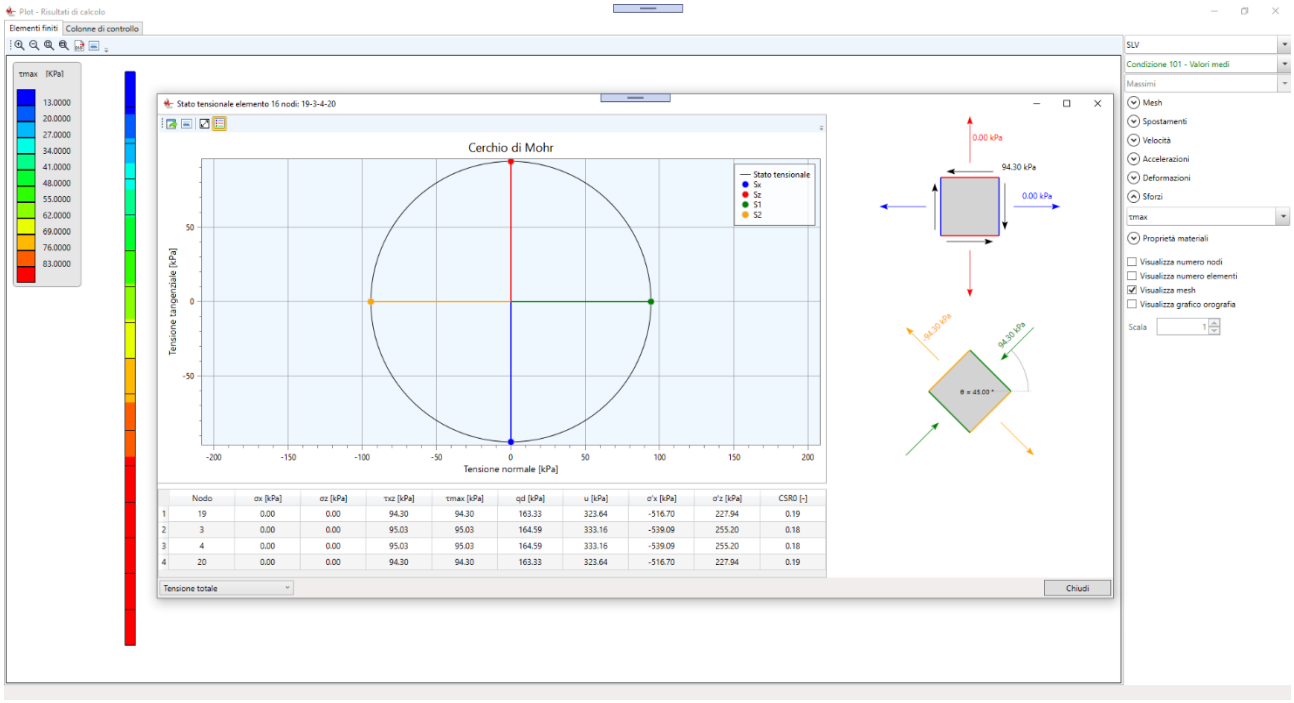


Figura 81. Valori massimi della tensione tangenziale sul modello ad elementi finiti.

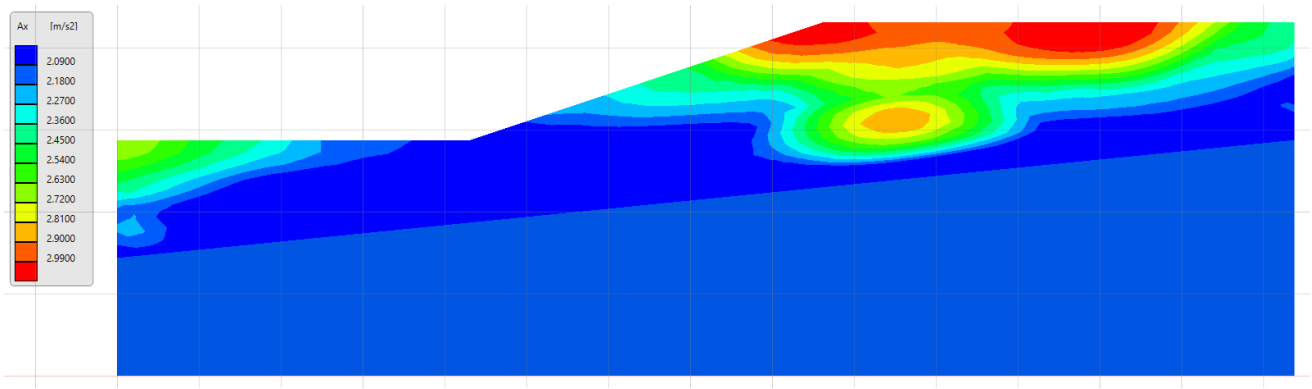


Figura 82. Colormap massimi assoluti accelerazioni orizzontali.

3.8.5 Fattori di amplificazione

Mediante il comando *"Fattori di amplificazione"* presente nella scheda *"Elaborazione e Output"* è possibile accedere all'ambiente per il calcolo dei fattori di amplificazione richiesti negli studi di microzonazione sismica.

Si tratta di rapporti tra grandezze integrali derivate da spettri di risposta elastici alla superficie e quelli corrispondenti al moto atteso su un suolo di riferimento pianeggiante ed ipoteticamente affiorante nello stesso sito, in altre parole si mettono a rapporto grandezze derivate dagli spettri di risposta in input ed in output dalle analisi di RSL. La forma generalizzata del fattore di amlificazione è la seguente:

$$FA = media\left\{\frac{\int_{T_1}^{T_2} S_g(T)^{output} dT}{\int_{T_1}^{T_2} S_g(T)^{input}\, dT}\right\}$$

dove:

- g: grandezza cinematica considerata (accelerazione, velocità o spostamento);
- $media$: può trattarsi di media geometrica, aritmetica o logaritmica;
- T_1 e T_2: intervallo di periodi di interesse.

In **Figura 83** viene riportato l'ambiente dedicato al calcolo dei fattori di amplificazione ottenuti per la singola analisi; il software propone già alcuni fattori di amplificazione di default, tuttavia egli può aggiungerne degli altri mediante il comando *"Aggiungi"* e decidere se visualizzarli o meno nel grafico di sinistra. L'esportazione delle curve in formato *.txt o *.csv può avvenire mediante il comando *"Esporta punti del grafico"* .

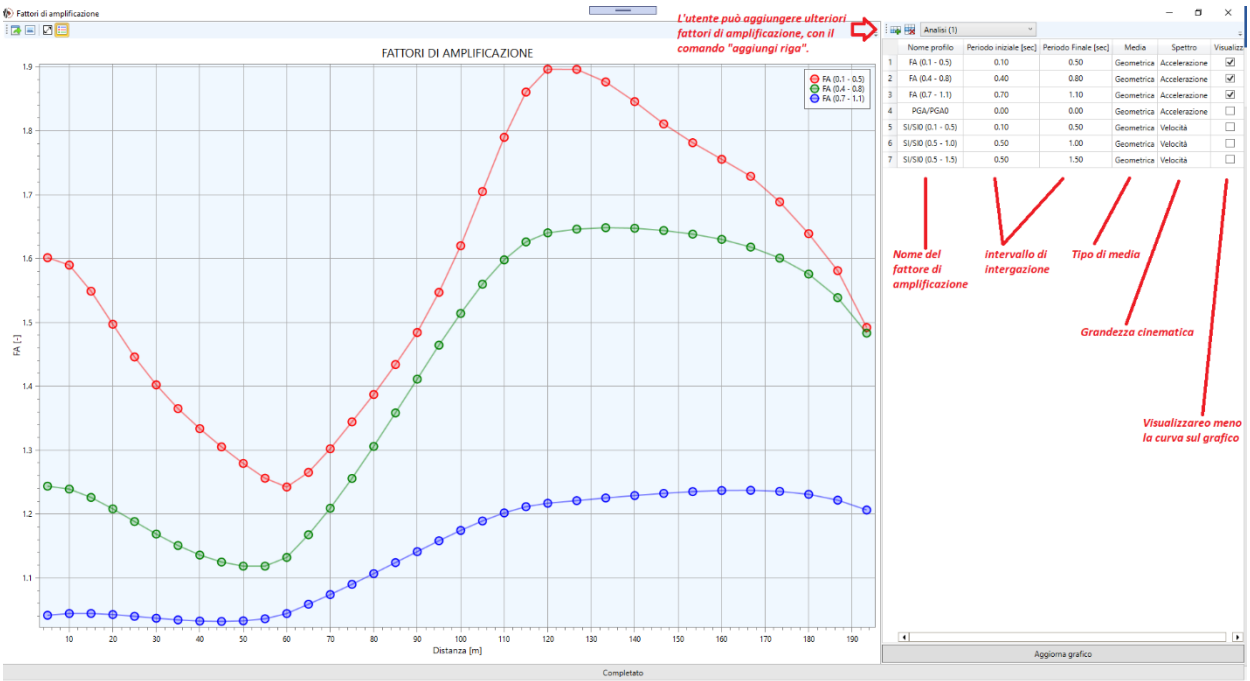


Figura 83. Ambiente per il calcolo dei fattori di amplificazione

Associato al fattore di amplificazione in accellerazione è calcolato il fattore ***HSM*** (Hazard, Seismic Microzonation) richiesto nelle "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazione" vers.2.0 del 2022.

3.8.6 Relazione di calcolo

Mediante il comando *"Relazione"* , presente nella scheda *"Elaborazione e Output",* è posssibile accedere all'editor (vedi **Figura 84**) che consente di attivare i paragrafi da inserire nella relazione di calcolo.

Una volta attivati i paragrafi desiderati, mediante il comando "*Genera elaborato"* è possibile visualizzare la relazione di calcolo direttamente in formato *.docx.

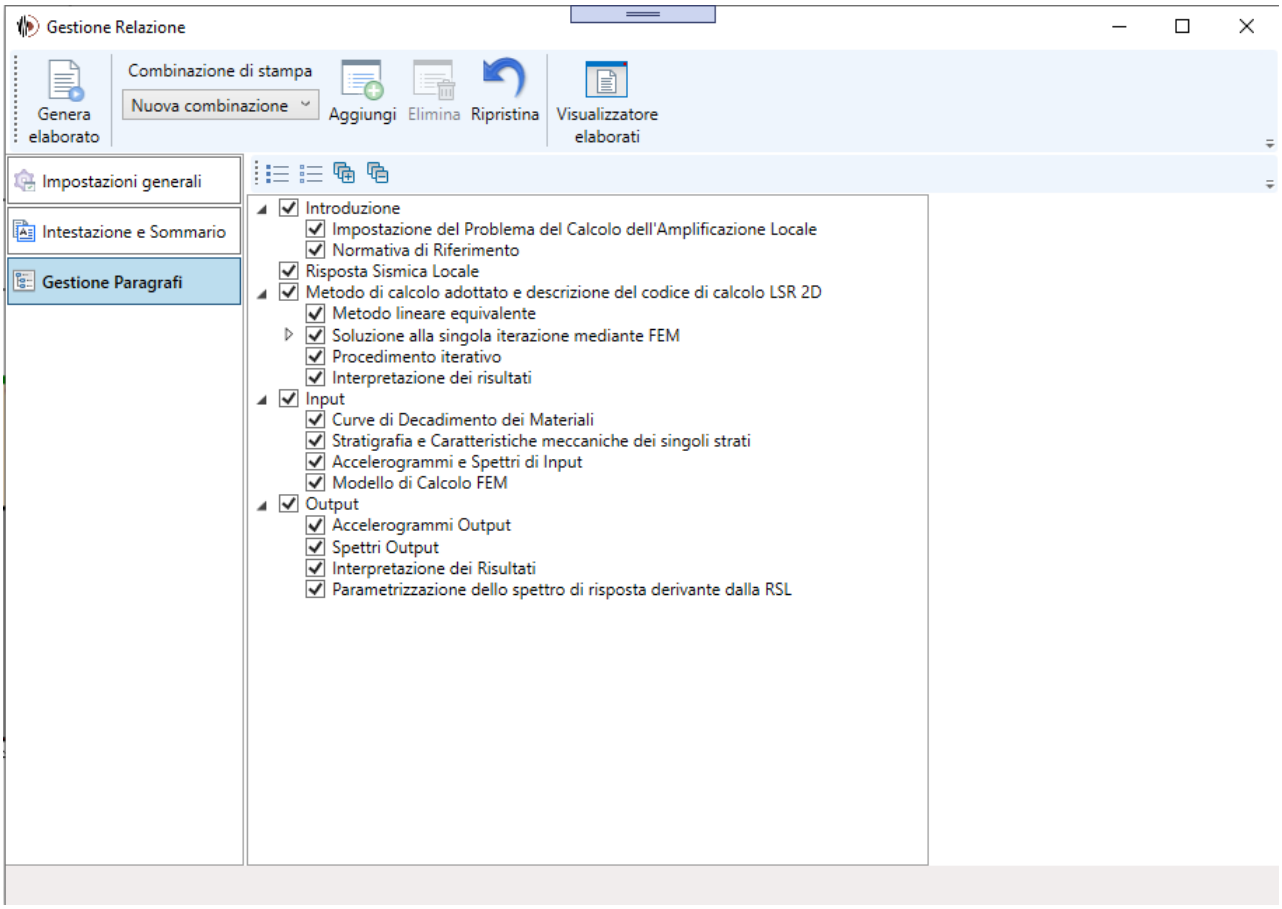


Figura 84. Gestione dei paragrafi della relazione.

Attraverso la selezione dei vari flags nella finestra rappresentata in **Figura 84** è possibile escludere alcuni paragrafi dalla relazione.

Copyright

Tutto il materiale contenuto nella confezione (CD contenente i file dei software, chiave di protezione, altri supporti di consultazione) è protetto dalle leggi e dai trattati sul copyright, nonché dalle leggi e trattati sulle proprietà intellettuali.

E' vietata la cessione o la sub-licenziazione del software a terzi.

E' altresì vietata la riproduzione del presente manuale in qualsiasi forma e con qualsiasi mezzo senza la preventiva autorizzazione scritta del produttore.

Informazioni e permessi sui prodotti o parti di essi possono essere richiesti a:

Stacec s.r.l.

S.S. 106, n. 59 (km 87)

89034 – Bovalino (RC)

Tel. 0964/67211 - Fax. 0964/61708

www.stacec.com

stacec@stacec.com

Revisione documento: 1.2025 - mercoledì 22 ottobre 2025