

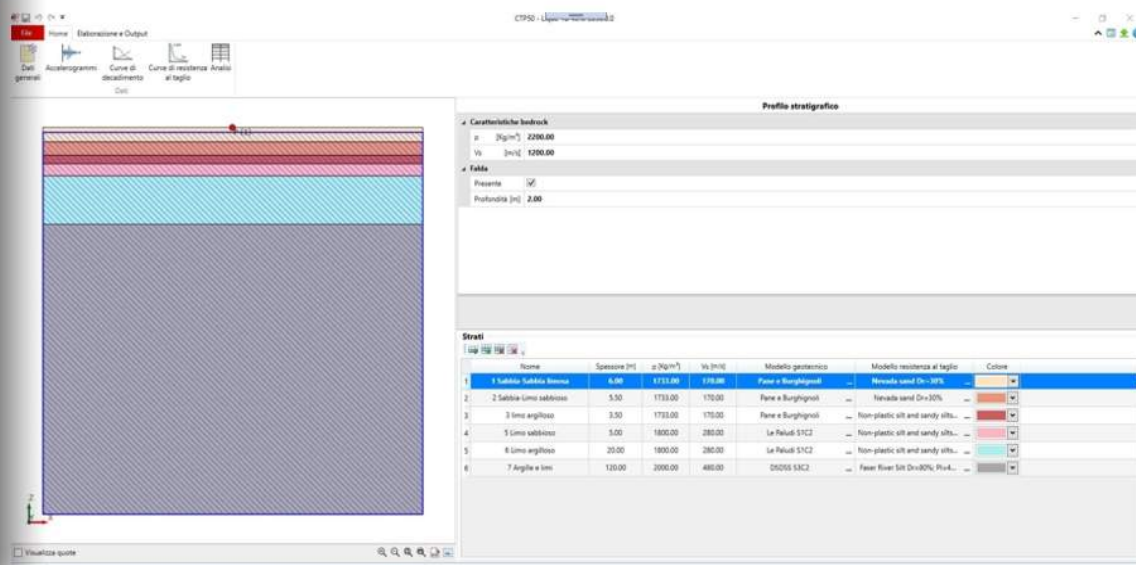
MANUALE D'USO



LOCAL SEISMIC RESPONSE

Software per la verifica della liquefazione
mediante analisi numeriche di
risposta sismica locale

www.stacec.com



Manuale utente
LIQUEFAZIONE



1. Introduzione

L'accumulo delle pressioni interstiziali in terreni sabbiosi e limosi sollecitati da carichi sismici di media e alta intensità, in terreni sotto falda, può generare l'abbattimento della rigidità e della resistenza del materiale, portandolo ad un cambiamento di stato, da solido a liquido: questo fenomeno prende il nome di **liquefazione**.

L'insorgere del suddetto fenomeno e dei danni da esso derivanti è noto alla comunità scientifica fin dagli anni settanta e nel tempo sono stati formulati diversi metodi numerici, più o meno sofisticati, in grado di stimare il potenziale di liquefazione in presenza di diversi tipi di terreno in differenti contesti geologici. In Italia dopo i terremoti dell'Aquila (6 aprile 2009: 6.3 Mw, 8.8km di profondità), dell'Emilia Romagna (20 maggio 2012: 6.1 Mw, 6.3km di profondità; 29 May 2021: 5.8 Mw, 5 km di profondità) e la sequenza sismica Amatrice-Norcia-Visso (2016/2017, tra cui: 24 agosto 2016: 6 Mw, 8.1 km profondità; 30 ottobre 2016: 6.5Mw, 9 km di profondità) sono stati registrati diffusi fenomeni di liquefazione che hanno portato all'integrazione degli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" (ICMS, 2008 ii.mm) in relazione alla gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni.

L'azienda *Stacec s.r.l.* e ed il *Dipartimento di Ingegneria e Geologia dell'Università degli Studi "Gabriele d'Annunzio" di Chieti-Pescara* hanno avviato un progetto di ricerca con l'obiettivo implementare e commercializzare un codice di calcolo per stimare l'incremento delle sovrappressioni interstiziali indotto dal sisma a valle di analisi numeriche di risposta sismica locale.

La stima dell'entità delle pressioni interstiziali come indicatore dell'avvenuta liquefazione può essere utilizzata sia a fini di progettazione e mitigazione della pericolosità da liquefazione nelle Zone di Attenzione per instabilità da liquefazione individuate dalla Microzonazione Sismica MS di livello 1 che nelle aree dove è stato stimato il Potenziale di Liquefazione (MS di livello 2).

Il software LIQUEFAZIONE consente di effettuare una stima semplificata dell'incremento delle sovrappressioni interstiziali, mediante la determinazione della curva CSR (cyclic stress ratio) con analisi di risposta sismica locale.

Questo documento oltre a rappresentare una guida operativa all'uso dell'applicativo, illustra i principi fondamentali su cui si basa la procedura di calcolo messa a punto nell'ambito del suddetto progetto di ricerca ed implementata nell'applicativo stesso.



2. Metodo di calcolo

Il metodo proposto ed implementato all'interno dell'applicativo LIQUEFAZIONE consiste nel calcolo, in condizioni *free-field*, dell'incremento delle pressioni interstiziali indotto dall'evento sismico. La condizione di sicurezza nei confronti della liquefazione viene espressa mediante un coefficiente detto rapporto di sovrappressione interstiziale:

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \quad (1)$$

dove Δu è l'incremento di sovrappressione interstiziale e σ'_{v0} la tensione verticale litostatica. È evidente che valori prossimi all'unità di r_u rappresentano una condizione di totale perdita di resistenza da parte del materiale e dunque il collasso per liquefazione. Tale rapporto di sovrappressione interstiziale r_u varia in funzione della deformazione da taglio γ indotta dal sisma e dal numero di cicli di carico N generalmente normalizzato rispetto al numero di cicli di carico limite N_L , che è il massimo numero di cicli di carico necessario perché un fissato terreno nelle condizioni di sito, arrivi a liquefazione.

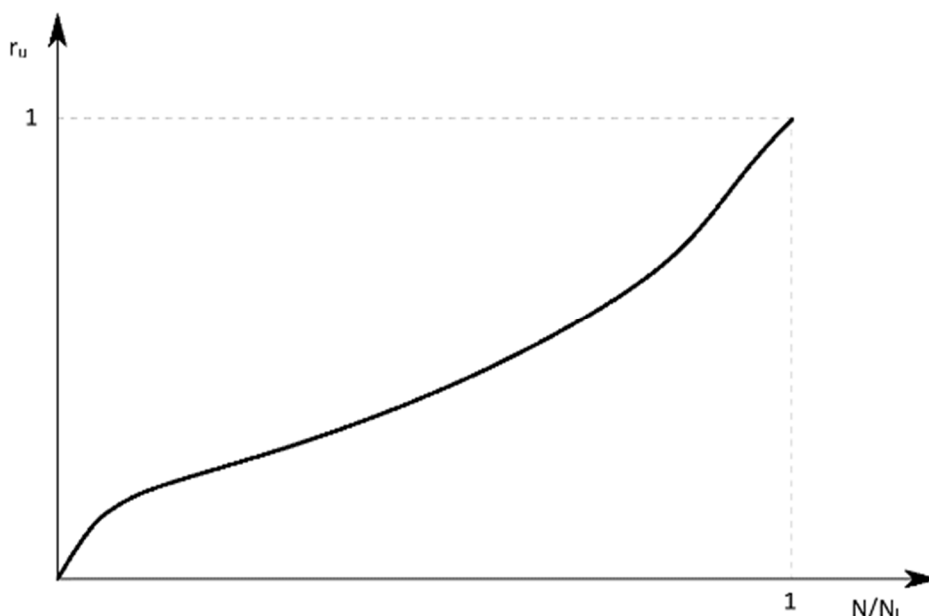


Figura 1. Andamento del rapporto di sovrappressione interstiziale r_u in funzione del numero di cicli di carico normalizzato N/N_L .

Quindi il codice LIQUEFAZIONE calcola il rapporto N/N_L lungo la verticale della colonna di studio. Per quanto riguarda il numero di cicli limite N_L questo dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale e dal livello tensionale a cui lo stesso è sottoposto in ogni punto del modello; tale valore viene ottenuto mediante l'uso di curve di resistenza del materiale definite dall'utente ed in funzione del livello di sollecitazione *CSR* (cyclic stress ratio) determinato dall'analisi di risposta sismica locale mediante la seguente espressione:

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{v0}} \quad (2)$$

dove τ_{max} rappresenta la tensione tangenziale massima durante l'evento sismico.

In figura 2 viene rappresentato uno schema che riassume come viene determinato N_L lungo la colonna analizzata, i passaggi sono i seguenti:

- Viene assegnata ad ogni sismostrato, in funzione del tipo di materiale, una curva di resistenza al taglio in grado di fornire il numero di cicli limite N_L in funzione del livello di sollecitazione CSR ;
- Si calcola la tensione verticale efficace litostatica in funzione della stratigrafia, del peso per unità di volume dei singoli strati e della posizione della falda;
- Per ogni accelerogramma in ingresso si esegue un'analisi di risposta sismica locale in tensioni totali con approccio lineare equivalente in modo da determinare la tensione tangenziale massima indotta τ_{max} ;
- Si calcola mediante l'equazione (2) il rapporto di sollecitazione ciclica CSR ;
- Si entra nelle curve di resistenza dei materiali definite per ogni singolo strato con il valore di CSR e si ottiene il numero di cicli limite N_L .

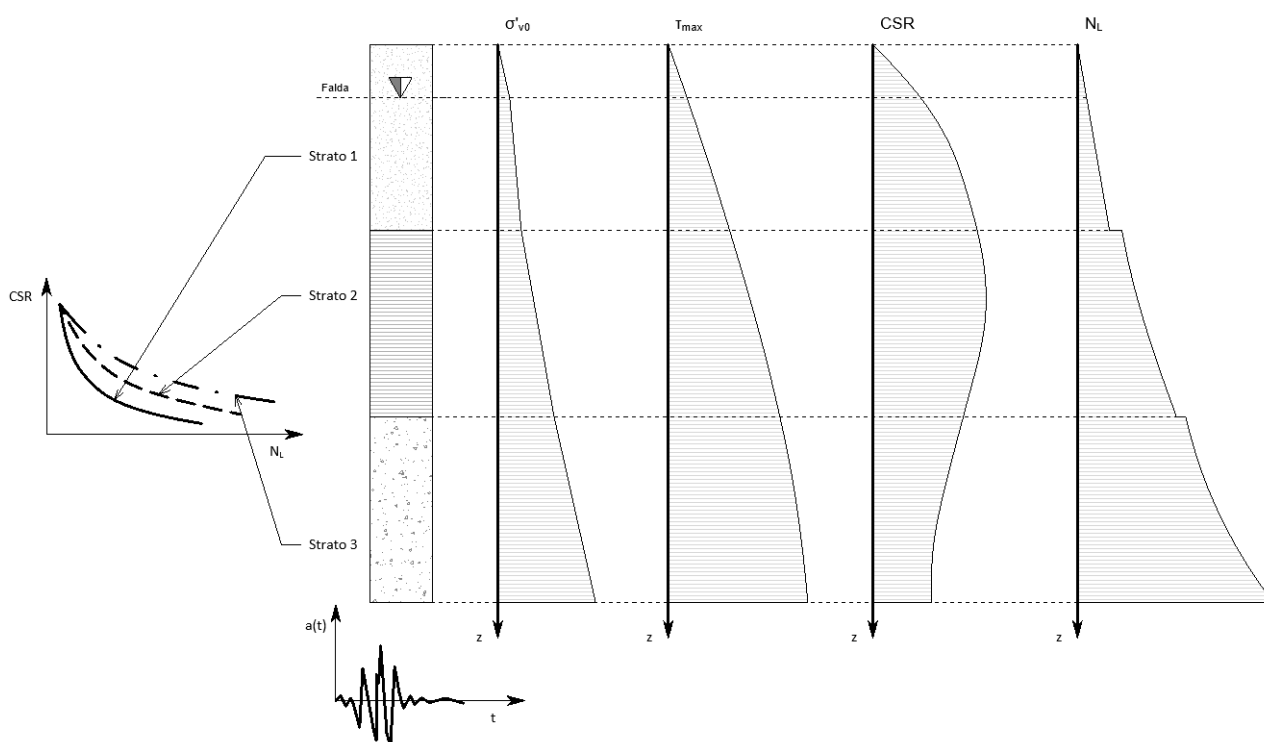


Figura 2. Schema monodimensionale per il calcolo del numero di cicli limite N_L lungo la verticale in funzione del CSR .

Una volta ottenuto il numero di cicli limite N_L il rapporto di sovrappressione ciclica r_u si ottiene mediante la determinazione del numero di cicli di carico N corrispondenti ad ogni singolo accelerogramma. In accordo con la normativa italiana, gli accelerogrammi applicati per un'analisi di risposta sismica locale saranno 7.

Ognuno di essi mostra una storia di carico di tipo irregolare, pertanto il numero di cicli di carico che si sta ricercando necessita una conversione dalla storia di carico irregolare ad un numero di cicli di carico che caratterizza la storia equivalente (carichi ciclici armonici). La procedura di conversione utilizzata dall'applicativo LIQUEFAZIONE è quella proposta da Biondi et al. (2012) e viene descritta nei prossimi paragrafi.

2.1 Rapporto di sovrappressione interstiziale

Per il calcolo delle sovrappressioni interstiziali, è stata considerata la formulazione di Seed et al. (1975):

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/\beta} - 1 \right] \quad (3)$$

dove:

- r_u : pressioni interstiziali residue normalizzate rispetto alla tensione iniziale efficace di confinamento;
- N : numero di cicli equivalenti;
- N_L : numero di cicli necessari per generare liquefazione;
- β : parametro empirico.

Quest'ultimo può essere calcolato mediante la seguente equazione proposta da Polito et al. (2008):

$$\beta = c_1 FC + c_2 D_r + c_3 CSR + c_4 \quad (4)$$

dove per frazione di fine $FC < 35\%$ i coefficienti della regressione assumono i seguenti valori:

$$c_1 = 0.01166; c_2 = 0.007397; c_3 = 0.01034; c_4 = 0.5058 \quad (5)$$

mentre per frazione di fine $FC \geq 35\%$ i coefficienti della regressione assumono questi altri valori:

$$c_1 = 0.002149; c_2 = -0.0009398; c_3 = 1.667; c_4 = 0.4285 \quad (6)$$

La densità relativa D_r è espressa in percentuale, mentre il rapporto di tensione di taglio CSR calcolato con un'analisi di risposta sismica locale.

La procedura di calcolo automatico prevede l'uso dell'equazione appena illustrata per il calcolo del rapporto di sovrappressione interstiziale r_u ottenendo il valore di N_L da opportune curve di resistenza al taglio ciclico $CSR - N_L$ misurate da prove di laboratorio ed il valore di N in funzione della storia temporale delle accelerazioni dell'evento sismico che si è analizzato nella risposta sismica locale.

2.2 Curve di resistenza al taglio

L'approccio numerico utilizzato si basa sull'uso di curve di resistenza al taglio che identificano il numero di cicli di carico per il raggiungimento della liquefazione dei depositi terrigeni, da sabbiosi a limosi. Tali curve, fondamentali per l'uso dell'applicativo, sono generalmente misurate in laboratorio mediante prove di taglio ciclico su campioni indisturbati.

Le curve $CSR - N_L$ dovrebbero essere misurate in laboratorio sui campioni prelevati nei siti oggetto di simulazione numerica in chiave di liquefazione, tuttavia nella pratica professionale, tali prove non sempre sono disponibili, per varie ragioni, e vi è l'esigenza di ricorrere a delle curve di letteratura che si adattino, caso per caso, alle condizioni dei terreni ricadenti nel sito di studio.

All'interno del codice LIQUEFAZIONE sono state implementate curve $CSR - N_L$ raccolte da letteratura internazionale in un database integrato nell'applicativo. Tali curve potranno essere adattate alle diverse tipologie di terreno normalmente ricorrenti nei casi pratici. Esse rappresentano una preliminare alternativa alle prove di laboratorio per i professionisti che intendono ricorrere a questa procedura di analisi.



Ovviamente, il codice LIQUEFAZIONE consente agli utenti di implementare nuove cuve nel database. Tale database si suddivide essenzialmente per famiglie di curve, all'interno della stessa famiglia si trovano poi ulteriori sottotipi che variano in funzione della frazione di fine FC e della densità relativa DR .

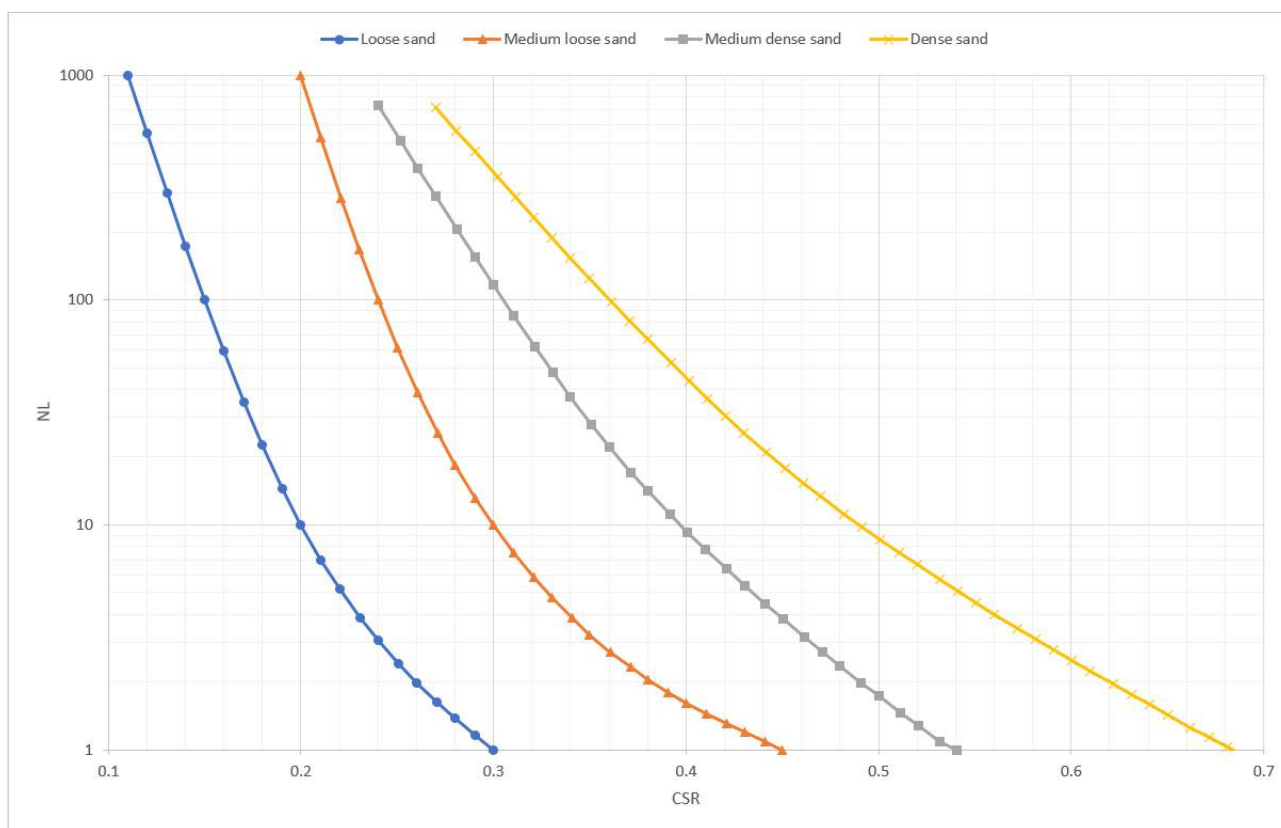


Figura 3. Curve di resistenza al taglio.

2.3 Numero di cicli di carico equivalenti N_{eq}

Il parametro N_{eq} è stato studiato da molti ricercatori sin dagli anni '60 (Seed e Idriss, 1967; Seed, 1968) nell'ambito di studi sul comportamento dei terreni granulari saturi sottoposti a storie di carico irregolari indotte da un evento sismico. La prima definizione di numero di cicli di carico equivalente è riconducibile al lavoro di Lee e Chan (1972) che definiscono N_{eq} come il numero dei cicli di carico "uniformi" (regolari) di tensioni tangenziali τ_{av} applicati ad un provino di terreno in laboratorio, tali da generare un effetto equivalente in termine di risposta tensionale o deformativa a quello indotto da una storia temporale sismica irregolare. Nel passato, a partire da questa definizione, diversi autori hanno proposto relazioni tra il N_{eq} e la Magnitudo, tra queste vi è la relazione proposta da Idriss (1999), illustrata in figura 3, che rappresenta un aggiornamento di una relazione precedentemente proposta.

M_w	N_0 cicli eq.	Durata (sec)
5.5 – 6	5	8
6.5	8	14
7	12	20
7.5	20	40
8	30	60

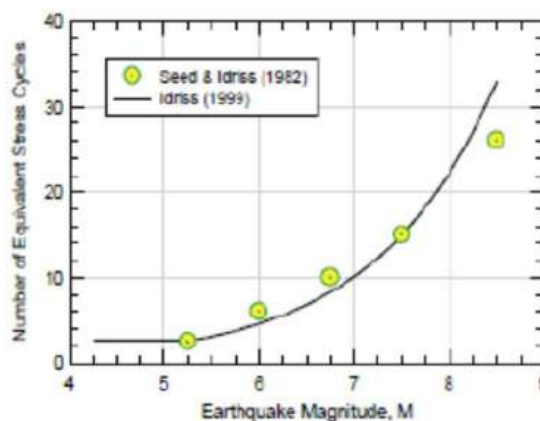


Figura 4. Numero di cicli equivalenti per Magnitudo dell'evento (da Idriss 1999).

Una più recente metodologia, ed implementata all'interno del modulo LIQUEFAZIONE, è quella proposta da Biondi et al. (2012).

Quest'ultima procedura di conversione, fa uso di risultati di prove cicliche di laboratorio descritti in termini di curve di resistenza alla liquefazione generalmente rappresentate nel piano $CSR - N_L$ e descritte mediante la seguente equazione:

$$\frac{CSR}{CSR_{N=15}} = \beta(N_L)^{-m} \quad (7)$$

in cui il rapporto di resistenza ciclica viene normalizzato rispetto al valore corrispondente ad un numero di cicli pari a $N_L = 15$.

Presi due punti A e B della curva, l'equazione (7) consente di scrivere:

$$CSR_A(N_{L,A})^m = CSR_B(N_{L,B})^m \quad (8)$$

Normalizzando la curva rispetto ad un valore arbitrario di riferimento CSR_R al quale corrisponde il valore $N_{L,R}$ e lo si fa coincidere con il punto B, l'equazione (8) diviene:



$$CSR_A = CSR_R \left(\frac{N_{L,R}}{N_{L,A}} \right)^m \quad (9)$$

Da cui ne consegue che un generico ciclo di carico di ampiezza CSR_A può essere convertito in $W_{f,A}$ cicli equivalenti di ampiezza CSR_R , purché sia:

$$W_{f,A} = \frac{N_{L,R}}{N_{L,A}} \quad (10)$$

dove il coefficiente $W_{f,A}$ è un fattore di conversione delle ampiezze dei cicli di carico che consente di definire una curva di conversione. Si osservi la figura 4-b in cui al rapporto tensionale $CSR_Y/CSR_{N=1}$ relativo all'Y-esimo ciclo di ampiezza CSR_Y corrisponda il fattore di conversione $W_{f,Y}$. Cumulando tale rapporto per tutti i k cicli da convertire, la storia di carico equivalente risulta composta da un numero di cicli pari a:

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^k \frac{N_{L,R}}{N_{L,i}} \quad (11)$$

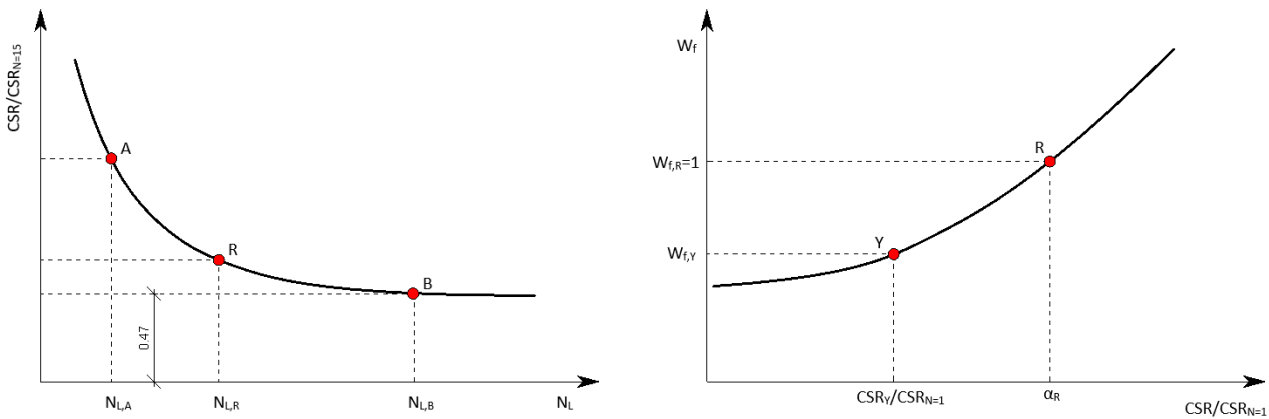


Figura 5. Schema per la definizione del criterio di conversione dei cicli di carico.

Sebbene i k contributi dell'equazione (11) dovrebbero comprendere tutti i cicli di carico della storia irregolare da convertire, dato l'andamento decrescente del fattore di conversione $W_{f,A}$ con il rapporto di resistenza ciclica, vi è una soglia del valore di tale rapporto oltre la quale i contributi risultano trascurabili. In tale procedura di conversione, pertanto, vengono selezionati degli emicicli positivi e negativi al di sopra di una certa soglia, funzione delle curve di resistenza al taglio, che contribuiscono al calcolo del valore del numero di cicli equivalenti N_{eq} .

È utile osservare che nell'applicare tale procedura di conversione direttamente sulle storie temporali dell'accelerazione si assume che il rapporto CSR/CSR_{max} , tra l'ampiezza del generico ciclo di carico da convertire e la massima ampiezza che caratterizza l'intera storia, viene assunto pari al corrispondente rapporto a/a_{max} . In altre parole si assume una proporzionalità diretta tra la storia delle tensioni di taglio indotte dal sisma e la storia delle accelerazioni sismiche in superficie.

2.4 Individuazione di strati potenzialmente liquefacibili

Noti N ed N_L si procede a calcolare il rapporto di sovrappressione interstiziale mediante l'equazione (3) da cui è possibile ottenere la sovrappressione interstiziale dalla seguente equazione:

$$\Delta u = r_u \cdot \sigma_{z,statico} \quad (12)$$

Quando $r_u = 1$, la tensione effettiva di confinamento si annulla innescando, la liquefazione. Si osservi che il valore unitario del rapporto di sovrappressione interstiziale rappresenta una condizione ideale, pertanto valori già prossimi a 0.9 rappresentano una condizione altamente pericolosa.

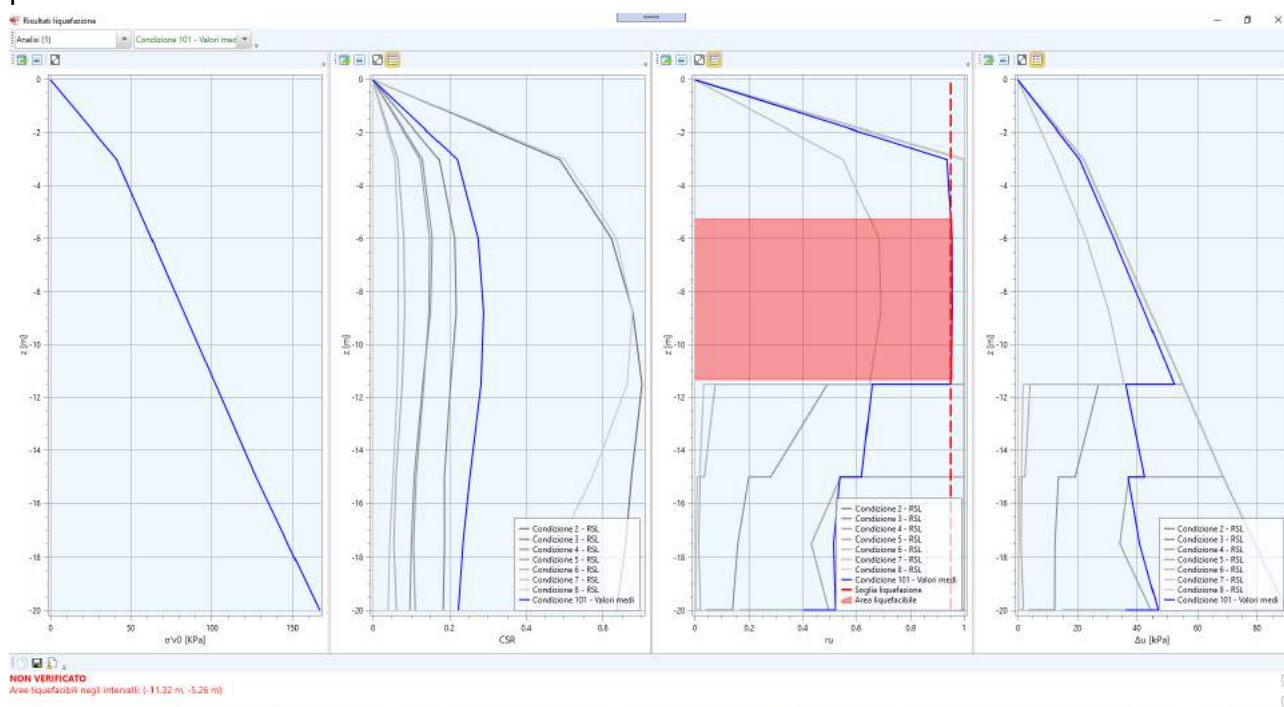


Figura 6. Interfaccia di verifica del sw e variazione del rapporto di sovrappressione interstiziale con la profondità.

3. Guida all'uso

In questo capitolo vengono illustrate le principali funzioni del software LIQUEFAZIONE.

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 7 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 alla rappresentazione grafica della stratigrafia e del livello di falda;
5. Tabella delle proprietà generali del modello;
6. Tabella contenente i parametri dei singoli strati;
7. Visualizzatore messaggi ed errori.

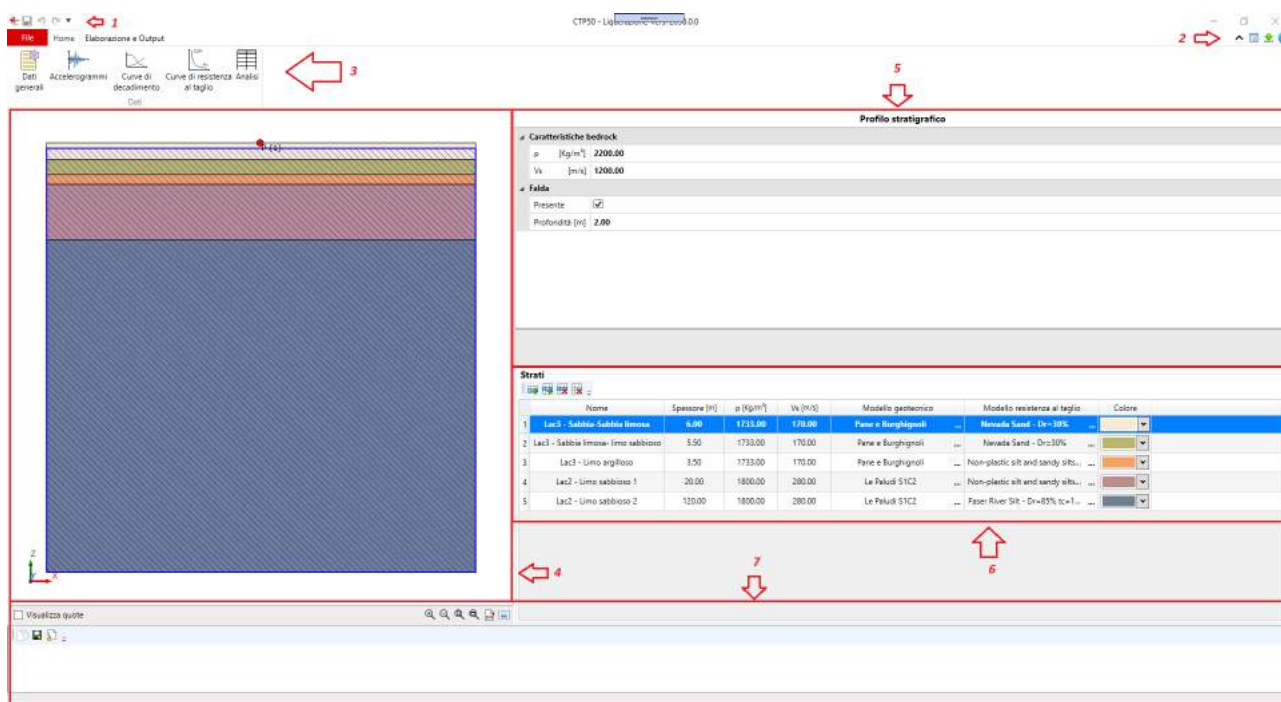









Figura 7. Interfaccia principale di LIQUEFAZIONE.

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 8).

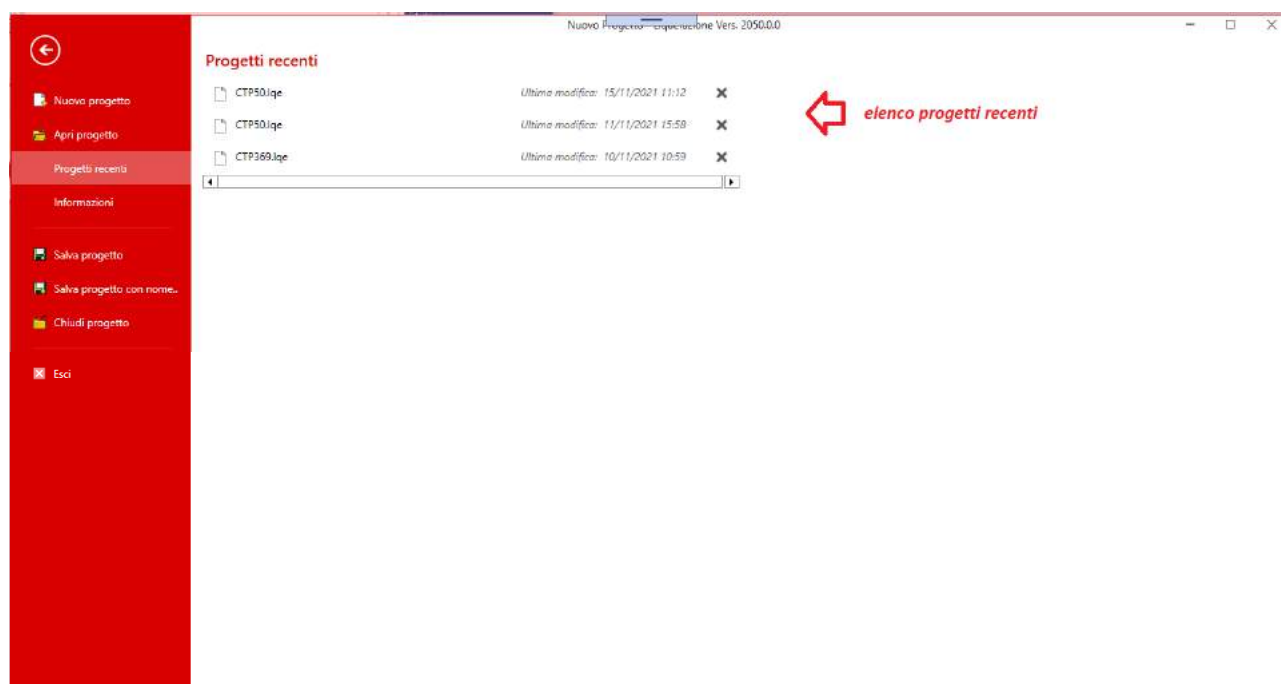


Figura 8. Gestione progetti recenti.






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 9. Gruppo di comandi "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.

3.2.3 Elaborazione e Output

Gruppo di comandi per la gestione dell'elaborazione e della visualizzazione dei risultati:

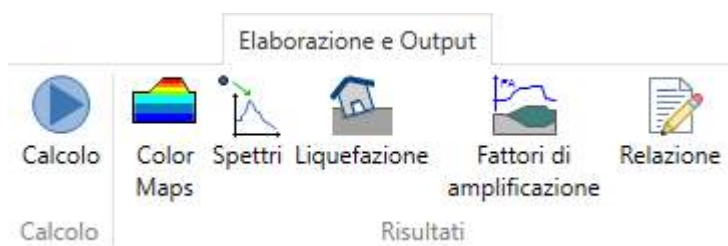








Figura 10. Gruppo di comandi "Elaborazione e Output".

In dettaglio:


-  Comando "Calcolo": avvia il processo di analisi;
-  Comando "Color Maps": avvia la finestra contenente il plot dei risultati delle analisi;

-  Comando “*Spettri*”: avvia la finestra contenente i risultati delle analisi di risposta sismica locale in termini di storie temporali e spettri di risposta;
-  Comando “*Liquefazione*”: avvia la finestra contenente i risultati delle verifiche di liquefazione;
-  Comando “*Fattori di amplificazione*”: avvia la finestra contenente i risultati delle analisi di risposta sismica locale in termini di fattori di amplificazione;
-  Comando “*Relazione*”: avvia la finestra di gestione/generazione della relazione di calcolo.

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;

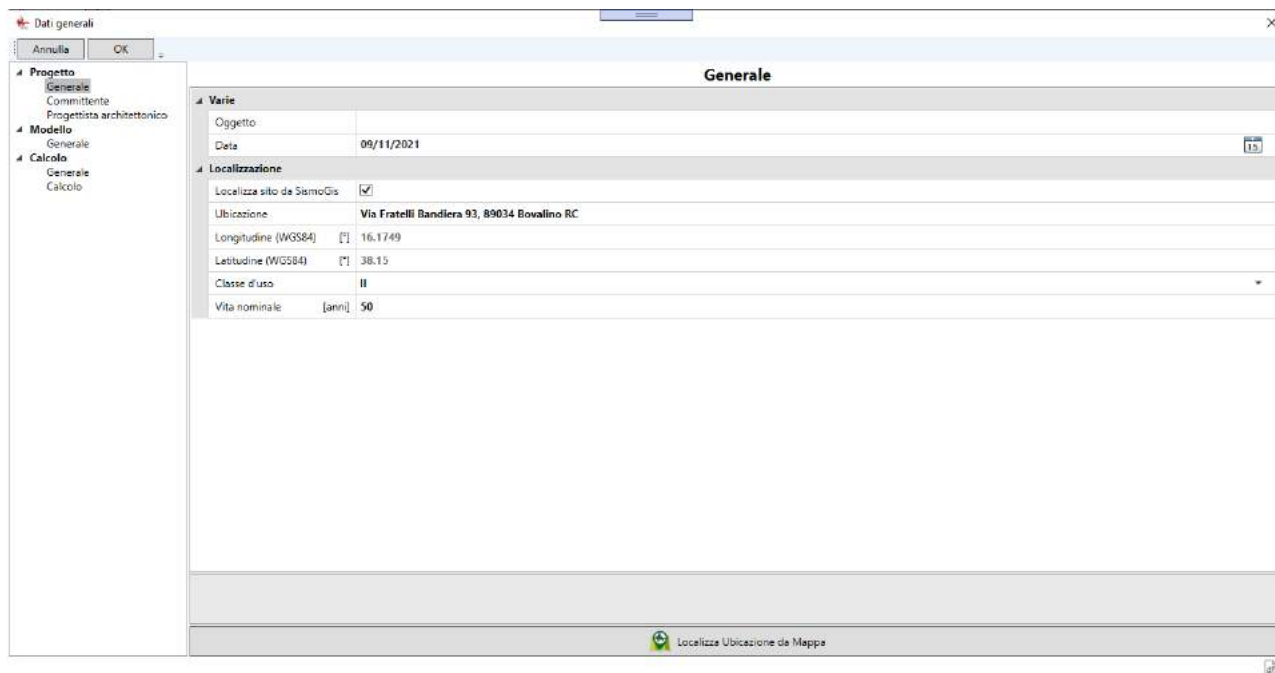


Figura 11. Compilazione delle informazioni relative al progetto nell’editor dei dati generali.

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

Modello

Si tratta di informazioni relative alla generazione del modello di calcolo di risposta sismica locale ed in particolare:

- *Ottimizza passo mesh*: se attivo, fa variare lungo la stratigrafia il passo degli elementi finiti della griglia di calcolo in funzione della velocità di propagazione delle onde di taglio secondo la nota regola $p = V_s/160$;
- *Passo*: specifica la dimensione della griglia di calcolo (mesh); se è attivo il flag “*ottimizza passo mesh*” il campo “*passo*” viene nascosto perché gestito in automatico dal software.



Figura 12. Dati relativi alla generazione della griglia di calcolo (mesh).

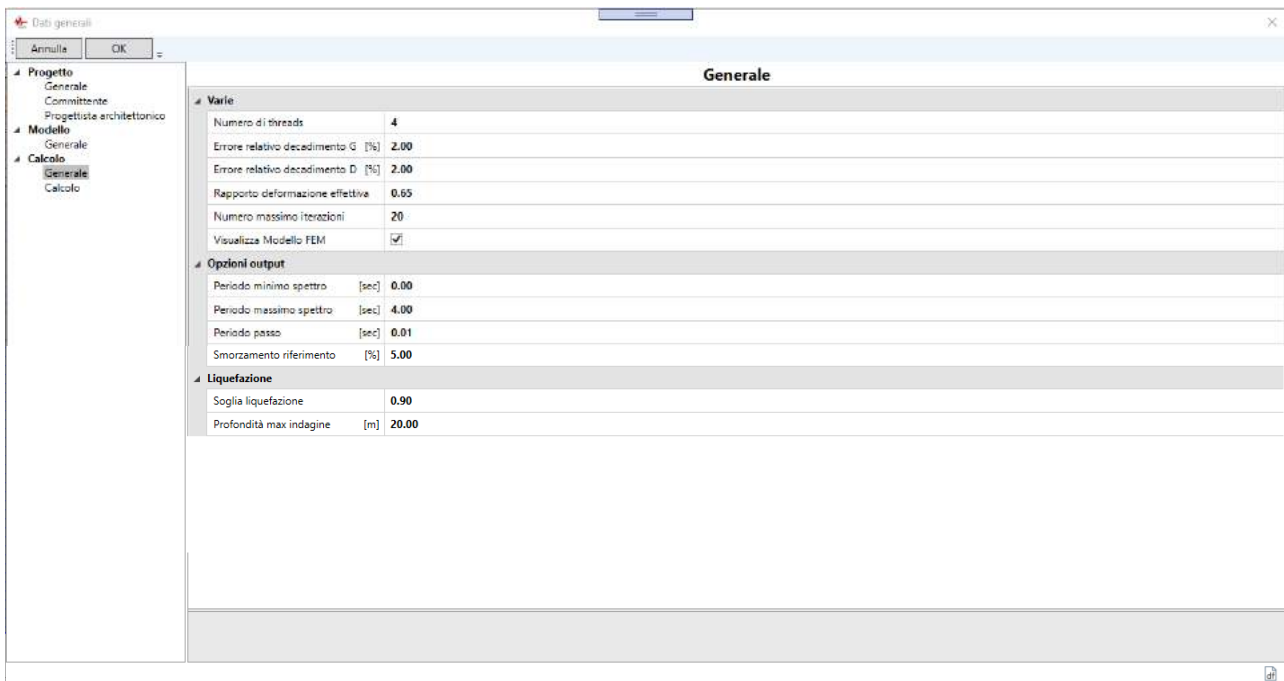
Calcolo

Si tratta di relativi alla procedura di analisi di risposta sismica locale e di verifica alla liquefazione. 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.



Generale	
Varie	
Numero di threads	4
Errore relativo decadimento G [%]	2.00
Errore relativo decadimento D [%]	2.00
Rapporto deformazione effettiva	0.65
Numero massimo iterazioni	20
Visualizza Modello FEM	<input checked="" type="checkbox"/>
Opzioni output	
Periodo minimo spettro [sec]	0.00
Periodo massimo spettro [sec]	4.00
Periodo passo [sec]	0.01
Smorzamento riferimento [%]	5.00
Liquefazione	
Soglia liquefazione	0.90
Profondità max indagine [m]	20.00

Figura 13. Parametri di calcolo di tipo generale.

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 14**). Di seguito vengono illustrati i principali comandi di gestione.

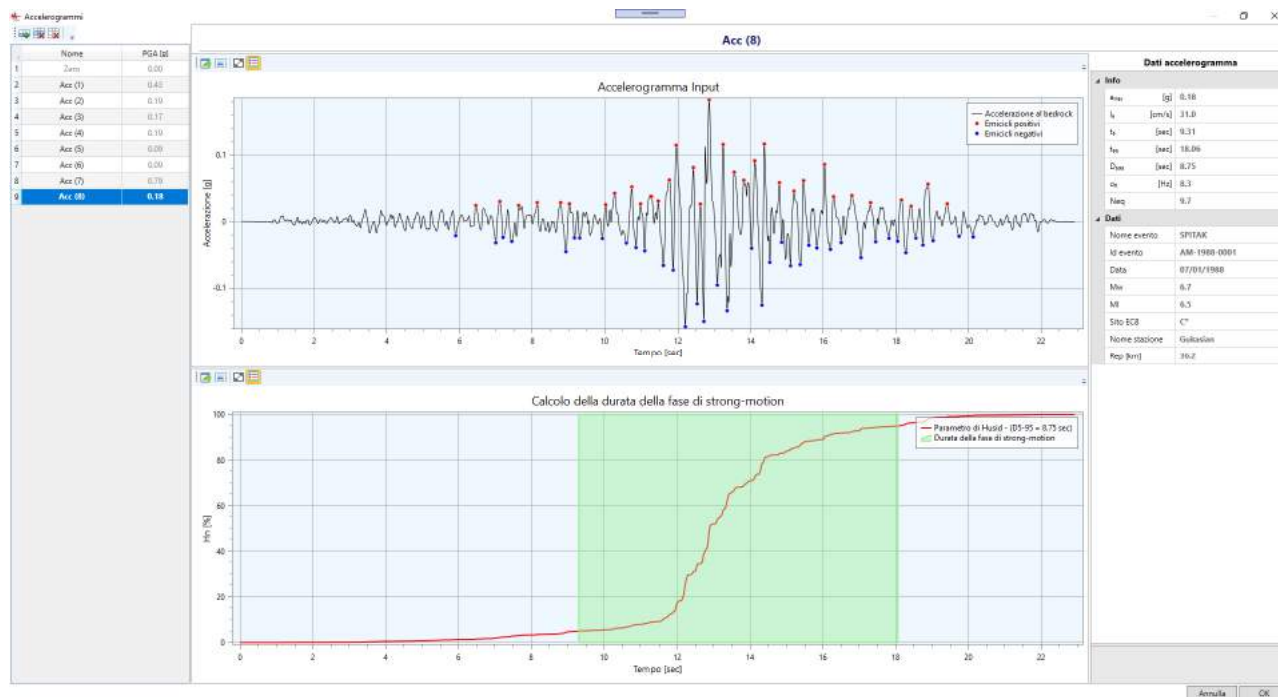



Figura 14. Editor degli accelerogrammi di input del progetto.

Inserimento di una nuova settupla di accelerogrammi

Mediante il comando “Inserisci accelerogramma” , posto in alto a sinistra, viene visualizzata l’interfaccia di **Figura 15** in cui vengono richieste le unità di misura con cui gli accelerogrammi sono riportati nel file che si intende leggere.

Parametri importazione ✕

Scegliere i parametri da utilizzare per l'importazione

Accelerazione g

Tempo mm/s²

☐ Freq Cut-Off [Hz]

g

Annulla OK

Figura 15. Scelta dei parametri di importazione degli accelerogrammi.

A questo punto mediante l'interfaccia di **Figura 16** 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).

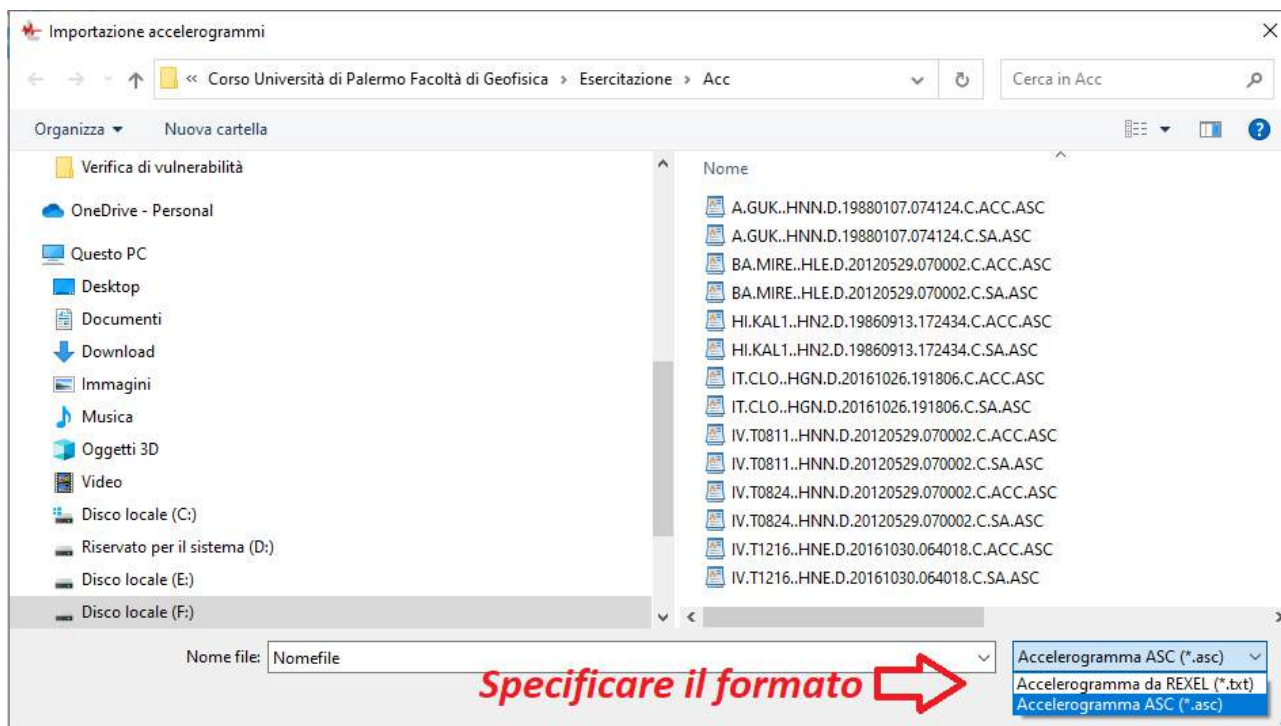


Figura 16. Selezione dei files e del tipo di formato da importare.

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;

File	Modifica	Formato	Visualizza	?
0		-6.04391450237017E-03		
0.01		-7.88786707737017E-03		
0.02		-4.80030366685242E-03		
0.03		1.74595632415731E-03		
0.04		7.07036808540579E-03		
0.05		1.96750538377091E-02		
0.06		4.43698098370805E-02		
0.07		0.038292862563394		
0.08		2.46451917104423E-02		
0.09		3.50460921472404E-03		
9.999999E-02		1.40729358780663E-02		
0.11		1.49979268506286E-03		
0.12		-3.01576200057752E-02		
0.13		-0.018871849689167		
0.14		-4.58553589275107E-02		
0.15		-1.01658389414661E-02		
0.16		8.91116750368383E-03		

Figura 17. 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 18**) 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.

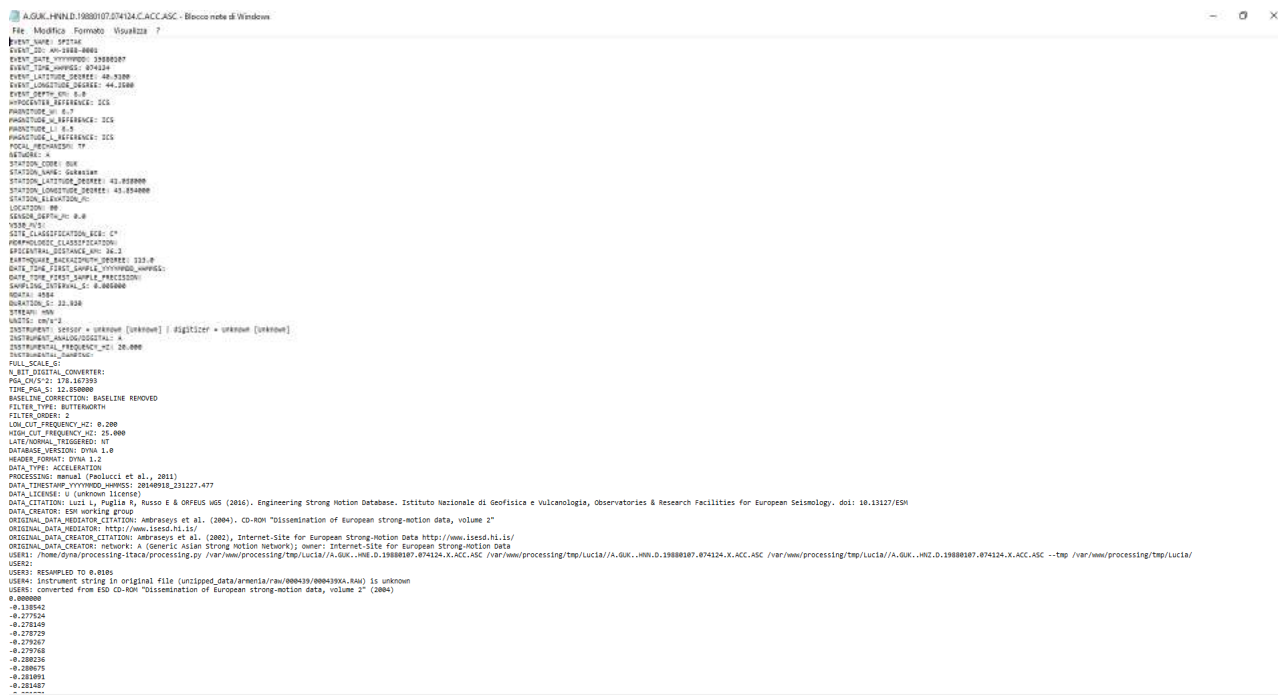


Figura 18. File di testo fornito dall'applicativo REXEL lite.

Una volta importato un certo numero di accelerogrammi, se l'operazione è andata a buon fine e non si sono verificati errori di lettura, sarà presente una tabella simile a quella di **Figura 19**. In cui è possibile rinominare il singolo accelerogramma oltre a visualizzare il corrispondente valore di PGA (accelerazione di picco) in frazione di g.

	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 19. Tabella accelerogrammi importati.

Cliccando sui numeri progressivi della tabella di **Figura 19** è possibile selezionare il singolo accelerogramma e per esso visualizzare (**Figura 20**) 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 §2.3.

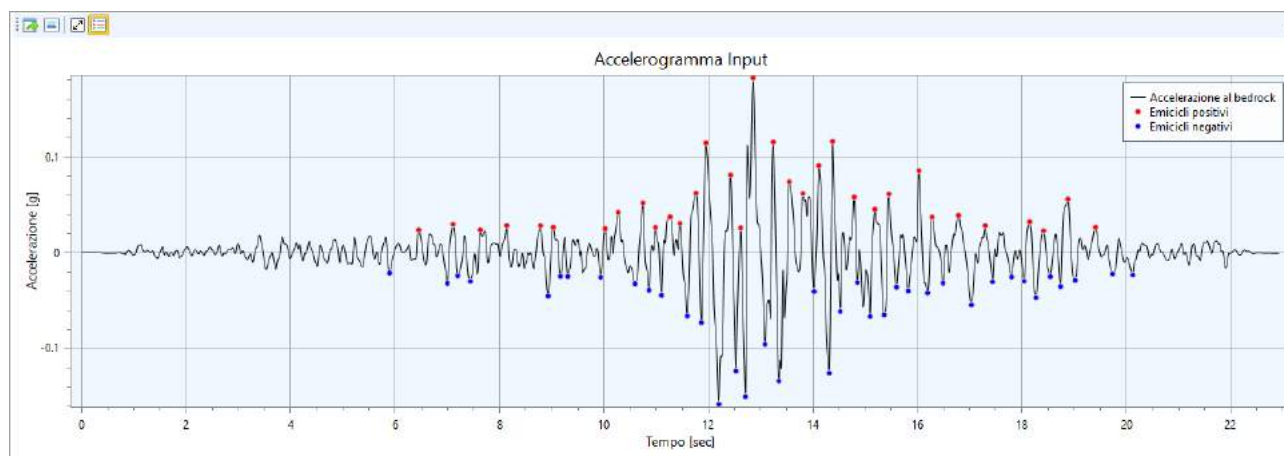


Figura 20. Visualizzazione storia temporale dell'accelerazione al suolo.

Per il singolo accelerogramma il software calcola l'andamento del parametro di Husid con il tempo (**Figura 21**), 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.

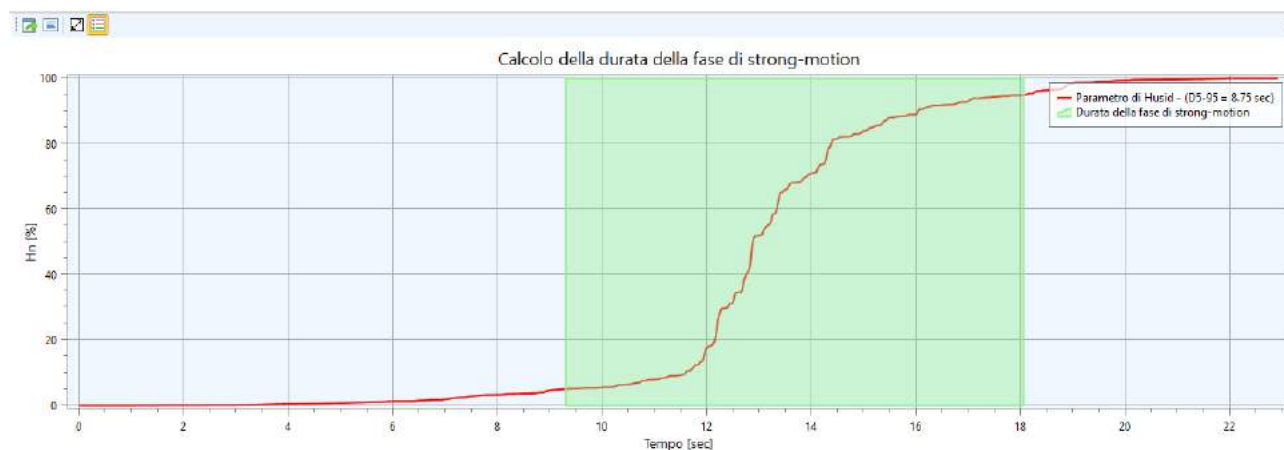


Figura 21. Parametro di Husid.

I dati relativi al singolo accelerogramma vengono riportati nella tabella riportata in **Figura 22**; 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;
- v_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_{95}	[sec]	8.75
v_0	[Hz]	8.3
N_{eq}		9.7
▲ Dati		
Nome evento	SPITAK	
Id evento	AM-1988-0001	
Data	07/01/1988	
Mw	6.7	
MI	6.5	
Sito EC8	C*	
Nome stazione	Gukasian	
Rep [km]	36.2	

Figura 22. 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 23**).

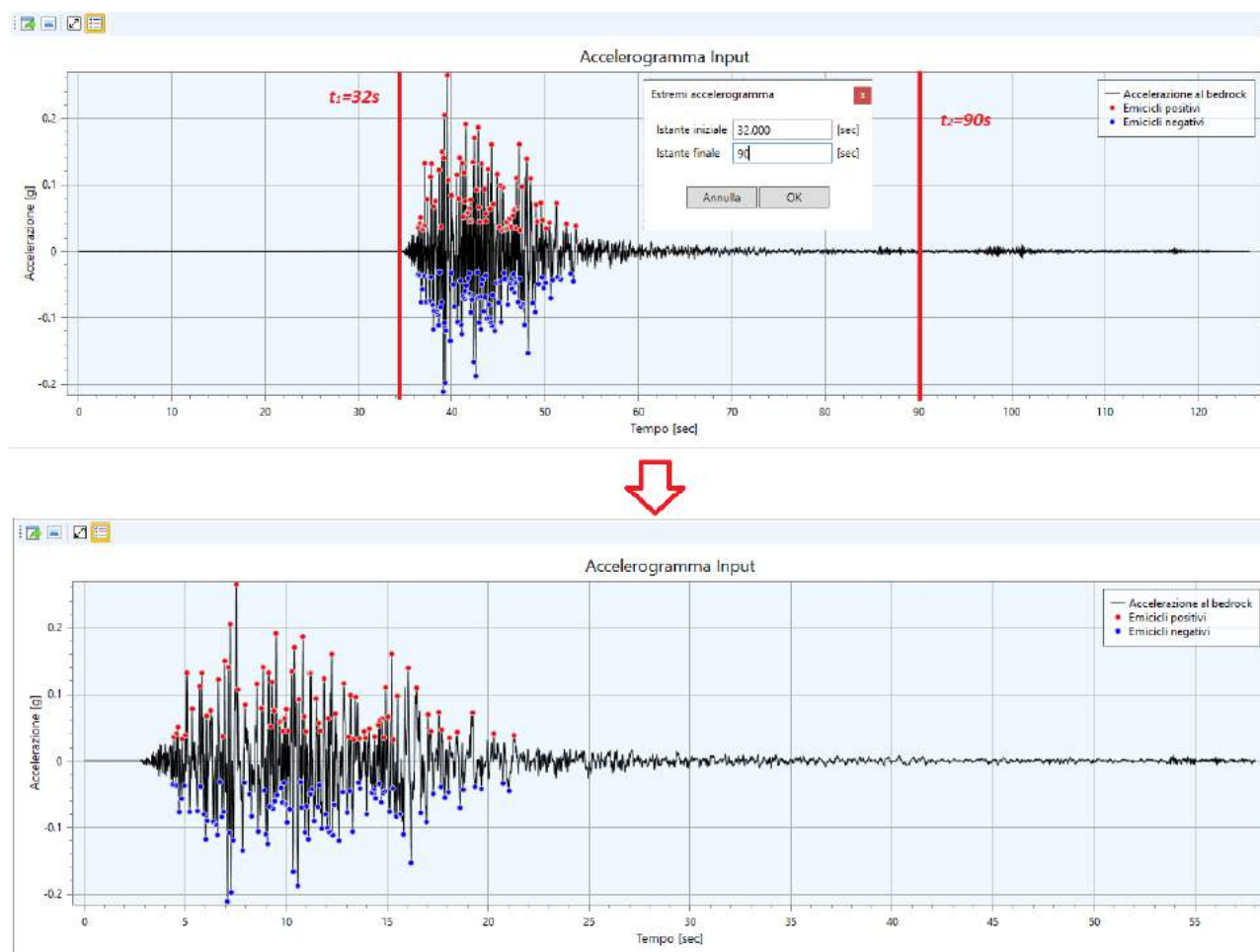


Figura 23. Procedura di taglio degli zeri di un accelerogramma.

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 24**.

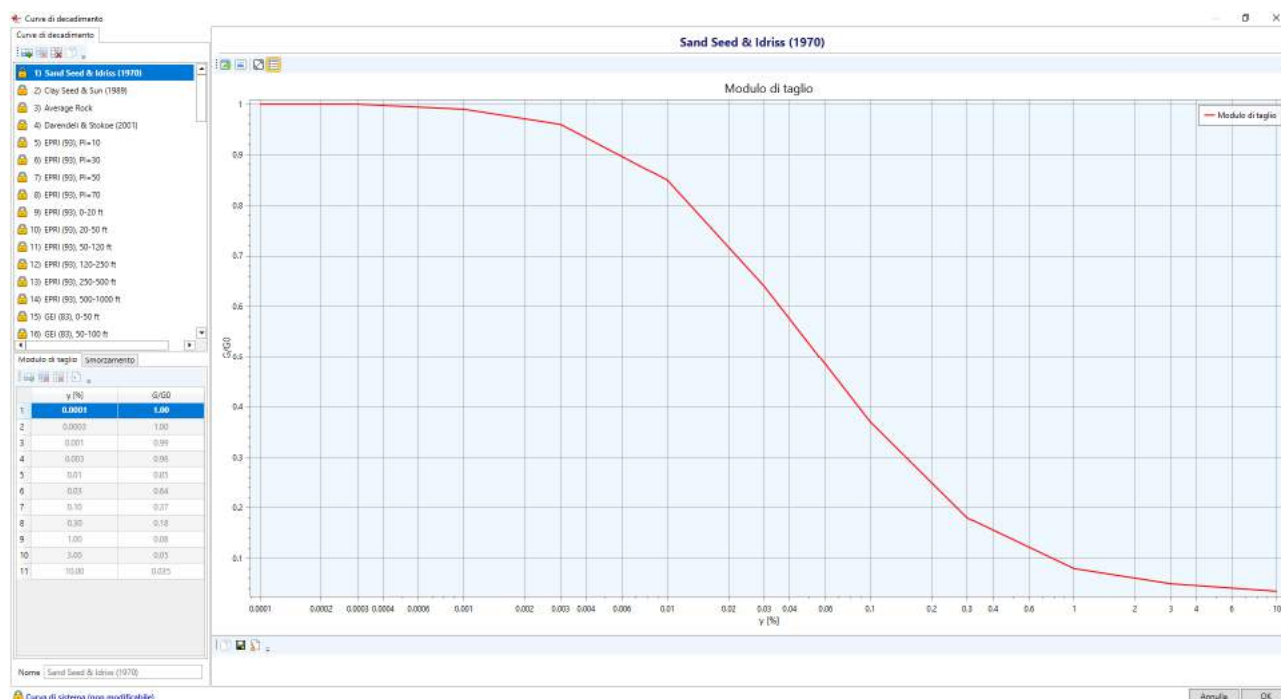




Figura 24. Editor delle curve di decadimento.

L'elenco delle curve di decadimento a disposizione dell'utente è riportato in alto a sinistra nella finestra principale (vedi **Figura 25**), 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.

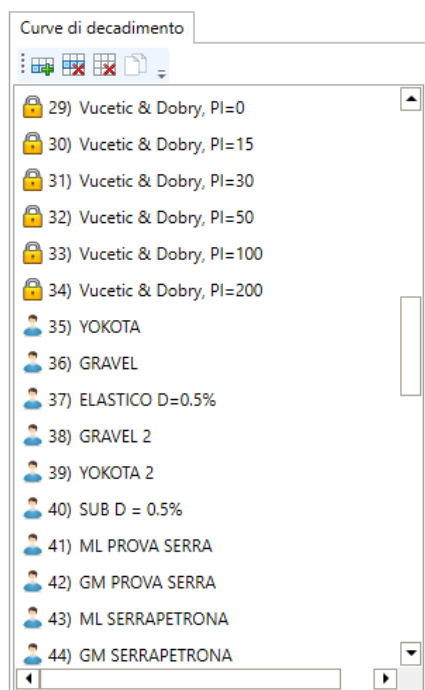





Figura 25. Elenco delle curve di decadimento disponibili.

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 26**), 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.

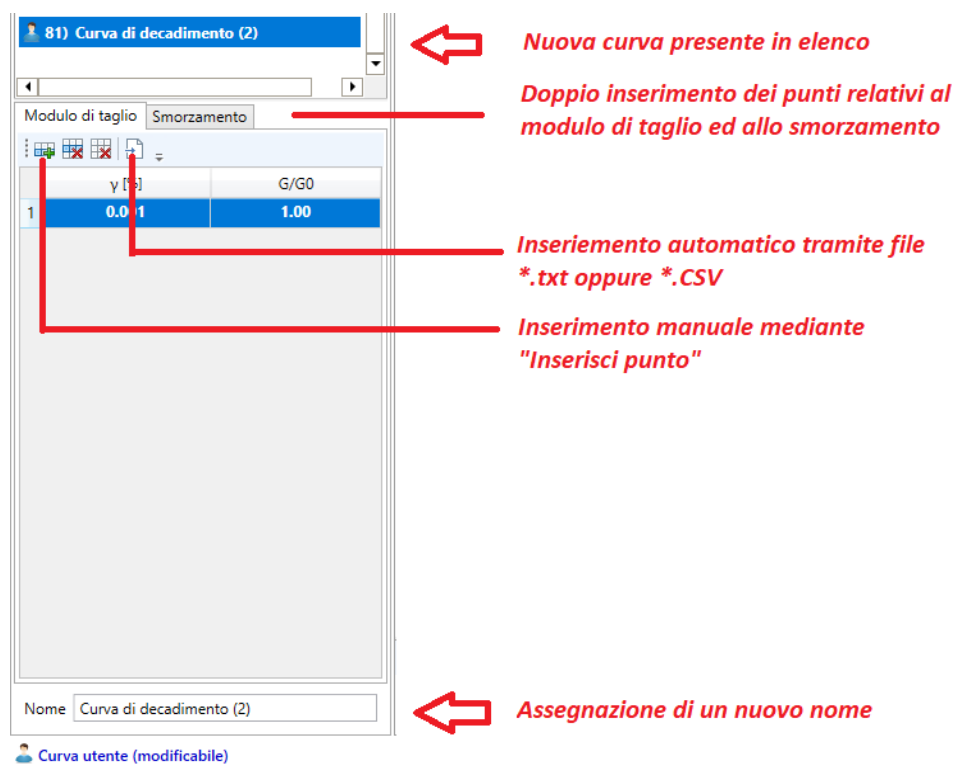


Figura 26. Inserimento di una nuova curva di decadimento.

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'utente dovrebbe osservare lo stato della generica iterazione all'interno dell'analisi disponibile nella finestra d'avanzamento del calcolo (vedi Figura 27) e qualora il valore di γ dovesse eccedere 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).

```


11:04:01 ----- Iterazione N: 3-----
11:04:01 Matrice di smorzamento proporzionale calcolata mediante le frequenze:
11:04:01 - f1 = 1.88 [rad/sec] - T1 = 0.53 [sec]
11:04:01 - f2 = 5.93 [rad/sec] - T2 = 0.17 [sec]
11:04:01 Stato convergenza lineare equivalente:
11:04:01 - Deformazione a taglio massima = 0.10 %
11:04:01 - Errore su G/Gmax = 3.86 %
11:04:01 - Errore su D = 6.08 %
11:04:01 -----
    
```

Figura 27. Livello di deformazione massimo per la singola iterazione all'interno dell'analisi corrente.



3.3.3 Editor delle curve di resistenza dei materiali

Il modello di analisi utilizzato dall'applicativo e descritto al §2.2 necessita 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 28**.

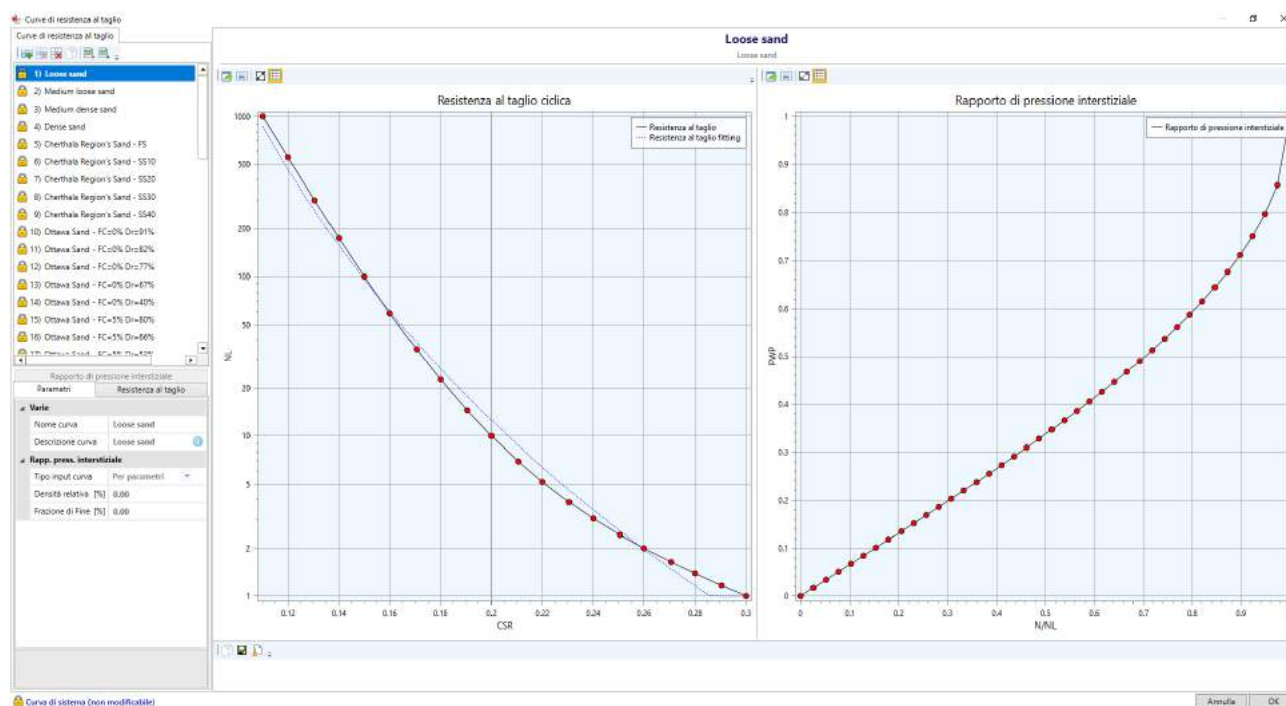





Figura 28. Editor delle curve di resistenza al taglio.

L'elenco delle curve di resistenza al taglio a disposizione dell'utente è riportato in alto a sinistra nella finestra principale (vedi **Figura 28**), 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.



Inserimento di una nuova curva di resistenza al taglio

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 29**), 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.

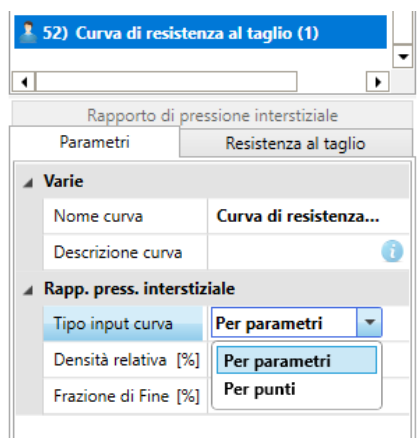
Per quest'ultimo la scelta può essere di due tipi:

- *"Per parametri"*: in questo caso il rapporto di sovrappressione interstiziale viene ottenuto secondo quanto illustrato al §2.1 e quindi viene chiesto 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.



← Nome della curva in elenco


Se "per parametri" è necessario specificare densità relativa e frazione di fine, se "per punti" è necessario fornire una curva che descrive il rapporto di sovrappressione interstiziale con il numero di cicli normalizzato

Figura 29. 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 30**).



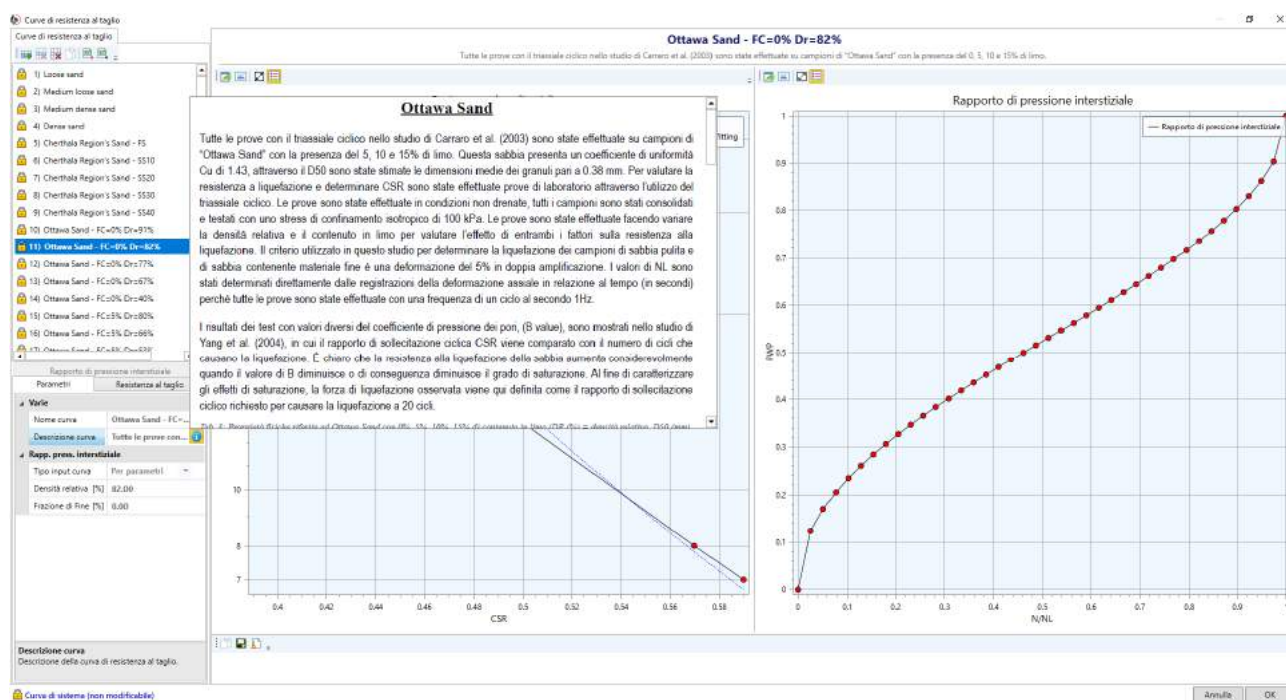



Figura 30. Informazioni relative alle curve di resistenza al taglio di sistema.

3.3.4 Editor delle analisi

Mediante il comando “Analisi”  è possibile accedere all’ambiente rappresentato in **Figura 31** che consente la definizione e la gestione delle analisi sismiche da effettuare sulla stratigrafia oggetto di studio per gli stati limite richiesti.

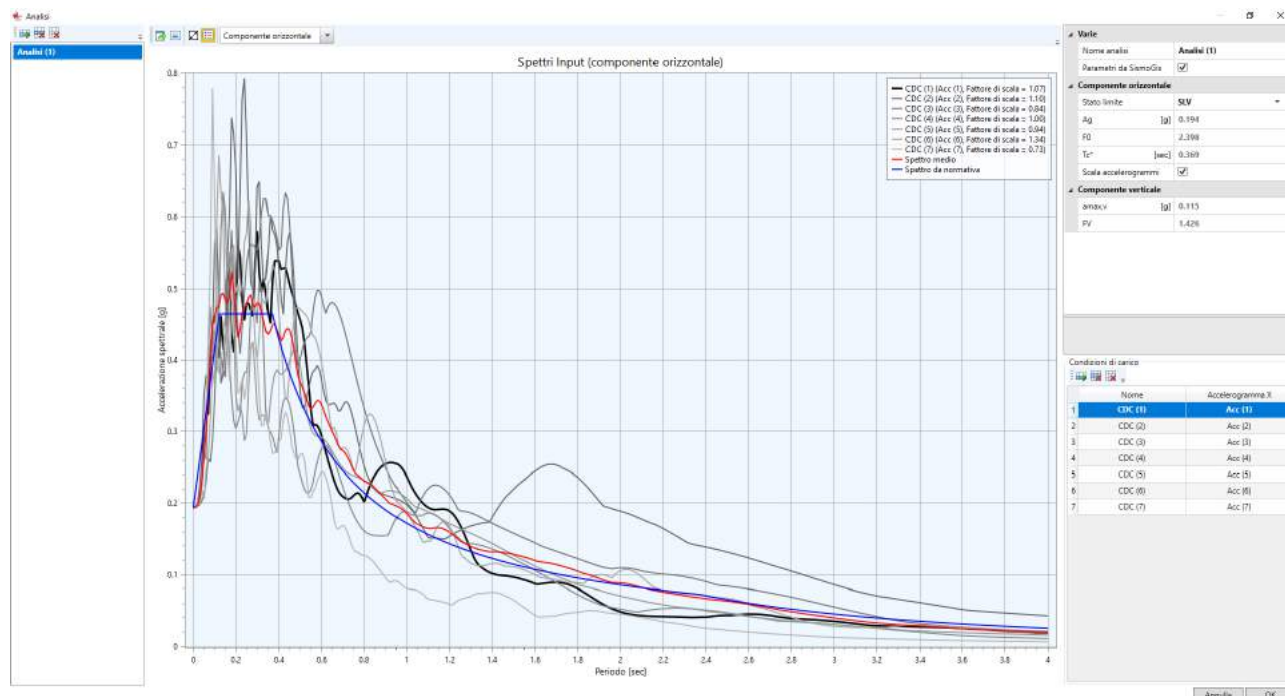



Figura 31. Editor delle analisi dirisposta sismica locale.

Inserimento di una nuova analisi

Mediante il comando “Inserisci una nuova analisi”  è possibile aggiungere all’elenco rappresentato in **Figura 32** una nuova analisi di risposta sismica locale relativa per esempio ad un particolare stato limite sismico secondo quanto previsto dalla normativa NTC18.

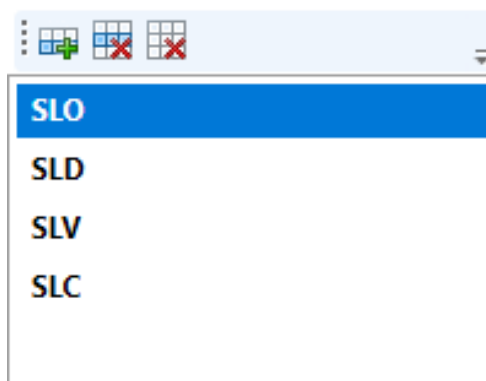


Figura 32. Elenco analisi di risposta sismica locale.

Per la singola analisi (vedi **Figura 33**) 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	<input checked="" type="checkbox"/>
▲ Componente orizzontale	
Stato limite	SLV ▼
Ag [g]	0.194
F0	2.398
Tc* [sec]	0.369
Scala accelerogrammi	<input type="checkbox"/>
▲ Componente verticale	
amax,v [g]	0.115
FV	1.426

Figura 33. 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 34** in cui è possibile osservare che nel caso di accelerogrammi non scalati i fattori di scala sono tutti pari all'unità.

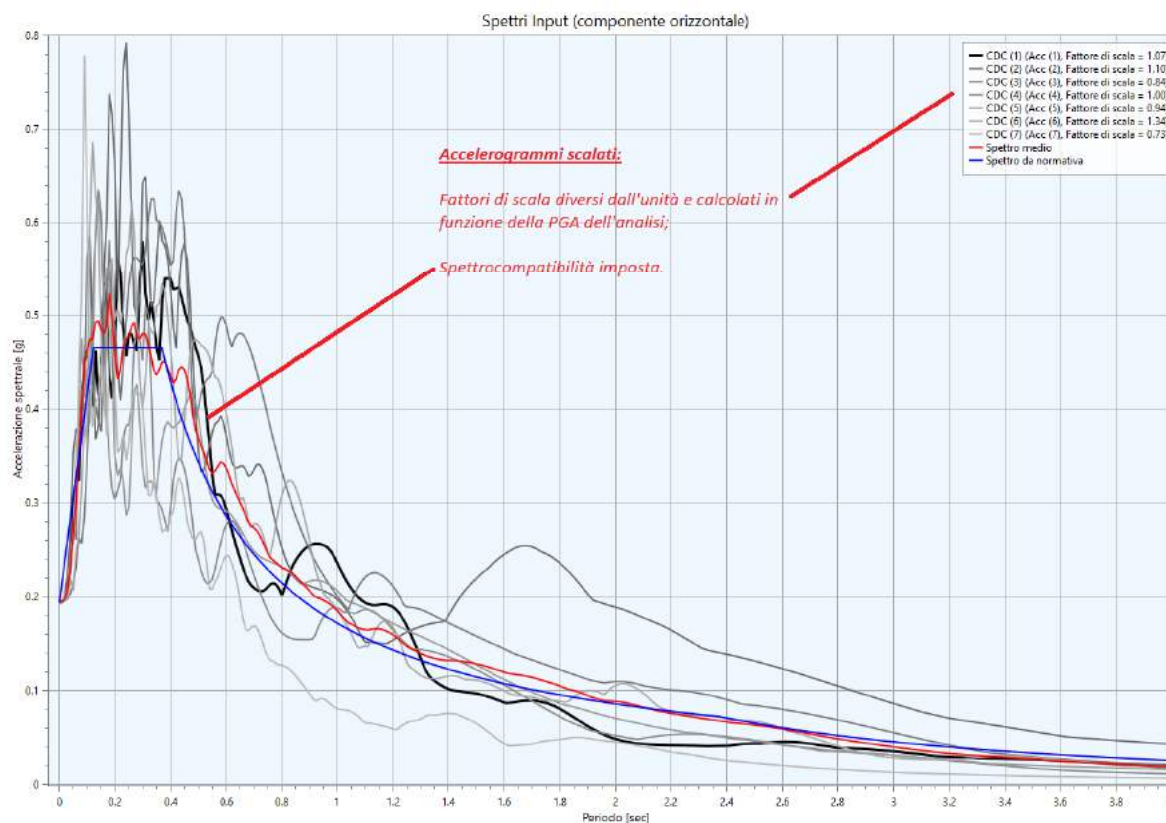
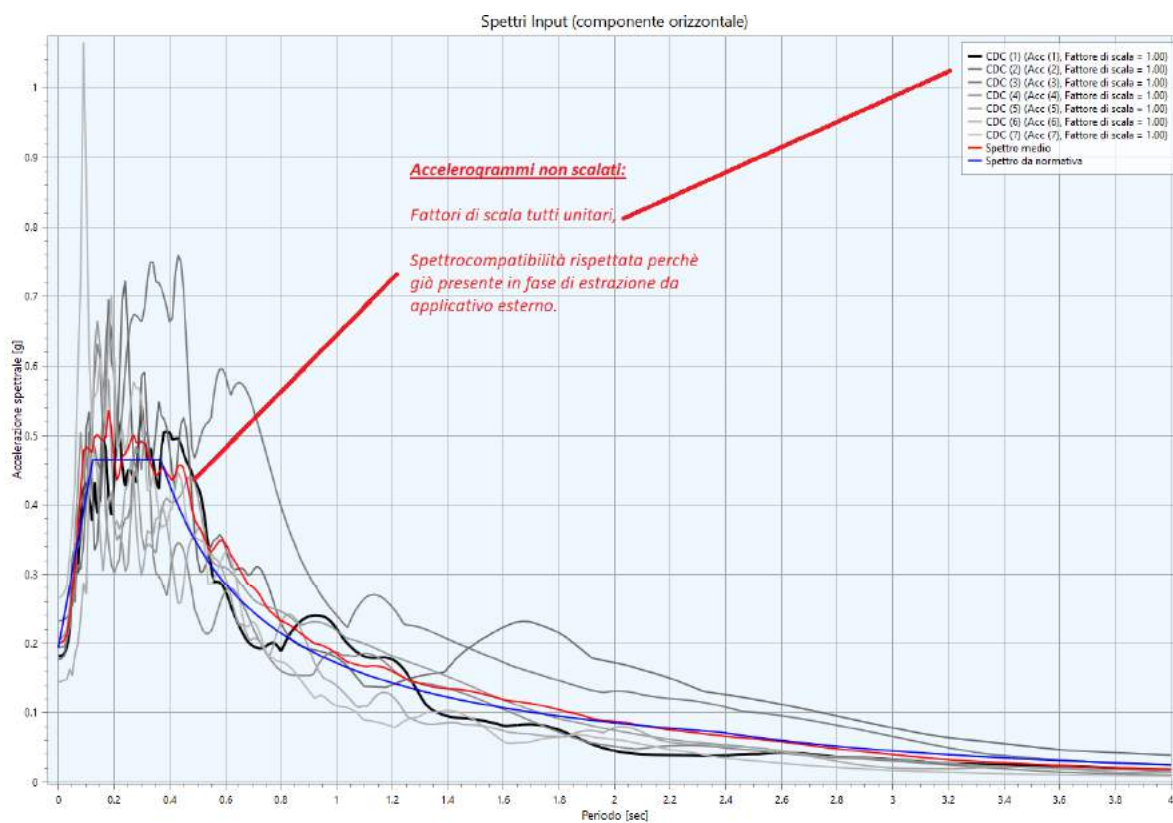




Figura 34. Differenza tra accelerogrammi scalati e non scalati.

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 35**) 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 interpretare i risultati mediante valori medi); per ognuna di esse viene specificato un accelerogramma precedentemente caricato nell'apposito editor in base al nome dello stesso.

Condizioni di carico



	Nome	Accelerogramma X
1	CDC (1)	Acc (1) ▼
2	CDC (2)	Zero
3	CDC (3)	Acc (1)
4	CDC (4)	Acc (2)
5	CDC (5)	Acc (3)
6	CDC (6)	Acc (4)
7	CDC (7)	Acc (5)
		Acc (6)
		Acc (7)

Figura 35. Associazione delle condizioni di carico per la singola analisi.

3.4 Inserimento del profilo stratigrafico

La verifica nei confronti della liquefazione mediante il metodo descritto nel precedente capitolo ed implementato nell'applicativo richiede la definizione di un profilo stratigrafico monodimensionale come sequenza di sismostrati dalla superficie verso la roccia madre, per ognuno di essi viene richiesto (vedi **Figura 36**):

- *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.

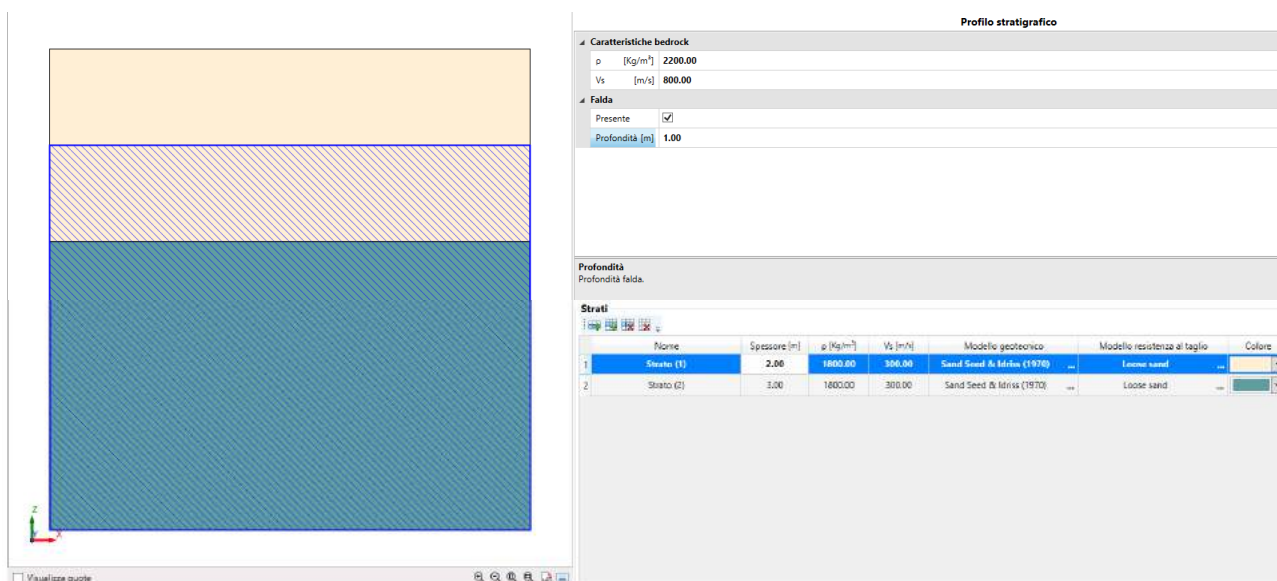


Figura 36. Inserimento stratigrafia.

Vengono inoltre richiesti (vedi **Figura 37**):

- Densità di massa del bedrock espressa in Kg/m^3 ;
- Velocità delle onde di taglio del bedrock espressa in m/s ;
- “Falda presente”: specifica se è presente la falda;
- Profondità della falda rispetto alla superficie.

Caratteristiche bedrock	
ρ [Kg/m ³]	2200.00
V_s [m/s]	800.00
Falda	
Presente	<input checked="" type="checkbox"/>
Profondità [m]	1.00


Figura 37. Parametri relativi al bedrock ed alla falda.



Dal punto di vista grafico nell'ambiente principale (vedi **Figura 36**) 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 Esecuzione delle analisi

Mediante il comando “Calcolo”  è possibile avviare l'esecuzione dell'analisi di risposta sismica locale e di liquefazione definite in precedenza per la sezione stratigrafica oggetto di studio. In **Figura 38** 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'avanzamento del processo di convergenza dell'algoritmo lineare equivalente. Di seguito verranno descritte nel dettaglio le informazioni fornite all'utente.

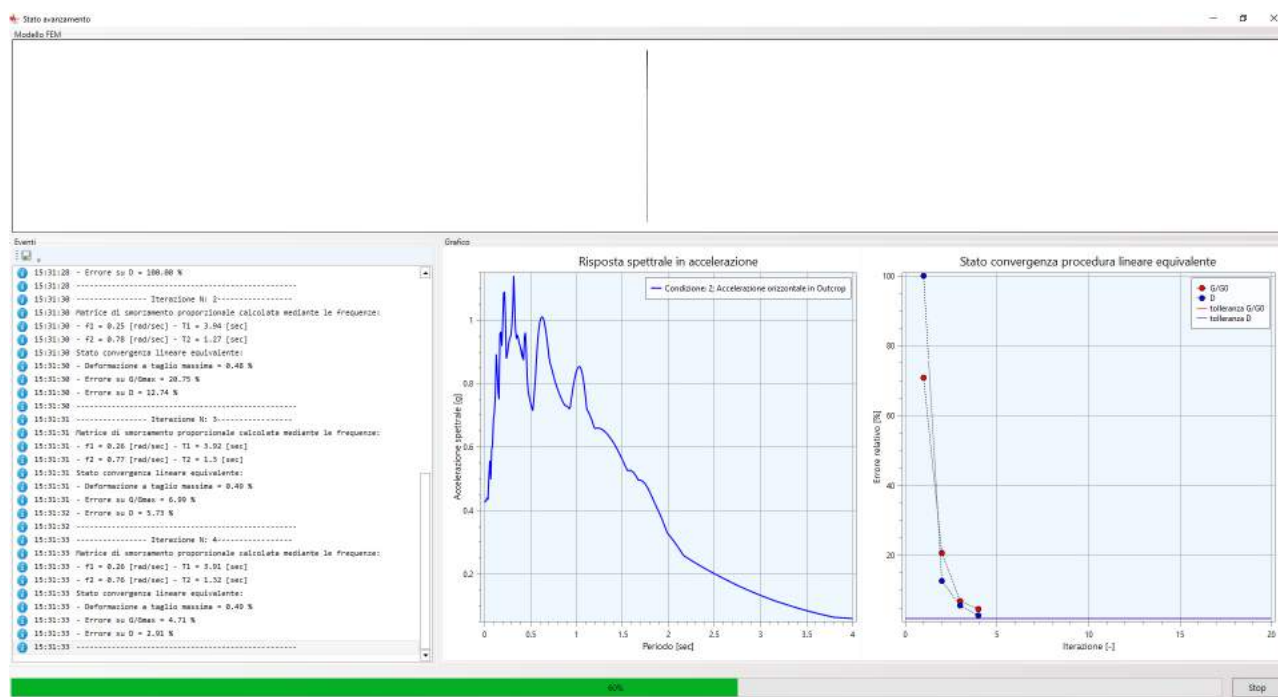


Figura 38. Finestra di avanzamento del calcolo.

Lista degli eventi

All'interno della finestra di avanzamento del calcolo (**Figura 38**) è presente un elenco di messaggi che aggiornano l'utente sullo stato delle analisi. Per come è possibile vedere dalla **Figura 39**, 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.

```

15:39:42 Pre-Process colonne di controllo
15:39:42 -----
15:39:42 Analisi azione di carico: 1/9 (ANALISI STATICA)
15:39:42 -----
15:39:42 Periodo naturale del deposito T0 = 1.06 [sec]
15:39:42 -----
15:39:42 Calcolo azione di carico completato con successo
15:39:42 -----
15:39:42 -----
15:39:42 Analisi azione di carico: 2/9 (ANALISI DINAMICA)
15:39:42 Numero di steps accelerogramma: 12001
15:39:44 ----- Iterazione N: 1-----
15:39:44 Matrice di smorzamento proporzionale calcolata mediante le frequenze:
15:39:44 - f1 = 0.45 [rad/sec] - T1 = 2.21 [sec]
15:39:44 - f2 = 1.34 [rad/sec] - T2 = 0.74 [sec]
15:39:44 Stato convergenza lineare equivalente:
15:39:44 - Deformazione a taglio massima = 0.37 %
15:39:44 - Errore su G/Gmax = 70.80 %
15:39:44 - Errore su D = 100.00 %
15:39:44 -----

```

Esecuzione di analisi preventive (statica ed agli autovalori)

I-esima analisi di risposta sismica locale con accelerogramma

Informazioni riguardanti la k-esima iterazione all'interno dell'i-esima analisi

Figura 39. Lista degli eventi durante le analisi.

Grafico degli spettri di risposta

All'interno della finestra di avanzamento del calcolo (Figura 38) 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 40. 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 38**) 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.

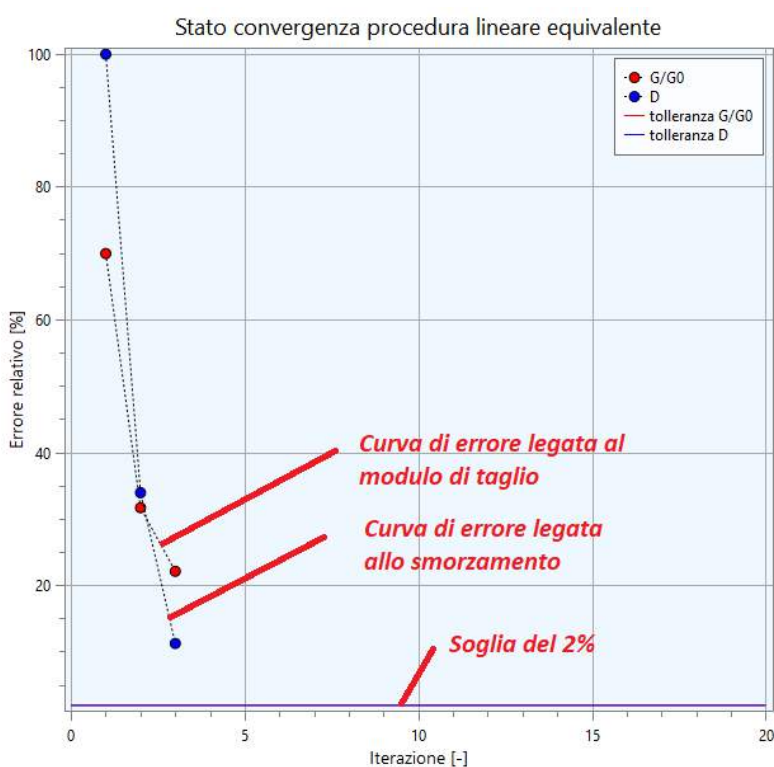


Figura 41. Stato di convergenza della procedura lineare equivalente.

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".

3.6 Output dei risultati

I risultati delle analisi forniti dall'applicativo riguardano:

- La risposta sismica locale;
- La liquefazione associata alla risposta sismica locale.

Per quanto riguarda la risposta sismica locale i risultati 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 elemento finito durante la ricerca della convergenza della procedura lineare equivalente.


I valori massimi possono essere rappresentati mediante:

- Colormaps su tutto il dominio discretizzato;
- Come profilo lungo la verticale.

Per quanto riguarda la liquefazione oltre all'ambiente di verifica, che verrà illustrato in un paragrafo dedicato, è possibile visualizzare lungo la verticale:

- il rapporto di sovrappressioni interstiziale;
- l'incremento di sovrappressioni Δu ;
- la tensionale verticale efficace.

3.6.1 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 42**). 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. 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 controllata utilizzando il penultimo menù.

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

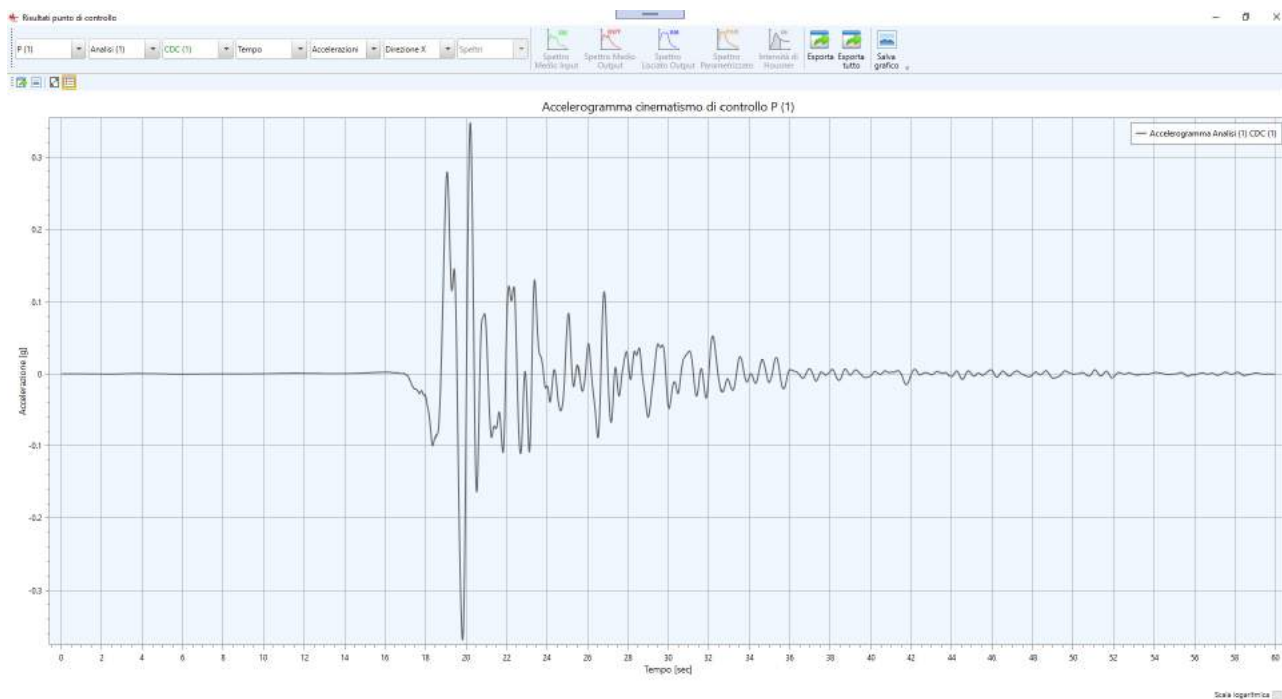


Figura 42. Ambiente di visualizzazione dei risultati sul punto di controllo posto in superficie.

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 43**) di specificare, la curva da esportare (identificandola con un nome visibile nella legenda del grafico), il tipo di formato, l’unità di misura.

Figura 43. 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 descrivono lo spettro di risposta medio relativo ad una particolare analisi dovrà seguire la procedura illustrata in **Figura 44**. 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”.

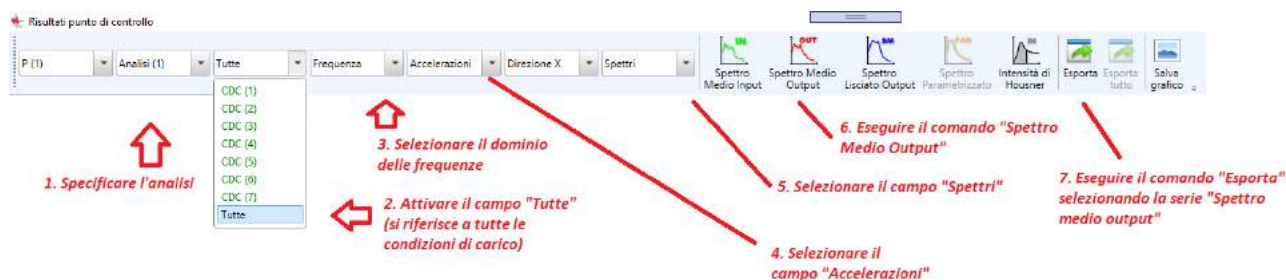


Figura 44. Procedura di esportazione dello spettro medio per punti.

3.6.2 Regularizzazione dello spettro medio di Output

La procedura di regularizzazione, 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 regularizzazione, 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 oggetto di studio;

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

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

Di seguito i passi dell'algoritmo di regularizzazione:



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 45** e cliccare sul pulsante "Parametrizza".

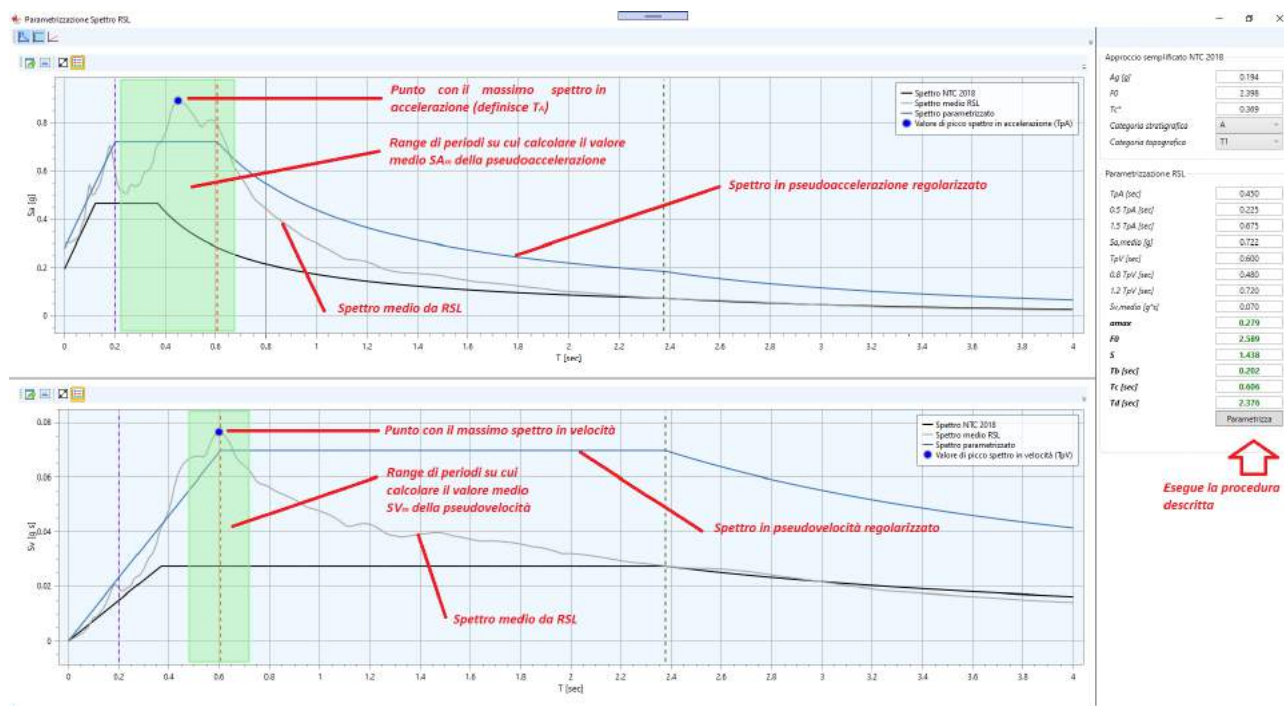


Figura 45. Interfaccia per la gestione della regolarizzazione dello spettro medio da RSL.

Eseguita la regolarizzazione l'utente può individuare i parametri che descrivono 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 46**) 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.

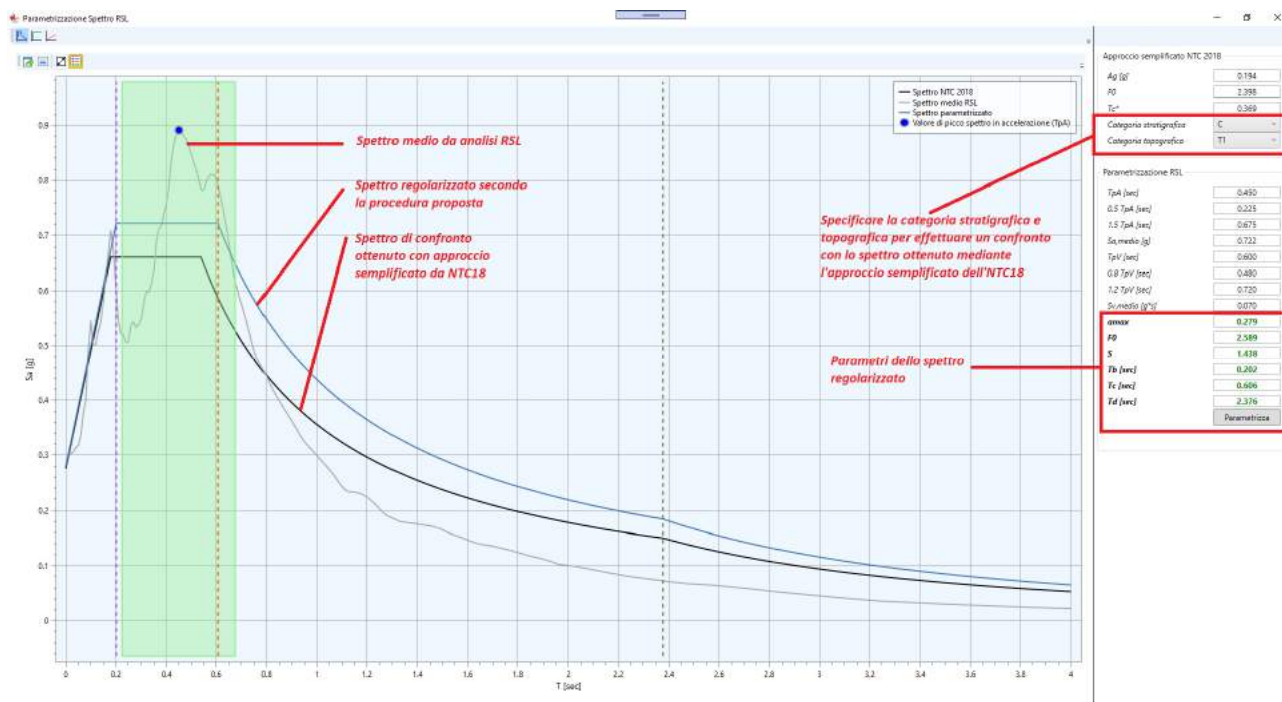


Figura 46. Confronto tra lo spettro regolarizzato e lo spettro ottenuto mediante l'approccio semplificato dell'NTC18.

3.6.3 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 47** 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.

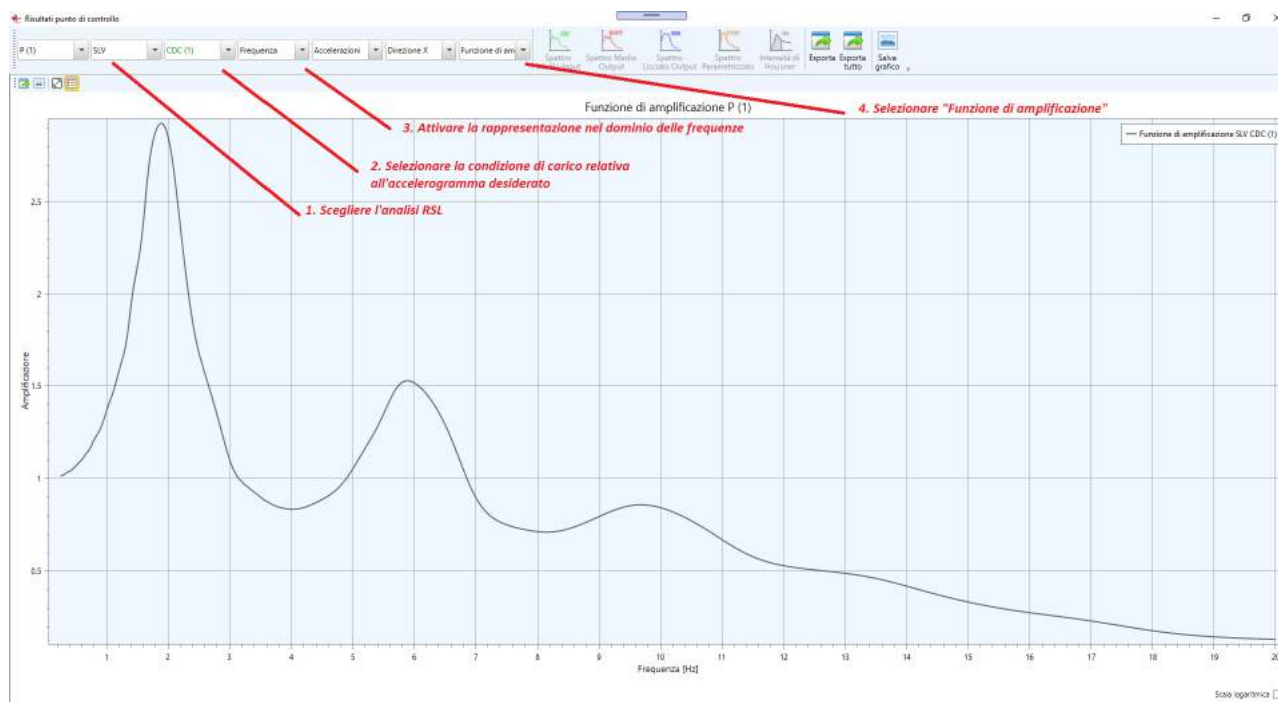



Figura 47. Procedura per la visualizzazione della funzione di amplificazione.

3.6.4 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 48) 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.

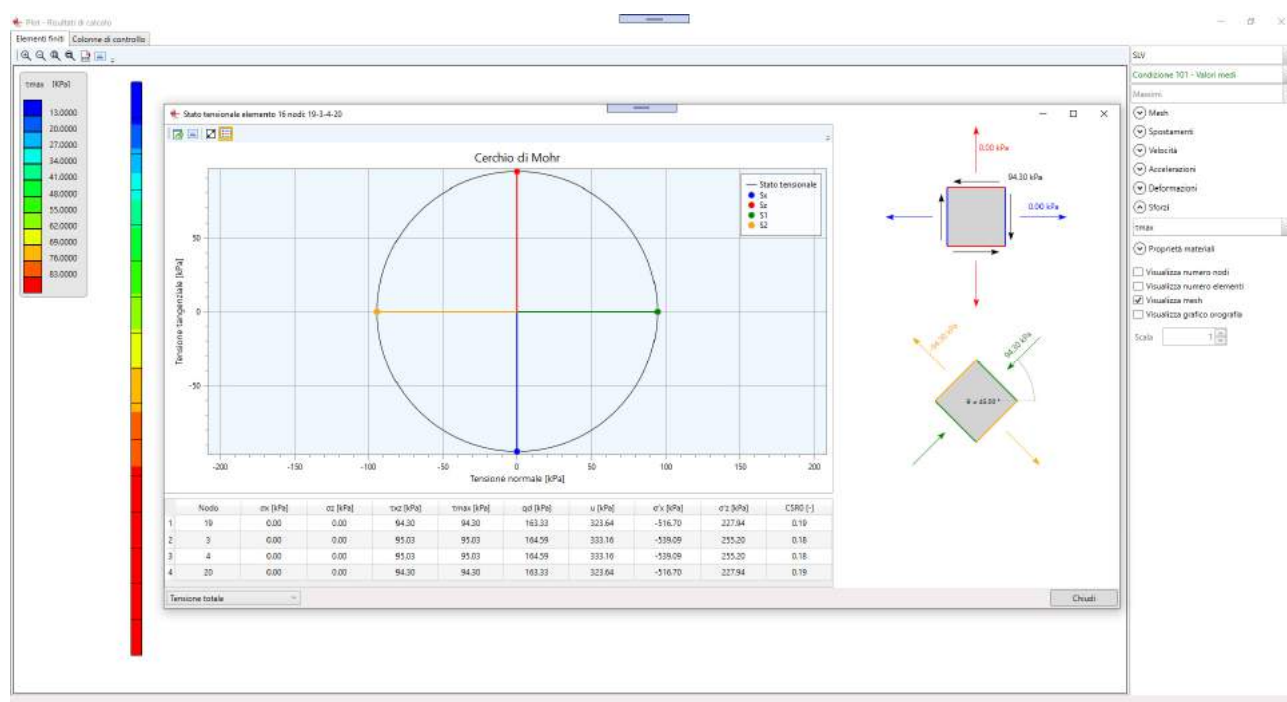



Figura 48. Valori massimi della tensione tangenziale sul modello ad elementi finiti.

3.6.5 Risultati verifica nei confronti della liquefazione

Mediante il comando “Liquefazione”  presente nella scheda “Elaborazione e Output” è possibile accedere all’ambiente di visualizzazione dei risultati ottenuti dal software per quanto riguarda le verifiche nei confronti della liquefazione.

Nella finestra sono presenti 4 grafici che in funzione della profondità riportano:

- Tensione litostatica verticale efficace σ'_{v0} ;
- Rapporto di sollecitazione ciclica indotto dalle analisi di risposta sismica locale CSR ;
- Rapporto di sovrappressione interstiziale r_u e range liquefacibile (se previsto dall’esito della verifica);
- Incremento di sovrappressioni interstiziali Δu .

Per visualizzare l’esito della verifica è necessario specificare come condizione di carico desiderata la condizione “Valori medi”. Nella finestra in basso a sinistra verrà riportato l’esito della verifica che potrà risultare:

- **VERIFICATO**;
- **NON VERIFICATO** con indicato il range di profondità in cui è prevista la liquefazione.

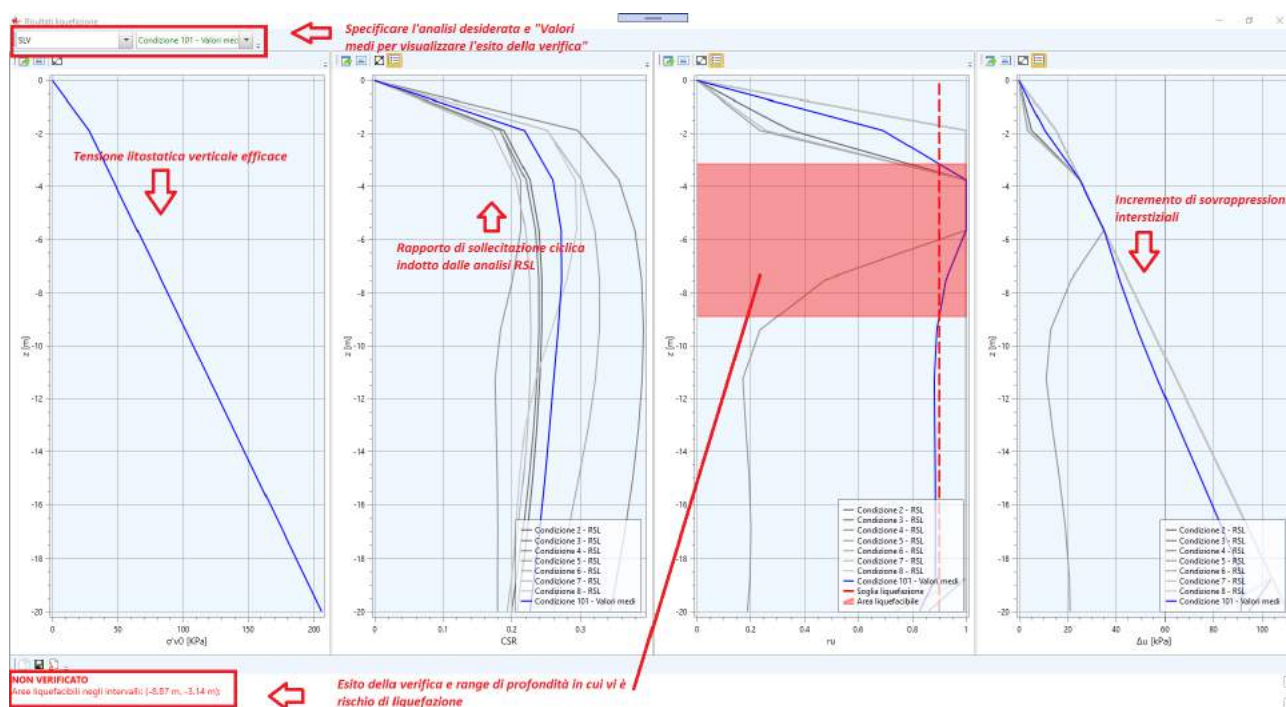




Figura 49. Risultati della verifica alla liquefazione.

3.6.6 Relazione di calcolo

Mediante il comando “Relazione” , presente nella scheda “Elaborazione e Output”, è possibile accedere all’editor (vedi **Figura 50**) 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.

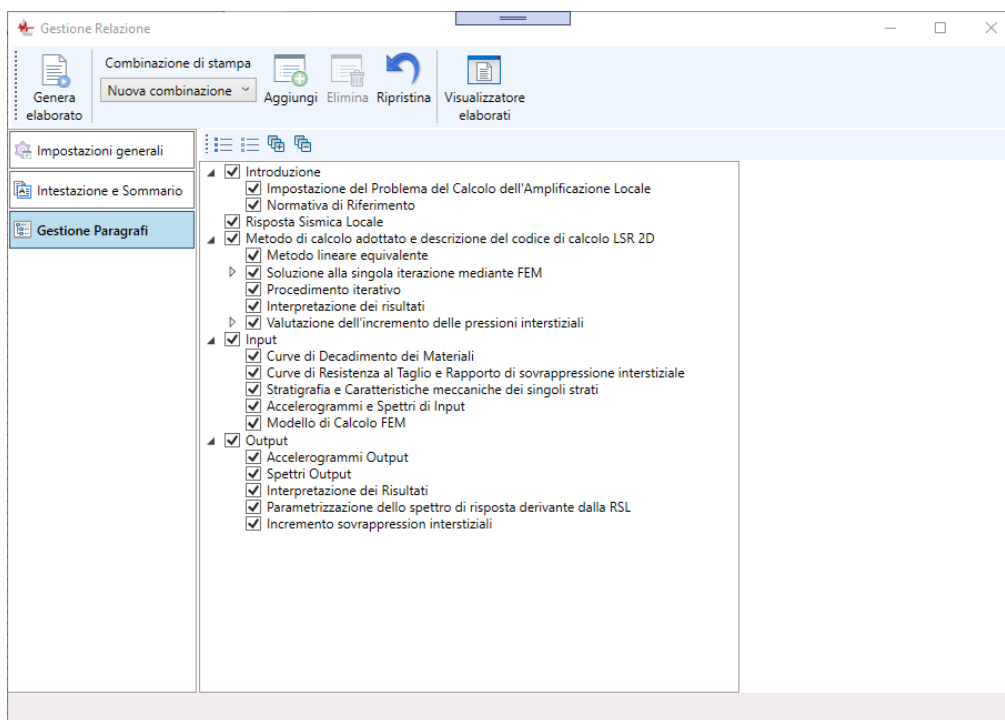


Figura 50. Gestione dei paragrafi della relazione.

Attraverso la selezione dei vari flags nella finestra rappresentata in **Figura 50** è possibile escludere alcuni paragrafi dalla relazione.

Sommario

1.	Introduzione	2
2.	Metodo di calcolo	3
2.1	Rapporto di sovrappressione interstiziale	5
2.2	Curve di resistenza al taglio	5
2.3	Numero di cicli di carico equivalenti N_{eq}	7
2.4	Individuazione di strati potenzialmente liquefacibili	9
3.	Guida all'uso	10
3.1	Interfaccia grafica	10
3.2	Funzioni principali.....	11
3.2.1	File	11
3.2.2	Home	12
3.2.3	Elaborazione e Output.....	12
3.3	Editors di gestione	14
3.3.1	Editor dei dati generali	14
3.3.2	Editor degli accelerogrammi.....	17
3.3.3	Editor delle curve di decadimento	23
3.3.3	Editor delle curve di resistenza dei materiali	26
3.3.4	Editor delle analisi	29
3.4	Inserimento del profilo stratigrafico	33
3.5	Esecuzione delle analisi	35
3.6	Output dei risultati	38
3.6.1	Storie temporali e spettri di risposta.....	38
3.6.2	Regolarizzazione dello spettro medio di Output.....	40
3.6.3	Funzione di amplificazione	43
3.6.4	Risultati sul modello FEM	45
3.6.5	Risultati verifica nei confronti della liquefazione	46
3.6.6	Relazione di calcolo	47

