

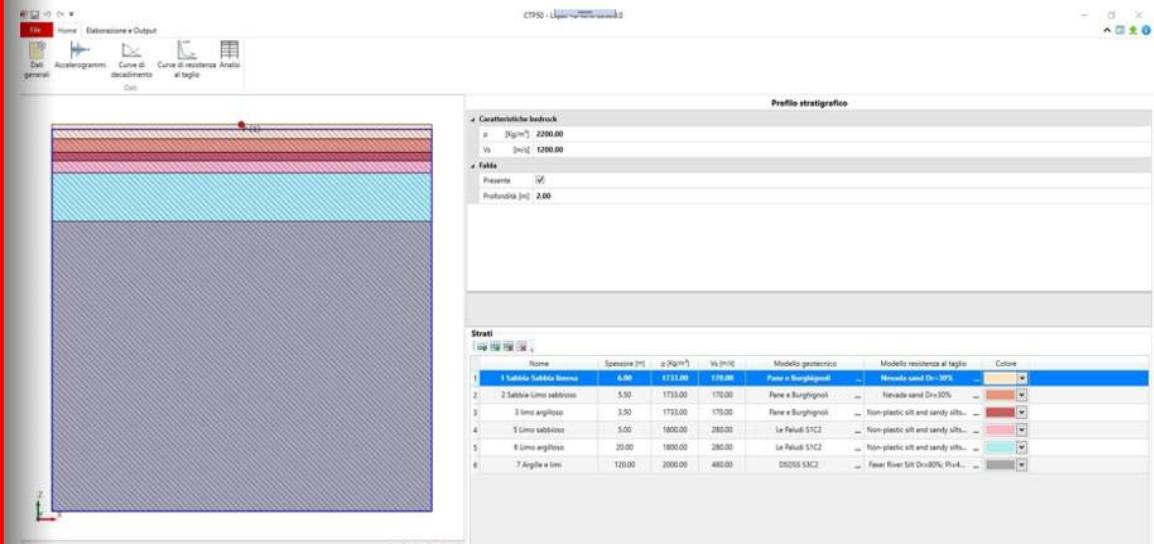
MANUALE
D'USO

LIQUEFAZIONE



LOCAL SEISMIC RESPONSE

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



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 rigidezza e della resistenza del materiale, portandolo ad un cambiamento di stato, da solido a liquido: questo fenomeno prende il nome di liquefazione.

L'innesco 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'integrazionere 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.

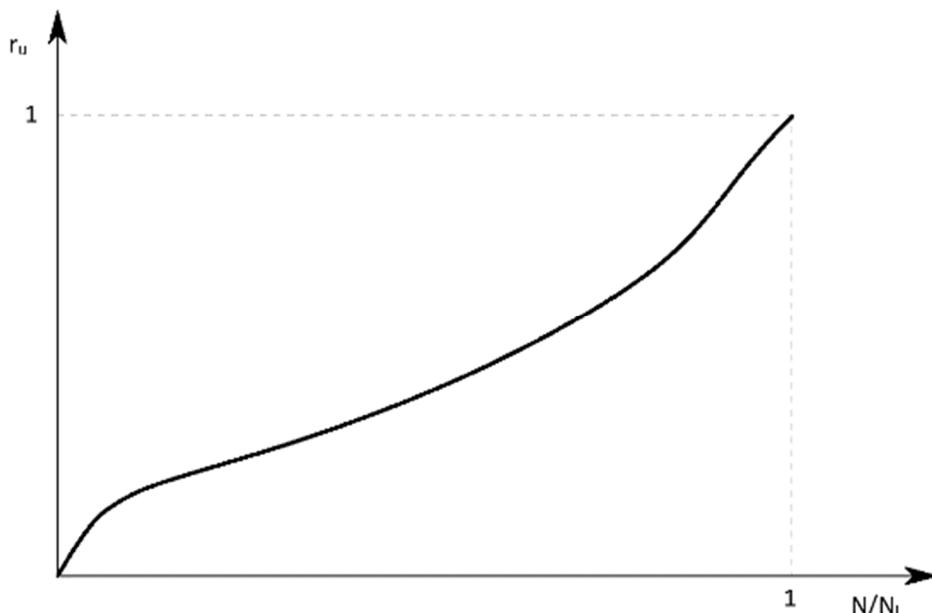


Figura 1. Andamento del rapporto di sovrappressione interstiziale r_u in funzione del numero di cicli di carico normalizzato N/N_L .

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 .

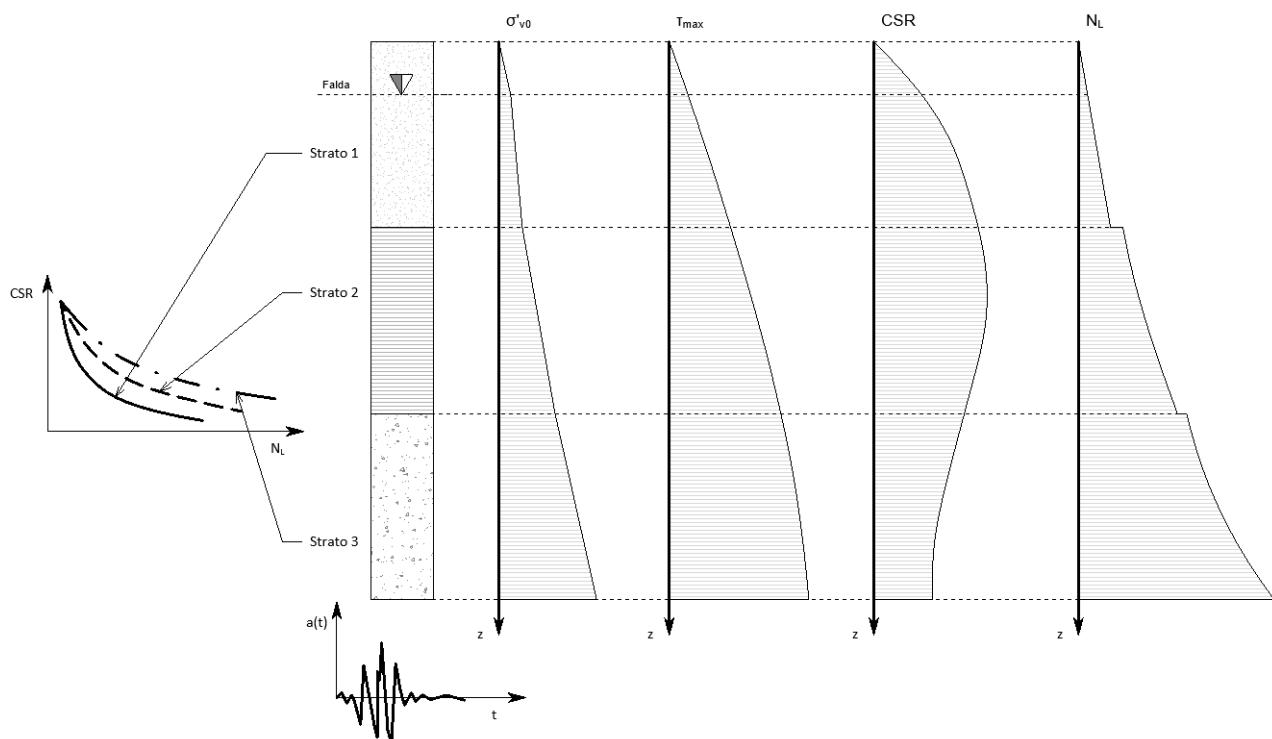


Figura 2. Schema monodimensionale per il calcolo del numero di cicli limite N_L lungo la verticale in funzione del CSR .

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*.

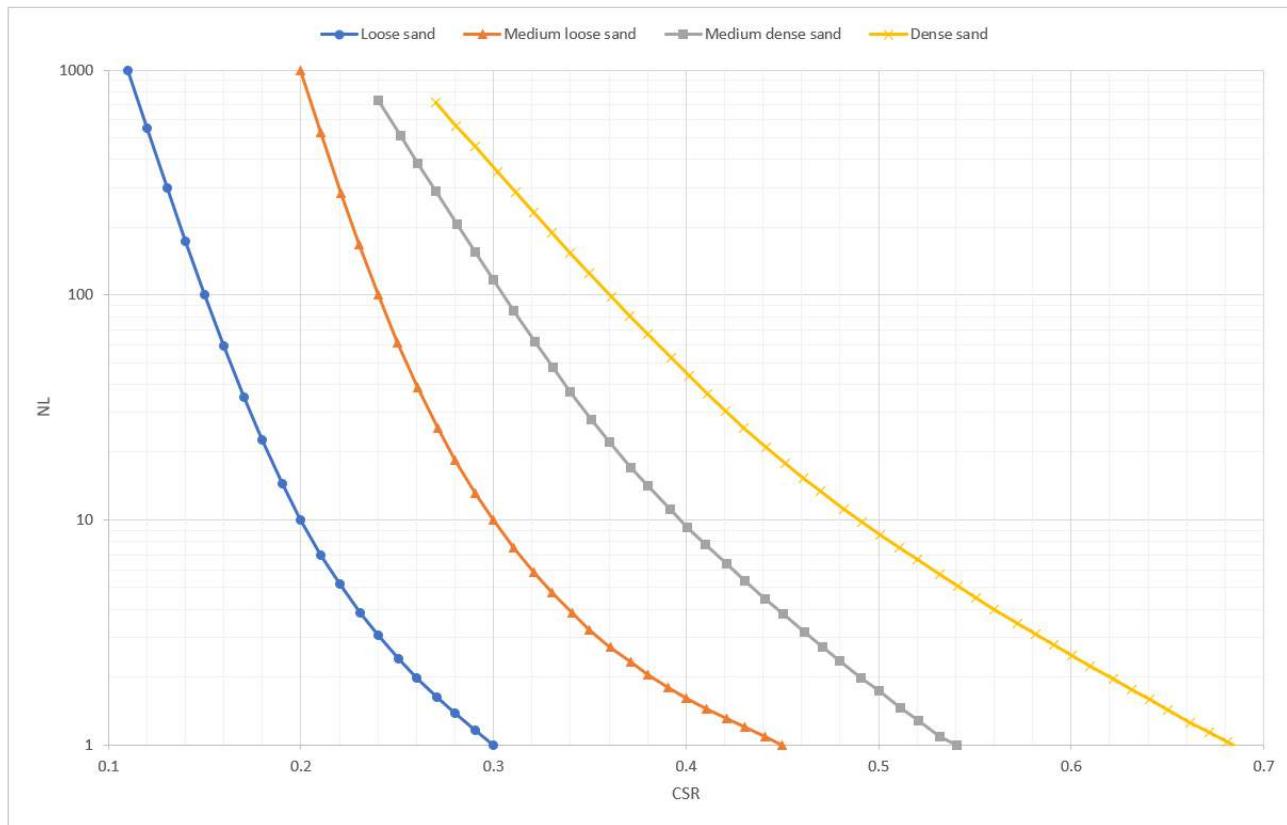


Figura 3. Curve di resistenza al taglio.

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

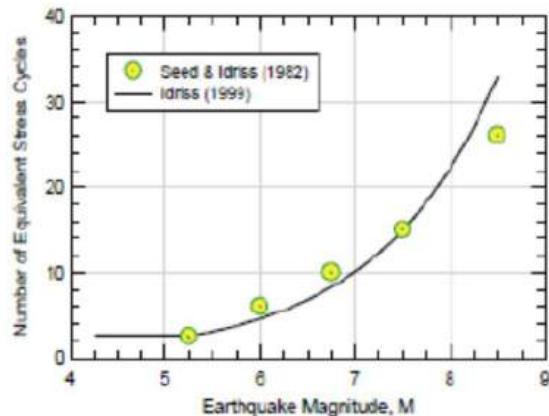


Figura 4. Numero di cicli equivalenti per Magnitudo dell'evento (da Idriss 1999).

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:

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

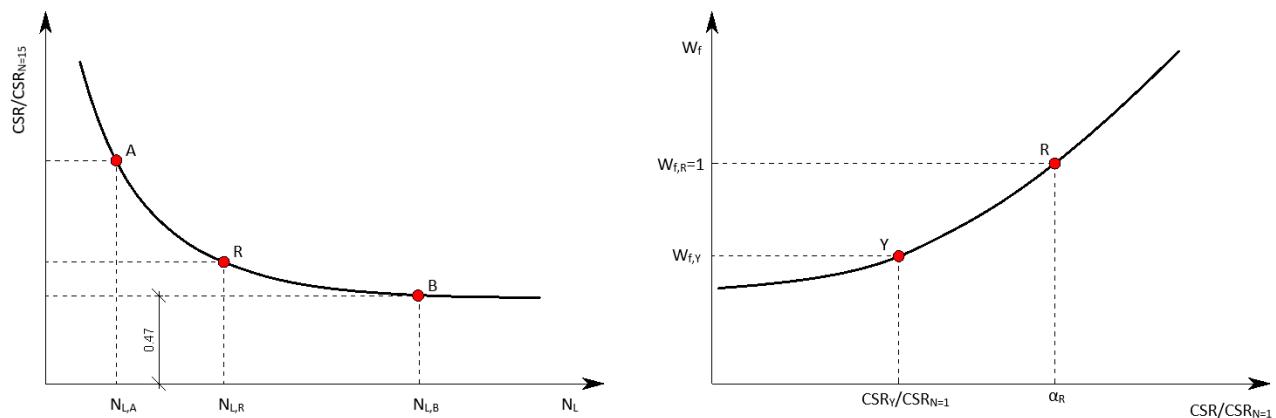


Figura 5. Schema per la definizione del criterio di conversione dei cicli di carico.

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:

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

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.

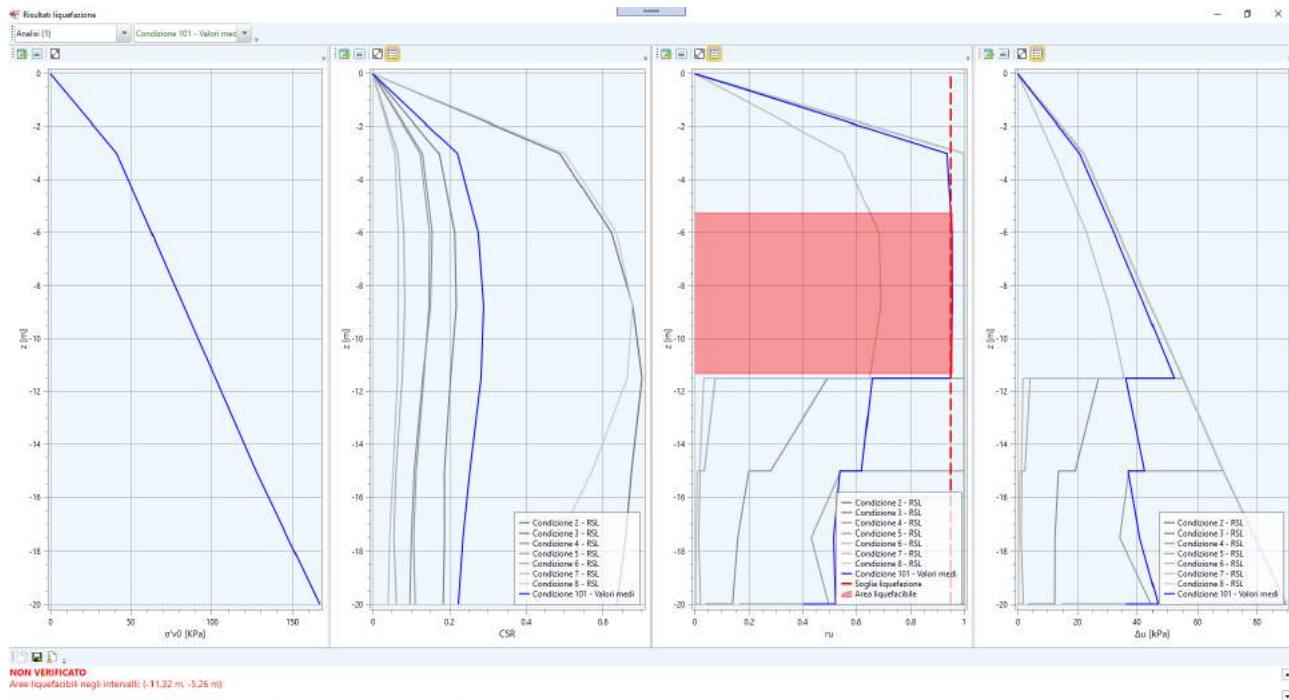


Figura 6. Interfaccia di verifica del sw e variazione del rapporto di sovrappressione interstiziale con la profondità.



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 di 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.

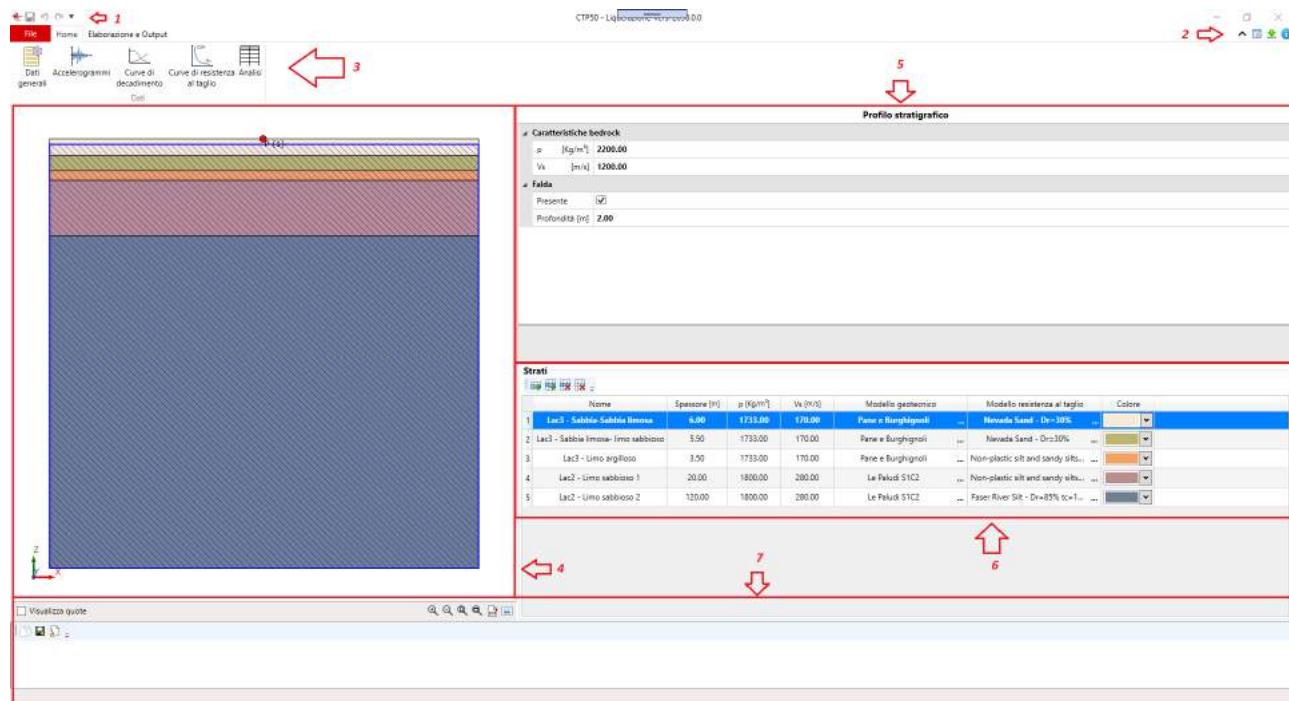


Figura 7. Interfaccia principale di LIQUEFAZIONE.

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).

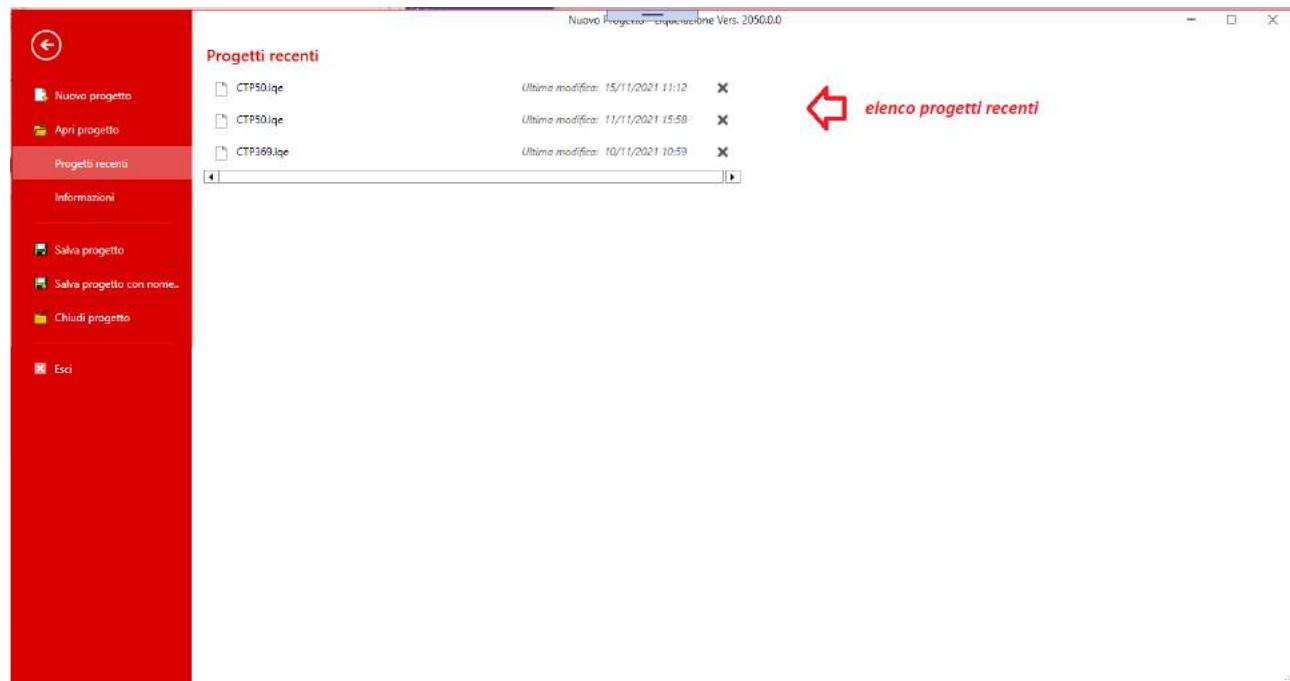


Figura 8. Gestione progetti recenti.



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;

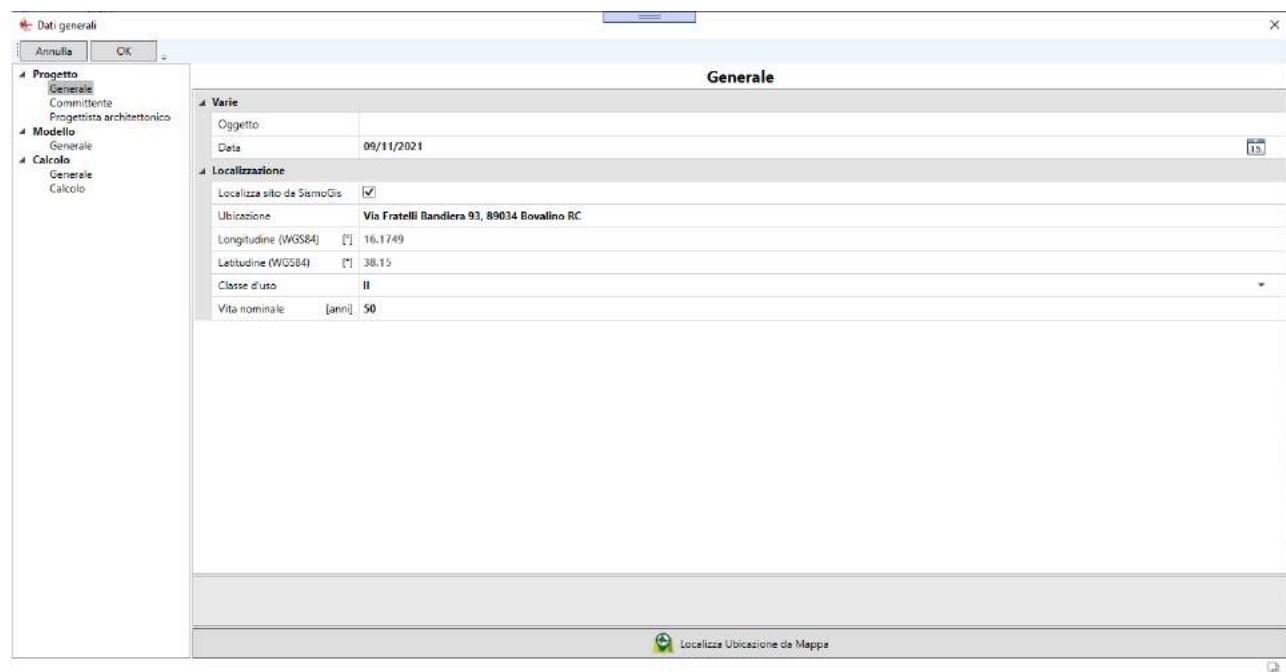


Figura 11. Compilazione delle informazioni relative al progetto nell’editor dei dati generali.

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.

Mesh		
Ottimizza passo		<input type="checkbox"/>
Passo [m]	0.50	

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.

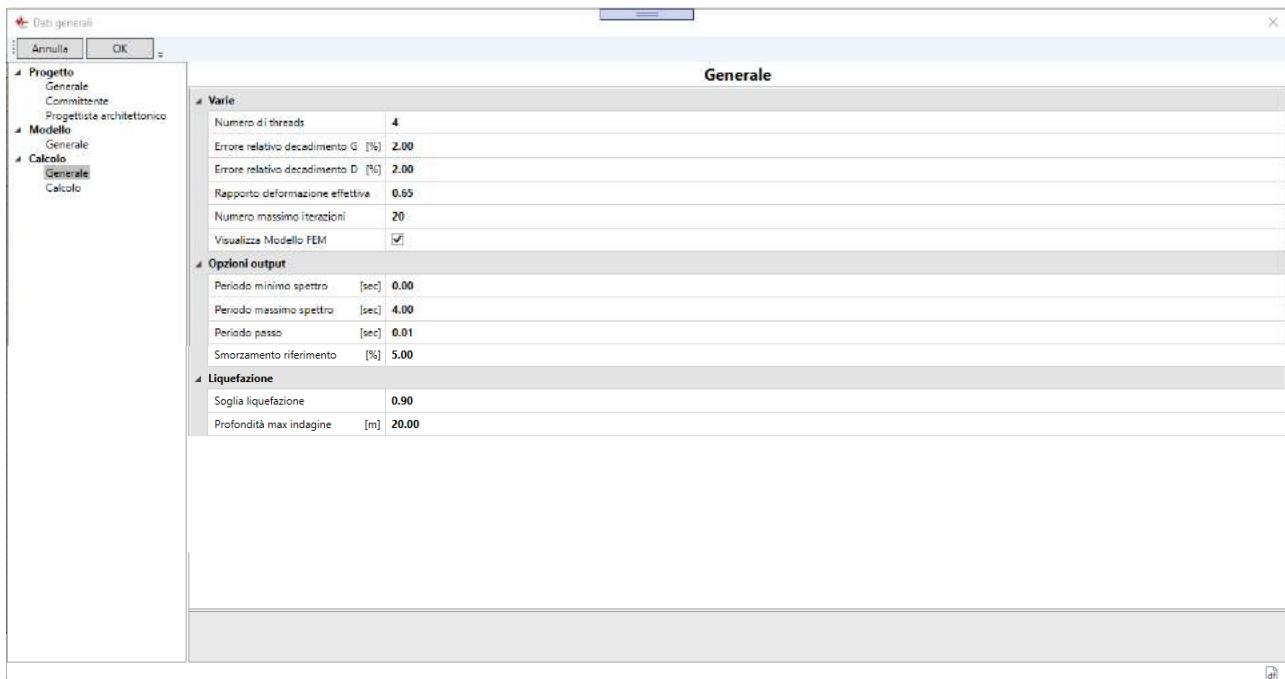


Figura 13. Parametri di calcolo di tipo generale.



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.

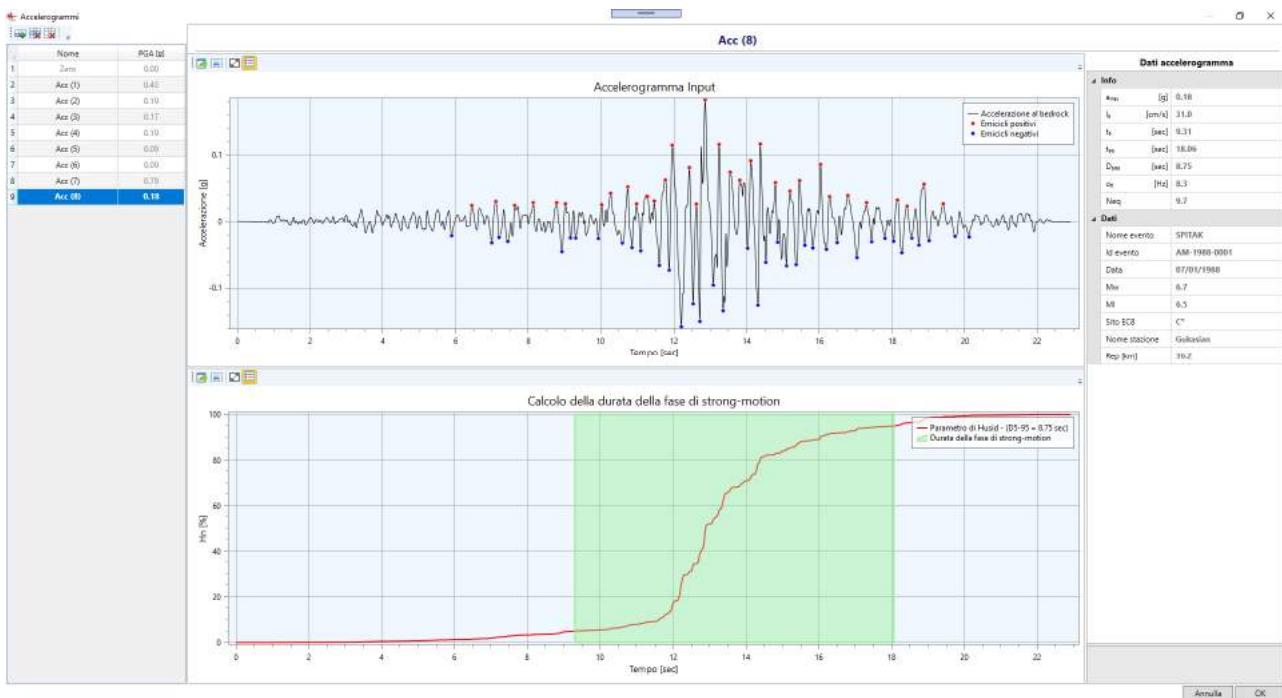


Figura 14. Editor degli accelerogrammi di input del progetto.

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.

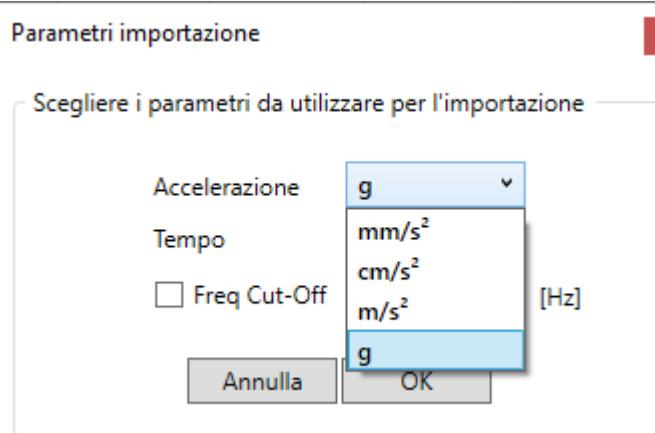


Figura 15. Scelta dei parametri di importazione degli accelerogrammi.



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).

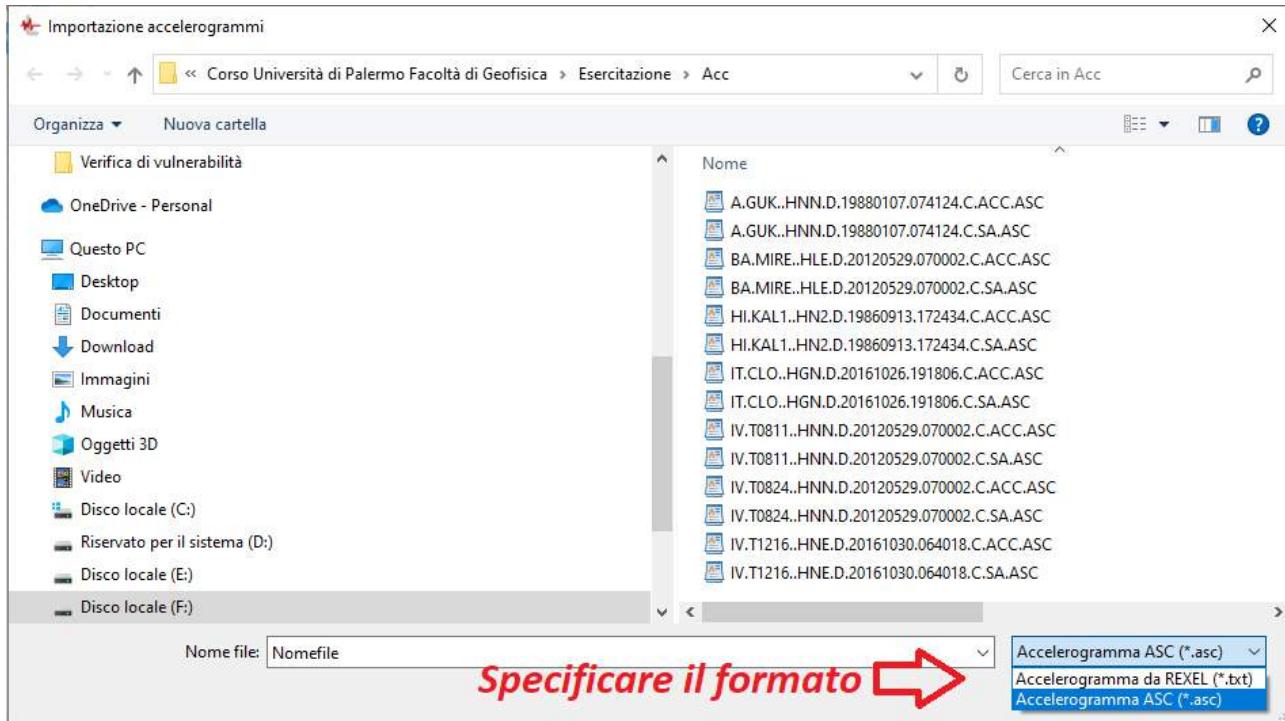


Figura 16. Selezione dei files e del tipo di formato da importare.

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;

H=1-(1).Txt - Blocco note di Windows	
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.

AGUK...HNN.D.19880107.074124.X.ACC.ASC - Blocco note di Windows
File Modifiche Formato Visualizza ?
Nuova scheda Nuova riga Nuova riga
EVENT_ID: AG-1988-0001
EVENT_DATE: 07/01/1988 13:49:28T
EVENT_LATITUDE_DEGREES: 48.5108
EVENT_LONGITUDE_DEGREES: 44.1568
EVENT_DEPTH_KM: 10.0
HYPOCENTRE_REFERENCE: ICS
HYPOCENTRE_W_RADIANS: 303
HYPOCENTRE_L: 6.3
HYPOCENTRE_Z: 10.0
HYPOCENTRE_Z_UNITS: KM
FOCAL_MECHANISM: TP
BATHSFILE:
BATHSFILE_CODE: BUR
STATION_NAME: Garibaldi
STATION_LATITUDE_DEGREES: 43.859999
STATION_LONGITUDE_DEGREES: 43.354000
STATION_ELEVATION_M: 1000.0
SESSID: 19880107074124
SESSID_DEPTH_M: 0.0
SITE_CODE: CL44020C7006_ECR
PROMPTCODE: CLASSIFICATION
PROMPTCODE_ID: 1
EARTHQUAKE_EACQUISITION_DATE: 1988-01-07
DATE_TIME_FIRST_SAMPLE_VYYVYDD: 1988-01-07
DATE_TIME_LAST_SAMPLE_VYYVYDD: 1988-01-07
SNPLINE_INTERVAL_MS: 8.000000
DURATION_S: 22.928
STREAM: HNN
STREAM_ID: 1
INSTRUMENT: SENSOR = UNKNOWN [unknown] | DILIGITIZER = UNKNOWN [unknown]
INSTRUMENT_ANALOG_DGGSAT: A
INSTRUMENT_DIGITAL_DGGSAT: C
INSTRUMENT_DIGITAL_GAIN: 26.000
INSTRUMENT_DIGITAL_HUMID: 0
INSTRUMENT_SCALING: 1
N_BIT_DIGITAL_CONVERTER: 16
PGA_CNS/2: 178.167393
PGA_CNS/2_SD: 10.000000
BASELINE_CORRECTION: BASELINE REMOVED
CORRECTION: BUTTERWORTH
FILTER_ORDER: 12
LOW_CUT_FREQUENCY_HZ: 8.200
HIGH_CUT_FREQUENCY_HZ: 20.000
LATE/NORMAL_TRIGGERED: NT
DATABASE_VERSION: DINA 1.0
DATA_TYPE: SEISMIC
DATA_SOURCE: (Puccetti et al., 2001)
DATA_LICENSE: V (unknown license)
DATA_LICENSE_ID: 1
DATA_CREATOR: ESM working group
ORIGINAL_DATA_PROVIDER_CITATION: Ambrejšev et al. (2004). CD-ROM "Dissemination of European strong-motion data, volume 2"
ORIGINAL_DATA_PROVIDER_URL: <http://www.ieses.yt.li.si/>
ORIGINAL_DATA_CREATOR_CITATION: Ambrejšev et al. (2002). Internet Site for European Seismograms Data <http://www.ieses.yt.li.si/>
ORIGINAL_DATA_CREATOR_URL: <http://www.ieses.yt.li.si/>
USER1: /home/processing-lucia/processing/tm/Lucia//A.GUK..HNN.D.19880107.074124.X.ACC.ASC /var/www/processing/tmp/Lucia//A.GUK..HNN.D.19880107.074124.X.ACC.ASC --tmp /var/www/processing/tmp/Lucia/
USER2:
USER3: RESAMPLED TO 0.010s
USER4: Instrument string CO-KOM "Dissemination of European strong-motion data, volume 2" (2004)
USER5: 0.138580
USER6: 0.138582
USER7: 0.138584
USER8: 0.278149
USER9: 0.278272
USER10: 0.278303
USER11: 0.278768
USER12: 0.288625
USER13: 0.298975
USER14: 0.281891
USER15: 0.231487
USER16: 0.231488
USER17: 0.231489
USER18: 0.231490
USER19: 0.231491
USER20: 0.231492
USER21: 0.231493
USER22: 0.231494
USER23: 0.231495
USER24: 0.231496
USER25: 0.231497
USER26: 0.231498
USER27: 0.231499
USER28: 0.231500
USER29: 0.231501
USER30: 0.231502
USER31: 0.231503
USER32: 0.231504
USER33: 0.231505
USER34: 0.231506
USER35: 0.231507
USER36: 0.231508
USER37: 0.231509
USER38: 0.231510
USER39: 0.231511
USER40: 0.231512
USER41: 0.231513
USER42: 0.231514
USER43: 0.231515
USER44: 0.231516
USER45: 0.231517
USER46: 0.231518
USER47: 0.231519
USER48: 0.231520
USER49: 0.231521
USER50: 0.231522
USER51: 0.231523
USER52: 0.231524
USER53: 0.231525
USER54: 0.231526
USER55: 0.231527
USER56: 0.231528
USER57: 0.231529
USER58: 0.231530
USER59: 0.231531
USER60: 0.231532
USER61: 0.231533
USER62: 0.231534
USER63: 0.231535
USER64: 0.231536
USER65: 0.231537
USER66: 0.231538
USER67: 0.231539
USER68: 0.231540
USER69: 0.231541
USER70: 0.231542
USER71: 0.231543
USER72: 0.231544
USER73: 0.231545
USER74: 0.231546
USER75: 0.231547
USER76: 0.231548
USER77: 0.231549
USER78: 0.231550
USER79: 0.231551
USER80: 0.231552
USER81: 0.231553
USER82: 0.231554
USER83: 0.231555
USER84: 0.231556
USER85: 0.231557
USER86: 0.231558
USER87: 0.231559
USER88: 0.231560
USER89: 0.231561
USER90: 0.231562
USER91: 0.231563
USER92: 0.231564
USER93: 0.231565
USER94: 0.231566
USER95: 0.231567
USER96: 0.231568
USER97: 0.231569
USER98: 0.231570
USER99: 0.231571
USER100: 0.231572
USER101: 0.231573
USER102: 0.231574
USER103: 0.231575
USER104: 0.231576
USER105: 0.231577
USER106: 0.231578
USER107: 0.231579
USER108: 0.231580
USER109: 0.231581
USER110: 0.231582
USER111: 0.231583
USER112: 0.231584
USER113: 0.231585
USER114: 0.231586
USER115: 0.231587
USER116: 0.231588
USER117: 0.231589
USER118: 0.231590
USER119: 0.231591
USER120: 0.231592
USER121: 0.231593
USER122: 0.231594
USER123: 0.231595
USER124: 0.231596
USER125: 0.231597
USER126: 0.231598
USER127: 0.231599
USER128: 0.231600
USER129: 0.231601
USER130: 0.231602
USER131: 0.231603
USER132: 0.231604
USER133: 0.231605
USER134: 0.231606
USER135: 0.231607
USER136: 0.231608
USER137: 0.231609
USER138: 0.231610
USER139: 0.231611
USER140: 0.231612
USER141: 0.231613
USER142: 0.231614
USER143: 0.231615
USER144: 0.231616
USER145: 0.231617
USER146: 0.231618
USER147: 0.231619
USER148: 0.231620
USER149: 0.231621
USER150: 0.231622
USER151: 0.231623
USER152: 0.231624
USER153: 0.231625
USER154: 0.231626
USER155: 0.231627
USER156: 0.231628
USER157: 0.231629
USER158: 0.231630
USER159: 0.231631
USER160: 0.231632
USER161: 0.231633
USER162: 0.231634
USER163: 0.231635
USER164: 0.231636
USER165: 0.231637
USER166: 0.231638
USER167: 0.231639
USER168: 0.231640
USER169: 0.231641
USER170: 0.231642
USER171: 0.231643
USER172: 0.231644
USER173: 0.231645
USER174: 0.231646
USER175: 0.231647
USER176: 0.231648
USER177: 0.231649
USER178: 0.231650
USER179: 0.231651
USER180: 0.231652
USER181: 0.231653
USER182: 0.231654
USER183: 0.231655
USER184: 0.231656
USER185: 0.231657
USER186: 0.231658
USER187: 0.231659
USER188: 0.231660
USER189: 0.231661
USER190: 0.231662
USER191: 0.231663
USER192: 0.231664
USER193: 0.231665
USER194: 0.231666
USER195: 0.231667
USER196: 0.231668
USER197: 0.231669
USER198: 0.231670
USER199: 0.231671
USER200: 0.231672
USER201: 0.231673
USER202: 0.231674
USER203: 0.231675
USER204: 0.231676
USER205: 0.231677
USER206: 0.231678
USER207: 0.231679
USER208: 0.231680
USER209: 0.231681
USER210: 0.231682
USER211: 0.231683
USER212: 0.231684
USER213: 0.231685
USER214: 0.231686
USER215: 0.231687
USER216: 0.231688
USER217: 0.231689
USER218: 0.231690
USER219: 0.231691
USER220: 0.231692
USER221: 0.231693
USER222: 0.231694
USER223: 0.231695
USER224: 0.231696
USER225: 0.231697
USER226: 0.231698
USER227: 0.231699
USER228: 0.231700
USER229: 0.231701
USER230: 0.231702
USER231: 0.231703
USER232: 0.231704
USER233: 0.231705
USER234: 0.231706
USER235: 0.231707
USER236: 0.231708
USER237: 0.231709
USER238: 0.231710
USER239: 0.231711
USER240: 0.231712
USER241: 0.231713
USER242: 0.231714
USER243: 0.231715
USER244: 0.231716
USER245: 0.231717
USER246: 0.231718
USER247: 0.231719
USER248: 0.231720
USER249: 0.231721
USER250: 0.231722
USER251: 0.231723
USER252: 0.231724
USER253: 0.231725
USER254: 0.231726
USER255: 0.231727
USER256: 0.231728
USER257: 0.231729
USER258: 0.231730
USER259: 0.231731
USER260: 0.231732
USER261: 0.231733
USER262: 0.231734
USER263: 0.231735
USER264: 0.231736
USER265: 0.231737
USER266: 0.231738
USER267: 0.231739
USER268: 0.231740
USER269: 0.231741
USER270: 0.231742
USER271: 0.231743
USER272: 0.231744
USER273: 0.231745
USER274: 0.231746
USER275: 0.231747
USER276: 0.231748
USER277: 0.231749
USER278: 0.231750
USER279: 0.231751
USER280: 0.231752
USER281: 0.231753
USER282: 0.231754
USER283: 0.231755
USER284: 0.231756
USER285: 0.231757
USER286: 0.231758
USER287: 0.231759
USER288: 0.231760
USER289: 0.231761
USER290: 0.231762
USER291: 0.231763
USER292: 0.231764
USER293: 0.231765
USER294: 0.231766
USER295: 0.231767
USER296: 0.231768
USER297: 0.231769
USER298: 0.231770
USER299: 0.231771
USER300: 0.231772
USER301: 0.231773
USER302: 0.231774
USER303: 0.231775
USER304: 0.231776
USER305: 0.231777
USER306: 0.231778
USER307: 0.231779
USER308: 0.231780
USER309: 0.231781
USER310: 0.231782
USER311: 0.231783
USER312: 0.231784
USER313: 0.231785
USER314: 0.231786
USER315: 0.231787
USER316: 0.231788
USER317: 0.231789
USER318: 0.231790
USER319: 0.231791
USER320: 0.231792
USER321: 0.231793
USER322: 0.231794
USER323: 0.231795
USER324: 0.231796
USER325: 0.231797
USER326: 0.231798
USER327: 0.231799
USER328: 0.231800
USER329: 0.231801
USER330: 0.231802
USER331: 0.231803
USER332: 0.231804
USER333: 0.231805
USER334: 0.231806
USER335: 0.231807
USER336: 0.231808
USER337: 0.231809
USER338: 0.231810
USER339: 0.231811
USER340: 0.231812
USER341: 0.231813
USER342: 0.231814
USER343: 0.231815
USER344: 0.231816
USER345: 0.231817
USER346: 0.231818
USER347: 0.231819
USER348: 0.231820
USER349: 0.231821
USER350: 0.231822
USER351: 0.231823
USER352: 0.231824
USER353: 0.231825
USER354: 0.231826
USER355: 0.231827
USER356: 0.231828
USER357: 0.231829
USER358: 0.231830
USER359: 0.231831
USER360: 0.231832
USER361: 0.231833
USER362: 0.231834
USER363: 0.231835
USER364: 0.231836
USER365: 0.231837
USER366: 0.231838
USER367: 0.231839
USER368: 0.231840
USER369: 0.231841
USER370: 0.231842
USER371: 0.231843
USER372: 0.231844
USER373: 0.231845
USER374: 0.231846
USER375: 0.231847
USER376: 0.231848
USER377: 0.231849
USER378: 0.231850
USER379: 0.231851
USER380: 0.231852
USER381: 0.231853
USER382: 0.231854
USER383: 0.231855
USER384: 0.231856
USER385: 0.231857
USER386: 0.231858
USER387: 0.231859
USER388: 0.231860
USER389: 0.231861
USER390: 0.231862
USER391: 0.231863
USER392: 0.231864
USER393: 0.231865
USER394: 0.231866
USER395: 0.231867
USER396: 0.231868
USER397: 0.231869
USER398: 0.231870
USER399: 0.231871
USER400: 0.231872
USER401: 0.231873
USER402: 0.231874
USER403: 0.231875
USER404: 0.231876
USER405: 0.231877
USER406: 0.231878
USER407: 0.231879
USER408: 0.231880
USER409: 0.231881
USER410: 0.231882
USER411: 0.231883
USER412: 0.231884
USER413: 0.231885
USER414: 0.231886
USER415: 0.231887
USER416: 0.231888
USER417: 0.231889
USER418: 0.231890
USER419: 0.231891
USER420: 0.231892
USER421: 0.231893
USER422: 0.231894
USER423: 0.231895
USER424: 0.231896
USER425: 0.231897
USER426: 0.231898
USER427: 0.231899
USER428: 0.231900
USER429: 0.231901
USER430: 0.231902
USER431: 0.231903
USER432: 0.231904
USER433: 0.231905
USER434: 0.231906
USER435: 0.231907
USER436: 0.231908
USER437: 0.231909
USER438: 0.231910
USER439: 0.231911
USER440: 0.231912
USER441: 0.231913
USER442: 0.231914
USER443: 0.231915
USER444: 0.231916
USER445: 0.231917
USER446: 0.231918
USER447: 0.231919
USER448: 0.231920
USER449: 0.231921
USER450: 0.231922
USER451: 0.231923
USER452: 0.231924
USER453: 0.231925
USER454: 0.231926
USER455: 0.231927
USER456: 0.231928
USER457: 0.231929
USER458: 0.231930
USER459: 0.231931
USER460: 0.231932
USER461: 0.231933
USER462: 0.231934
USER463: 0.231935
USER464: 0.231936
USER465: 0.231937
USER466: 0.231938
USER467: 0.231939
USER468: 0.231940
USER469: 0.231941
USER470: 0.231942
USER471: 0.231943
USER472: 0.231944
USER473: 0.231945
USER474: 0.231946
USER475: 0.231947
USER476: 0.231948
USER477: 0.231949
USER478: 0.231950
USER479: 0.231951
USER480: 0.231952
USER481: 0.231953
USER482: 0.231954
USER483: 0.231955
USER484: 0.231956
USER485: 0.231957
USER486: 0.231958
USER487: 0.231959
USER488: 0.231960
USER489: 0.231961
USER490: 0.231962
USER491: 0.231963
USER492: 0.231964
USER493: 0.231965
USER494: 0.231966
USER495: 0.231967
USER496: 0.231968
USER497: 0.231969
USER498: 0.231970
USER499: 0.231971
USER500: 0.231972
USER501: 0.231973
USER502: 0.231974
USER503: 0.231975
USER504: 0.231976
USER505: 0.231977
USER506: 0.231978
USER507: 0.231979
USER508: 0.231980
USER509: 0.231981
USER510: 0.231982
USER511: 0.231983
USER512: 0.231984
USER513: 0.231985
USER514: 0.231986
USER515: 0.231987
USER516: 0.231988
USER517: 0.231989
USER518: 0.231990
USER519: 0.231991
USER520: 0.231992
USER521: 0.231993
USER522: 0.231994
USER523: 0.231995
USER524: 0.231996
USER525: 0.231997
USER526: 0.231998
USER527: 0.231999
USER528: 0.232000
USER529: 0.232001
USER530: 0.232002
USER531: 0.232003
USER532: 0.232004
USER533: 0.232005
USER534: 0.232006
USER535: 0.232007
USER536: 0.232008
USER537: 0.232009
USER538: 0.232010
USER539: 0.232011
USER540: 0.232012
USER541: 0.232013
USER542: 0.232014
USER543: 0.232015
USER544: 0.232016
USER545: 0.232017
USER546: 0.232018
USER547: 0.232019
USER548: 0.232020
USER549: 0.232021
USER550: 0.232022
USER551: 0.232023
USER552: 0.232024
USER553: 0.232025
USER554: 0.232026
USER555: 0.232027
USER556: 0.232028
USER557: 0.232029
USER558: 0.232030
USER559: 0.232031
USER560: 0.232032
USER561: 0.232033
USER562: 0.232034
USER563: 0.232035
USER564: 0.232036
USER565: 0.232037
USER566: 0.232038
USER567: 0.232039
USER568: 0.232040
USER569: 0.232041
USER570: 0.232042
USER571: 0.232043
USER572: 0.232044
USER573: 0.232045
USER574: 0.232046
USER575: 0.232047
USER576: 0.232048
USER577: 0.232049
USER578: 0.232050
USER579: 0.232051
USER580: 0.232052
USER581: 0.232053
USER582: 0.232054
USER583: 0.232055
USER584: 0.232056
USER585: 0.232057
USER586: 0.232058
USER587: 0.232059
USER588: 0.232060
USER589: 0.232061
USER590: 0.232062
USER591: 0.232063
USER592: 0.232064
USER593: 0.232065
USER594: 0.232066
USER595: 0.232067
USER596: 0.232068
USER597: 0.232069
USER598: 0.232070
USER599: 0.232071
USER600: 0.232072
USER601: 0.232073
USER602: 0.232074
USER603: 0.232075
USER604: 0.232076
USER605: 0.232077
USER606: 0.232078
USER607: 0.232079
USER608: 0.232080
USER609: 0.232081
USER610: 0.232082
USER611: 0.232083
USER612: 0.232084
USER613: 0.232085
USER614: 0.232086
USER615: 0.232087
USER616: 0.232088
USER617: 0.232089
USER618: 0.232090
USER619: 0.232091
USER620: 0.232092
USER621: 0.232093
USER622: 0.232094
USER623: 0.232095
USER624: 0.232096
USER625: 0.232097
USER626: 0.232098
USER627: 0.232099
USER628: 0.232100
USER629: 0.232101
USER630: 0.232102
USER631: 0.232103
USER632: 0.232104
USER633: 0.232105
USER634: 0.232106
USER635: 0.232107
USER636: 0.232108
USER637: 0.232109
USER638: 0.232110
USER639: 0.232111
USER640: 0.232112
USER641: 0.232113
USER642: 0.232114
USER643: 0.232115
USER644: 0.232116
USER645: 0.232117
USER646: 0.232118
USER647: 0.232119
USER648: 0.232120
USER649: 0.232121
USER650: 0.232122
USER651: 0.232123
USER652: 0.232124
USER653: 0.232125
USER654: 0.232126
USER655: 0.232127
USER656: 0.232128
USER657: 0.232129
USER658: 0.232130
USER659: 0.232131
USER660: 0.232132
USER661: 0.232133
USER662: 0.232134
USER663: 0.232135
USER664: 0.232136
USER665: 0.232137
USER666: 0.232138
USER667: 0.232139
USER668: 0.232140
USER669: 0.232141
USER670: 0.232142
USER671: 0.232143
USER672: 0.232144
USER673: 0.232145
USER674: 0.232146
USER675: 0.232147
USER676: 0.232148
USER677: 0.232149
USER678: 0.232150
USER679: 0.232151
USER680: 0.232152
USER681: 0.232153
USER682: 0.232154
USER683: 0.232155
USER684: 0.232156
USER685: 0.232157
USER686: 0.232158
USER687: 0.232159
USER688: 0.232160
USER689: 0.232161
USER690: 0.232162
USER691: 0.232163
USER692: 0.232164
USER693: 0.232165
USER694: 0.232166
USER695: 0.232167
USER696: 0.232168
USER697: 0.232169
USER698: 0.232170
USER699: 0.232171
USER700: 0.232172
USER701: 0.232173
USER702: 0.232174
USER703: 0.232175
USER704: 0.232176
USER705: 0.232177
USER706: 0.232178
USER707: 0.232179
USER708: 0.232180
USER709: 0.232181
USER710: 0.232182
USER711: 0.232183
USER712: 0.232184
USER713: 0.232185
USER714: 0.232186
USER715: 0.23218

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.

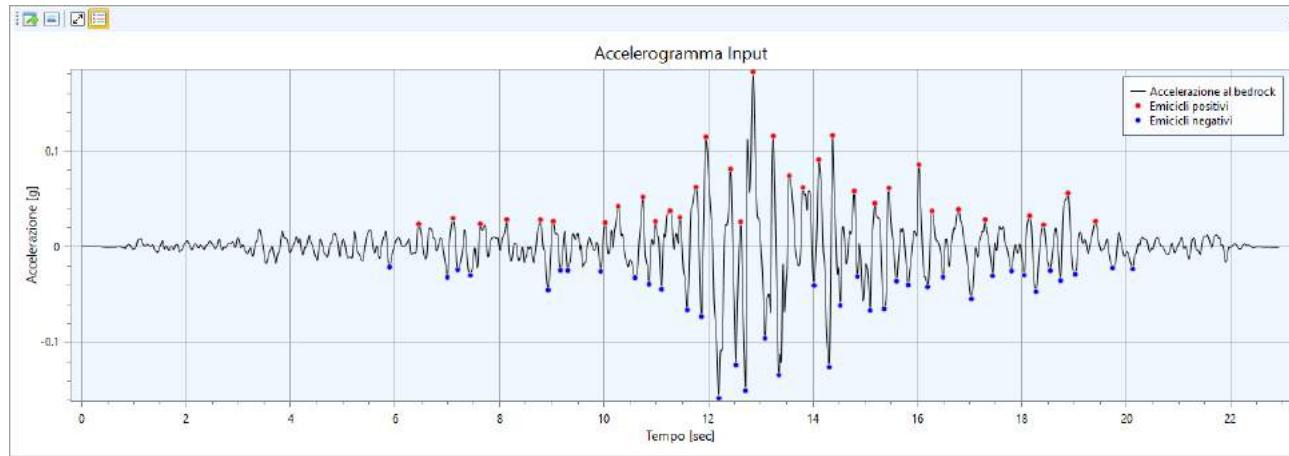


Figura 20. Visualizzazione storia temporale dell'accelerazione al suolo.

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.

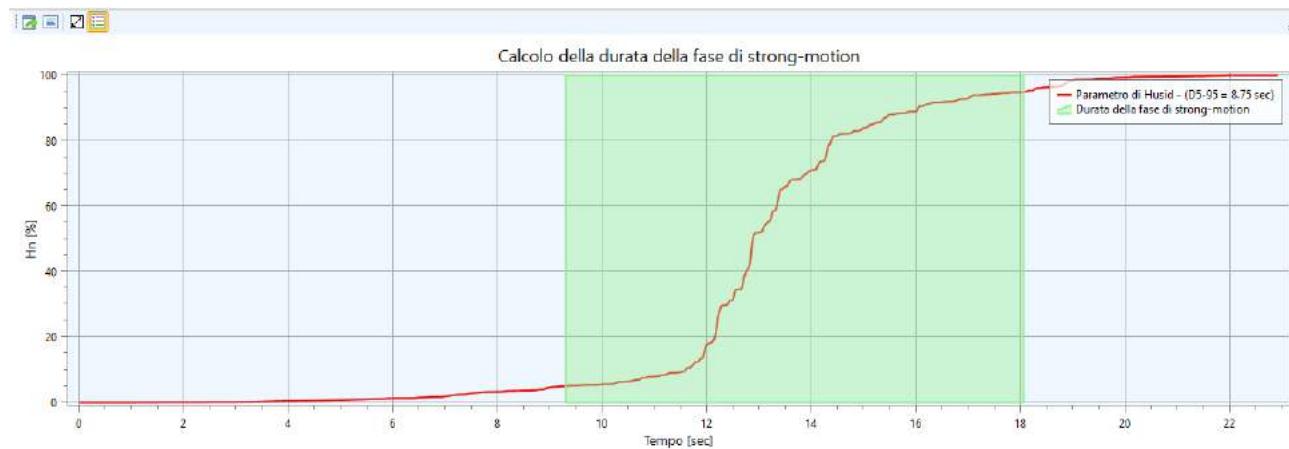


Figura 21. Parametro di Husid.



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_I : 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**).

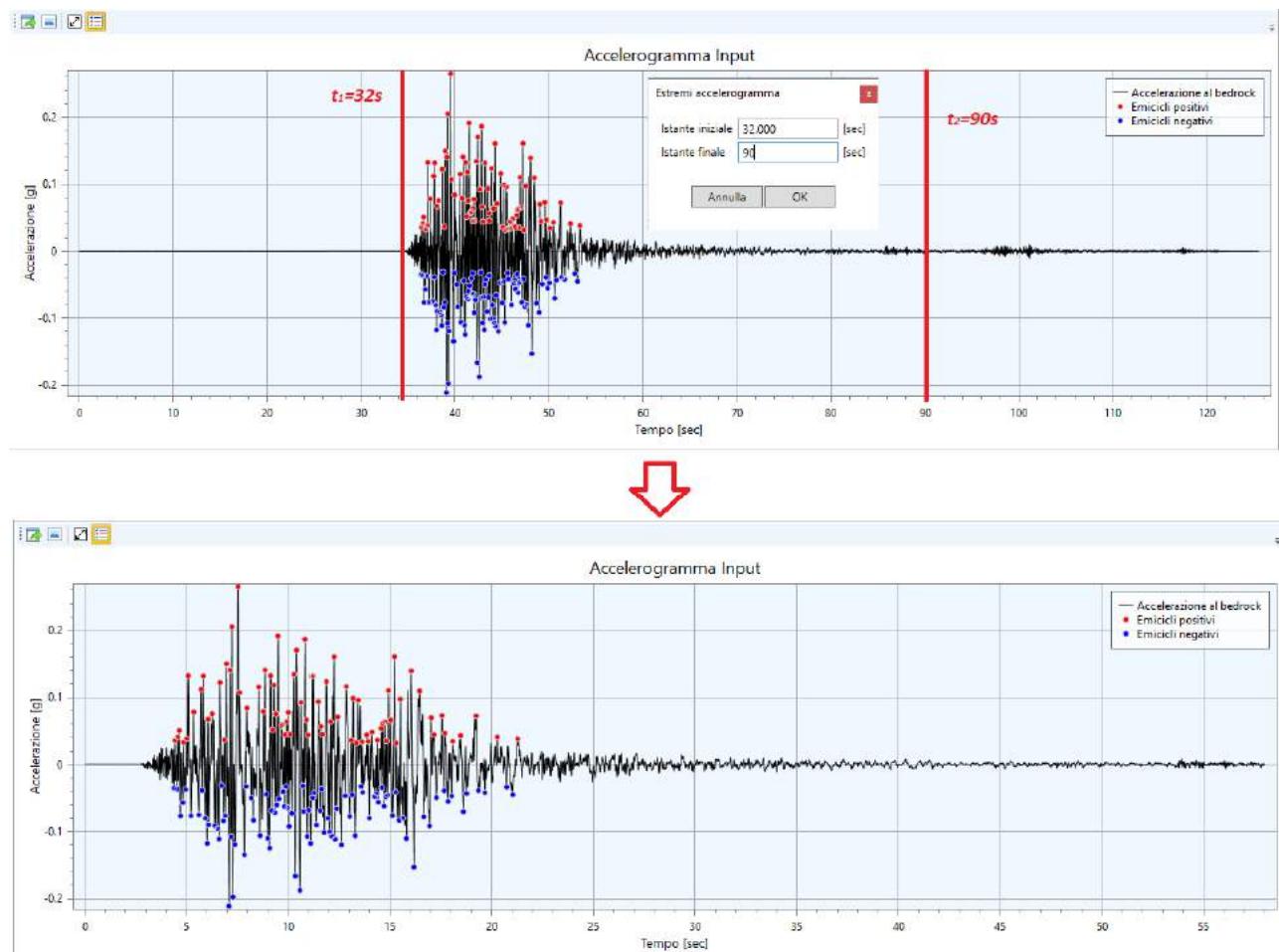


Figura 23. Procedura di taglio degli zeri di un accelerogramma.



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.

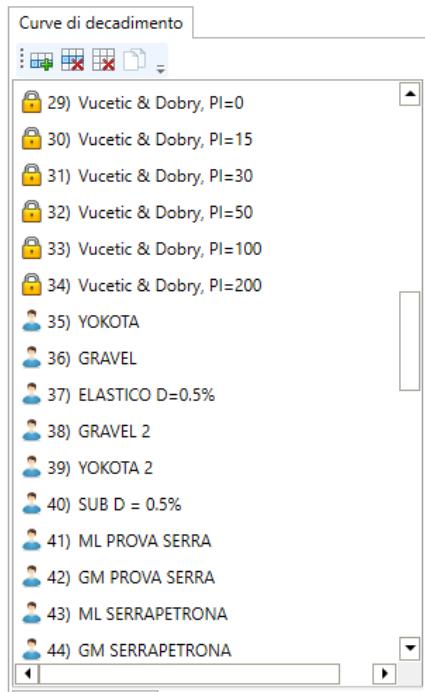


Figura 25. Elenco delle curve di decadimento disponibili.

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.

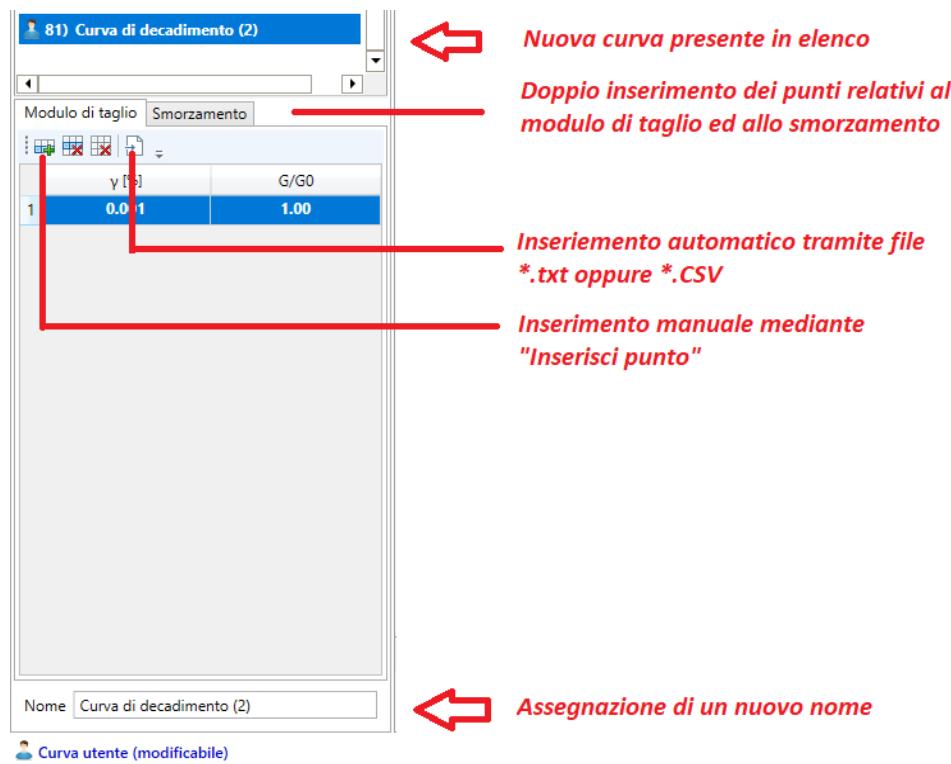


Figura 26. Inserimento di una nuova curva di decadimento.

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 % 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.

CSR

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**.

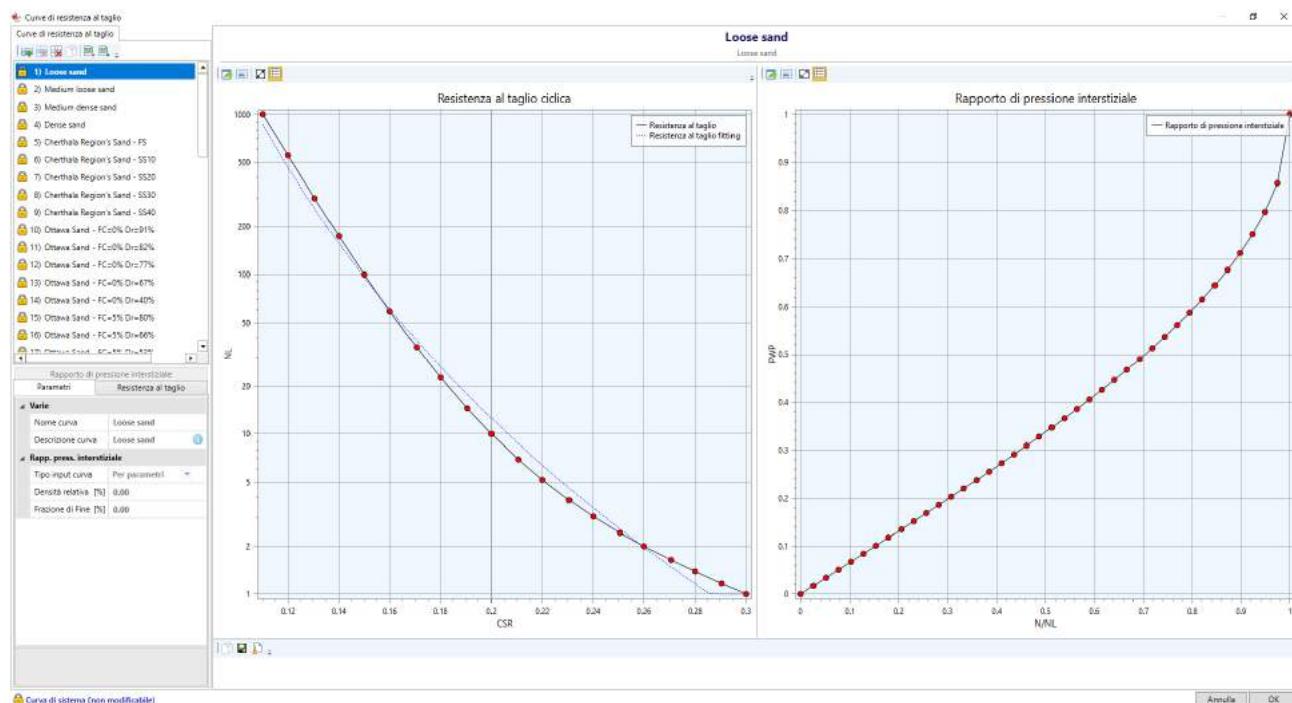


Figura 28. Editor delle curve di resistenza al taglio.

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 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.

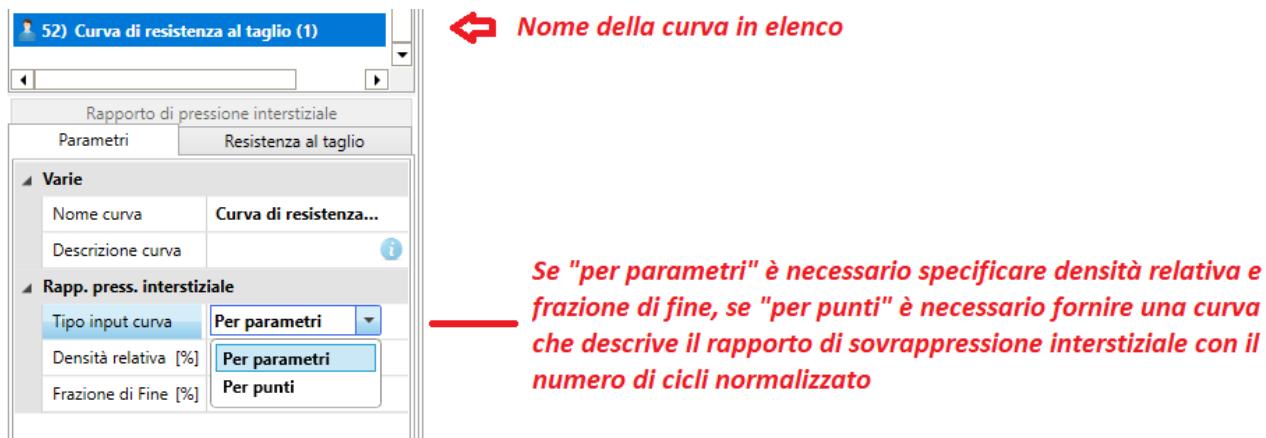


Figura 29. Inserimento di una nuova curva di resistenza al taglio.

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 *Scopus* 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**).

LIQUEFAZIONE – Manuale utente

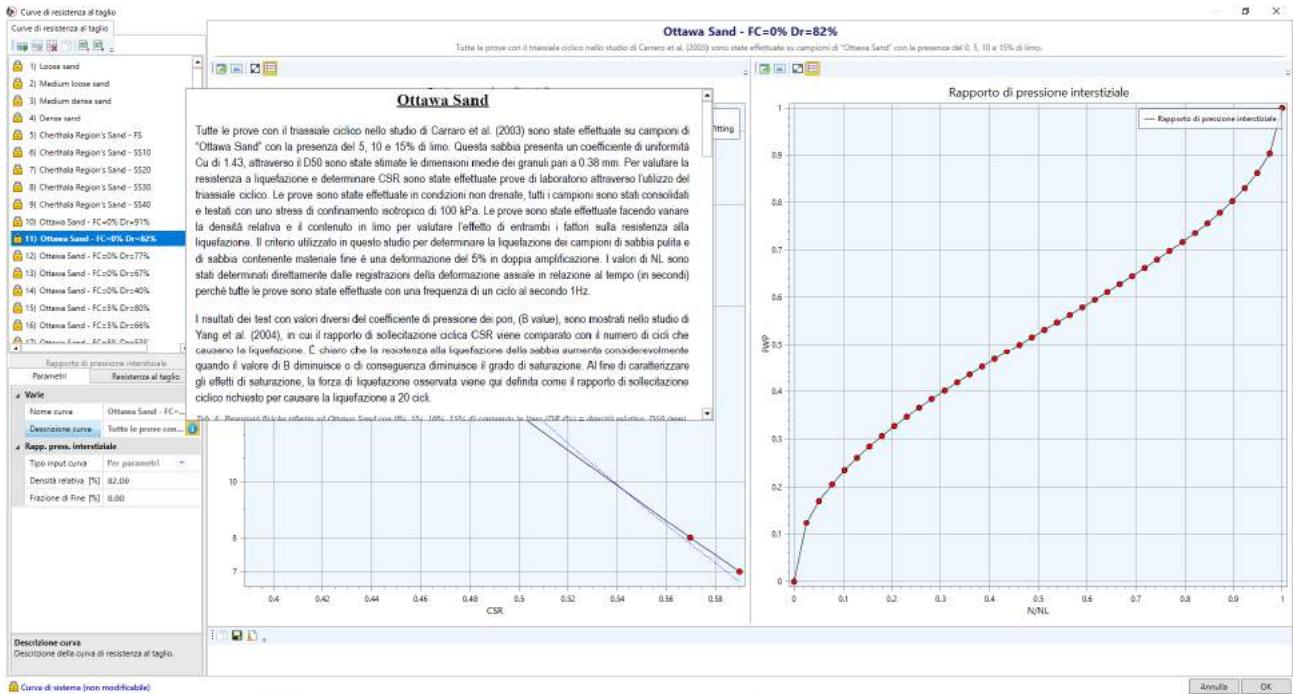


Figura 30. Informazioni relative alle curve di resistenza al taglio di sistema.



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.

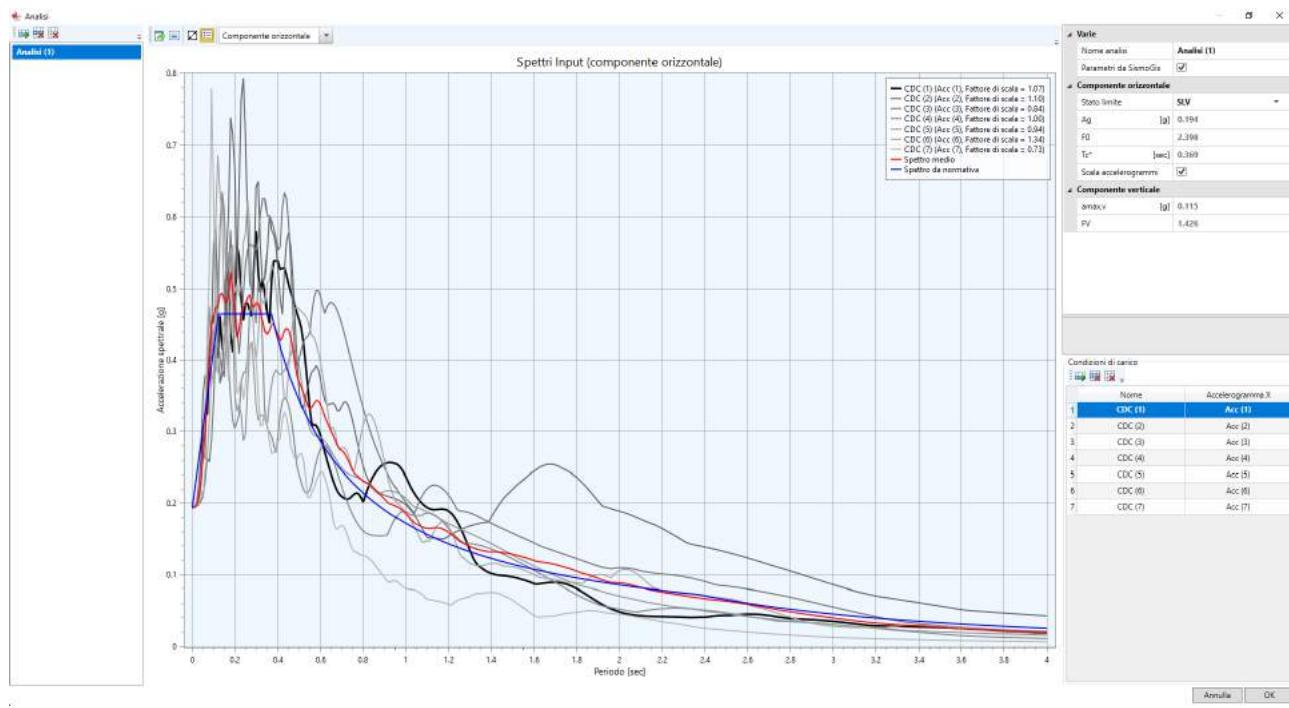


Figura 31. Editor delle analisi dirisposta sismica locale.

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.

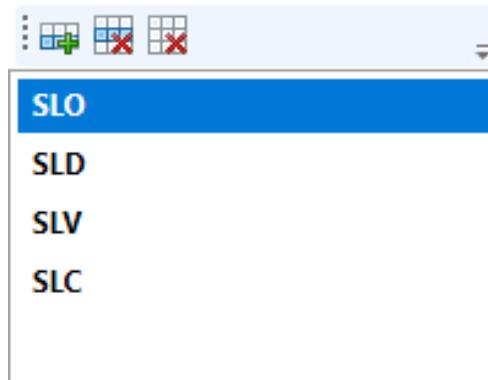


Figura 32. Elenco analisi di risposta sismica locale.



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.



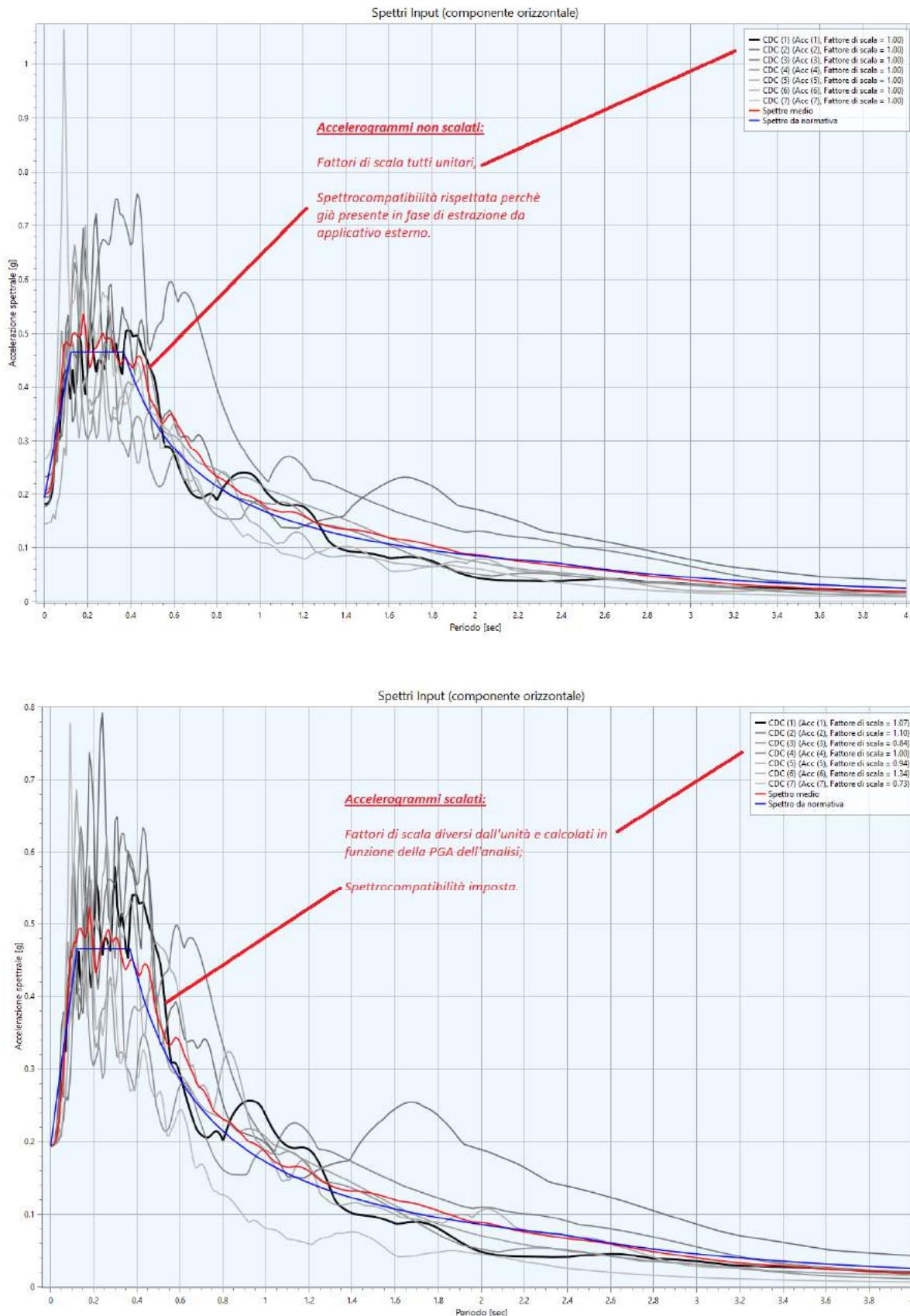


Figura 34. Differenza tra accelerogrammi scalati e non scalatati.



Associazione della settaglia 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.

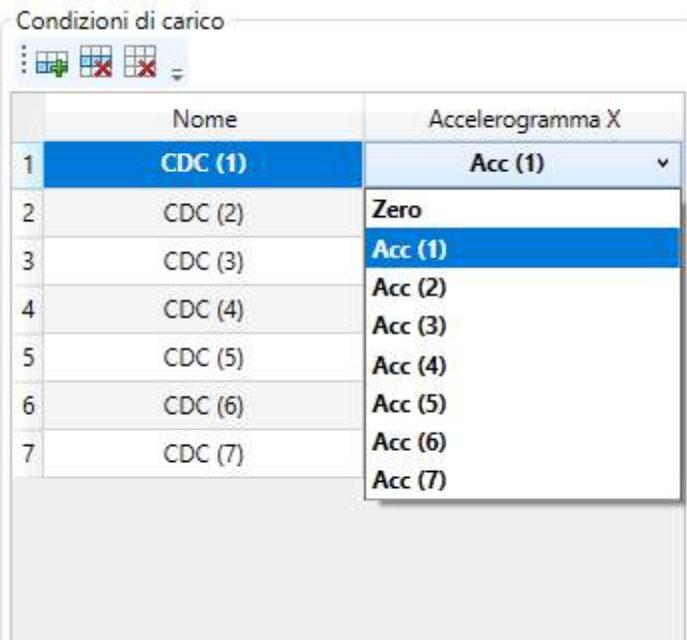


Figura 35. Associazione delle condizioni di carico per la singola analisi.

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.

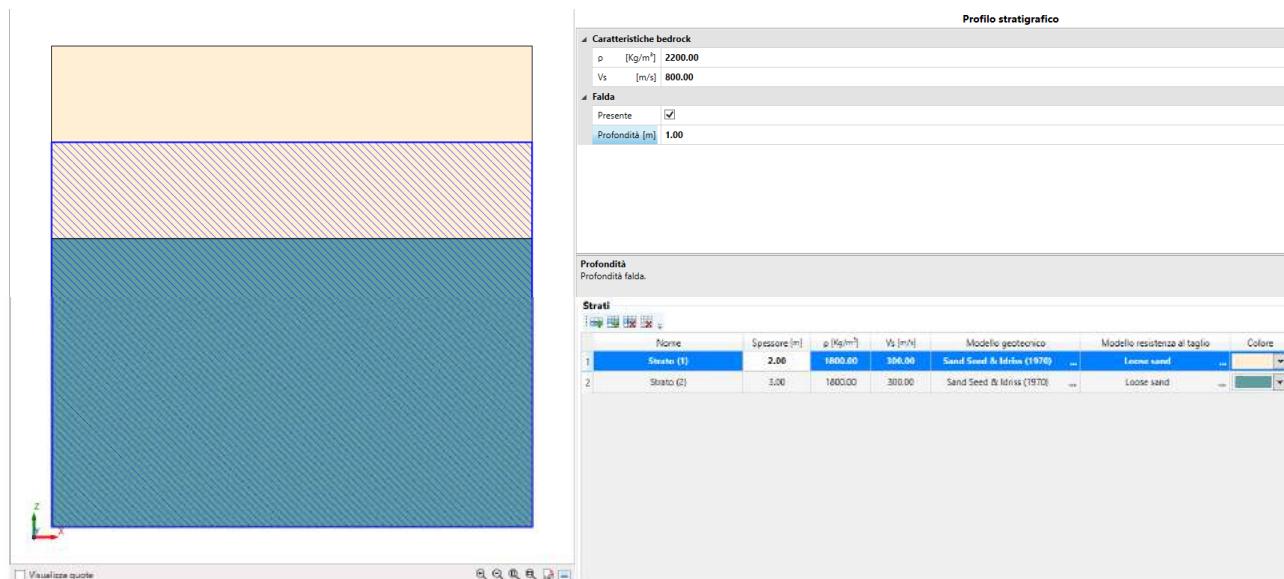


Figura 36. Inserimento stratigrafia.

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 definita 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.

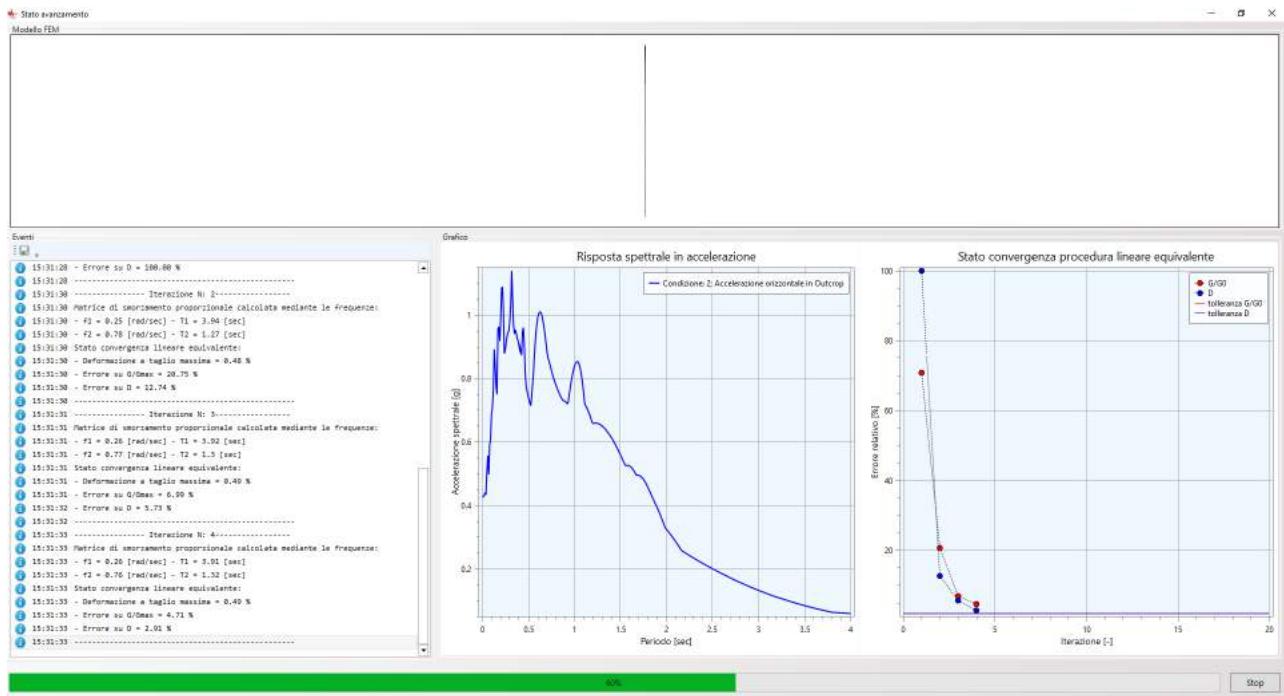


Figura 38. Finestra di avanzamento del calcolo.

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 STATICÀ)
 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 blu);
- 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.

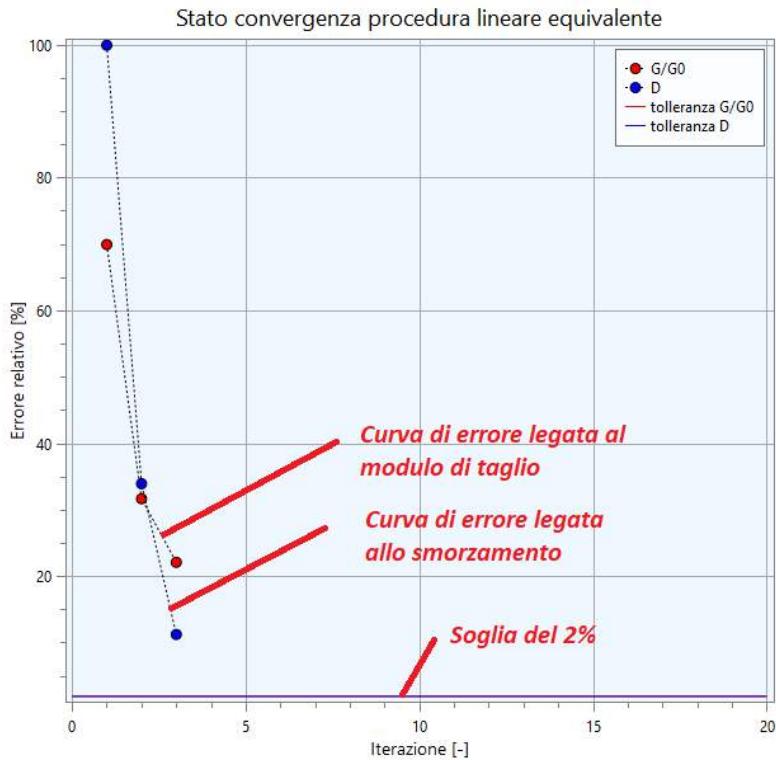


Figura 41. Stato di convergenza della procedura lineare equivalente.

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" () .



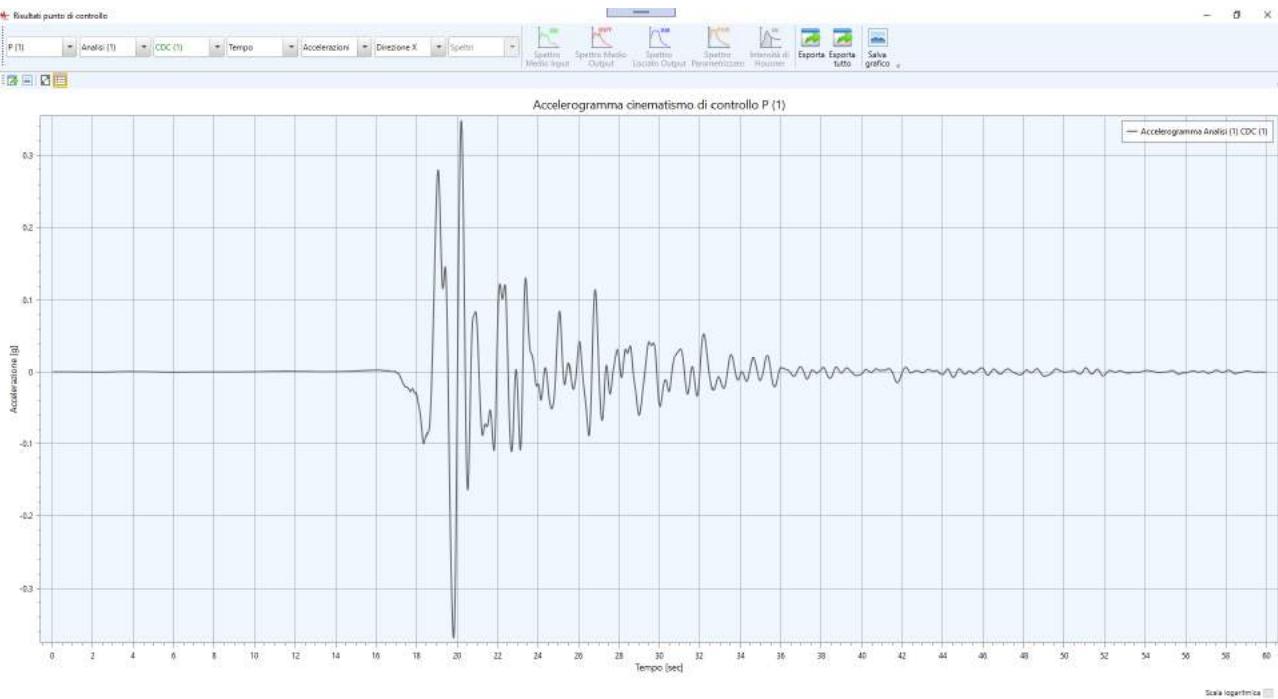


Figura 42. Ambiente di visualizzazione dei risultati sul punto di controllo posto in superficie.

Per esportare i grafici visualizzati in formato testo (*.txt) o per Excel (*.csv) è possibile utilizzare il comando

 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.

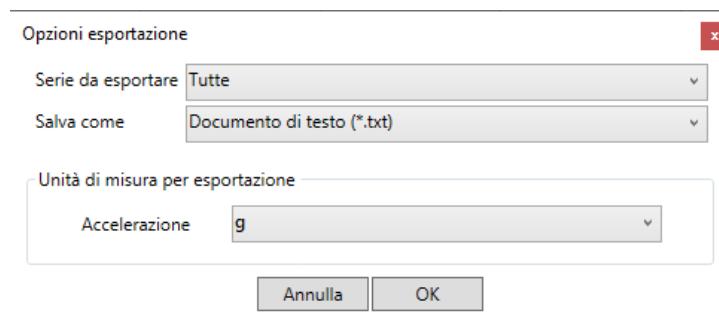


Figura 43. Richieste per l'esportazione dei grafici.

Esportazione dello spettro medio in accelerazione

Qualora l'utente avesse l'esigenza di esportare un file contenente i punti che descrivo 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”.

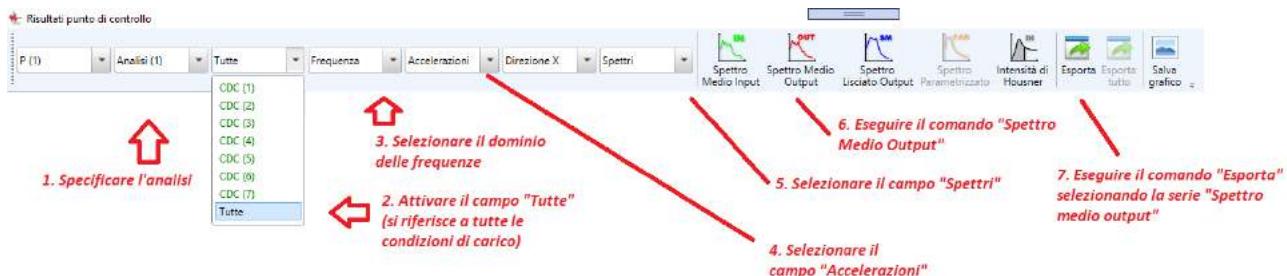


Figura 44. Procedura di esportazione dello spettro medio per punti.

3.6.2 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 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 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 45** e cliccare sul pulsante “Parametrizza”.

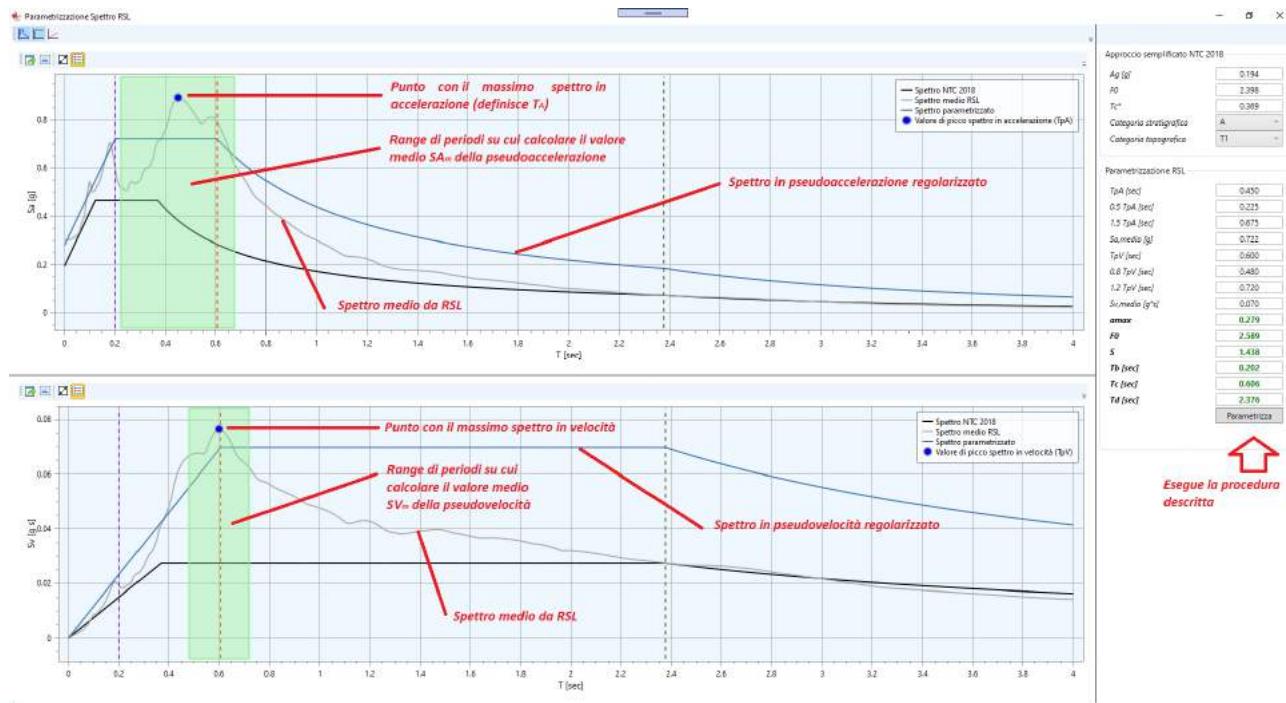


Figura 45. Interfaccia per la gestione della regolarizzazione dello spettro medio da RSL.

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.



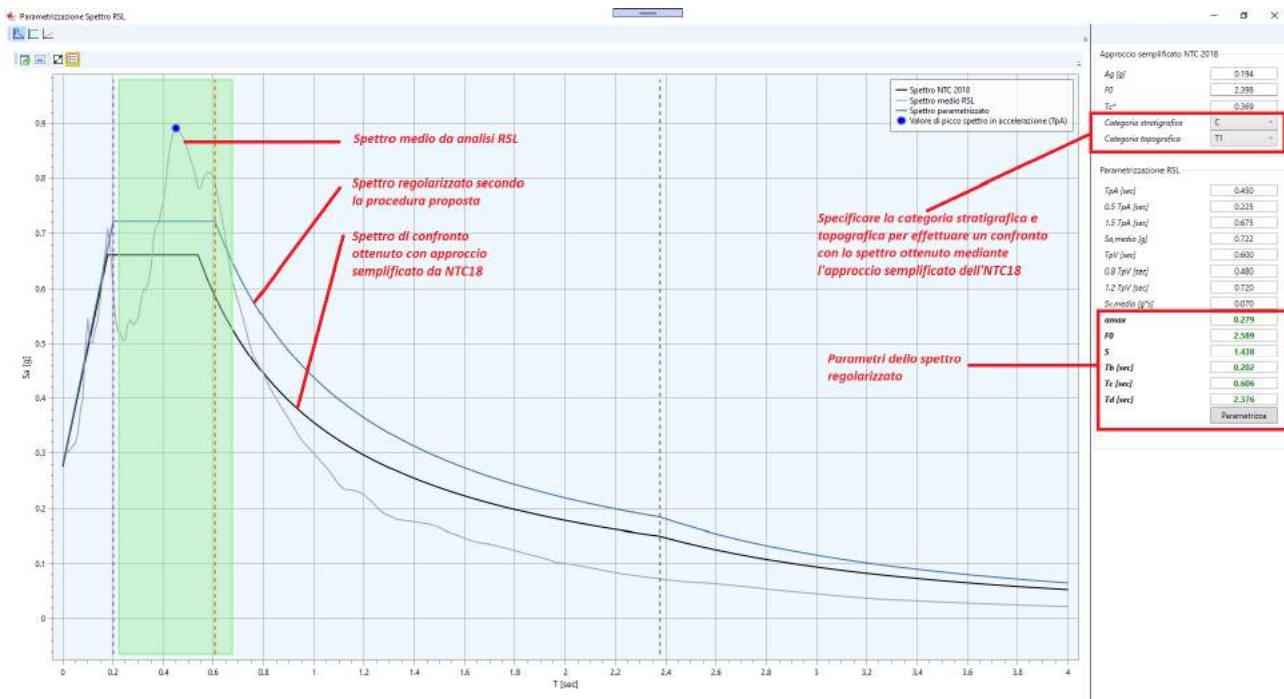


Figura 46. Confronto tra lo spettro regolarizzato e lo spettro ottenuto mediante l'approccio semplificato dell'NTC18.

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.

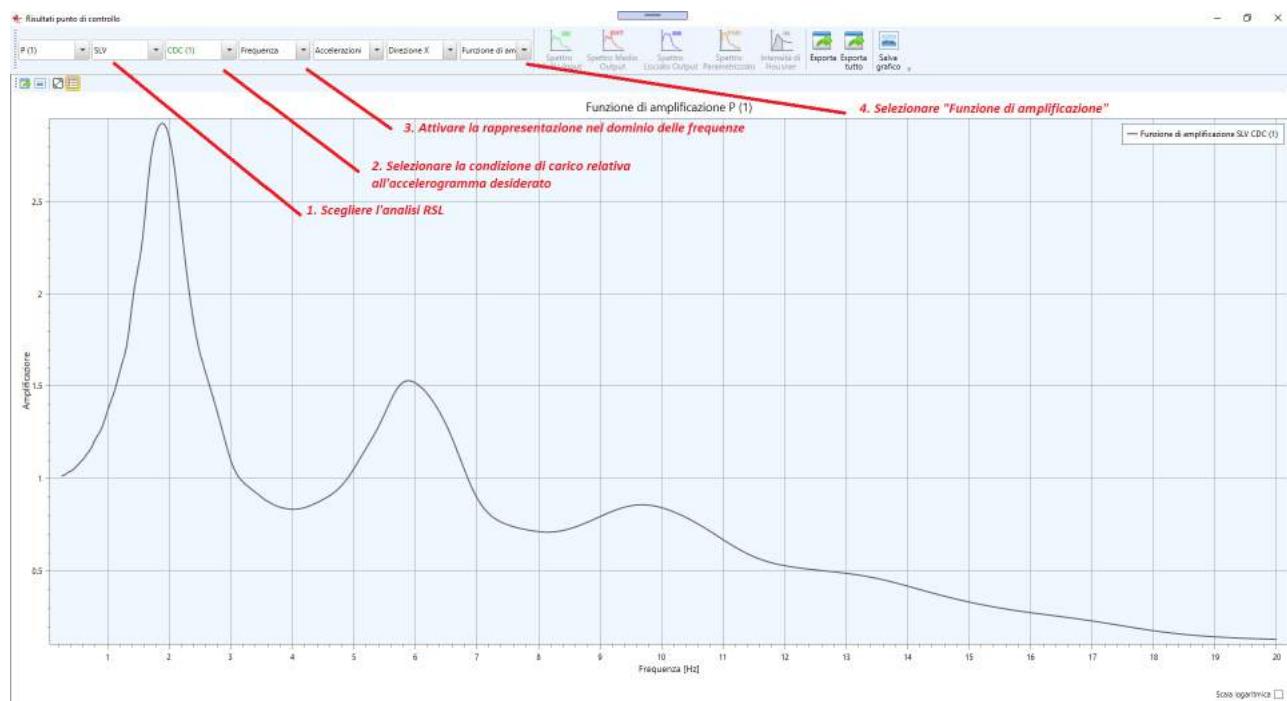


Figura 47. Procedura per la visualizzazione della funzione di amplificazione.



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.

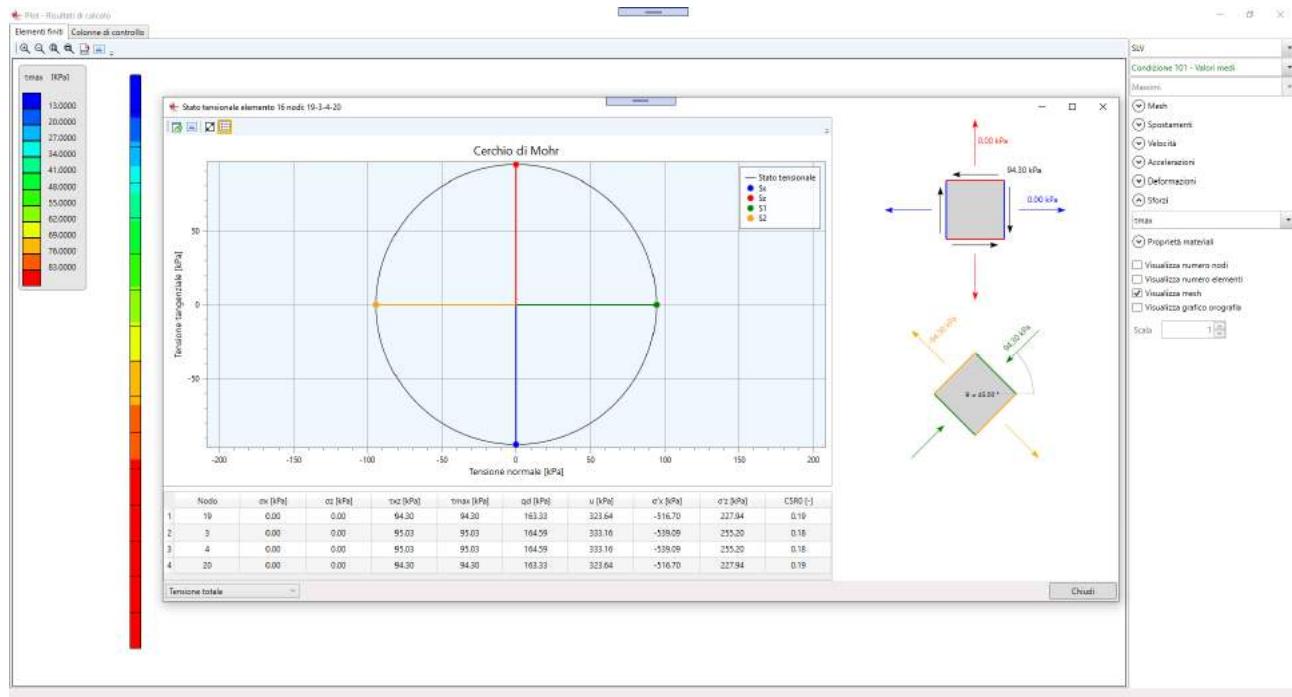


Figura 48. Valori massimi della tensione tangenziale sul modello ad elementi finiti.



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 dal’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.

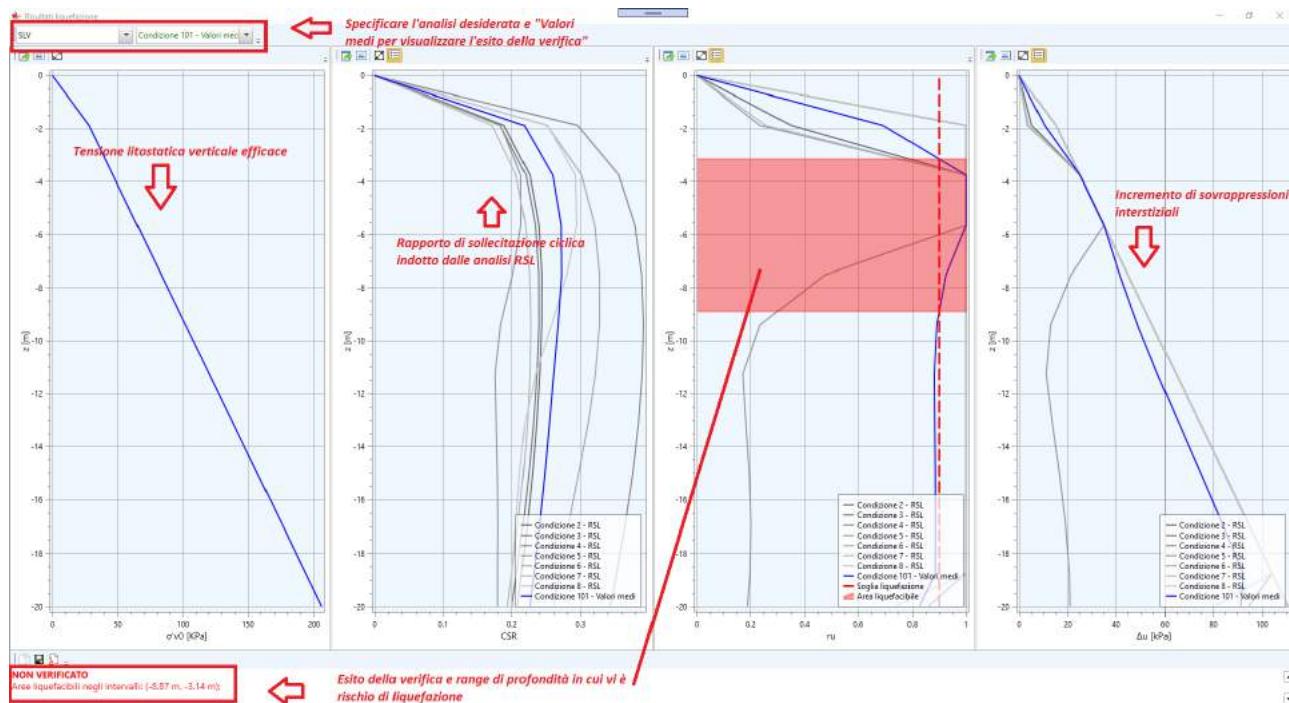


Figura 49. Risultati della verifica alla liquefazione.



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.

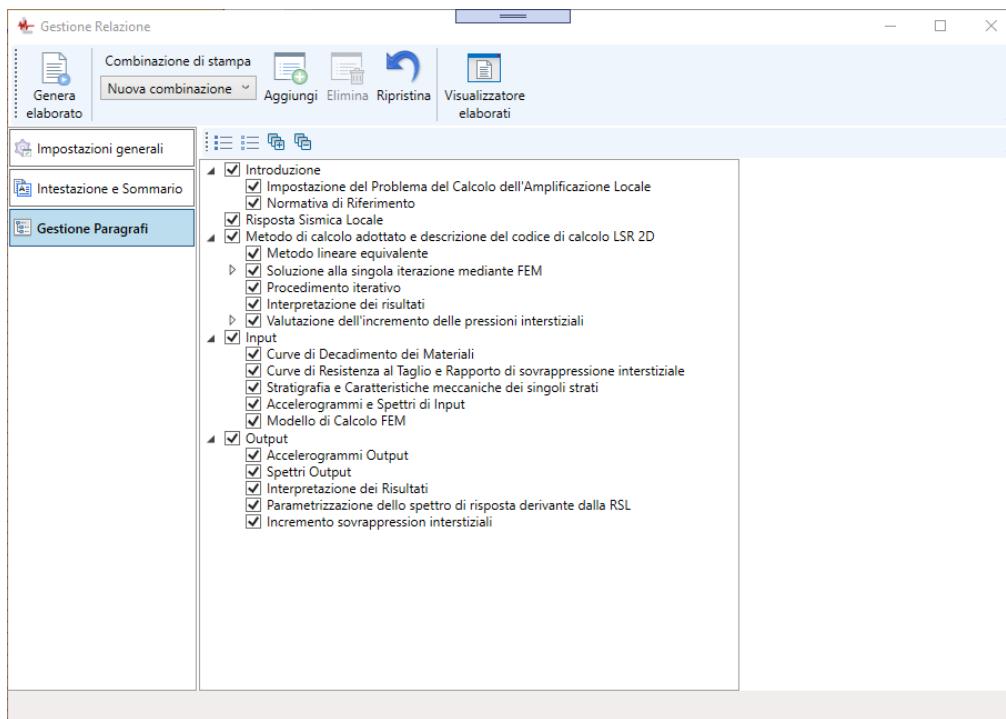


Figura 50. Gestione dei paragrafi della relazione.

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

