



## Aedes.PCM 2023

### PROGETTAZIONE DI COSTRUZIONI IN MURATURA

Analisi strutturale di costruzioni in muratura secondo la Normativa Tecnica vigente

### Aggiornamento 2023

*include:*

- **Analisi parametrica**
- **Spettri di piano**
- **Classificazione sismica**

*Data di redazione di questo documento: 02.05.2023*

Tutti i diritti sono riservati, anche di riproduzione parziale, a norma di legge e delle convenzioni internazionali. Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta in qualsiasi forma o mezzo elettronico o meccanico, per alcun uso, senza il permesso scritto della AEDES Software per Ingegneria Civile.

© 1997-2023 AEDES Software per Ingegneria Civile

Via F. Aporti 32 - 56028 SAN MINIATO (PI)

Tel.: +39 0571 401073

E-mail: info@aedes.it - Internet: www.aedes.it

#### AVVERTENZE E CONDIZIONI D'USO

La AEDES Software si riserva il diritto di apportare miglioramenti o modifiche al programma PCM, descritto nella documentazione ad esso associata, in qualsiasi momento e senza preavviso.

Il software e la documentazione allegata, anche se curati con scrupolosa attenzione, non possono comportare specifiche responsabilità di AEDES per involontari errori o inesattezze: pertanto, l'utilizzatore è tenuto a controllare l'esattezza e la completezza del materiale utilizzato. Le correzioni relative ad eventuali errori tipografici saranno incluse nelle versioni di aggiornamento.

PCM è di esclusiva proprietà della AEDES e viene concesso in uso non esclusivo secondo i termini e le condizioni riportati nel contratto di licenza d'uso. L'Utente non avrà diritto ad utilizzare PCM fino a quando non avrà sottoscritto la suddetta licenza d'uso.

L'Utente è responsabile della scelta di PCM al fine del raggiungimento dei risultati voluti, nonché dell'installazione, dell'uso dello stesso e dei relativi risultati. Le sole garanzie fornite dalla AEDES in merito a PCM sono quelle riportate nella licenza d'uso. La AEDES non garantisce che le funzioni contenute in PCM soddisfino le esigenze dell'Utente o funzionino in tutte le combinazioni che possono essere scelte per l'uso da parte dell'Utente.

I nomi dei prodotti citati nella documentazione di PCM possono essere marchi di fabbrica o marchi registrati dalle rispettive Società.

# INDICE

<b>1</b>	<b>Analisi Parametrica .....</b>	<b>3</b>
1.1	Definizione dei parametri variabili.....	8
1.2	Generazione delle combinazioni.....	14
1.3	Esecuzione dell'analisi parametrica .....	16
1.4	Consultazione dei risultati.....	17
1.5	Analisi di sensitività .....	20
1.6	Esempio applicativo .....	23
1.6.1	Stato Attuale .....	25
1.6.2	Stato di Progetto.....	31
<b>2</b>	<b>Spettri di piano .....</b>	<b>40</b>
2.1	Elaborazione spettri di piano .....	42
2.2	Analisi sismiche lineari con spettri di piano.....	47
<b>3</b>	<b>Classificazione sismica .....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>Analisi Pushover: nuovi Parametri di calcolo.....</b>	<b>54</b>
4.1	Fattore di Partecipazione Modale.....	54
4.2	Punti di controllo.....	57

# 1 ANALISI PARAMETRICA

Aedes 2023 introduce, per i software PCM e ACM, l'**Analisi Parametrica**, consistente nello **studio della variazione dei risultati in funzione di parametri variabili**: questa tecnica si rivela molto importante per l'analisi degli edifici esistenti.

I software di analisi strutturale vengono normalmente utilizzati scegliendo i dati in input ritenuti rappresentativi del comportamento strutturale, ottenendo i corrispondenti risultati, ad esempio in termini di indicatore di rischio sismico.

**L'analisi degli edifici esistenti è caratterizzata da varie incertezze sui valori in input.**

Si possono eseguire in sequenza più analisi variando alcuni parametri affetti da incertezze, ma l'onere gestionale dei diversi modelli può essere elevato: ogni volta si deve creare una copia del modello e mettere a punto la configurazione strutturale da sottoporre all'analisi.

Risulta conveniente una metodologia che permetta al Progettista la **specificità in input di un campo di variabilità per i parametri affetti da incertezze, con la gestione automatica delle combinazioni che si generano**, ognuna corrispondente ad una variante del modello strutturale.

Al termine di questa analisi, definita Analisi Parametrica, è possibile individuare le combinazioni di maggior interesse, ad esempio nei confronti del **minimo indicatore di rischio sismico**.

La tecnica implementata in Aedes 2023 è la **Ricerca Esaustiva**, che prevede l'esecuzione dell'analisi strutturale per tutte le combinazioni generate dalla variabilità dei parametri.

Le combinazioni generate in dipendenza dai parametri variabili scelti dall'Utente possono ovviamente essere molte, e il loro numero cresce in maniera importante aumentando i parametri variabili. Questo aspetto può essere controllato inquadrando correttamente il caso studio, per definire quali siano le incertezze più significative e quali relazioni possono sussistere a priori fra i diversi parametri variabili, escludendo così combinazioni ridondanti o superflue.

Ad esempio, i parametri meccanici dei materiali (resistenze, moduli di elasticità) mantengono in genere tra loro una relazione che prevede l'utilizzo contemporaneo di valori minimi, medi o massimi oppure ottenuti attraverso indicatori di qualità muraria (IQM) che forniscono per i diversi parametri un 'gruppo' di valori fra loro coerenti.

Più in generale, **la gestione delle incertezze è una problematica che comprende diversi aspetti.**

Come noto, le incertezze sono di tipo aleatorio (variabili descritte da una funzione continua di probabilità) e di tipo epistemico (variabili dovute ad una non completa conoscenza dell'oggetto di studio).

Fra le **variabili di tipo aleatorio**, i parametri meccanici (resistenza a compressione, resistenza a taglio, moduli di elasticità) sono quantità definite positive che seguono generalmente la distribuzione log-normale, caratterizzata da valore medio e deviazione standard. Il valore medio si rileva dai dati sulle tipologie murarie (Tab. C8.5.I della Circ. 2019 alle NTC 2018), mentre la deviazione standard, non presente nella tabella citata, è riportata in altri documenti (vd. Tabella 3.1 delle linee guida CNR DT 212-2013: Istruzioni per la valutazione affidabilistica della sicurezza sismica di edifici esistenti [1]).

Le **variabili di tipo epistemico**, associate a difetto di conoscenza della struttura o del comportamento meccanico dei suoi elementi componenti, sono riconducibili a valori discreti, e comportano pertanto la scelta fra due o più valori alternativi. Alcuni esempi: criteri di definizione del telaio equivalente (suddivisione delle pareti in maschi murari), zone rigide dei maschi murari, rigidità fessurata della muratura, distribuzione dei carichi sui solai, tipo di modellazione delle fasce murarie (bielle o elementi beam), grado di accoppiamento fra pareti ortogonali.

Un primo approccio relativo alla gestione delle incertezze consiste nell'**analisi di sensitività**: si tratta di un'analisi che **permette di individuare i parametri** riguardanti geometria, materiali, carichi, vincoli **dai quali dipende maggiormente la risposta strutturale del fabbricato**.

La finalità di tale analisi può essere quella di pianificare le indagini da effettuare per migliorare la conoscenza delle proprietà meccaniche e delle caratteristiche costruttive dell'edificio.

L'analisi di sensitività è stata introdotta nei documenti normativi italiani dalle istruzioni CNR-DT 212/2013 (cfr. §3.1.2; §B.5.3), proponendo l'analisi statica non lineare come metodo di calcolo appropriato per studiare la dipendenza del comportamento strutturale degli edifici esistenti in muratura dalla variabilità dei parametri affetti da incertezze.

In tale documento, dopo aver focalizzato i parametri affetti da incertezza, viene condotta una serie di analisi statiche non lineari, adottando per tutti i parametri di tipo aleatorio continuo (es.: la resistenza a compressione) il valore medio dell'intervallo corrispondente eccetto un parametro, al quale è stato attribuito alternativamente il valore massimo o minimo dell'intervallo stesso (espressione (3.1) delle CNR-DT 212/2013). Per i parametri di tipo epistemico vengono 'pesati' i risultati corrispondenti alle varie opzioni alternative utilizzando la formulazione (3.4) delle citate CNR-DT 212/2013.

L'analisi di sensitività individua quindi i parametri che maggiormente influenzano la risposta strutturale, per i quali può pertanto essere più opportuno approfondire le indagini.

Con riferimento al percorso indicato nel documento citato, all'analisi di sensitività segue l'**analisi di rischio**. A seguito delle indagini è infatti possibile adottare stime migliori dei parametri stessi, aggiornando le distribuzioni di probabilità delle variabili affette da incertezza. L'analisi di rischio consiste nel considerare ancora variabili affette da incertezze e quindi nell'analizzare le diverse combinazioni corrispondenti. L'insieme dei parametri variabili può essere stato modificato rispetto a quello scelto per l'analisi di sensitività, ad esempio ponendo come deterministiche, e quindi su un valore prefissato, le variabili i cui effetti sulla risposta sono risultati poco significativi.

Poiché nell'analisi di rischio occorre associare una probabilità ad ogni variabile, quindi anche a quelle epistemiche, è necessario operare in tal senso scelte di tipo soggettivo.

Nell'analisi di rischio, le probabilità corrispondenti ai valori delle variabili incerte conducono, per ognuna delle combinazioni considerate, a un valore di capacità in termini di accelerazione al suolo (o di indicatore di rischio) associato alla probabilità della combinazione, e conseguentemente è possibile costruire curve di fragilità per i vari stati limite di riferimento.

**Nell'analisi di sensitività e nell'analisi di rischio sopra descritte si possono rilevare alcune importanti criticità.**

Nell'analisi di sensitività la variazione fra massimo e minimo per una variabile, tenendo ferme tutte le altre sui valori medi, limita il numero di combinazioni analizzate per studiare l'effetto di un parametro variabile e di conseguenza le informazioni ricavate potrebbero non essere esaustive: il comportamento strutturale è in generale molto complesso, essendo caratterizzato da un sistema dove le variabili tra loro indipendenti possono assumere qualsiasi valore del proprio intervallo.

Ad esempio, l'effetto del valore massimo di un parametro in corrispondenza del massimo o del minimo di un altro parametro da esso indipendente può essere ben diverso: pertanto, bloccare il secondo parametro sul valore medio può non condurre a una valutazione appropriata degli effetti dei valori estremi del primo parametro.

In altre parole, **il disaccoppiamento tra variabili condotto nell'analisi di sensitività come sopra formulata esamina solo un sottoinsieme delle possibili combinazioni e quindi non è esaustivo.**

Si può ritenere più significativo procedere direttamente con un' **Analisi Parametrica completa, esplorando tutte le combinazioni** così come fatto dall'analisi di rischio, rispetto alla quale tuttavia possono non entrare in gioco le probabilità. La Ricerca Esaustiva dell'Analisi Parametrica produce infatti un quadro completo sulle capacità della struttura corrispondenti alle diverse combinazioni.

Si può così individuare l'insieme di valori dei parametri variabili che corrisponde ad esempio al risultato più sfavorevole (il minimo indicatore di rischio sismico), e contemporaneamente è possibile studiare l'influenza dei singoli parametri, sia applicando i criteri restrittivi dell'Analisi di Sensitività sopra illustrata, sia esplorando lo spazio dei risultati secondo criteri definiti dall'Utente.

**L'Analisi Parametrica, come formulata in Aedes 2023, include quindi l'Analisi di Sensitività, ma costituisce uno strumento più vasto e completo, fondandosi sulla Ricerca Esaustiva.**

**Per quanto riguarda l'analisi di rischio: sussistono notevoli perplessità sulle scelte delle probabilità associate a variabili epistemiche.**

Si consideri come riferimento un lavoro sulla valutazione dell'effetto delle incertezze di modello sulla risposta sismica di edifici in muratura esistenti [2], dove viene presentato un caso studio.

Le incertezze di modellazione sono variabili discrete, e viene seguito un approccio ad albero logico (ossia l'insieme delle combinazioni generate dai diversi valori discreti dei parametri variabili), assegnando ad ogni valore una determinata probabilità; per ogni ramo dell'albero logico (cioè, per ogni combinazione) si ottiene un risultato in termini di accelerazione e la probabilità corrispondente, ottenuta dalla moltiplicazione delle probabilità assegnati ai valori che i vari parametri variabili assumono nella combinazione. Si ottiene in tal modo, per i diversi stati limite di riferimento, la distribuzione di probabilità delle capacità in termini di accelerazione.

**Su alcuni parametri le probabilità assegnate ai diversi valori derivano da un giudizio fortemente soggettivo.** Ad esempio, uno dei parametri variabili di modello considerati è la rigidezza fessurata della muratura.

Sono stati scelti tre valori possibili: 50% (rigidezza fessurata pari alla metà della rigidezza elastica), 75% e 100% (rigidezza non fessurata). A questi tre valori sono stati associate le seguenti probabilità: 45% ai valori del 100% e del 50%, e 10% al 75%. La giustificazione di tale scelta è la seguente (cit. da

[2], §3.2):

- *l'opzione 100% si ritiene ragionevole se il Progettista ritiene che i valori riportati nella tabella normativa per i moduli di elasticità siano già bassi se confrontati con i risultati sperimentali;*
- *il valore 50% è un coefficiente di riduzione che viene spesso adottato nella pratica ingegneristica e costituisce anche il valore di default dei diversi programmi di analisi strutturale;*
- *il valore 75% è il più coerente con i risultati sperimentali e quindi in molti casi è probabilmente la scelta più appropriata. A questo valore si associa una bassa probabilità, in quanto si ritiene che solo una piccola percentuale di Progettisti ricorrerebbe a risultati sperimentali per la valutazione di questo coefficiente di riduzione.*

**La forte soggettività di questa posizione condiziona inevitabilmente la bontà del risultato.**

Non è chiaro per quale motivo si deve associare la probabilità più bassa alla scelta più appropriata.

Nell'ambito del lavoro citato [2], probabilità soggettive vengono associate anche ai due valori del parametro di connessione fra pareti ortogonali, attribuendo il 75% al completo collegamento, e il 25% alla mancanza di accoppiamento flessionale e a taglio, ritenendo che il primo sia l'approccio di modellazione più corretto: ma valori altrettanto giustificabili in tal senso potrebbero essere 60% e 40%. Quest'ultima scelta è stata adottata nell'esempio proposto in §B.6 della CNR-DT 212/2013: anche in questo caso studio viene considerata la variabile di modello sull'ammorsamento dei muri ortogonali, ed è stato deciso di assegnare un maggior peso all'ipotesi di perfetto ammorsamento (60%) e conseguentemente una probabilità del 40% ad un accoppiamento non efficace. Tale scelta viene giustificata osservando che l'edificio oggetto di studio (un edificio esistente reale danneggiato in occasione del sisma del 29 maggio 2012 in Emilia, del quale è disponibile il rilievo del danno) non mostra alcuna fessurazione in corrispondenza degli ammorsamenti.

Non si capisce per quale motivo per un parametro di modellazione identico (l'ammorsamento tra muri ortogonali) caratterizzato da due valori discreti con significato identico (accoppiamento completo o mancante) si assegnino probabilità 60%-40% nel caso della CNR-DT 212/2013 e 75%-25% nel caso del lavoro citato [2].

Inoltre, in [2] gli Autori dichiarano di aver condotto l'analisi con un unico software che non modella la rigidità della parete fuori piano, un aspetto certamente coinvolto nel comportamento di due pareti tra loro ortogonali sotto azione sismica lungo una direzione rispetto alla quale una delle pareti è orientata ortogonalmente a tale direzione. Diversamente dal software utilizzato in [2], Aedes.PCM ha sempre preso in considerazione la rigidità delle pareti in direzione trasversale, ritenendo che il comportamento di ogni elemento strutturale debba essere modellato nella sua completezza. In [2] gli Autori stessi indicano che prendere in considerazione la rigidità fuori piano modificherebbe la gestione dell'incertezza e quindi il giudizio sui risultati.

**Le analisi di rischio condotte sulla base di ipotesi soggettive possono condurre a giudizi di vulnerabilità poco attendibili.**

**Tutto ciò premesso, si ritiene preferibile un esame esaustivo delle combinazioni derivanti dalla variabilità dei parametri affetti da incertezze**, in modo da supportare efficacemente il Progettista sia nelle analisi di vulnerabilità sia nella progettazione degli interventi di consolidamento. In prospettiva, questo approccio può essere peraltro irrobustito attraverso metodi di ottimizzazione in

grado di gestire i casi con elevato numero di combinazioni.

**Aedes 2023** si muove in tale direzione attraverso l'implementazione dell'**Analisi Parametrica nei software PCM e ACM**, secondo un percorso originale di Ricerca e proponendo strumenti all'avanguardia per la definizione dei dati e la consultazione dei risultati.

Per eseguire un'analisi parametrica è necessario innanzitutto definire i **parametri variabili**, cioè una lista di parametri relativi alla modellazione strutturale, che si intende far variare nel corso dell'analisi. I parametri variabili possono riguardare opzioni generali di modellazione o proprietà di materiali, aste, nodi e solai. Per ogni parametro è necessario specificare l'elenco dei possibili valori o un intervallo di variabilità.

Al lancio dell'Analisi Parametrica, vengono generate tutte le possibili **combinazioni** dei parametri variabili tenendo conto della loro variabilità e dei vincoli imposti. In Aedes.PCM, per ogni combinazione vengono eseguite l'analisi modale e l'analisi Pushover memorizzando i valori di alcuni **risultati monitorati**, come i periodi fondamentali di vibrazione nelle direzioni X e Y, e gli indicatori di rischio sismico  $\zeta_E$  per i vari stati limite considerati.

[1] CNR-DT 212/2013: "Istruzione per la Valutazione Affidabilistica della Sicurezza Sismica di Edifici Esistenti", Roma – CNR, 14 maggio 2014.

[2] M. Rota, S. Bracchi, A. Penna, G. Magenes: "Evaluation of the effect of modeling uncertainties on the seismic response of existing masonry buildings", COMPDYN 2013, 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, 12–14 June 2013.

## 1.1 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI VARIABILI

Un'apposita scheda situata nella parte alta dell'interfaccia permette di definire l'elenco dei parametri variabili. Nella griglia, le righe rappresentano i parametri e le colonne le loro proprietà. Per inserire un nuovo parametro è sufficiente iniziare a compilare l'ultima riga della griglia. La compilazione o la modifica di un parametro deve avvenire da sinistra verso destra, partendo dalla colonna "Classe".

Trova Segnalazioni Parametri variabili														
Aggiungi Annulla filtri Esegui validazione														
N. Combinazioni ≤ 49														
Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2	Valore 3	Valore 4	Valore 5	Vincolo	ki	kj	Stato
1	Generale		Fasce murarie: Contributo	Da modello	B	Non collaboranti	Da modello							Corretto
2	1	Materiale	Muratura esistente	E	870	D3	696	870	1305					Corretto
3	1	Materiale	Muratura esistente	G	290	D3	232	290	435					Corretto
4	1	Materiale	Muratura esistente	f,m	1	D3	0.7	1	1.5					Corretto
5	1	Materiale	Muratura esistente	f,hm	0.5	D3	0.35	0.5	0.75					Corretto
6	1	Materiale	Muratura esistente	τ,0	0.018	D3	0.013	0.018	0.027					Corretto
7	2	Solaio	Solaio cod.464	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
8	2	Solaio	Solaio cod.476	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
9	3	Solaio	Solaio cod.436	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
10	3	Solaio	Solaio cod.440	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
11	3	Solaio	Solaio cod.444	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
12	3	Solaio	Solaio cod.452	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
13	3	Solaio	Solaio cod.456	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
14	3	Solaio	Solaio cod.460	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
15	4	Solaio	Solaio cod.464	Distribuzione trasversale	0	D2	0	20						Corretto
16	4	Solaio	Solaio cod.468	Distribuzione trasversale	0	D2	0	20						Corretto
17	4	Solaio	Solaio cod.476	Distribuzione trasversale	0	D2	0	20						Corretto

\* Aggiungi riga

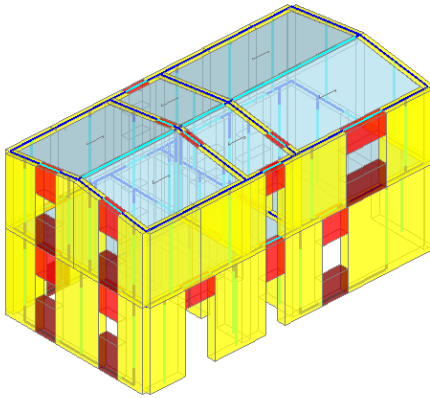


Figura 1. Scheda Parametri variabili

Di seguito si riporta la descrizione delle informazioni necessarie a caratterizzare un parametro variabile.

### Gruppo

Numero identificativo di un eventuale gruppo di appartenenza del parametro. Grazie a questa proprietà è possibile raggruppare vari parametri e fare in modo che varino in modo omogeneo, cioè assumano sempre valori omologhi.

Nell'esempio riportato nella figura precedente, i parametri 2, 3, 4, 5, 6 sono raggruppati nel gruppo 1. Nella generazione delle varie combinazioni, saranno considerate accettabili solo le combinazioni in cui tutti questi parametri assumono contemporaneamente il primo, il secondo o il terzo valore possibile. Evidentemente, affinché due parametri possano essere raggruppati nello stesso gruppo è necessario che abbiano lo stesso numero di valori possibili (vedi Variabilità).



---

I gruppi di parametri non definiti correttamente o aventi diverso numero di valori possibili, vengono evidenziati in rosso perché non validi.

---

**Classe** Rappresenta la classe del parametro variabile, o il tipo di elemento cui esso si riferisce. Le opzioni possibili sono:

- **Generale**
  - **Materiale**
  - **Asta**
  - **Nodo**
  - **Solaio**
- 

**Elemento** Elemento di riferimento del parametro variabile.  
Per le classi Materiale, Asta, Nodo o Solaio, una lista permette di selezionare l'elemento desiderato tra quelli presenti nel modello. Per la classe Generale, il campo va lasciato vuoto.

---

**Proprietà** Proprietà o impostazione rappresentativa del parametro variabile. Le opzioni possibili dipendono dalla classe e dalla tipologia dell'elemento.

**Generale:**

- *Zone rigide*. Metodo di definizione delle zone rigide nel telaio equivalente
- *Rigidità trasversale*. Per considerare, oppure no, la rigidità trasversale dei maschi murari.
- *Pushover: Componente Verticale*. Per considerare, oppure no, la componente sismica verticale in analisi Pushover.
- *Fasce murarie: Contributo*. Modellazione delle fasce murarie in riferimento all'accoppiamento dei maschi murari adiacenti. Le opzioni possibili sono:
  - Da modello: lascia invariata la modellazione corrente;
  - Non collaboranti: libera la rotazione  $y$  agli estremi delle fasce murarie e le esclude dalle verifiche di sicurezza.
- *Flessione solo nei maschi snelli*. Per considerare la flessione solo nei maschi murari con snellezza superiore al valore soglia specificato in Parametri di Calcolo > Verifiche.

**Materiale:**

- $E, G$ . Valore del modulo di elasticità normale e tangenziale.
- $f_m, f_{hm}$ . Valore della resistenza media a compressione verticale e orizzontale (solo in caso di muratura esistente),
- $\tau_0, f_{v0}$ . Valore della resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali, in caso di tessitura regolare o irregolare (solo in caso di muratura esistente).

**Asta:**

- *Da verificare*. Per eseguire, oppure no, le verifiche di sicurezza relative all'asta.
-

- *Vincolo*. Con riferimento al vincolamento iniziale o finale dell'asta (Vincolo I o Vincolo J) permette di bloccare o liberare una determinata componente di spostamento (Traslazione X,Y,Z o Rotazione X,Y,Z).
- *Caratteristiche*. Per attivare, oppure no, determinate caratteristiche costruttive che modificano le proprietà meccaniche del materiale: Malta scadente, Malta buona, Giunti sottili, Ricorsi o listature, Connessione trasversale, Nucleo scadente o ampio. Solo per aste in muratura esistente.
- *Interventi*. Per attivare, oppure no, determinati interventi di consolidamento: Intonaco armato, Diatoni artificiali, Ristilatura armata, Altri interventi. Solo per aste in muratura esistente.  
In caso di "Altri interventi", i possibili valori sono: Nessuno, Rinforzo a taglio, Precompressione, FRP, FRCM, CAM, Reticolatus, Reti FRP e altro. Le caratteristiche di questi interventi di consolidamento devono essere impostate preventivamente sul modello della struttura (proprietà delle aste e parametri di calcolo); il parametro variabile ha il solo scopo di attivare oppure no l'intervento.

**Nodo:**

- *Vincolo*. Con riferimento al vincolamento del nodo permette di bloccare o liberare una determinata componente di spostamento (Traslazione X,Y,Z o Rotazione X,Y,Z).
- *Sempre massa locale*. Se il nodo fa parte di un livello rigido, questa proprietà permette di svincolarlo dalla relazione master-slave. La massa nodale rimane locale (non confluisce nel nodo master) e lo spostamento del nodo (Traslazione X,Y e Rotazione Z) non viene vincolato allo spostamento del nodo master del livello.

**Solaio:**

- *Infinitamente rigido*. Determina se il solaio è dotato di infinita rigidità nel suo piano.
- *Distribuzione trasversale*. Valore della percentuale di carico distribuito in direzione ortogonale alla direzione principale del solaio.
- *Carico 3*. Valore del carico distribuito variabile. La relativa condizione di carico è specificata nelle proprietà del solaio.

---

**Valore**

Valore corrente della proprietà di cui sopra, cioè il valore definito in input nei dati del progetto. I valori correnti di progetto sono tutti utilizzati per la definizione della combinazione n°1, che si riferisce alla struttura così come definita nel modello corrente: i corrispondenti risultati possono in tal modo essere comparati con quelli delle combinazioni generate dai valori dei parametri variabili in input.

---

**Variabilità**

Determina il tipo di variabilità del parametro, in base alla proprietà specificata. Le opzioni possibili sono:

---

- **B.** Variabilità di tipo booleano. Permette di specificare 2 valori, ad esempio: Si/No oppure Libera/Bloccata (con riferimento alla componente di spostamento in un vincolamento).
- **DN.** Variabilità di tipo discreto. Permette di specificare N valori distinti del parametro.
- **CN.** Variabilità di tipo continuo. Permette di specificare il valore iniziale e il valore finale di un intervallo di variabilità (Valore 1 e Valore 2). Saranno considerati N valori appartenenti a questo intervallo.  
Ad esempio, si consideri il seguente caso:  
Variabilità C5, Valore 1 = 100, Valore 2 = 500  
I valori possibili sono: 100, 200, 300, 400, 500.

<b>Valori</b>	<p>Determinano i valori che possono essere assunti dal parametro variabile. Il numero di valori da specificare dipende dal tipo di variabilità:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilità B: 2 valori</li> <li>• Variabilità DN: N valori</li> <li>• Variabilità CN: 2 valori corrispondenti al valore iniziale e finale dell'intervallo di variabilità.</li> </ul>
<b>Vincolo</b>	<p>Proprietà vincolante V distinta dalla proprietà corrente P. Permette di vincolare la variabilità del parametro corrente in funzione del valore assunto dalla proprietà vincolante. I limiti di variabilità sono definiti dai successivi parametri <math>k_i</math> e <math>k_j</math>. La proprietà vincolante può essere a sua volta costante o variabile.</p>
<b><math>k_i</math></b>	<p>Se specificato, sono considerate accettabili le combinazioni in cui <math>P \geq k_i V</math>. Dove P è la proprietà del parametro corrente e V è la proprietà vincolante.</p>
<b><math>k_j</math></b>	<p>Se specificato, sono considerate accettabili le combinazioni in cui <math>P \leq k_j V</math>. Dove P è la proprietà del parametro corrente e V è la proprietà vincolante.</p>
<b>Stato</b>	<p>Definisce lo stato del parametro variabile. I possibili valori sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Corretto.</b> Il parametro variabile è stato definito correttamente.</li> <li>• <b>Incompleto.</b> La definizione del parametro è incompleta, bisogna inserire ulteriori informazioni.</li> <li>• <b>Errato.</b> Alcune informazioni non sono corrette. Succede, ad esempio, se l'elemento specificato non fa più parte del modello.</li> <li>• <b>Duplicato.</b> Il parametro variabile si riferisce ad una proprietà o un'opzione già presente in un altro parametro variabile.</li> </ul>

Cliccando sul titolo delle colonne è possibile ordinare la lista dei parametri variabili. L'**ordinamento** può essere effettuato per Gruppo, Classe, Elemento, Variabilità e Stato.

Inoltre, sempre agendo sul titolo delle colonne è possibile applicare dei **filtri** per semplificare la consultazione della lista in presenza di un elevato numero di parametri variabili.

La barra degli strumenti in alto contiene i seguenti comandi o informazioni.

---

<b>Aggiungi selezione</b>	Inserisce automaticamente una lista di parametri variabili relativi agli elementi selezionati nel modello. Questo comando è utile, ad esempio, per definire rapidamente dei parametri variabili per un gruppo di aste, nodi o solai.
---------------------------	--

---

<b>Annulla filtri</b>	Annulla tutti i filtri specificati nella griglia dei parametri variabili.
-----------------------	---


---

<b>Esegui validazione</b>	Il comando esegue le seguenti operazioni: <ul style="list-style-type: none"><li>• Elimina i parametri incompleti, incorretti o duplicati.</li><li>• Annulla i gruppi non validi, ad esempio quelli specificati per parametri con diverso numero di valori possibili.</li><li>• Ordina la lista dei parametri variabili per gruppo, classe ed elemento.</li><li>• Calcola con esattezza il numero delle combinazioni, tenendo conto dei gruppi, dei vincoli e delle esclusioni (vedi Esclusione).</li></ul>
---------------------------	--

---

<b>N. Combinazioni</b>	Riporta il numero di possibili combinazioni dei parametri variabili. Durante la definizione dei parametri viene riportato un limite superiore del numero di combinazioni, che tiene conto di variabilità, gruppi, vincoli ed esclusioni, ma non di eventuali combinazioni duplicate. Invece, in seguito alla Validazione o al lancio dell'Analisi Parametrica, viene riportato il numero effettivo delle combinazioni da esaminare. Se il numero effettivo di combinazioni da esaminare è maggiore di 10000, l'analisi non verrà eseguita.
------------------------	--

---

 <b>Esclusione</b>	Visualizza la matrice di esclusione, per mezzo della quale è possibile impedire la variabilità contemporanea di due o più parametri. Quando due parametri si escludono vicendevolmente, mentre l'uno varia l'altro assume il valore corrente (da modello): vengono quindi scartate le combinazioni in cui entrambi assumono valore diverso dal valore corrente. Ad esempio, si consideri il caso riportato nella figura seguente. Sono stati definiti in totale 5 parametri variabili. I parametri 2 e 3 (gruppo 1) sono relativi all'intervento di consolidamento con iniezioni di malta; mentre i parametri 4 e 5 (gruppo 2) sono relativi all'intervento di intonaco armato. Supponiamo di voler evitare la concomitanza dei due tipi di intervento. È necessario escludere la variabilità contemporanea dei parametri 2, 3 con i parametri 4, 5. In questo modo, dato che nel modello corrente gli interventi sono disattivati, saranno scartate le combinazioni in cui entrambi gli interventi siano attivi. Nella matrice di esclusione spuntiamo quindi la casella [2,4] per escludere la variabilità contemporanea dei parametri 2 e 4. Automaticamente vengono spuntate anche le caselle [2,5] [3,4] e [4,5] in quanto l'esclusione di variabilità si ripercuote a tutto il gruppo.
---	--

---

Ovviamente le caselle [2,3] e [4,5] non possono essere spuntate, in quanto non avrebbe senso escludere la variabilità contemporanea di parametri appartenenti allo stesso gruppo.

Trova		Segnalazioni		Parametri variabili																
Aggiungi selezione		Annulla filtri		Esegui validazione												N. Combinazioni ≤ 9				
Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2	Valore 3	Valore 4	Valore 5	Vincolo	ki	kj	Stato	1	2	3	4	5	
1	Solaio	Solaio cod.436	Infinitamente rigido	No	B	No	Si							Corretto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
▶ 2	1	Asta	Asta 1	Interventi: Iniezioni	No	B	No	Si						Corretto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	1	Asta	Asta 3	Interventi: Iniezioni	No	B	No	Si						Corretto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	2	Asta	Asta 1	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	2	Asta	Asta 3	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 2. Matrice di esclusione

## 1.2 GENERAZIONE DELLE COMBINAZIONI

Durante la definizione dei parametri variabili Aedes.PCM elabora automaticamente tutte le possibili combinazioni tenendo conto di variabilità, gruppi, vincoli ed esclusioni. Il numero di combinazioni riportato nella barra degli strumenti rappresenta il numero massimo di combinazioni (ad esempio, N. Combinazioni  $\leq 24$ ). Il numero di combinazioni da esaminare potrebbe essere ulteriormente ridotto nella fase di validazione quando vengono scartate eventuali combinazioni duplicate.

Per comprendere il metodo di generazione delle combinazioni, si consideri l'esempio di **3 parametri** variabili: P1 con 2 valori, P2 con 2 valori, P3 con 3 valori.

La figura seguente illustra le combinazioni generate nel caso in cui i 3 parametri siano tra loro **indipendenti**, cioè non vi siano gruppi o esclusioni. Il numero di combinazioni è ottenuto moltiplicando il numero dei valori di ogni parametro:  $2 \cdot 2 \cdot 3 = 12$ .

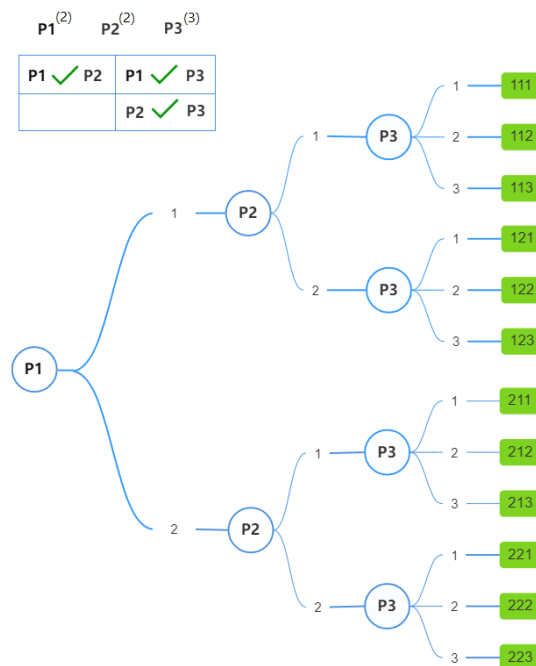


Figura 3. Tre parametri indipendenti

Si consideri ora che i parametri P1 e P2 appartengano allo stesso **gruppo** e che debbano quindi variare in modo omogeneo. La figura seguente illustra le combinazioni generate in questo caso. Il numero di combinazioni si riduce a  $2 \cdot 3 = 6$ .

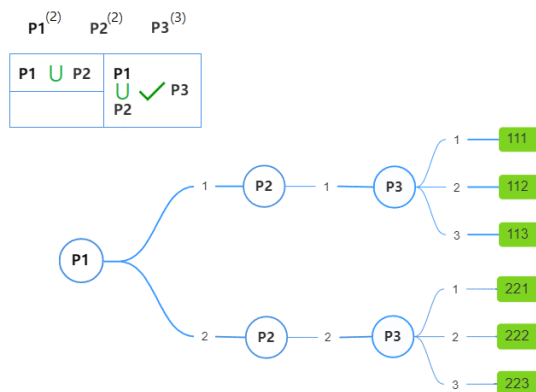
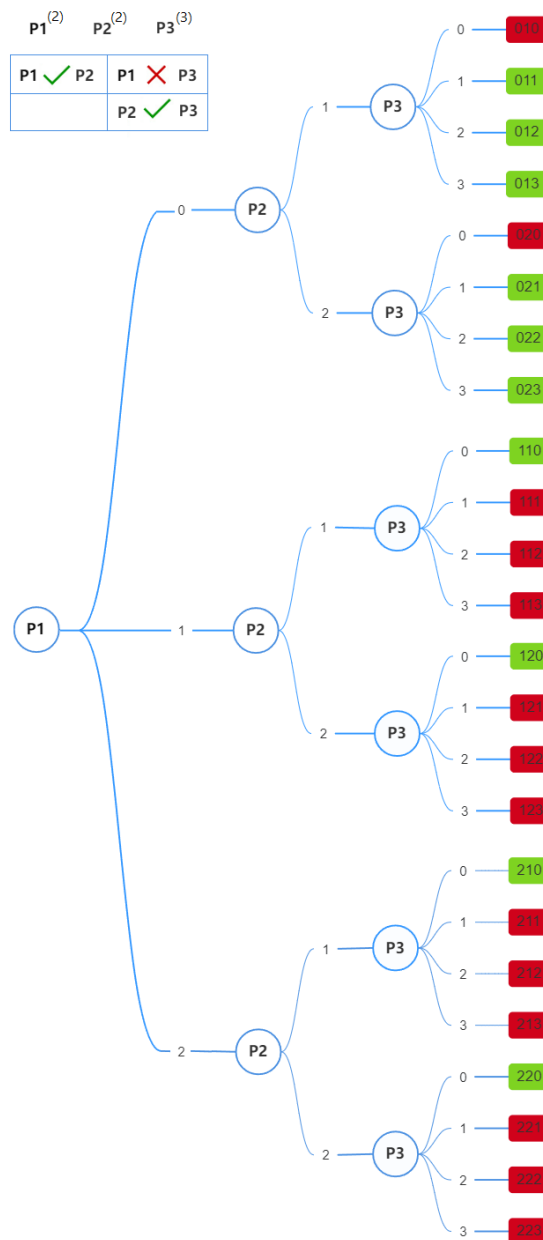


Figura 4. Tre parametri con raggruppamento (P1,P2)

Consideriamo ora che sia stata definita l'**esclusione** tra i parametri P1 e P3. I due parametri non possono variare contemporaneamente: quando uno assume uno dei suoi possibili valori, l'altro deve assumere il valore corrente (da modello). In questo caso alla lista dei possibili valori dei due parametri si aggiunge il valore corrente (0). Inizialmente, per effetto di questa aggiunta, il numero massimo di combinazioni aumenta:  $3 \cdot 2 \cdot 4 = 24$  (vedi figura seguente).

Tuttavia, devono essere scartate le combinazioni (in rosso) in cui: entrambi i parametri assumono il valore corrente (0); entrambi i parametri assumono valore diverso dal valore corrente (0).

Il numero di combinazioni possibili si riduce quindi a 10 (combinazioni in verde).



Tre parametri con esclusione (P1,P3)

Al termine della definizione delle combinazioni, viene in ogni caso aggiunta la **combinazione 1** composta dai valori correnti di tutti i parametri variabili.

### 1.3 ESECUZIONE DELL'ANALISI PARAMETRICA

Una volta aver completato la modellazione strutturale, eseguito l'analisi relativa alle impostazioni correnti e definiti i parametri variabili è possibile procedere con l'esecuzione dell'analisi parametrica, per mezzo del seguente comando nella barra multifunzione:

Risultati > Esegui Analisi parametrica

Per ognuna delle combinazioni da esaminare, vengono eseguite l'analisi modale e l'analisi pushover con le opzioni specificate in Parametri di Calcolo.

Una finestra fornisce lo stato dell'analisi parametrica mostrando in ogni momento il numero della combinazione esamina. Se N è il numero delle combinazioni da esaminare, il tempo di elaborazione sarà all'incirca N volte il tempo impiegato per l'elaborazione della singola analisi relativa alle impostazioni correnti.

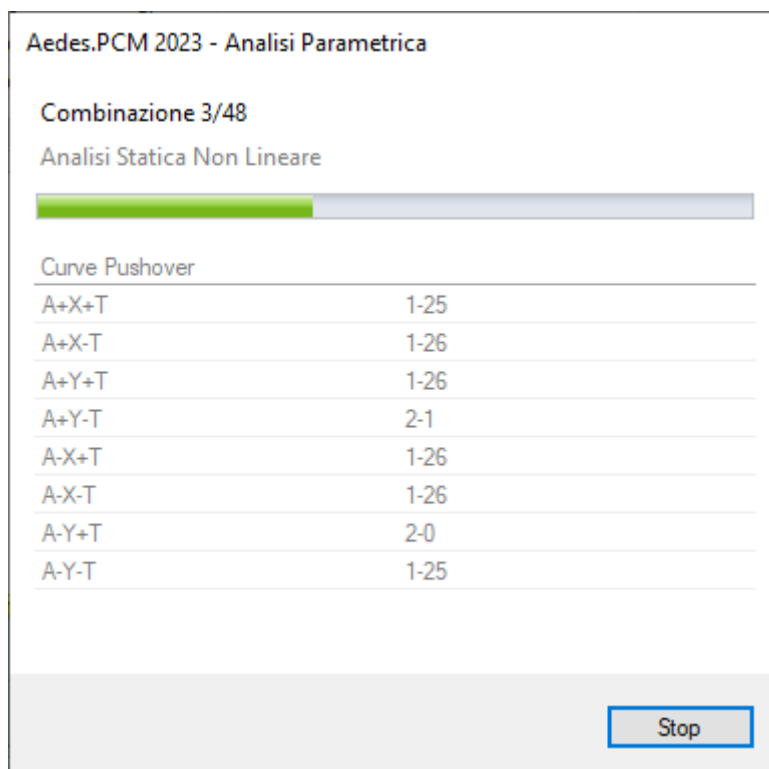


Figura 5. Esecuzione dell'analisi parametrica

In qualsiasi momento dell'elaborazione è possibile interrompere l'analisi cliccando due volte sul tasto "Stop". I risultati relativi alle combinazioni esaminate fino a quel punto saranno comunque disponibili nella successiva fase di consultazione dei risultati.



## 1.4 CONSULTAZIONE DEI RISULTATI

Al termine dell'analisi parametrica appare una nuova scheda che permette di consultare i risultati ottenuti, sia in forma tabulare che attraverso grafici di vario tipo.

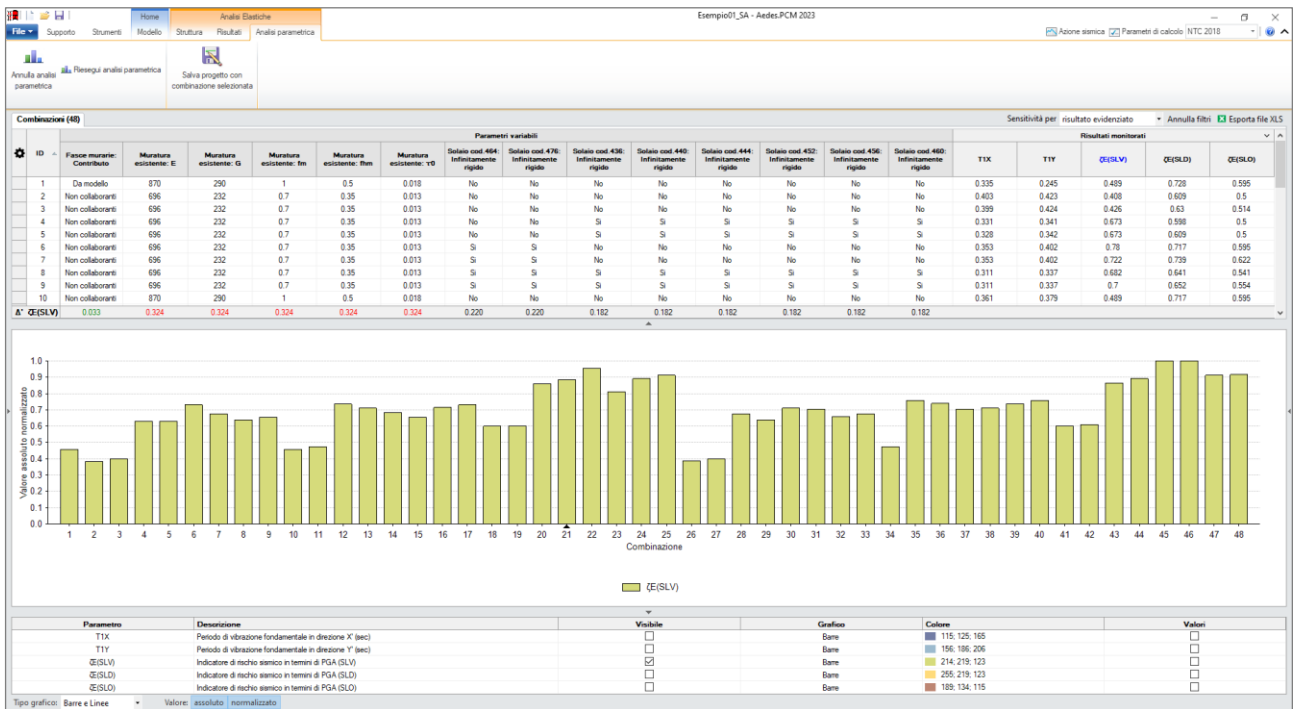



Figura 6. Risultati analisi parametrica

Nella tabella delle combinazioni (in alto) ogni riga rappresenta una combinazione esaminata (o da esaminare nel caso in cui l'analisi sia stata interrotta). Le colonne della tabella rappresentano i **Parametri variabili** e i **Risultati monitorati**.

Cliccando sull'icona  in alto a sinistra si accede a un menu che permette di **nascondere o visualizzare** determinate colonne della tabella, mentre cliccando sul titolo delle colonne è possibile **ordinare** le combinazioni per ID o in funzione di un determinato parametro variabile o risultato monitorato. Inoltre, sempre agendo sul titolo delle colonne è possibile applicare dei **filtri** per focalizzare l'attenzione su un determinato gruppo di combinazioni.

Evidenziando un risultato monitorato (con un click sul titolo della colonna) in fondo alla tabella delle combinazioni compare una riga con i **parametri di sensibilità  $\Delta'$**  dei vari parametri variabili rispetto al risultato evidenziato. Per maggiori informazioni consultare il paragrafo seguente dedicato all'analisi di sensibilità.

Nella barra degli strumenti (in alto a destra) troviamo le seguenti funzioni:

- Sensibilità per**
- **risultato evidenziato**
  - **tutti i risultati monitorati**

Grazie a questa scelta è possibile visualizzare in fondo alla tabella i parametri di sensibilità dei vari parametri variabili rispetto al risultato evidenziato (una riga) o a tutti i risultati monitorati (più righe).

<b>Annulla Filtri</b>	Annulla tutti i filtri specificati nelle colonne della tabella. Di conseguenza tutte le combinazioni tornano visibili.
<b>Esporta file XLS</b>	Esporta la tabella in un file di formato XLS per aprirlo, ad esempio, con Microsoft Excel.

Inoltre, nella barra multifunzione sono disponibili i seguenti comandi.

<b>Annulla analisi parametrica</b>	Annulla l'analisi parametrica, chiude la finestra di consultazione dei risultati e permette quindi la modifica dei parametri variabili.
<b>Riesegui analisi parametrica</b>	Riesegue l'analisi parametrica.
<b>Salva progetto con combinazione selezionata</b>	Salva una copia del progetto corrente applicando le impostazioni relative alla combinazione selezionata nella tabella Combinazioni.

Il grafico centrale rappresenta il valore assunto dai parametri monitorati nelle varie combinazioni esaminate. Le combinazioni visibili nel grafico sono quelle correntemente visibili nella tabella combinazioni e appaiono nello stesso ordine. La rappresentazione grafica può essere personalizzata attraverso la barra e la tabella sottostanti.

<b>Parametro</b>	Nome del parametro monitorato. Sono visibili in tabella solo i parametri la cui colonna nella tabella combinazioni sia visibile (vedi sopra).
<b>Descrizione</b>	Breve descrizione del parametro monitorato.
<b>Visibile</b>	Determina se il parametro monitorato deve essere rappresentato nel grafico.
<b>Grafico</b>	In caso di grafico di tipo Barre e linee (vedi sotto), permette di scegliere se rappresentare i valori assunti dal parametro per mezzo di barre o linee.
<b>Colore</b>	Determina il colore associato alla rappresentazione del parametro nel grafico.
<b>Valori</b>	Attiva o disattiva la visualizzazione di etichette che riportano il valore assunto dal parametro nelle varie combinazioni.
<b>Tipo grafico</b>	Permette di scegliere il tipo di rappresentazione tra: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Barre e linee.</b> Grafico bidimensionale in cui ogni parametro monitorato è rappresentato per mezzo di barre o linee a seconda della scelta effettuata in tabella.</li> <li>• <b>Barre 3D.</b> Grafico tridimensionale in cui ogni parametro monitorato è rappresentato per mezzo di barre solide.</li> </ul>

- 
- **Radar.** Grafico circolare in cui ogni raggio corrisponde ad una combinazione ed ogni parametro monitorato è rappresentato per mezzo di una linea spezzata i cui vertici corrispondono al valore assunto dal parametro in una determinata combinazione.
- 

**Valore**

Per i grafici di tipo Barre e linee o Barre 3D, stabilisce se il valore dei parametri rappresentato nel grafico debba essere **assoluto** e/o **normalizzato** al valore massimo.

Nel grafico radar i valori sono sempre assoluti e normalizzati.

---

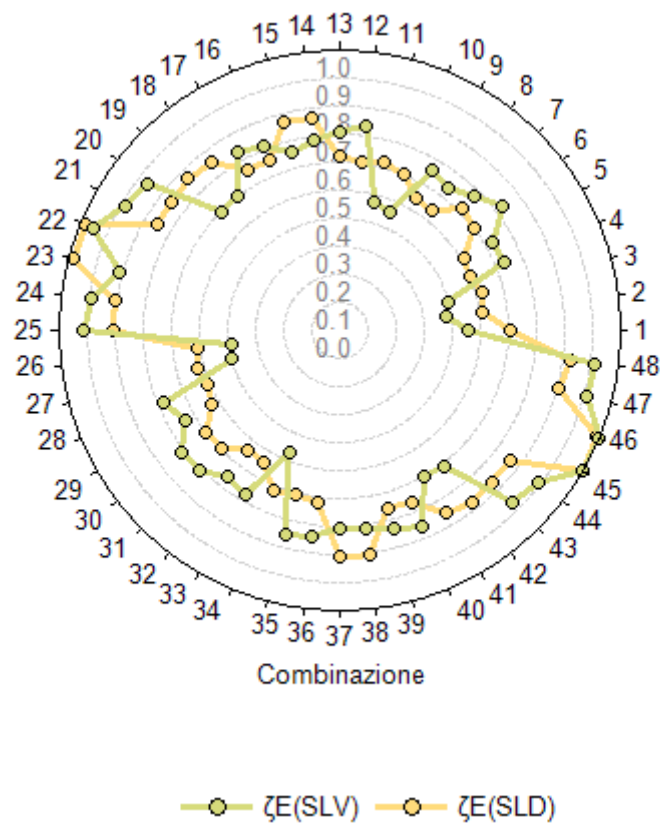


Figura 7. Esempio di grafico radar

## 1.5 ANALISI DI SENSITIVITÀ

In fondo alla tabella delle combinazioni sono riportati i **parametri di sensitività  $\Delta'$**  dei parametri variabili rispetto a uno o più risultati monitorati. Un'apposita opzione nella barra degli strumenti permette di mostrare la sensitività rispetto al risultato evidenziato o rispetto a tutti i risultati monitorati. Per evidenziare un determinato risultato è sufficiente cliccare sul titolo della colonna corrispondente.

Combinazioni		Parametri variabili														Risultati monitorati						
ID	Fascia muraria: Contributo	Muratura esistente: E	Muratura esistente: G	Muratura esistente: Im	Muratura esistente: Im	Muratura esistente: r0	Solaio cod.464: Infiltrazione rigido	Solaio cod.476: Infiltrazione rigido	Solaio cod.436: Infiltrazione rigido	Solaio cod.440: Infiltrazione rigido	Solaio cod.444: Infiltrazione rigido	Solaio cod.452: Infiltrazione rigido	Solaio cod.456: Infiltrazione rigido	Solaio cod.460: Infiltrazione rigido	Solaio cod.464: Distribuzione trasversale	Solaio cod.468: Distribuzione trasversale	Solaio cod.476: Distribuzione trasversale	TIX	T1Y	QE(SLV)	QE(SLD)	QE(SLO)
2	Non collaboranti	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.403	0.423	0.408	0.609	0.5
26	Da modello	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.38	0.287	0.413	0.609	0.5
3	Non collaboranti	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	No	No	No	No	No	No	20	20	20	0.399	0.424	0.426	0.63	0.514
27	Da modello	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	No	No	No	No	No	No	20	20	20	0.376	0.288	0.426	0.63	0.514
1	Da modello	870	290	1	0.5	0.018	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.335	0.245	0.489	0.728	0.595
10	Non collaboranti	870	290	1	0.5	0.018	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.361	0.379	0.489	0.717	0.595
11	Non collaboranti	870	290	1	0.5	0.018	No	No	No	No	No	No	No	No	20	20	20	0.357	0.379	0.507	0.739	0.622
34	Da modello	870	290	1	0.5	0.018	No	No	No	No	No	No	No	No	20	20	20	0.336	0.258	0.507	0.739	0.622
18	Non collaboranti	1305	435	1.5	0.75	0.027	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.294	0.309	0.641	0.902	0.73
19	Non collaboranti	1305	435	1.5	0.75	0.027	No	No	No	No	No	No	No	No	20	20	20	0.292	0.31	0.641	0.913	0.757
41	Da modello	1305	435	1.5	0.75	0.027	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.278	0.21	0.641	0.902	0.743
A'	QE(SLV)	0.033	0.324	0.324	0.324	0.324	0.220	0.220	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.005	0.005	0.005					

Figura 8. Parametri di sensitività per il risultato evidenziato

Combinazioni		Parametri variabili														Risultati monitorati						
ID	Fascia muraria: Contributo	Muratura esistente: E	Muratura esistente: G	Muratura esistente: Im	Muratura esistente: Im	Muratura esistente: r0	Solaio cod.464: Infiltrazione rigido	Solaio cod.476: Infiltrazione rigido	Solaio cod.436: Infiltrazione rigido	Solaio cod.440: Infiltrazione rigido	Solaio cod.444: Infiltrazione rigido	Solaio cod.452: Infiltrazione rigido	Solaio cod.456: Infiltrazione rigido	Solaio cod.460: Infiltrazione rigido	Solaio cod.464: Distribuzione trasversale	Solaio cod.468: Distribuzione trasversale	Solaio cod.476: Distribuzione trasversale	TIX	T1Y	QE(SLV)	QE(SLD)	QE(SLO)
2	Non collaboranti	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.403	0.423	0.408	0.609	0.5
26	Da modello	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.38	0.287	0.413	0.609	0.5
3	Non collaboranti	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	No	No	No	No	No	No	20	20	20	0.399	0.424	0.426	0.63	0.514
27	Da modello	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	No	No	No	No	No	No	20	20	20	0.376	0.288	0.426	0.63	0.514
1	Da modello	870	290	1	0.5	0.018	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.335	0.245	0.489	0.728	0.595
10	Non collaboranti	870	290	1	0.5	0.018	No	No	No	No	No	No	No	No	0	0	0	0.361	0.379	0.489	0.717	0.595
11	Non collaboranti	870	290	1	0.5	0.018	No	No	No	No	No	No	No	No	20	20	20	0.357	0.379	0.507	0.739	0.622
34	Da modello	870	290	1	0.5	0.018	No	No	No	No	No	No	No	No	20	20	20	0.336	0.258	0.507	0.739	0.622
A'	TIX	0.079	0.311	0.311	0.311	0.311	0.108	0.108	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.005	0.005	0.005					
A'	T1Y	0.301	0.310	0.310	0.310	0.310	0.030	0.030	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.003	0.003	0.003					
A'	QE(SLV)	0.033	0.324	0.324	0.324	0.324	0.220	0.220	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.005	0.005	0.005					
A'	QE(SLD)	0.010	0.419	0.419	0.419	0.419	0.151	0.151	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.012	0.012	0.012					
A'	QE(SLO)	0.005	0.412	0.412	0.412	0.412	0.155	0.155	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.016	0.016	0.016					

Figura 9. Parametri di sensitività per tutti i risultati monitorati

I parametri di sensitività sono degli indicatori che forniscono la misura di quanto un dato parametro variabile influisca sul valore di un risultato monitorato. Grazie ai valori dei parametri di sensitività è possibile individuare rapidamente quali siano i parametri variabili che maggiormente influenzano la risposta della struttura.

Le informazioni sui parametri variabili più influenti possono essere utilizzate per approfondire la conoscenza dei valori reali e quindi definire un adeguato piano di indagini e prove sperimentali.

Per gli interventi di consolidamento, un'importante applicazione dell'analisi di sensitività consiste nel valutare gli effetti di diverse tecniche alternative comparate tra loro.

Un altro utilizzo può essere quello di revisionare la tabella dei parametri variabili: ai parametri poco influenti sui risultati si può assegnare un preciso valore in input nei dati del Progetto; togliendo tali parametri dall'insieme dei parametri variabili scelti per l'analisi parametrica, si riduce il numero delle combinazioni processate dall'analisi. Nella tabella, per ogni risultato monitorato, il parametro di sensitività in colore rosso rappresenta il massimo valore ottenuto e corrisponde ai parametri variabili maggiormente influenti, mentre il colore verde corrisponde ai parametri variabili meno influenti (si osservi che i valori ottenuti per  $\Delta'$  possono essere comuni a più parametri variabili).

I parametri di sensitività sono calcolati applicando la seguente **formula** (CNR-DT 212/2013, §3.1.2):

$$\Delta'_j = 2 \frac{\max(\mu_{\alpha_p}^j) - \min(\mu_{\alpha_p}^j)}{\max(\mu_{\alpha_p}^j) + \min(\mu_{\alpha_p}^j)} \quad (1)$$

dove:

$\Delta'_j$  è il parametro di sensitività del parametro variabile  $j$  rispetto al risultato monitorato  $a$ ;

$\mu_{\alpha_p}^j$  è la media dei valori assunti dal risultato monitorato  $a$  nelle combinazioni caratterizzate dalla  $p$ -esima opzione di  $j$  (cioè il  $p$ -esimo valore associato al parametro variabile).

Pertanto, per calcolare il parametro di sensitività  $\Delta'_j$  di un dato parametro variabile  $j$  rispetto a un risultato monitorato  $a$ , sono necessarie le seguenti **operazioni**:

- raggruppare le varie combinazioni elaborate in funzione del valore assunto dal parametro variabile  $j$ ;
- per ogni gruppo, caratterizzato dalla  $p$ -esima opzione di  $j$ , calcolare la media dei valori assunti dal risultato monitorato  $a$ ;
- individuare il massimo e il minimo tra le medie calcolate al punto precedente e applicare la formula (1).

Qualora il risultato monitorato assuma **valori negativi**, prima di applicare la procedura di cui sopra, i valori del risultato monitorato vengono traslati (incrementati della stessa quantità) in modo tale da ottenere tutti valori positivi (maggiori o uguali a 0).

Il calcolo dei parametri di sensitività viene svolto sulla base delle **combinazioni elaborate effettivamente visibili** in tabella. Pertanto, i parametri riportati risentono di eventuali filtri applicati alle colonne. Grazie a questa funzionalità è possibile limitare il numero di combinazioni da considerare e valutare, ad esempio, l'impatto di un dato parametro variabile mentre un altro viene fissato su un valore predefinito.

Per comprendere a pieno la procedura di calcolo dei parametri di sensitività si consideri l'**esempio** illustrato in figura seguente. In questa analisi parametrica, i parametri variabili sono rappresentati da: contributo delle fasce murarie, parametri meccanici della muratura esistente, rigidità degli impalcati. Sono state elaborate un totale di 48 combinazioni, ma per effetto dei filtri impostati sono visibili solo 12 combinazioni e il calcolo dei parametri di sensitività si basa su queste.

Combinazioni (48)		Parametri variabili														Risultati monitorati		
ID	Fasce murarie: Contributo	Muratura esistente: E	Muratura esistente: G	Muratura esistente: Im	Muratura esistente: fhm	Muratura esistente: rD	Solaio cod.464: Infinitamente rigido	Solaio cod.476: Infinitamente rigido	Solaio cod.436: Infinitamente rigido	Solaio cod.440: Infinitamente rigido	Solaio cod.444: Infinitamente rigido	Solaio cod.452: Infinitamente rigido	Solaio cod.456: Infinitamente rigido	Solaio cod.460: Infinitamente rigido	€(SLV)	€(SLD)	€(SLO)	
2	Non collaboranti	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	No	No	No	No	No	No	0.408	0.609	0.5	
4	Non collaboranti	696	232	0.7	0.35	0.013	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	0.673	0.598	0.5	
6	Non collaboranti	696	232	0.7	0.35	0.013	Si	Si	No	No	No	No	No	No	0.78	0.717	0.595	
8	Non collaboranti	696	232	0.7	0.35	0.013	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	0.682	0.641	0.541	
10	Non collaboranti	870	290	1	0.5	0.018	No	No	No	No	No	No	No	No	0.489	0.717	0.595	
12	Non collaboranti	870	290	1	0.5	0.018	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	0.785	0.728	0.595	
14	Non collaboranti	870	290	1	0.5	0.018	Si	Si	No	No	No	No	No	No	0.731	0.913	0.757	
16	Non collaboranti	870	290	1	0.5	0.018	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	0.762	0.783	0.649	
18	Non collaboranti	1305	435	1.5	0.75	0.027	No	No	No	No	No	No	No	No	0.641	0.902	0.73	
20	Non collaboranti	1305	435	1.5	0.75	0.027	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	0.919	0.902	0.743	
22	Non collaboranti	1305	435	1.5	0.75	0.027	Si	Si	No	No	No	No	No	No	1.018	1.174	0.959	
24	Non collaboranti	1305	435	1.5	0.75	0.027	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	0.951	0.967	0.797	
$\Delta'$	€(SLV)	0.325	0.325	0.325	0.325	0.325	0.228	0.228	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160				

Figura 10. Esempio: parametri di sensitività

In figura sono riportati i parametri di sensitività dei parametri variabili rispetto al risultato evidenziato  $\zeta_E(\text{SLV})$ , cioè l'indicatore di rischio sismico in termini di PGA allo Stato Limite di salvaguardia della Vita.

Per il primo parametro variabile, relativo al contributo delle fasce murarie, non viene riportato alcun parametro di sensitività in quanto, per effetto dei filtri impostati, tutte le combinazioni visibili sono caratterizzate dalla stessa opzione (fasce murarie non collaboranti).

I parametri di sensitività maggiori (in rosso) vengono registrati per i parametri variabili relativi alle proprietà meccaniche della **muratura esistente**. Questi parametri variabili sono raggruppati, cioè possono variare solo in modo omogeneo; quindi, sono caratterizzati dagli stessi parametri di sensitività. Vediamo in dettaglio come viene ottenuto il valore  $\Delta' = 0.325$ :

- il parametro relativo al modulo elastico E presenta 3 opzioni: 696, 870 e 1305 N/mm<sup>2</sup>;
- per ognuna di queste opzioni sono presenti 4 combinazioni. Le medie dei valori assunti da  $\zeta_E(\text{SLV})$  per ognuna di queste opzioni valgono rispettivamente 0.636, 0.692 e 0.882;
- quindi, il valore minimo è 0.636 e il valore massimo è 0.882;
- applicando la formula (1) si ottiene  $\Delta' = 2 \cdot \frac{0.882-0.636}{0.882+0.636} = 0.325$ .

## 1.6 ESEMPIO APPLICATIVO

Come esempio di applicazione dell'analisi parametrica si consideri la struttura illustrata nelle figure seguenti. Si tratta di un edificio esistente a due piani fuori terra sito in Perugia. Il Piano Terra ha un'altezza di 3.6 m; mentre il Piano Primo dotato di copertura a falde leggermente spioventi ha un'altezza minima pari a 3.1 m.

La struttura portante è realizzata in muratura di pietrame disordinata mentre gli impalcati sono costituiti da solai in legno orditi nella direzione longitudinale dell'edificio.

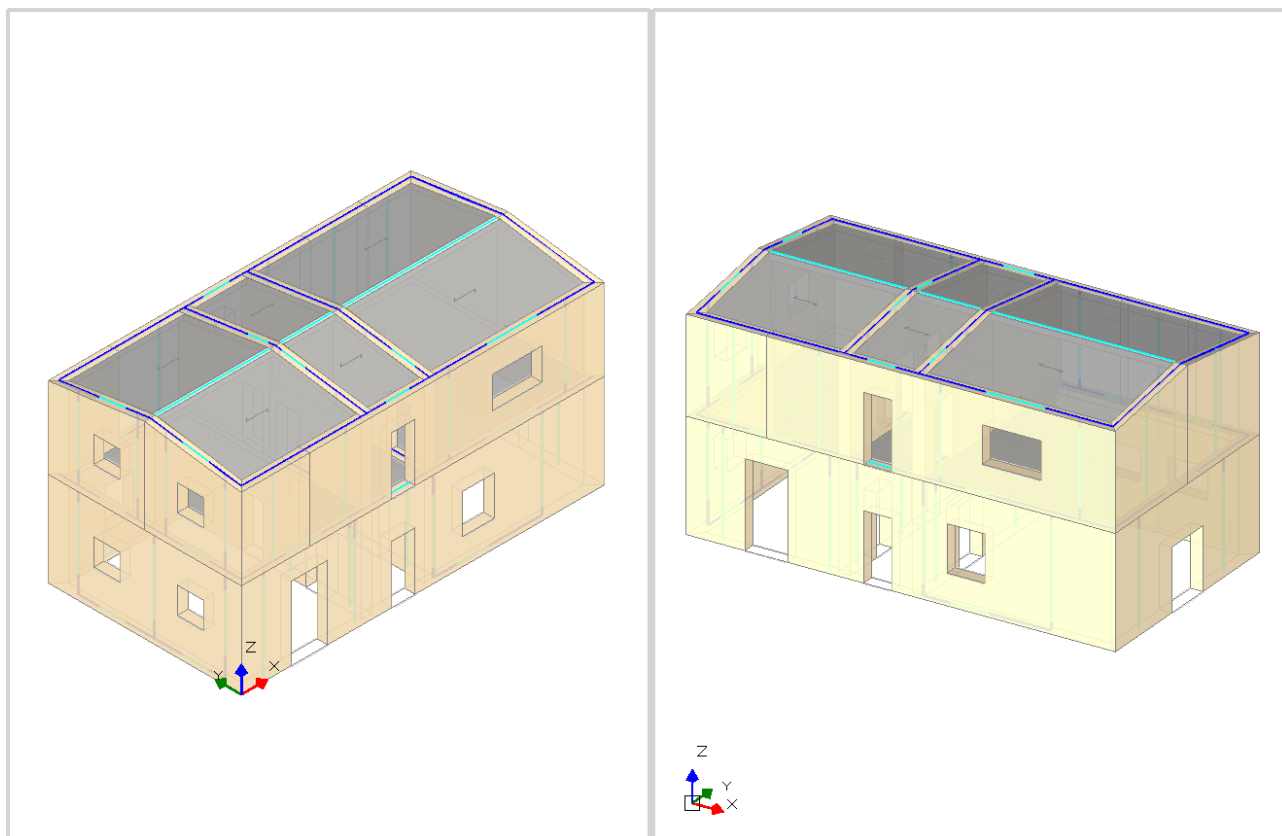


Figura 11. Viste assometriche da Sud-Ovest e da Nord-Est

Per l'edificio si richiede la valutazione della sicurezza sismica allo stato attuale e la progettazione di eventuali interventi di miglioramento.

Vedremo come l'analisi parametrica costituisca un utilissimo strumento in entrambi le fasi.

Nella fase di valutazione dello stato attuale, permette di far fronte alle tante incertezze che caratterizzano la modellazione strutturale degli edifici esistenti. In questa fase, i parametri variabili sono costituiti da tutti quegli aspetti della modellazione strutturale in cui è obiettivamente difficile stabilire il valore più rappresentativo per la struttura reale. L'analisi parametrica permette di individuare agevolmente la configurazione che porta ad una valutazione conservativa (a favore di sicurezza).

Nello stato di progetto, l'analisi parametrica permette di valutare diverse tecniche di consolidamento e individuare agevolmente gli interventi che permettono di raggiungere i livelli di sicurezza desiderati con il minimo impatto economico e cantieristico.

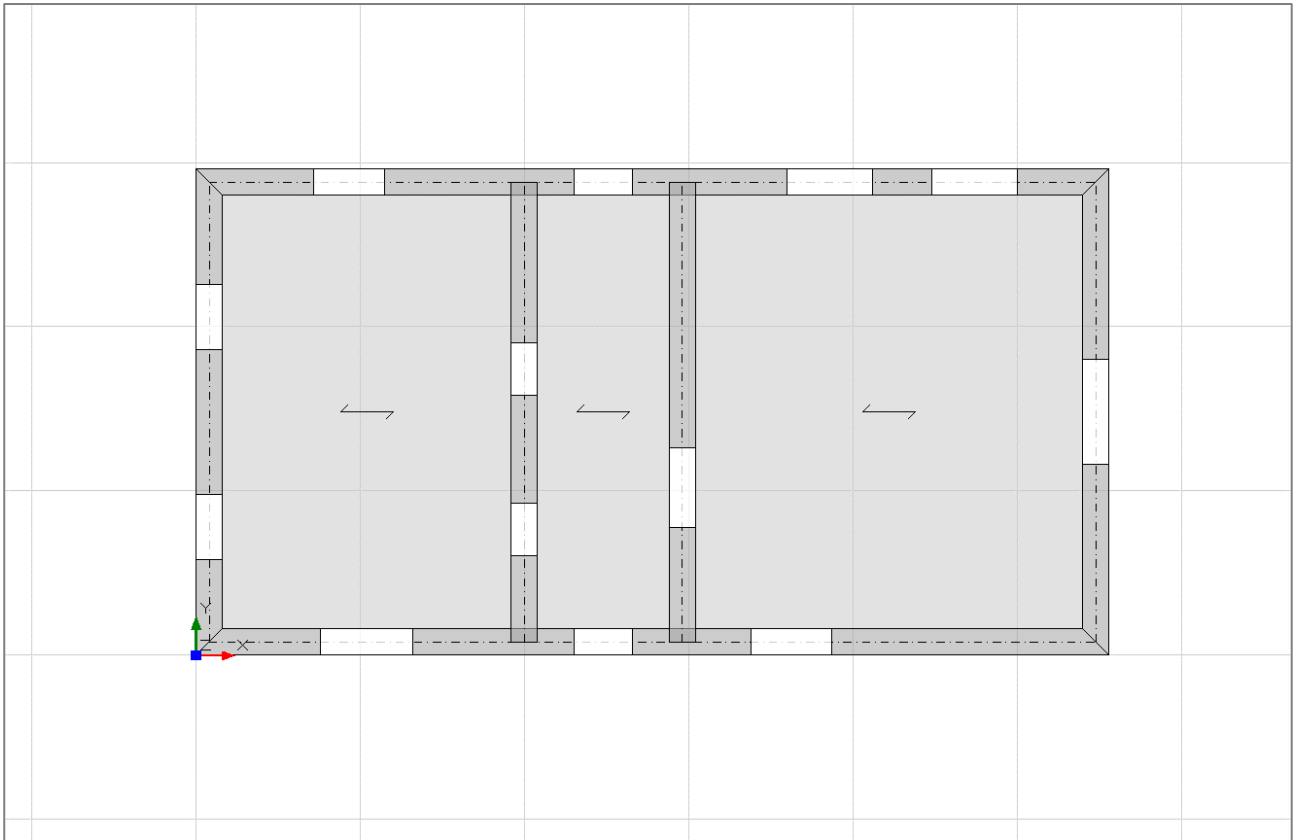


Figura 12. Pianta Piano Terra

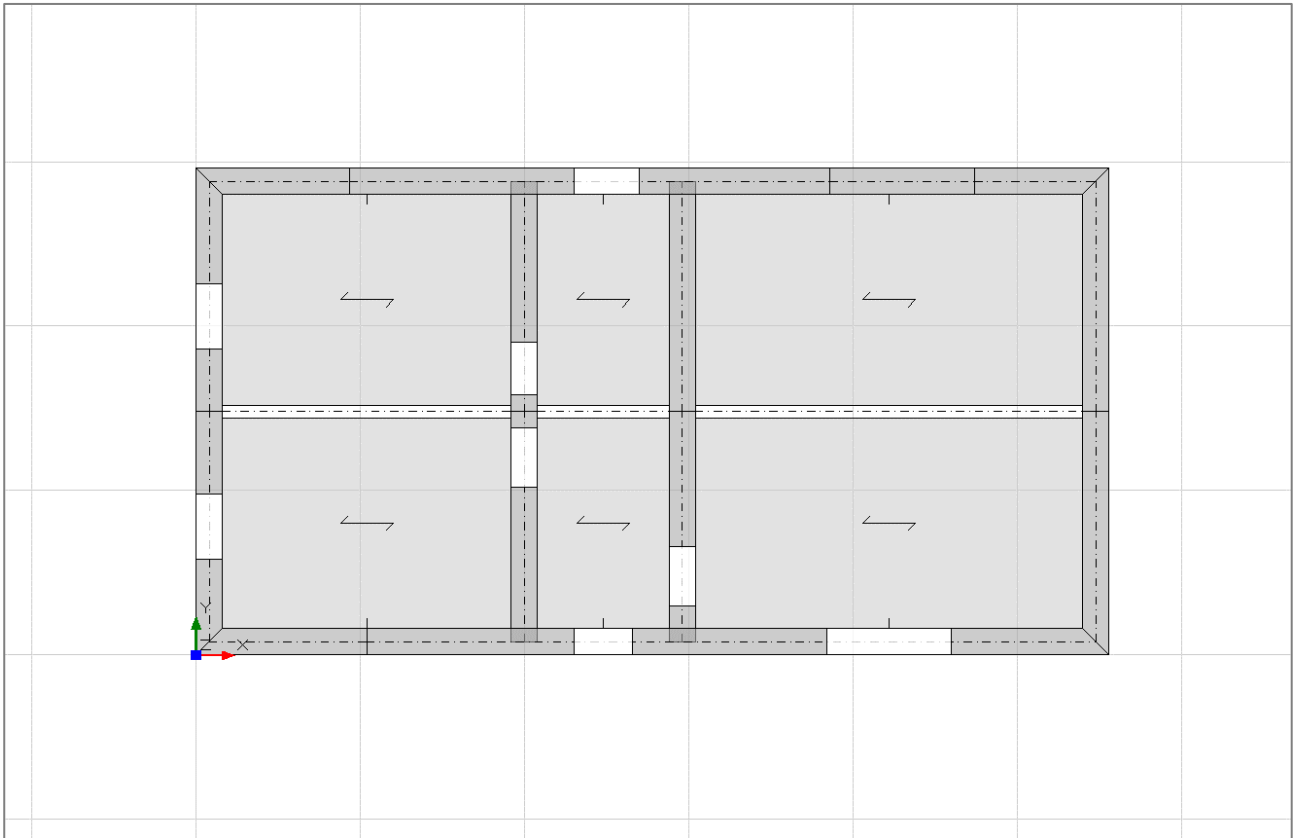


Figura 13. Pianta Piano Primo



### 1.6.1 Stato Attuale

Nella valutazione della sicurezza dell'edificio oggetto di studio, le principali fonti di incertezza si riscontrano nei parametri meccanici della muratura, nel comportamento delle fasce murarie, nella rigidità degli impalcati e nella distribuzione del carico alle strutture portanti.

Come detto, la struttura portante è realizzata in muratura di pietrame disordinata per la quale si intende raggiunto un limitato livello di conoscenza (LC1). Pertanto, le caratteristiche meccaniche del materiale vengono impostate sulla base dei valori di riferimento forniti dalla normativa (NTC 2018) per questa tipologia di muratura. In particolare, coerentemente alle indicazioni normative, i moduli elastici vengono impostati pari ai valori medi dell'intervallo di riferimento, mentre le resistenze vengono impostate pari ai valori minimi. Il fattore di confidenza FC viene fissato pari 1.35.

▼ <b>Generale</b>	
Nome	<b>Muratura esistente</b>
Riferimento	<b>NTC 2018, Tab. C8.5.I</b>
Tipologia	<b>Pietrame disordinata</b>
Condizioni	<b>Standard</b>
Fattore di Confidenza	<b>1.35</b>
▼ <b>Moduli elastici</b>	
Valori	<b>Medi</b>
E	<b>870</b>
G	<b>290</b>
▼ <b>Resistenze</b>	
Valori	<b>Minimi</b>
f <sub>m</sub>	<b>1.000</b>
f <sub>tm</sub>	<b>0.100</b>
f <sub>hm</sub>	<b>0.500</b>
τ <sub>0</sub>	<b>0.018</b>
f <sub>vm0</sub>	
▼ <b>Altre proprietà meccaniche</b>	
w	<b>19.00</b>

Figura 14. Caratteristiche meccaniche della muratura

Tuttavia, la malta che costituisce la muratura presenta caratteristiche profondamente eterogenee. Alcuni test rilevano malta di modeste caratteristiche ( $f_m$  compresa tra 0.7 e 1.5 N/mm<sup>2</sup>), altri rilevano caratteristiche particolarmente scadenti e altri ancora caratteristiche più che soddisfacenti.

Pertanto, si ritiene opportuno valutare gli effetti di questa caratteristica incerta per mezzo dell'analisi parametrica. Viene quindi definito un gruppo di parametri variabili relativi alle caratteristiche meccaniche del materiale murario. In particolare, vengono inseriti 5 parametri variabili associati al materiale in questione, ogni parametro è riferito ad una diversa caratteristica meccanica: modulo elastico normale (E), modulo elastico tangenziale (G), resistenza media a compressione ( $f_m$ ), resistenza media a compressione orizzontale ( $f_{hm}$ ), resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali ( $\tau_0$ ). A tutti i parametri viene assegnata variabilità D3, che permette di specificare 3 possibili valori: il primo è relativo alla condizione di malta scadente (ottenuto applicando il coefficiente 0.7 al valore corrente), il secondo è relativo a malta di modeste caratteristiche (coefficiente pari a 1.0), il terzo è relativo a malta buona (coefficiente pari a 1.5).

Inoltre, questi parametri vengono raggruppati nel gruppo 1 per farli variare in modo omogeneo. In questo modo le varie caratteristiche meccaniche saranno sempre coerenti tra loro.

Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2	Valore 3
1	Materiale	Muratura esistente	E	870	D3	696	870	1305
1	Materiale	Muratura esistente	G	290	D3	232	290	435
1	Materiale	Muratura esistente	f,m	1	D3	0.7	1	1.5
1	Materiale	Muratura esistente	f,hm	0.5	D3	0.35	0.5	0.75
1	Materiale	Muratura esistente	$\tau_0$	0.018	D3	0.013	0.018	0.027

Figura 15. Parametri variabili relativi alle caratteristiche meccaniche della muratura

Le aperture sono dotate di architrave in calcestruzzo armato, pertanto le soprastanti fasce murarie possono essere considerate come elementi resistenti in grado di accoppiare i maschi adiacenti. Sono modellate come aste Incastro-Incastro soggette a verifiche di resistenza in termini di pressoflessione e taglio. Nelle proprietà delle fasce è stata specificata la resistenza a trazione dell'architrave (vedi §7.8.2.2.4) pari a 118 kN, ottenuta considerando la resistenza a trazione delle barre di armatura: 4#10,  $f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$ , FC = 1.2.

Tuttavia, la lunghezza di appoggio degli architravi sulla muratura potrebbe non essere sufficiente, appare quindi opportuno valutare anche la condizione di fasce murarie deboli, cioè non in grado di accoppiare i maschi murari adiacenti. A questo scopo viene inserito un ulteriore parametro variabile relativo al contributo offerto delle fasce murarie. Si tratta di un parametro di classe Generale, con variabilità di tipo booleana, può quindi assumere due valori: il primo corrisponde alla condizione di fasce deboli (non collaboranti), il secondo rappresenta la condizione di fasce resistenti (come da modello).

Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2
	Generale		Fasce murarie: Contributo	Da modello	B	Non collaboranti	Da modello

Figura 16. Parametro variabile relativo al contributo delle fasce murarie

Un altro aspetto incerto nella modellazione strutturale è relativo alla rigidità degli impalcati. Si tratta di solai in legno, la cui rigidità nel piano è di difficile determinazione. È quindi opportuno valutare le due condizioni estreme, di impalcato deformabile o impalcato infinitamente rigido, per individuare quella corrispondente al livello di sicurezza minore.

Per ogni solaio presente nel modello (tranne quello centrale del Piano Terra corrispondente al vano scala) vengono inseriti i parametri variabili corrispondenti alla proprietà "Infinitamente rigido". L'inserimento può essere effettuato rapidamente selezionando i solai nel modello 3D e cliccando sul comando Parametri variabili > Aggiungi selezione. La variabilità è di tipo booleana, pertanto i valori possibili sono "Si" oppure "No". Questa volta i parametri relativi ai solai del Piano Terra vengono raggruppati nel gruppo 2, mentre i restanti, relativi alla copertura, vengono raggruppati nel gruppo 3. In questo modo i due impalcati saranno o completamente deformabili o completamente rigidi.

Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2
2	Solaio	Solaio cod.464	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
2	Solaio	Solaio cod.476	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
3	Solaio	Solaio cod.436	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
3	Solaio	Solaio cod.440	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
3	Solaio	Solaio cod.444	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
3	Solaio	Solaio cod.452	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
3	Solaio	Solaio cod.456	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
3	Solaio	Solaio cod.460	Infinitamente rigido	No	B	No	Si

Figura 17. Parametri variabili relativi alla rigidità dei solai

Infine, un'ulteriore incertezza riguarda la distribuzione del carico dei solai. Mentre in copertura è evidente che il carico sia distribuito sulle sole pareti ortogonali alla direzione di orditura, per l'impalcato intermedio questo non è così evidente e una parte del carico potrebbe essere distribuito in direzione trasversale.

Per ogni solaio del Piano Terra, definiamo quindi un parametro variabile relativo alla percentuale di carico totale da distribuire in direzione trasversale all'orditura. Scegliamo la variabilità di tipo D2 che permette di specificare due valori: 0 e 20%.

Dato che i solai sono realizzati nello stesso modo, questi parametri vengono raggruppati nel gruppo 4.

Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2
4	Solaio	Solaio cod.464	Distribuzione trasversale	0	D2	0	20
4	Solaio	Solaio cod.468	Distribuzione trasversale	0	D2	0	20
4	Solaio	Solaio cod.476	Distribuzione trasversale	0	D2	0	20

Figura 18. Parametri variabili relativi alla distribuzione del carico dei solai

Una volta aver eseguito la validazione, la scheda dei parametri variabili si presenta come in figura seguente. Sono state generate 48 combinazioni dei parametri variabili.

Trova		Segnalazioni		Parametri variabili													
Aggiungi selezione		Annulla filtri		Esegui validazione													
Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2	Valore 3	Valore 4	Valore 5	Vincolo	ki	kj	Stato			
1	Generale	Facce murarie: Contributo	Da modello	B	Non collaboranti	Da modello								Corretto			
2	1	Materiale	Muratura esistente	E	870	D3	696	870	1305					Corretto			
3	1	Materiale	Muratura esistente	G	290	D3	232	290	435					Corretto			
4	1	Materiale	Muratura esistente	f,m	1	D3	0.7	1	1.5					Corretto			
5	1	Materiale	Muratura esistente	f,hm	0.5	D3	0.35	0.5	0.75					Corretto			
6	1	Materiale	Muratura esistente	τ,0	0.018	D3	0.013	0.018	0.027					Corretto			
7	2	Solaio	Solaio cod.464	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto			
8	2	Solaio	Solaio cod.476	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto			
9	3	Solaio	Solaio cod.436	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto			
10	3	Solaio	Solaio cod.440	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto			
11	3	Solaio	Solaio cod.444	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto			
12	3	Solaio	Solaio cod.452	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto			
13	3	Solaio	Solaio cod.456	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto			
14	3	Solaio	Solaio cod.460	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto			
15	4	Solaio	Solaio cod.464	Distribuzione trasversale	0	D2	0	20						Corretto			
16	4	Solaio	Solaio cod.468	Distribuzione trasversale	0	D2	0	20						Corretto			
17	4	Solaio	Solaio cod.476	Distribuzione trasversale	0	D2	0	20						Corretto			

Figura 19. Scheda dei parametri variabili

A questo punto non resta che richiedere l'esecuzione dell'analisi parametrica attraverso il comando:  
Risultati > Esegui analisi parametrica

Per ognuna delle 48 combinazioni generate, vengono eseguite l'analisi modale e l'analisi pushover, registrando i valori dei periodi di vibrazione fondamentali nelle direzioni X e Y, e gli indicatori di rischio sismico  $\zeta_E$  per i vari stati limite.

Una volta completata l'elaborazione di tutte le combinazioni, è possibile consultare i risultati nella scheda Analisi Parametrica. Optiamo per un diagramma a barre che rappresenta l'andamento di due parametri monitorati: l'indicatore di rischio sismico  $\zeta_E$  per gli stati limite di Danno (SLD) e Salvaguardia della Vita (SLV) e scegliamo di diagrammare il valore effettivo (cioè non normalizzato). Inoltre, ordiniamo la tabella delle combinazioni per valori crescenti di  $\zeta_E$ (SLV).

In fondo alla tabella delle combinazioni compaiono i parametri di sensitività dei parametri variabili rispetto all'indicatore  $\zeta_E$ (SLV). La maggiore sensitività ( $\Delta' = 0.317$ , in rosso) è stata registrata dalle caratteristiche meccaniche della muratura, che, essendo raggruppate per variare in modo omogeneo, restituiscono tutte lo stesso valore del parametro di sensitività. Questi sono i parametri variabili che maggiormente condizionano la risposta della struttura. La minore sensitività, invece, è stata registrata dai parametri relativi alla distribuzione del carico dei solai ( $\Delta' = 0.006$ , in verde).

Il valore minore di  $\zeta_E$ (SLV), pari a 0.408, è stato registrato per le combinazioni 2 e 3, ma la combinazione 3 fornisce anche il valore minore di  $\zeta_E$ (SLD) pari a 0.587.

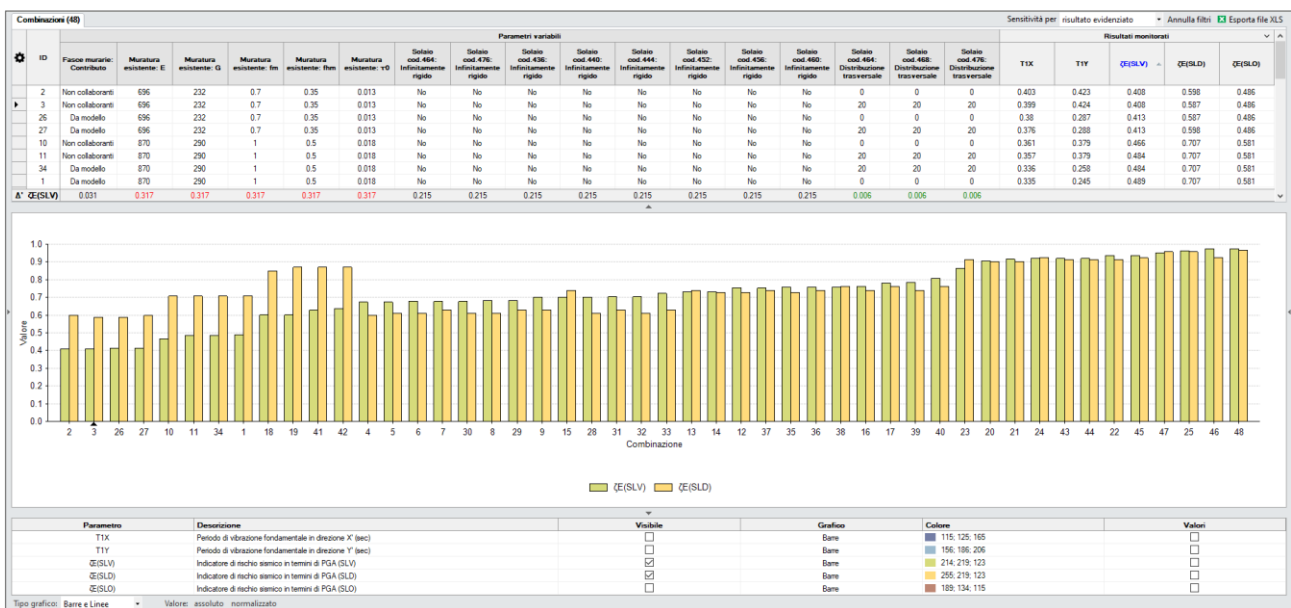


Figura 20. Risultati analisi parametrica dello stato attuale

La combinazione 3 corrisponde alle seguenti caratteristiche:

- fasce murarie non collaboranti;
- muratura con malta di caratteristiche scadenti;
- impalcati non rigidi;
- distribuzione del carico dei solai al Piano Terra: 20% in direzione trasversale.

Il valore maggiore di  $\zeta_E$ (SLV), pari a 0.973, è stato registrato per la combinazione 48 che corrisponde alle seguenti caratteristiche:

- fasce murarie collaboranti;
- muratura con malta di caratteristiche buone;
- impalcati infinitamente rigidi;
- distribuzione del carico dei solai al Piano Terra: 20% in direzione trasversale.

L'indicatore di rischio sismico varia in un ampio intervallo (0.408, 0.973). Questo fa riflettere circa l'importanza dell'analisi parametrica nel far fronte alle incertezze di modellazione. Se uno dei parametri variabili affetti da incertezza fosse stato fissato a priori senza indagare sui suoi effetti, si sarebbe rischiato di sovrastimare il reale livello di sicurezza della struttura.

Non è detto che la combinazione 3 rappresenti il reale livello di sicurezza, però data l'incertezza che riveste i vari aspetti considerati, senza dubbio è la configurazione da considerare per un risultato a favore di sicurezza.

Grazie al comando "Salva progetto con combinazione selezionata" è possibile ottenere una copia del modello applicando le impostazioni relative alla combinazione 3. Questo è il modello rappresentativo dello stato attuale dell'edificio.

Eseguendo l'analisi pushover sul modello (Combinazione 3) si nota che in entrambe le direzioni X e Y la capacità della struttura è determinata dal collasso di tutti i maschi murari di una parete significativa del Piano Terra (uno dei paramenti definiti in input).

In particolare, in direzione X, la curva pushover che restituisce il valore minore dell'indicatore di rischio sismico è la curva E-X+T: spinta in direzione -X, distribuzione di forze uniforme, effetti torcenti in senso antiorario,  $\zeta_E = 0.408$ .

L'elaborazione di questa curva pushover si interrompe per il collasso completo della parete Nord al Piano Terra.

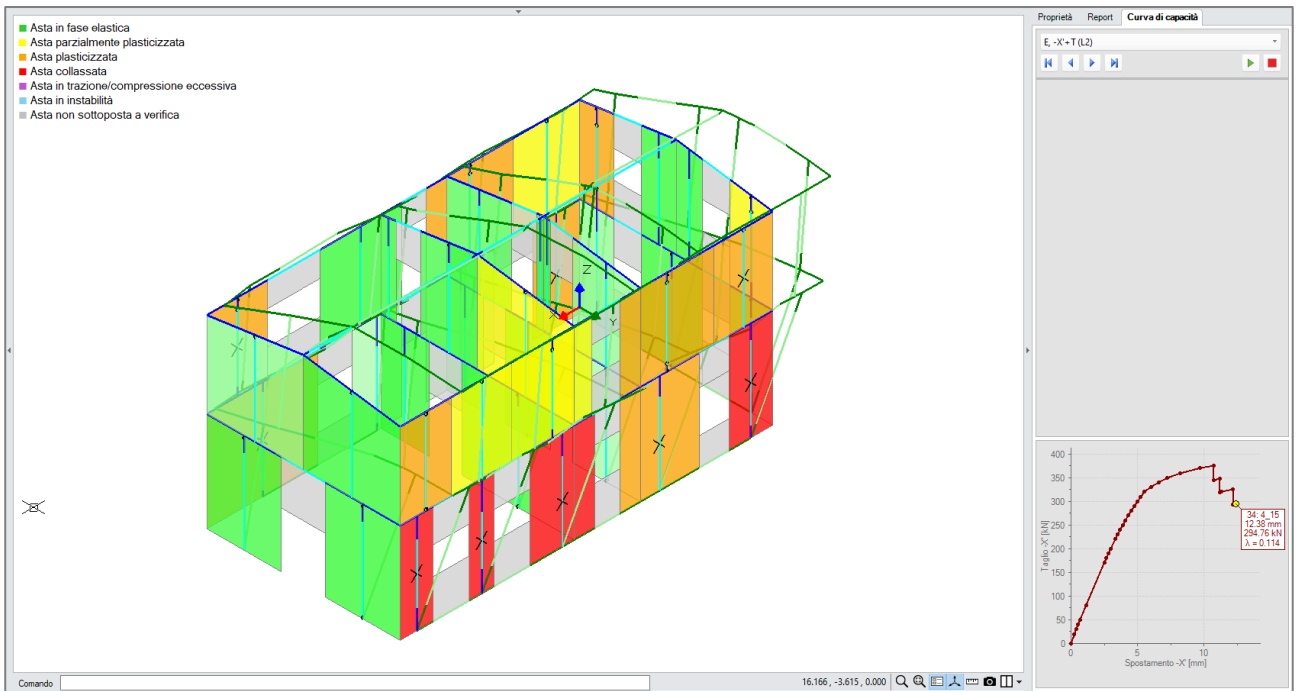


Figura 21. Combinazione 3: Risultati curva E-X+T:  $\zeta_E = 0.408$

In direzione Y, la curva pushover che restituisce il valore minore dell'indicatore di rischio sismico è la curva A+Y-T: spinta in direzione +Y, distribuzione di forze lineare, effetti torcenti in senso orario,  $\zeta_E = 0.457$ . L'elaborazione di questa curva pushover si interrompe per il collasso completo della parete Ovest al Piano Terra.

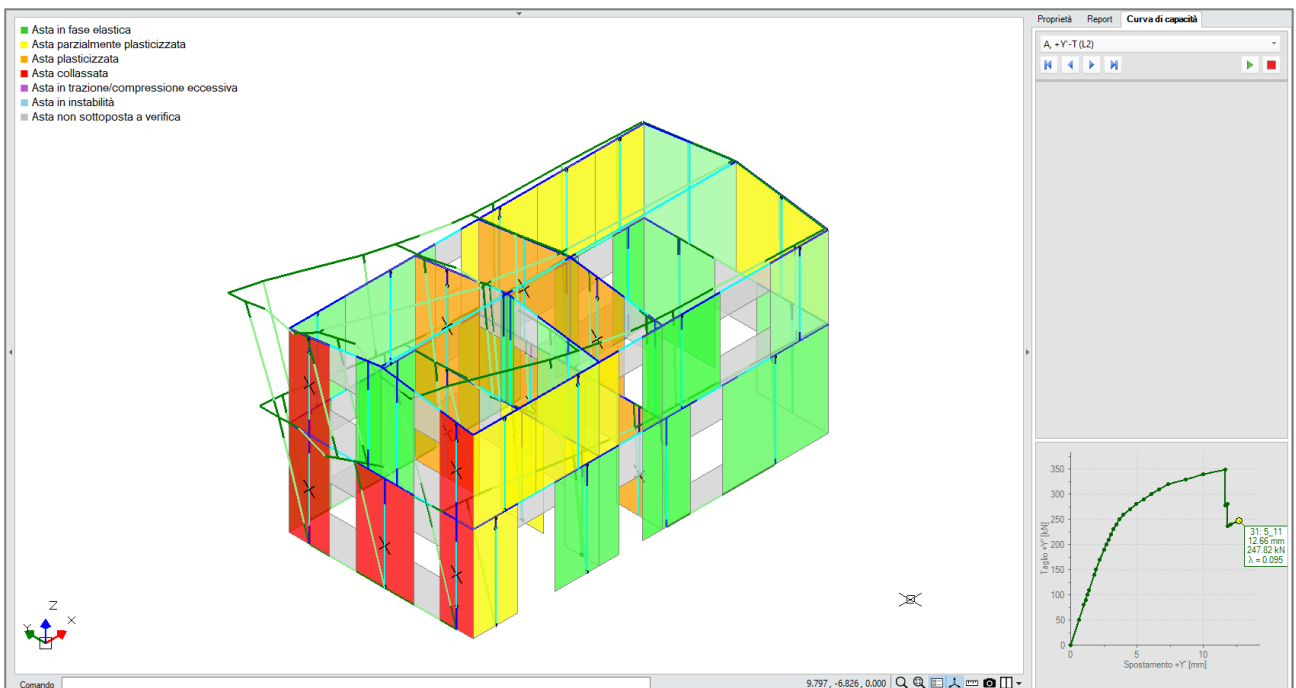


Figura 22. Combinazione 3: Risultati curva A+Y-T:  $\zeta_E = 0.457$

## 1.6.2 Stato di Progetto

Nella valutazione della sicurezza dell'edificio allo stato attuale, svolta con l'ausilio di un'analisi parametrica, è emerso che il livello di sicurezza migliorerebbe se gli impalcati si comportassero come diaframmi rigidi. Inoltre, si è evidenziato come la capacità della struttura sia condizionata principalmente dal collasso di intere pareti al Piano Terra: queste pareti dovrebbero quindi essere rinforzate in modo prioritario per poter registrare un miglioramento del livello di sicurezza.

Per la progettazione degli interventi di rinforzo si parte dal modello identificato come rappresentativo dello stato attuale (vedi sopra, Combinazione 3).

Anche in questa fase è possibile sfruttare a pieno le potenzialità dell'analisi parametrica per ricercare gli interventi che consentono di raggiungere il livello di sicurezza desiderato con il minimo sforzo economico e cantieristico. In questo caso, i parametri variabili corrispondono alle varie tipologie di intervento e alle relative zone di applicazione.

Il primo intervento considerato riguarda l'irrigidimento dei solai al fine di garantire la ripartizione delle sollecitazioni sismiche tra le pareti. Per ogni solaio (tranne quello centrale del Piano Terra che rappresenta il vano scala) si inserisce un parametro variabile relativo alla proprietà "Infinitamente rigido". Come visto si tratta di un parametro a variabilità booleana Si/No. I parametri relativi ai solai del Piano Terra vengono raggruppati nel gruppo 1, mentre quelli relativi alle falde di copertura vengono raggruppati nel gruppo 2. In questo modo si evitano le combinazioni corrispondenti all'irrigidimento parziale di un impalcato.

Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2
1	Solaio	Solaio cod.464	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
1	Solaio	Solaio cod.476	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
2	Solaio	Solaio cod.436	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
2	Solaio	Solaio cod.440	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
2	Solaio	Solaio cod.444	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
2	Solaio	Solaio cod.452	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
2	Solaio	Solaio cod.456	Infinitamente rigido	No	B	No	Si
2	Solaio	Solaio cod.460	Infinitamente rigido	No	B	No	Si

Figura 23. Parametri variabili relativi all'irrigidimento dei solai

In seguito, si considera il rinforzo delle pareti perimetrali del Piano Terra tramite intonaco armato, con applicazione sia sulla faccia interna che sulla faccia esterna. Per ogni maschio murario di queste pareti viene inserito il corrispondente parametro variabile relativo alla proprietà "Intonaco armato". Si tratta di un parametro booleano quindi il primo valore viene impostato su "No" e il secondo su "Si". I parametri vengono raggruppati in modo che l'intervento si estenda sempre a tutti i maschi della stessa parete e sia consentita l'applicazione su singole pareti (non necessariamente su tutte). Pertanto, i parametri relativi ai maschi sulla facciata Sud vengono raggruppati nel gruppo 3, quelli della facciata Nord nel gruppo 4, quelli della facciata Ovest nel gruppo 5, e quelli della facciata Est nel gruppo 6.

Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2	Valore 3	Valore 4	Valore 5	Vincolo	ki	kj	Stato
9	3	Asta	Asta 1	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
10	3	Asta	Asta 3	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
11	3	Asta	Asta 4	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
12	3	Asta	Asta 6	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
13	4	Asta	Asta 13	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
14	4	Asta	Asta 16	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
15	4	Asta	Asta 19	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
16	4	Asta	Asta 22	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
17	4	Asta	Asta 27	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
18	5	Asta	Asta 38	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
19	5	Asta	Asta 42	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
20	5	Asta	Asta 45	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
21	6	Asta	Asta 53	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto
22	6	Asta	Asta 55	Interventi: Intonaco armato	No	B	No	Si						Corretto

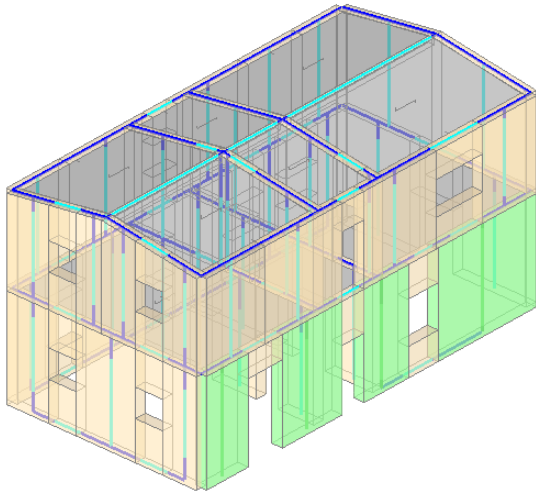
  


Figura 24. Parametri variabili relativi all'intervento di intonaco armato

In alternativa all'intervento di intonaco armato e nell'ipotesi di poter intervenire solo all'esterno dell'edificio, si considera il rinforzo con sistema FRCM applicato sulla sola faccia esterna delle pareti perimetrali al Piano Terra. Tutti gli interventi di consolidamento che non compaiono in Tabella C8.5.II (NTC 2018, §C8.5.3.1) sono attivabili nelle proprietà delle aste interessate agendo sulla proprietà Altri Interventi: il rinforzo con FRCM è uno di questi.

Per la corretta modellazione del rinforzo occorre specificare le caratteristiche del sistema utilizzato in Parametri di Calcolo > Interventi > FRCM, e successivamente completare la definizione agendo nelle proprietà delle aste interessate (Interventi > Altri interventi > FRCM). In questa fase è necessario modellare il rinforzo come se dovesse effettivamente essere applicato a tutte le pareti perimetrali del Piano Terra.



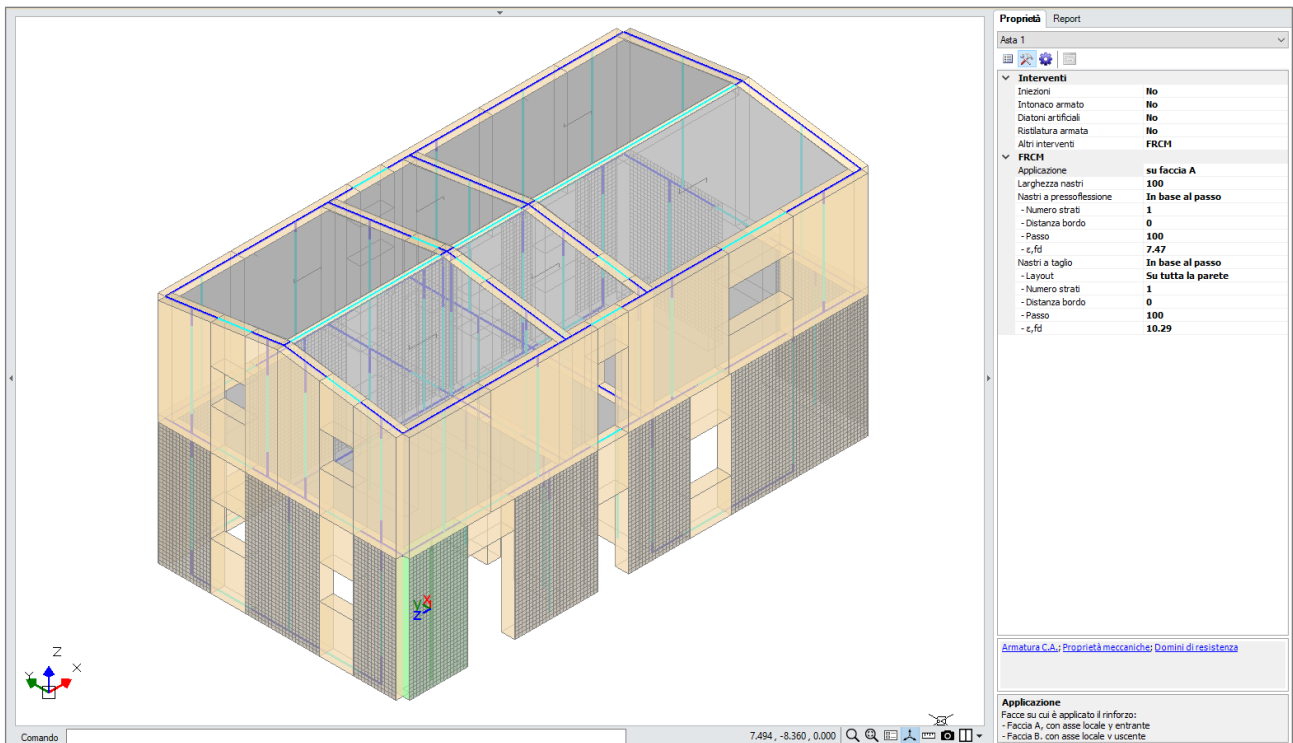


Figura 25. Modellazione del rinforzo FRCM sulla faccia esterna delle pareti perimetrali al Piano Terra

Una volta completata la modellazione del rinforzo è necessario disattivare l'intervento su tutti i maschi murari (Interventi > Altri Interventi > Nessuno). Infatti, l'attivazione del rinforzo su determinate pareti è compito dei parametri variabili che ora andremo a definire.

Per ogni maschio delle pareti perimetrali al Piano Terra viene inserito un parametro variabile relativo alla proprietà "Altri interventi". La proprietà può assumere vari valori, tra cui FRCM: specifichiamo quindi che i parametri hanno variabilità D2 e impostiamo il primo valore su "Nessuno" e il secondo su "FRCM". Anche in questo caso i parametri vengono raggruppati in modo che l'intervento si estenda sempre a tutti i maschi della stessa parete e sia consentita l'applicazione su singole pareti (non necessariamente su tutte). Pertanto, i parametri relativi ai maschi sulla facciata Sud vengono raggruppati nel gruppo 7, quelli della facciata Nord nel gruppo 8, quelli della facciata Ovest nel gruppo 9, e quelli della facciata Est nel gruppo 10.

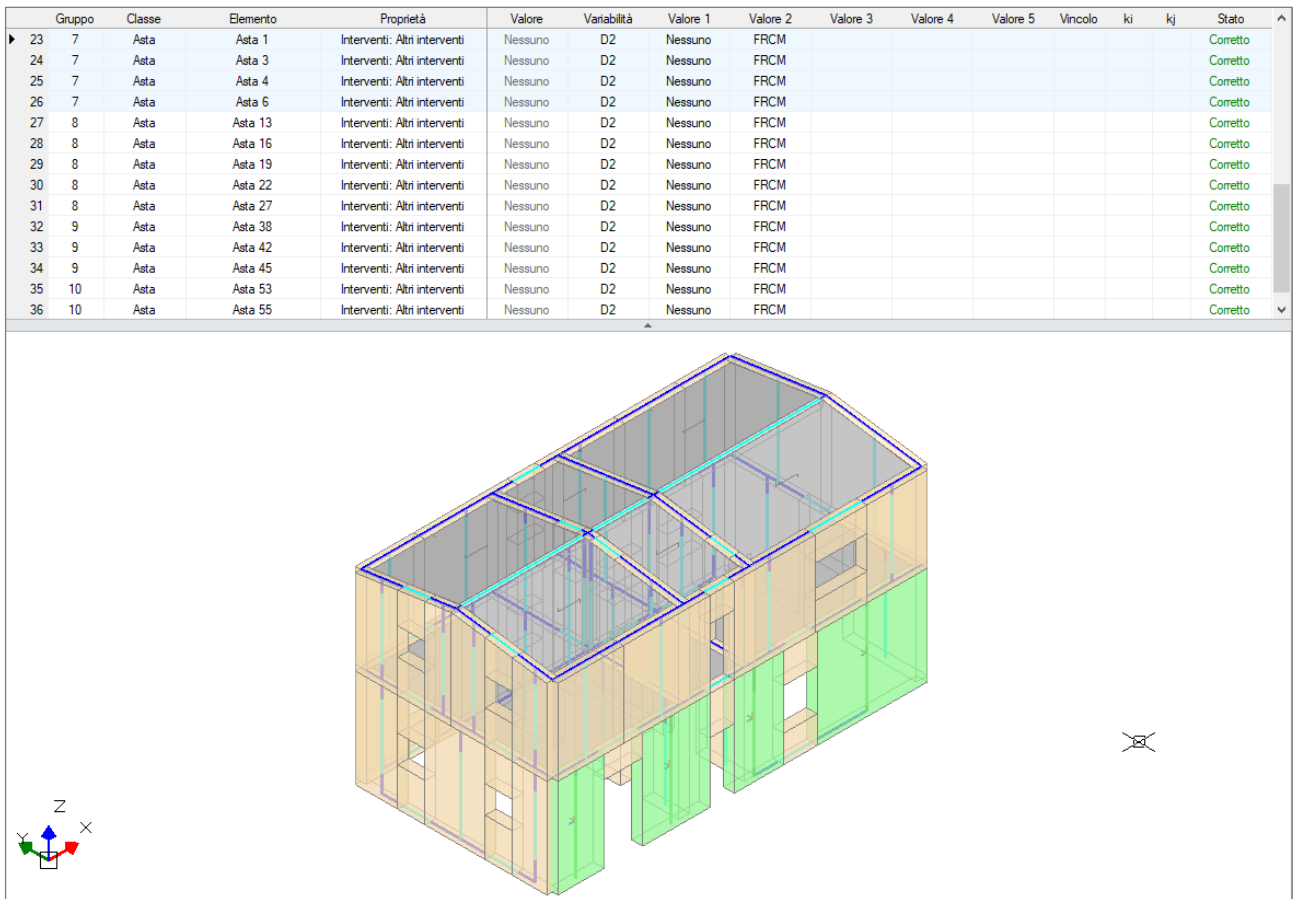


Figura 26. Parametri variabili relativi all'intervento con FRCM

Trova Segnalazioni Parametri variabili														
Aggiungi selezione Annulla filtri Esegui validazione														N. Combinazioni = 1 024
Gruppo	Classe	Elemento	Proprietà	Valore	Variabilità	Valore 1	Valore 2	Valore 3	Valore 4	Valore 5	Vincolo	ki	kj	Stato
1	1	Solaio	Solaio cod.464	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
2	1	Solaio	Solaio cod.476	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
3	2	Solaio	Solaio cod.436	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
4	2	Solaio	Solaio cod.440	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
5	2	Solaio	Solaio cod.444	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
6	2	Solaio	Solaio cod.452	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
7	2	Solaio	Solaio cod.456	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
8	2	Solaio	Solaio cod.460	Infinitamente rigido	No	B	No	Si						Corretto
9	3	Asta	Asta 1	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
10	3	Asta	Asta 3	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
11	3	Asta	Asta 4	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
12	3	Asta	Asta 6	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
13	4	Asta	Asta 13	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
14	4	Asta	Asta 16	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
15	4	Asta	Asta 19	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
16	4	Asta	Asta 22	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
17	4	Asta	Asta 27	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
18	5	Asta	Asta 38	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
19	5	Asta	Asta 42	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
20	5	Asta	Asta 45	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
21	6	Asta	Asta 53	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
22	6	Asta	Asta 55	Interventi: Intonaco amato	No	B	No	Si						Corretto
23	7	Asta	Asta 1	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
24	7	Asta	Asta 3	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
25	7	Asta	Asta 4	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
26	7	Asta	Asta 6	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
27	8	Asta	Asta 13	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
28	8	Asta	Asta 16	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
29	8	Asta	Asta 19	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
30	8	Asta	Asta 22	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
31	8	Asta	Asta 27	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
32	9	Asta	Asta 38	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
33	9	Asta	Asta 42	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
34	9	Asta	Asta 45	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
35	10	Asta	Asta 53	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto
36	10	Asta	Asta 55	Interventi: Altri interventi	Nessuno	D2	Nessuno	FRCM						Corretto

Figura 27. Tabella dei parametri variabili





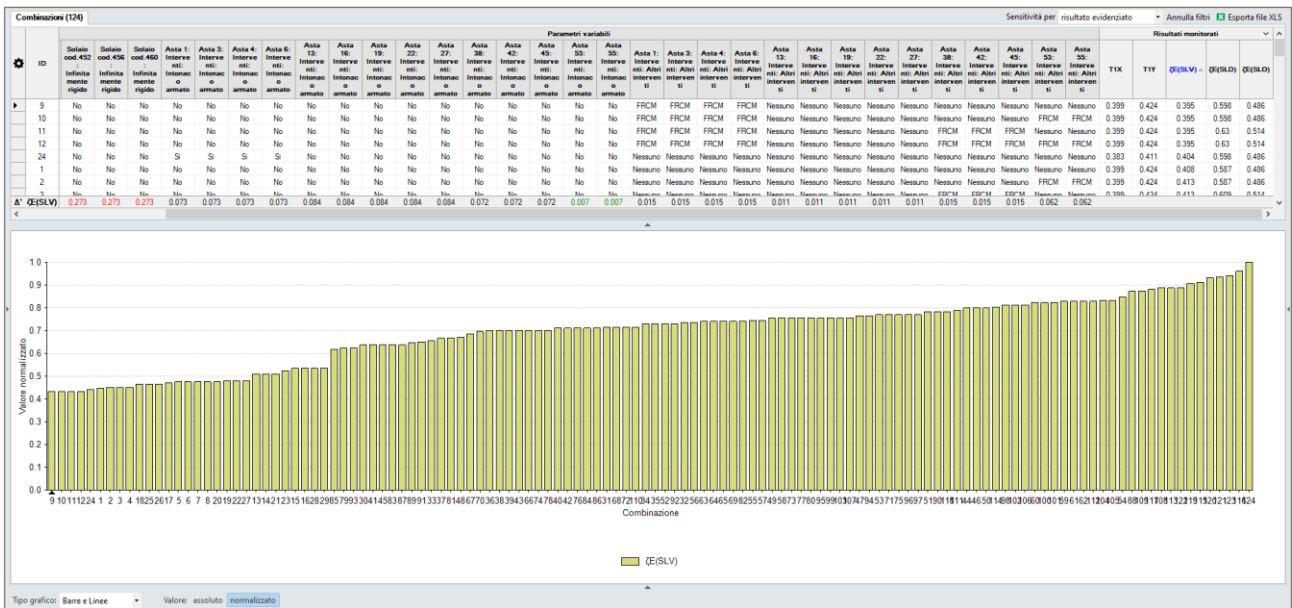



Figura 30. Risultati analisi parametrica dello stato di progetto

Notiamo subito che  $\zeta_E(SLV)$  varia da 0.395 a 0.915: vi sono quindi delle combinazioni che determinano una riduzione dell'indicatore  $\zeta_E$  rispetto allo stato attuale (0.408). Esaminando la tabella vediamo che si tratta delle combinazioni 9, 10, 11, 12, 24; hanno in comune l'assenza di irrigidimento dei solai, il rinforzo della parete della facciata Sud (con intonaco armato o FRM) e l'assenza di rinforzo sulla parete Nord. Questo fa riflettere sull'importanza di un'accurata progettazione degli interventi che, in alcuni casi, possono risultare controproducenti.

Applichiamo ora un filtro alla colonna  $\zeta_E(SLV)$  per concentrarci sulle combinazioni che restituiscono un valore dell'indicatore maggiore o uguale a 0.508 (cioè almeno +0.1 rispetto allo stato attuale). Inoltre, per semplificare la consultazione della tabella andiamo a nascondere alcune colonne non strettamente necessarie per effetto dei raggruppamenti. Clicchiamo sul pulsante : tra le colonne relative ai solai visualizziamo solo quella del solaio 464 (rappresentativo dell'intervento all'impalcato intermedio) e quella del solaio 436 (rappresentativa dell'intervento in copertura); tra le colonne relative alle aste visualizziamo le colonne dell'asta 1 (rappresentativa della facciata Sud), dell'asta 13 (facciata Nord), dell'asta 38 (facciata Ovest) e dell'asta 53 (facciata Est).

ID	Input											Output		
	Solaio cod.464: Infinitamente rigido	Solaio cod.436: Infinitamente rigido	Asta 1: Interventi: Intonaco armato	Asta 13: Interventi: Intonaco armato	Asta 38: Interventi: Intonaco armato	Asta 53: Interventi: Intonaco armato	Asta 1: Interventi: Altri interventi	Asta 13: Interventi: Altri interventi	Asta 38: Interventi: Altri interventi	Asta 53: Interventi: Altri interventi	$\zeta_E$ (SLV) $\Delta$ $\checkmark$	$\zeta_E$ (SLD)	$\zeta_E$ (SLO)	
85	Si	No	No	Si	Si	Si	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.565	0.793	0.662	
79	Si	No	No	No	No	Si	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.57	0.652	0.541	
93	Si	No	Si	Si	Si	Si	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.57	0.913	0.757	
30	No	No	Si	Si	Si	No	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.583	0.739	0.622	
41	No	Si	No	No	No	No	FRCM	Nessuno	Nessuno	FRCM	0.583	0.663	0.554	
45	No	Si	No	No	No	No	FRCM	FRCM	Nessuno	FRCM	0.583	0.761	0.622	
83	Si	No	No	Si	No	Si	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.583	0.707	0.581	
87	Si	No	Si	No	No	Si	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.583	0.717	0.595	
89	Si	No	Si	No	Si	Si	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.592	0.793	0.662	
91	Si	No	Si	Si	No	Si	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.596	0.761	0.622	
33	No	Si	No	No	No	No	Nessuno	Nessuno	Nessuno	FRCM	0.601	0.609	0.5	
37	No	Si	No	No	No	No	Nessuno	FRCM	Nessuno	FRCM	0.61	0.696	0.568	
81	Si	No	No	No	Si	Si	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.61	0.663	0.554	
48	No	Si	No	No	No	Si	Nessuno	Nessuno	Nessuno	Nessuno	0.614	0.641	0.541	
67	Si	No	No	No	No	No	Nessuno	FRCM	Nessuno	Nessuno	0.628	0.696	0.581	
70	Si	No	No	No	No	No	Nessuno	FRCM	FRCM	FRCM	0.637	0.707	0.581	
36	No	Si	No	No	No	No	Nessuno	FRCM	Nessuno	Nessuno	0.641	0.696	0.568	
38	No	Si	No	No	No	No	Nessuno	FRCM	FRCM	Nessuno	0.641	0.696	0.568	
39	No	Si	No	No	No	No	Nessuno	FRCM	FRCM	FRCM	0.641	0.696	0.568	
43	No	Si	No	No	No	No	FRCM	Nessuno	FRCM	FRCM	0.641	0.663	0.554	

Figura 31. Focus per la selezione della combinazione ottimale

Tra le prime righe spiccano le seguenti:

- Combinazione 79:  $\zeta_E = 0.570$   
Irrigidimento impalcato intermedio e intonaco armato su muri a Est
- Combinazione 30:  $\zeta_E = 0.583$   
Intonaco armato sui muri a Nord, Sud e Ovest
- Combinazione 33:  $\zeta_E = 0.601$   
Irrigidimento dell'impalcato di copertura e rinforzo FRCM su muri a Est

La scelta della combinazione ottimale può quindi essere effettuata considerando vari aspetti, tra cui il livello di sicurezza raggiungibile, la possibilità o meno di intervenire all'interno della struttura, il costo delle opere.

Una volta individuata la combinazione ottimale, è possibile richiedere la creazione del modello rappresentativo dello stato di progetto attraverso il comando "Salva modello con combinazione selezionata".

Supponiamo che la nostra combinazione ottimale sia la 33. Salviamo il relativo modello ed eseguiamo l'analisi Pushover. La curva che restituisce l'indicatore minore è la curva E-Y+T: spinta in direzione -Y, distribuzione di forze uniforme, effetti torcenti in senso antiorario,  $\zeta_E = 0.601$ .

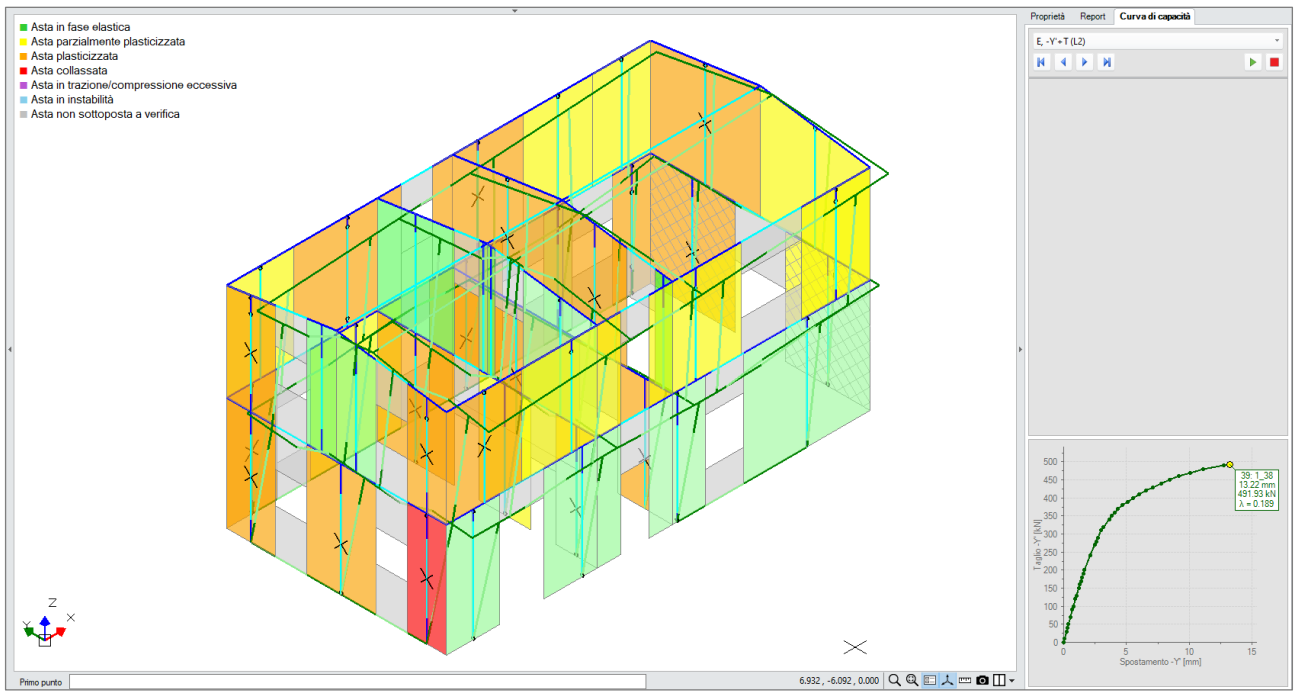


Figura 32. Combinazione 33: Risultati curva E-Y+T:  $\zeta_E = 0.601$

## 2 SPETTRI DI PIANO

Gli **elementi costruttivi non strutturali** si distinguono in due gruppi (NTC 2018, §7.2.3):

1. elementi con rigidezza, resistenza e massa tali da influenzare in maniera significativa la risposta strutturale;
2. elementi che influenzano la risposta strutturale solo attraverso la loro massa.

Nel primo caso, l'analisi sismica può essere condotta inglobando gli elementi non strutturali nel modello della struttura principale (Combined Prime-Secondary System Approach).

Per gli elementi del secondo gruppo, invece, l'analisi può essere disaccoppiata da quella della struttura principale. In questo caso l'input sismico può essere valutato per mezzo degli **spettri di piano** (Floor Response Spectrum Approach).

In questa sezione si fa riferimento proprio a quest'ultimo approccio.

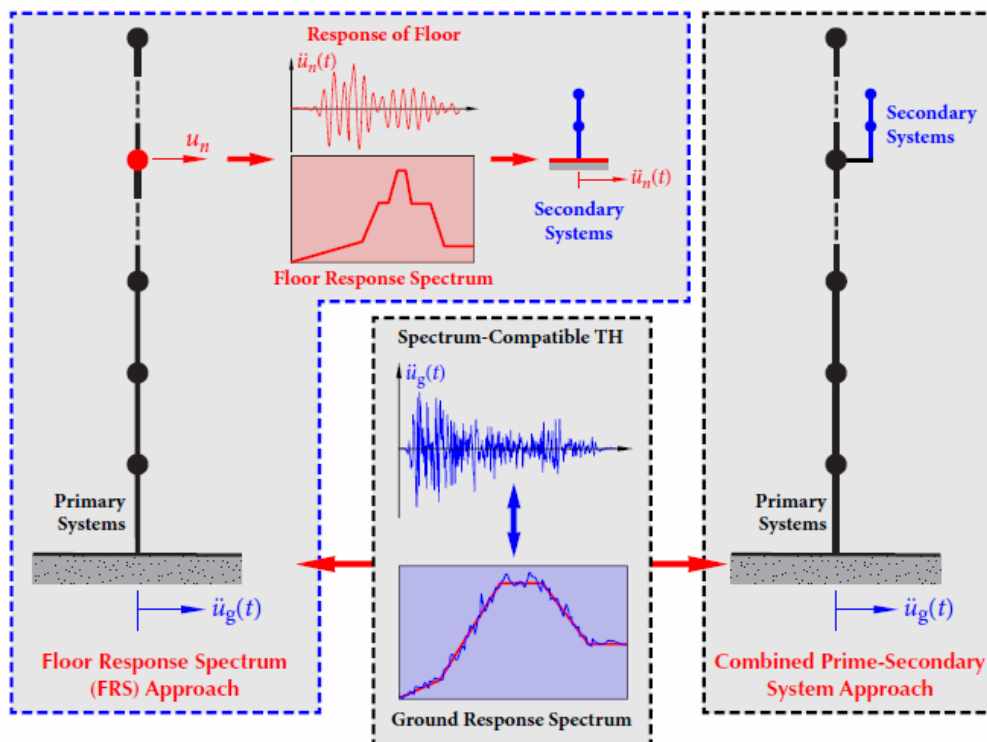


Figura 33. Due approcci per l'analisi sismica di elementi costruttivi non strutturali (da Wei Jiang: Direct Method of Generating Floor Response Spectra, a thesis presented to the University of Waterloo, 2016)

La domanda sismica sugli elementi strutturali può essere determinata applicando loro una forza orizzontale  $F_a$  definita come segue:

$$F_a = \frac{S_a W_a}{q_a}$$

dove:

$S_a$  è l'accelerazione massima (adimensionalizzata rispetto a quella di gravità) che l'elemento non strutturale subisce durante il sisma per lo stato limite in esame;

$W_a$  è il peso dell'elemento;

$q_a$  è il fattore di comportamento dell'elemento.



Gli spettri di piano rappresentano un modello per la valutazione di  $S_a$ , cioè l'azione sismica in un predeterminato punto della struttura principale.

**Aedes.PCM 2023** consente di elaborare gli spettri di piano secondo le tre formulazioni fornite dalla Circolare applicativa delle NTC 2018 (§C7.2.3).

I paragrafi seguenti illustrano la funzionalità di **elaborazione degli spettri di piano** a partire dall'analisi modale della struttura principale, e la possibilità di eseguire **analisi sismiche lineari con spettri di piano**.

## 2.1 ELABORAZIONE SPETTRI DI PIANO

Una volta eseguita l'analisi modale della struttura principale, attraverso il seguente comando della Barra multifunzione è possibile accedere ad una finestra dedicata all'elaborazione degli spettri di piano:

### Risultati > Analisi Modale > Spettri di Piano

La finestra si presenta come in figura seguente e contiene:

- un grafico per la rappresentazione degli spettri;
- una tabella per la definizione degli spettri di piano in funzione di formulazione, posizione, e parametri caratteristici (in basso);
- una barra degli strumenti per la scelta degli spettri da visualizzare (in alto).

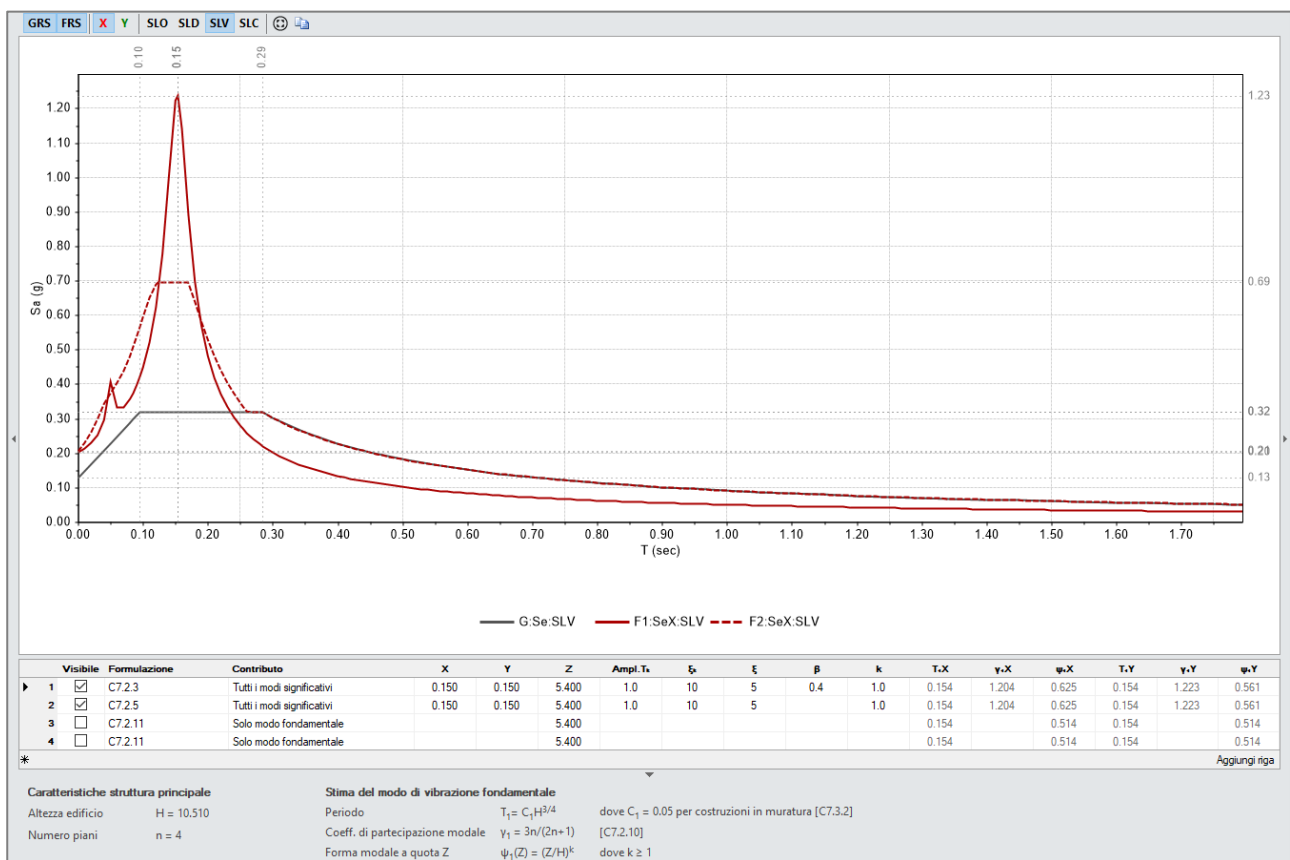


Figura 34. Finestra degli Spettri di Piano

Nella tabella di definizione, in basso, ogni riga rappresenta una "regola" di definizione degli spettri di piano in funzione di formulazione, contributo modale, posizione nel sistema di riferimento della struttura principale e altri parametri caratteristici. Per ogni riga vengono generati gli spettri di piano in direzione X e Y per tutti gli stati limite considerati (SLO, SLD, SLV, SLC).

Per aggiungere una nuova regola è sufficiente iniziare la compilazione dell'ultima riga della tabella (Aggiungi riga).

Vediamo in dettaglio il significato delle varie colonne della tabella.

<b>Visibile</b>	Stabilisce se gli spettri di piano relativi a una determinata regola debbano essere rappresentati, oppure no, nel grafico.
<b>Formulazione</b>	<p>Formulazione adottata nella definizione degli spettri di piano corrispondente a una delle formule proposte in NTC 2018, §C7.2.3:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>C7.2.3</b> Formulazione generica.</li> <li>• <b>C7.2.5</b> Formulazione semplificata per elementi non strutturali, impianti, meccanismi locali.</li> <li>• <b>C7.2.11</b> Formulazione semplificata per costruzioni con struttura a telai.</li> </ul>
<b>Contributo</b>	<p>Determina il contributo modale, cioè i modi di vibrare della struttura principale considerati nel calcolo dello spettro di piano:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Tutti i modi significativi.</b> Si tiene conto dei modi di vibrare calcolati nell'analisi modale della struttura principale; e in particolare di tutti i modi da considerare, secondo quanto specificato in Parametri di Calcolo &gt; Modale.</li> <li>• <b>Solo il modo fondamentale.</b> Si tiene conto del modo di vibrare della struttura principale con la maggior massa partecipante nella direzione sismica considerata.</li> <li>• <b>Modo fondamentale stimato.</b> Si considera un modo fondamentale con periodo, forma modale, e coefficiente di partecipazione specificati manualmente dall'utente. I valori iniziali sono ottenuti con le formule semplificate riportate in fondo alla finestra.</li> </ul>
<b>X, Y, Z</b>	<p>Coordinate nel sistema di riferimento della struttura principale del punto in cui si vuole calcolare l'accelerazione sismica e quindi lo spettro di piano. Le coordinate permettono di determinare la forma modale per ogni modo considerato. Si distinguono due casi in base al contributo modale selezionato.</p> <p><b>1. Tutti i modi significativi / Solo modo fondamentale</b></p> <p>La forma modale deriva dall'analisi modale della struttura principale. Se le coordinate coincidono con un nodo della struttura, la forma modale viene assunta pari allo spostamento modale del nodo. In caso contrario la forma modale viene calcolata come media pesata degli spostamenti modali di tutti i nodi della struttura. Concettualmente, ogni nodo contribuisce alla media con un peso inversamente proporzionale alla sua distanza dal punto specificato, ma allo scostamento verticale viene attribuito un'importanza maggiore rispetto allo scostamento orizzontale. Precisamente, il peso con cui ogni nodo contribuisce alla media è dato dalla seguente espressione:</p> $w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2}}$

---

dove:  $x_i, y_i, z_i$  sono le coordinate del nodo  $i$ -esimo;  $X, Y, Z$  sono le coordinate del punto specificato.

## 2. Modo fondamentale stimato

La forma modale è calcolata con la seguente formula:

$$\psi = \left(\frac{Z}{H}\right)^k$$

dove:  $Z$  è la coordinata specificata in input;  $H$  è l'altezza della struttura principale specificata in Parametri di Calcolo > Sismica;  $k$  è un coefficiente in input, pari a 1 se si vuole assumere una deformata modale con andamento lineare.

---

### Ampl. Tk

Fattore di amplificazione dei periodi propri della struttura principale.

Gli spettri di piano sono fortemente influenzati dal livello di non-linearità della struttura principale. Infatti, presentano una forte amplificazione in corrispondenza del periodo fondamentale della struttura elastica; ma tale amplificazione si riduce considerevolmente quando la struttura entra in campo non lineare perché le progressive plasticizzazioni determinano un incremento dei periodi propri di vibrazione.

Grazie a questo parametro è possibile amplificare i periodi di vibrare calcolati in fase elastica tenendo conto del comportamento non lineare della struttura principale.

Solo per formulazione C7.2.3 e C7.2.5.

---

### $\xi_k$

Smorzamento viscoso equivalente della struttura principale in %.

Gli spettri di piano sono fortemente influenzati dal livello di non-linearità della struttura principale. È possibile tener conto di questo comportamento grazie ad un maggior smorzamento viscoso, ad esempio specificando 10% invece che 5%.

Solo per formulazione C7.2.3 e C7.2.5.

---

### $\xi$

Smorzamento viscoso equivalente dell'elemento strutturale (o della struttura secondaria) in %.

Solo per formulazione C7.2.3 e C7.2.5.

---

### $\beta$

Coefficiente di accoppiamento tra i modi di vibrare della struttura principale e secondaria (variabile tra 0.4 e 0.5).

Solo per formulazione C7.2.3.

---

### k

Coefficiente per la stima della forma modale come da seguente espressione:

$$\psi = \left(\frac{Z}{H}\right)^k$$

Solo in caso di contributo modale con modo fondamentale stimato.

---

<b>T<sub>1X</sub>, T<sub>1Y</sub></b>	Periodo di vibrazione fondamentale della struttura principale in direzione X e Y. In input in caso di modo fondamentale stimato.
<b>Y<sub>1X</sub>, Y<sub>1Y</sub></b>	Coefficiente di partecipazione modale del modo fondamentale della struttura principale in direzione X e Y. In input in caso di modo fondamentale stimato. Non rilevante in caso di formulazione C7.2.11.
<b>ψ<sub>1X</sub>, ψ<sub>1Y</sub></b>	Forma modale a quota Z del modo di vibrare fondamentale della struttura principale, in direzione X e Y.

La barra degli strumenti nella parte alta della finestra permette di scegliere quali spettri di risposta visualizzare nel grafico, e contiene alcuni utili comandi. Vediamo in dettaglio le varie opzioni.

<b>GRS</b>	Attiva (o disattiva) la rappresentazione degli spettri di risposta al suolo (Ground Response Spectra).
<b>FRS</b>	Attiva (o disattiva) la rappresentazione degli spettri di risposta di piano (Floor Response Spectra).
<b>X, Y</b>	Attivano (o disattivano) la rappresentazione degli spettri in direzione X e Y.
<b>SLO, SLD, SLV, SLC</b>	Attivano (o disattivano) la rappresentazione degli spettri relativi ai vari stati limite.
<b>Estendi</b>	Fa in modo che il grafico inquadri completamente tutti gli spettri da visualizzare nell'intervallo 0 - 4 sec.
<b>Copia</b>	Copia negli appunti l'immagine del grafico degli spettri con la corrente impostazione di visualizzazione.

Attraverso le varie opzioni di visualizzazione, il grafico permette di operare qualsiasi tipo di confronto tra vari spettri di risposta: spettri al suolo o di piano, in direzione X o Y, con varie formulazioni, vario contributo modale, varie posizioni in pianta e in elevazione, vari stati limite.

Ad esempio, l'immagine precedente mette a confronto lo spettro al suolo per SLV con gli spettri di piano a quota 5.4 m e in direzione X, ottenuti attraverso le formulazioni C7.2.3 e C7.2.5 considerando il contributo di tutti i modi significativi.

Nell'immagine seguente, invece, il confronto è tra lo spettro al suolo e gli spettri di piano a quota 5.4 m, in direzione X e Y, ottenuti attraverso la formulazione C7.2.5.

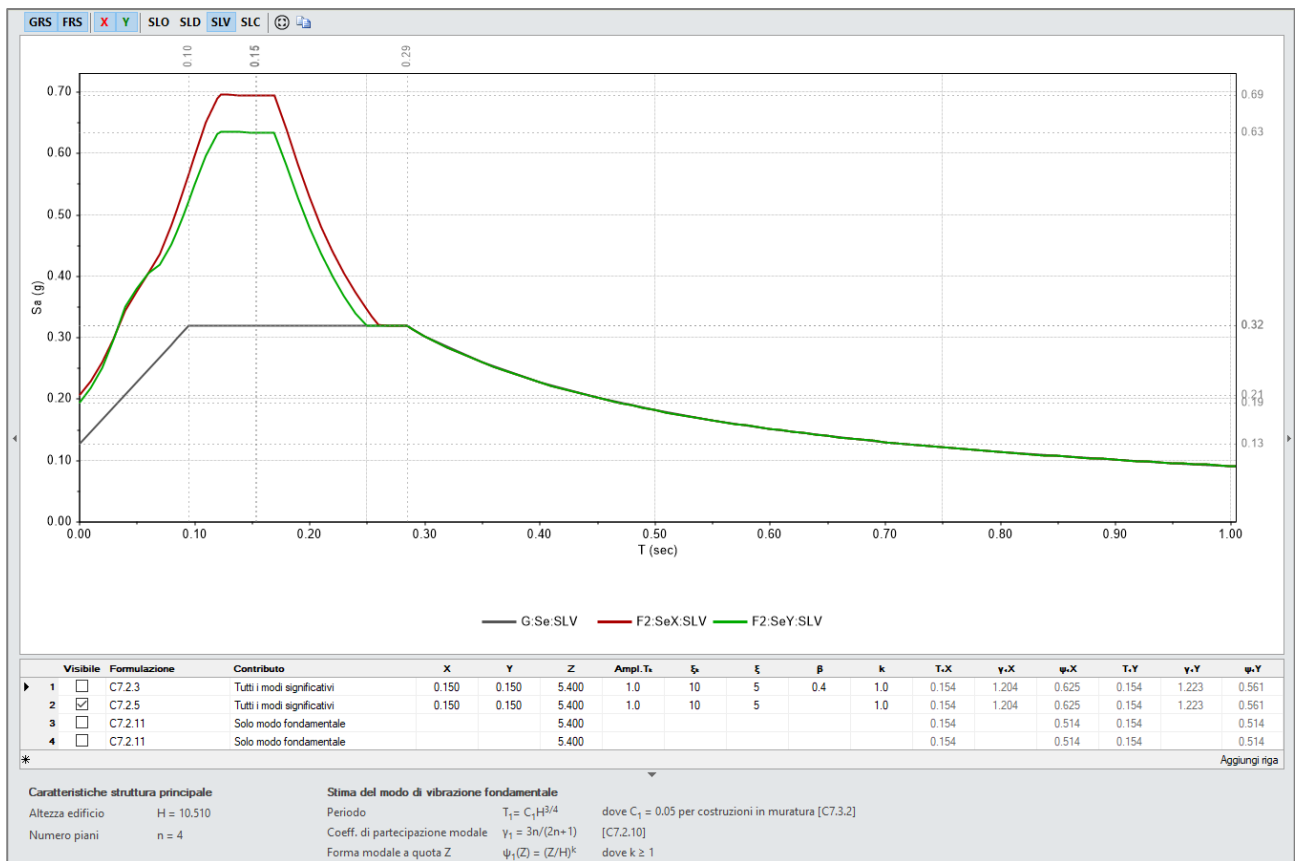


Figura 35. Confronto tra spettri di piano in direzione X e Y

Il comando **Esporta XLS** nella Barra multifunzione permette di esportare gli spettri di risposta al suolo e tutti gli spettri di piano elaborati, in formato tabulare su file XLS. Il file esportato può essere aperto per successive elaborazioni con qualsiasi programma che gestisce fogli elettronici, come ad esempio Microsoft Excel.

## 2.2 ANALISI SISMICHE LINEARI CON SPETTRI DI PIANO

Piccole strutture realizzate sulla copertura di un edificio, come ad esempio una pergola, un gazebo o una tettoia in legno o in acciaio, possono essere analizzate separatamente rispetto alla struttura principale. È possibile quindi realizzare un modello strutturale che includa la sola struttura secondaria, e svolgere analisi sismiche lineari (statica lineare o dinamica modale) utilizzando gli spettri di piano invece che lo spettro di risposta al suolo.

Per attuare questa procedura in modo rigoroso occorre innanzitutto svolgere l'analisi modale della struttura principale. Successivamente, nel file della struttura secondaria, sarà possibile definire l'azione sismica sulla base di opportuni spettri di piano che tengano conto del comportamento dinamico della struttura principale (vedi figura seguente).

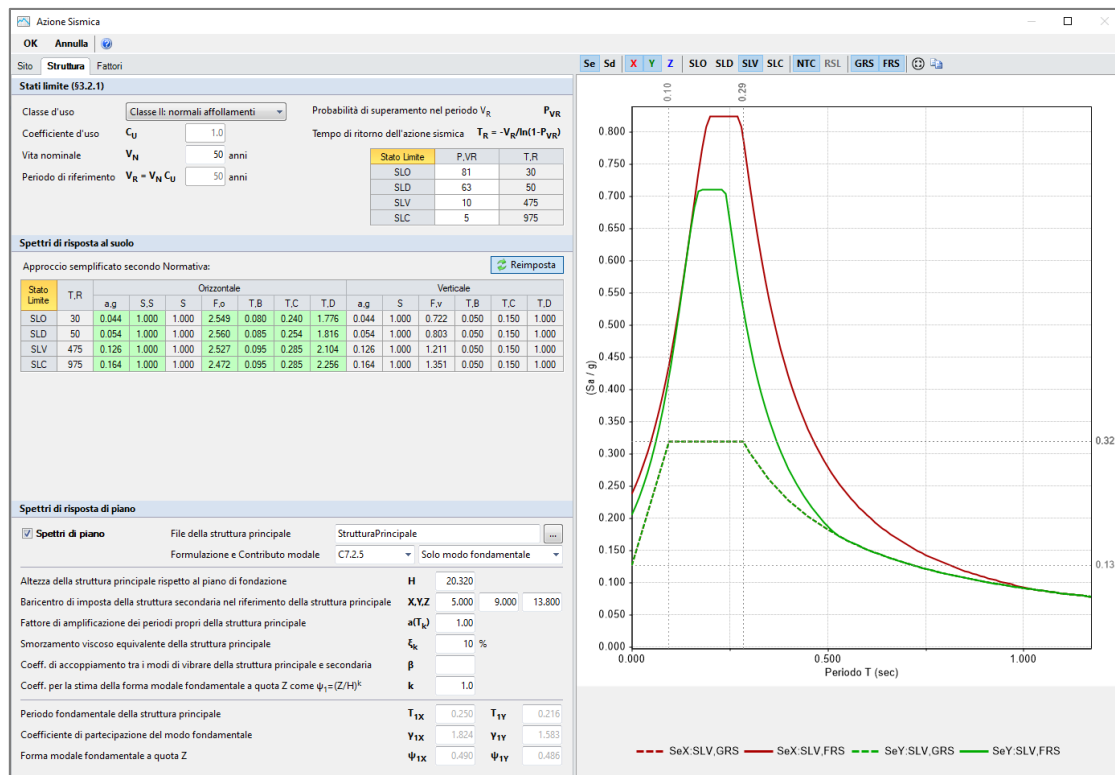


Figura 36. Definizione spettri di piano per analisi sismiche lineari

Nel file della struttura secondaria, finestra Azione sismica, scheda Struttura, è necessario attivare l'opzione "Spettri di piano" e specificare i seguenti parametri.

### File della struttura principale

Attraverso il tasto (...) è possibile selezionare il file relativo al modello della struttura principale su cui sia stata svolta l'analisi modale.

In assenza di un'analisi di questo tipo, è comunque possibile definire opportuni spettri di piano sulla base di una stima dei modi fondamentali.

<b>Formulazione</b>	<p>Formulazione adottata nella definizione degli spettri di piano corrispondente a una delle formule proposte in NTC 2018, §C7.2.3:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>C7.2.3</b> Formulazione generica.</li> <li>• <b>C7.2.5</b> Formulazione semplificata per elementi non strutturali, impianti, meccanismi locali.</li> <li>• <b>C7.2.11</b> Formulazione semplificata per costruzioni con struttura a telai.</li> </ul>
<b>Contributo</b>	<p>Determina il contributo modale, cioè i modi di vibrare della struttura principale considerati nel calcolo dello spettro di piano:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Tutti i modi significativi.</b> Si tiene conto dei modi di vibrare calcolati nell'analisi modale della struttura principale; e in particolare di tutti i modi da considerare, secondo quanto specificato in Parametri di Calcolo &gt; Modale.</li> <li>• <b>Solo il modo fondamentale.</b> Si tiene conto del modo di vibrare della struttura principale con la maggior massa partecipante nella direzione sismica considerata.</li> <li>• <b>Modo fondamentale stimato.</b> Si considera un modo fondamentale con periodo, forma modale, e coefficiente di partecipazione specificati manualmente dall'utente.</li> </ul>
<b>H</b>	Altezza della struttura principale rispetto al piano di fondazione.

I restanti parametri sono descritti in dettaglio nel paragrafo "Elaborazione Spettri di Piano". Il coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi$  e il fattore di comportamento  $q$  della struttura secondaria possono essere normalmente definiti nella scheda "Fattori" della finestra "Azione Sismica".

Una volta definiti gli spettri di piano, questi possono essere visualizzati nel grafico degli spettri e saranno utilizzati nel corso delle analisi sismiche lineari (statica lineare e dinamica modale) per caratterizzare l'azione sismica agente sulla struttura secondaria.

Il collegamento tra i file di struttura secondaria e struttura principale è costantemente aggiornato. Supponiamo che nel file della struttura principale intervengano delle modifiche che alterino i risultati dell'analisi modale. Tornando nel file della struttura secondaria, gli spettri di piano saranno automaticamente aggiornati sulla base del nuovo comportamento della struttura principale.



### 3 CLASSIFICAZIONE SISMICA

Aedes.PCM presenta funzionalità dedicate alla classificazione sismica delle costruzioni in accordo al DM 65 del 7.3.2017, in attuazione del cosiddetto Sismabonus.

La classificazione sismica di una costruzione consiste nell'assegnazione di una delle otto **Classi di Rischio**, con rischio crescente da A+ a G.

Per determinare la classe di rischio si fa riferimento a due **parametri**:

- la **Perdita Annuale Media (PAM)**, cioè il costo di riparazione dei danni prodotti dagli eventi sismici che si manifesteranno nel corso della vita della costruzione, ripartito annualmente ed espresso come percentuale del costo di ricostruzione;
- l'**Indice di Sicurezza (IS-V)** definito come rapporto tra capacità e domanda in termini di PGA allo Stato Limite di salvaguardia della Vita.

Per i fabbricati in muratura, il Decreto propone due **metodi** alternativi:

- il **metodo Convenzionale**, basato sull'applicazione dei normali metodi di analisi previsti dalle NTC, consente la valutazione della classe di rischio della costruzione sia nello stato di fatto sia nello stato conseguente all'eventuale intervento;
- il **metodo Semplificato**, basato su una classificazione macrosismica dell'edificio e indicato per una valutazione speditiva della Classe di Rischio dei soli edifici in muratura. L'idea alla base di questo metodo è quella di creare una procedura speciale, meno costosa, per stimolare i cittadini a mettere in sicurezza i loro fabbricati con piccoli interventi (locali) di rammendo, come le catene utilizzate per sostenere gli edifici in muratura o la ristrutturazione del tetto in un piccolo immobile.

Aedes.PCM consente di determinare la Classe di Rischio di un edificio secondo il metodo Convenzionale, cioè sulla base delle usuali verifiche di sicurezza previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Per gli edifici esistenti in muratura la valutazione della sicurezza sismica è in genere condotta attraverso l'Analisi Cinematica dei meccanismi di collasso locale e l'Analisi Statica Non Lineare (Pushover) che chiama in causa il comportamento globale della struttura. La valutazione può essere integrata attraverso l'analisi Dinamica Modale per tenere conto di verifiche complementari, relative ad esempio alla pressoflessione ortogonale dei maschi murari o alla capacità delle fondazioni.

Una volta completata la valutazione della sicurezza dell'edificio, attraverso il seguente comando della Barra multifunzione è possibile generare un report che identifica la Classe di Rischio:

**Risultati > Report > Classificazione sismica**

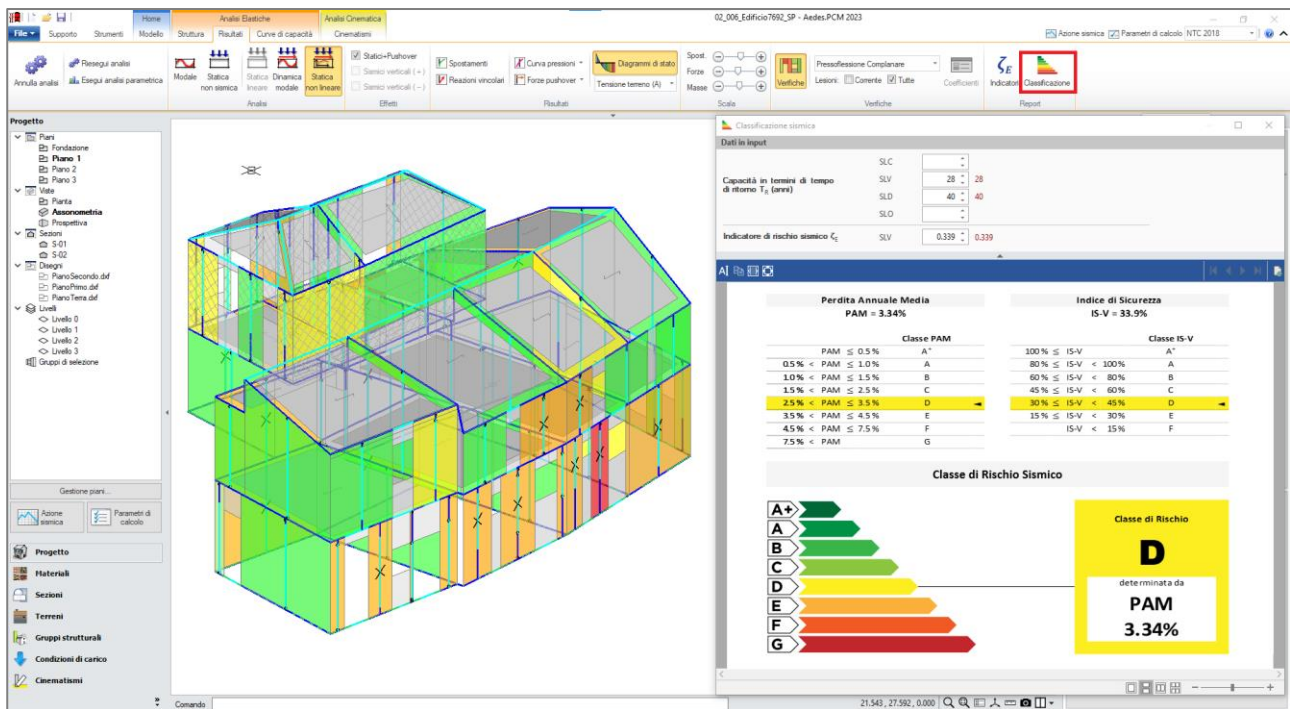


Figura 37. Report di Classificazione sismica

Il report è generato in funzione dei seguenti **dati in input**:

- **capacità in termini di tempo di ritorno  $T_R$**  per i vari stati limite considerati;
- **indicatore di rischio sismico  $\zeta_E$**  per SLV.

Questi parametri sono automaticamente preimpostati sulla base dei risultati delle analisi svolte (evidenziati in rosso), coerentemente a quanto riportato nel report "Indicatori di rischio sismico".

I valori possono comunque essere modificati per tenere conto, ad esempio, di verifiche svolte separatamente.

Dati in input	
SLC	
Capacità in termini di tempo di ritorno $T_R$ (anni)	SLV: 28, 28
	SLD: 40, 40
	SLO: -
Indicatore di rischio sismico $\zeta_E$	SLV: 0.339, 0.339

Figura 38. Dati in input

Il report mostra innanzitutto la **curva della perdita economica** da cui si ricava il parametro PAM.

La curva è ottenuta diagrammando per ogni stato limite le seguenti quantità: in ascisse  $\lambda$ , la frequenza media annua di superamento pari a  $1/T_{RC}$ , dove  $T_{RC}$  è la capacità in termini di tempo di ritorno; in ordinate **CR**, la percentuale del costo di ricostruzione associata al raggiungimento dello stato limite (DM 07.03.17, Tabella 3).

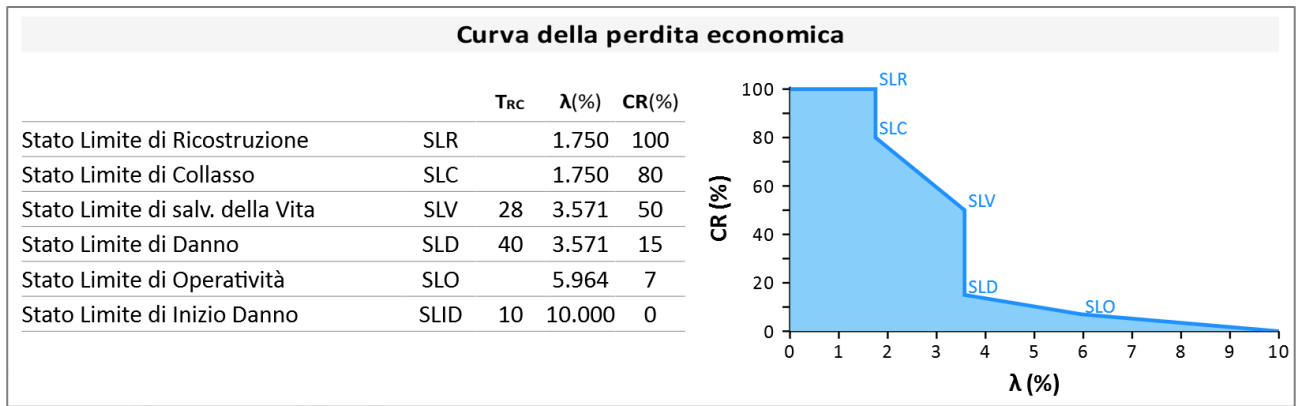


Figura 39. Curva della perdita economica

Per determinare  $\lambda$  si adottano le seguenti condizioni:

- $\lambda_{SLD} = \max(1/T_{RC,SLD}, \lambda_{SLV})$
- $\lambda_{SLC} = 0.49 \lambda_{SLV}$  se  $T_{RC,SLC}$  non è specificato, altrimenti  $\lambda_{SLC} = \min(1/T_{RC,SLC}, \lambda_{SLV})$
- $\lambda_{SLO} = 1.67 \lambda_{SLD}$  se  $T_{RC,SLO}$  non è specificato, altrimenti  $\lambda_{SLO} = \min(1/T_{RC,SLO}, \lambda_{SLD})$
- $\lambda_{SLR} = \lambda_{SLC}$
- $\lambda \leq \lambda_{SLID} = 10$  per tutti gli stati limite

Pertanto, la curva della perdita economica può essere ricavata anche se sono note le capacità in termini di tempo di ritorno relative ai soli SLV e SLD.

**Nota.** In Aedes.PCM, in base alla classe d'uso della costruzione, la valutazione della sicurezza potrebbe limitarsi al solo SLV. Tuttavia, ai fini della classificazione sismica è opportuno valutare la sicurezza anche nei confronti di SLD, sia nell'analisi globale che nell'analisi dei meccanismi di collasso locale.

La **perdita annuale media (PAM)** espressa come percentuale del costo di ricostruzione, è determinata come area sottesa dalla curva della perdita economica, mediante la seguente espressione:

$$PAM = \sum_{i=2}^5 [\lambda(SL_{i-1}) - \lambda(SL_i)] \cdot [CR(SL_i) + CR(SL_{i-1})]/2 + \lambda(SLR) \cdot CR(SLR)$$

dove l'indice  $i$  rappresenta il generico stato limite, con  $i = 1$  per SLID e  $i = 5$  per SLC.

L'**indice di sicurezza (IS-V)** non è altro che l'indicatore di rischio sismico in termini di PGA per SLV espresso in percentuale:

$$ISV = \zeta_E \cdot 100$$

Quindi, sulla base di questi parametri, il report di classificazione sismica fornisce la **Classe PAM** e la **Classe IS-V**. La minore tra le due determina la **Classe di rischio sismico** della costruzione.

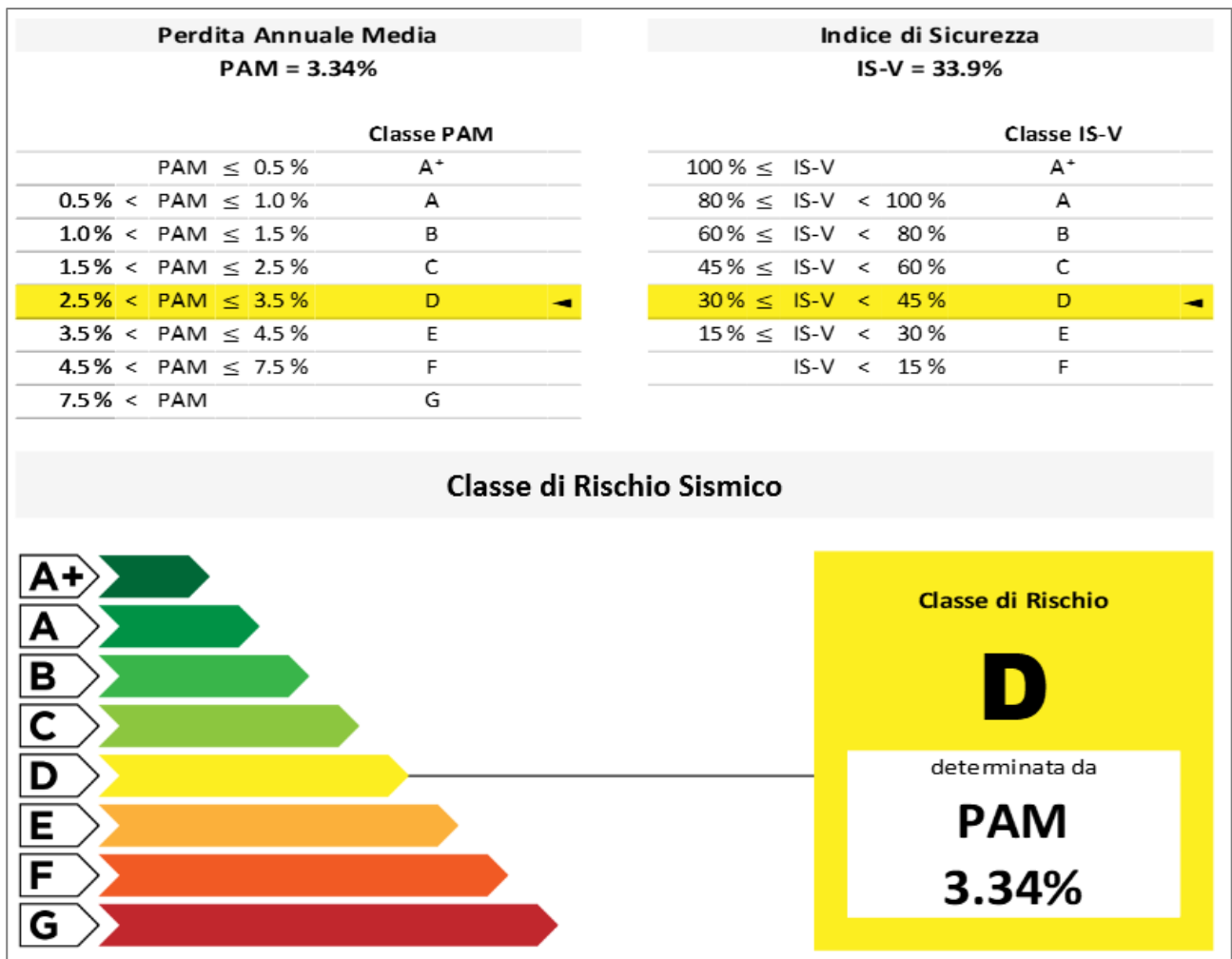


Figura 40. Classe PAM, Classe IS-V e Classe di rischio sismico

Qualora la valutazione della sicurezza sia relativa allo Stato di Progetto di un intervento di miglioramento, i dati in input riguardano sia lo stato di progetto che lo stato attuale e il report della Classificazione Sismica si compone di più pagine:

- classe di rischio dello Stato Attuale;
- classe di rischio dello Stato di Progetto;
- confronto tra stato attuale e stato di progetto in termini di curva di perdita economica e classe di rischio.

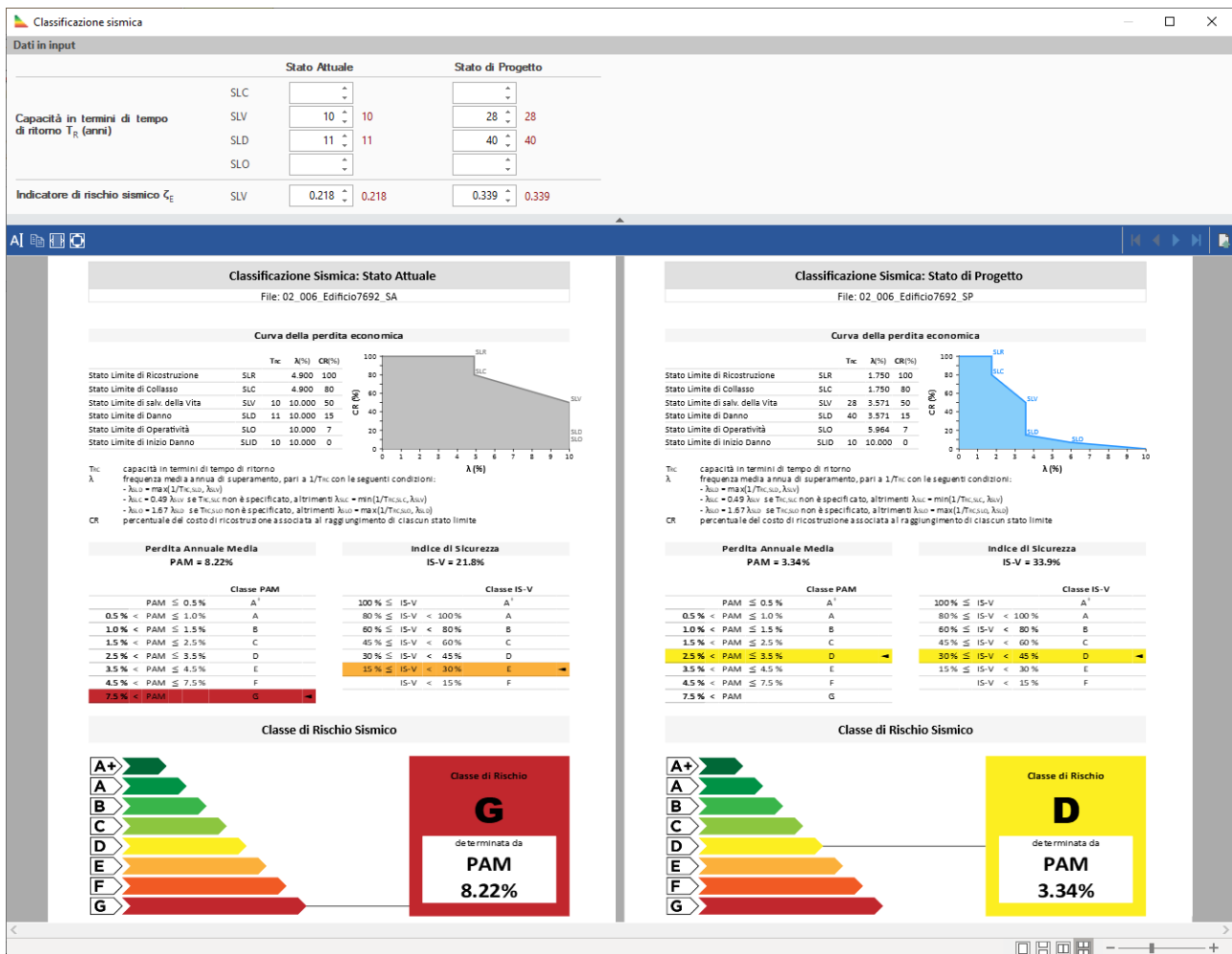


Figura 41. Classificazione sismica di stato attuale e stato di progetto

Il report di Classificazione Sismica può essere generato anche in assenza di una valutazione condotta con Aedes.PCM, attraverso il seguente comando della barra Multifunzione:

**Supporto > Utility > Classificazione Sismica**

In questo caso, ovviamente, i dati in input (capacità in termini di TR e indicatore di rischio sismico  $\zeta_E$ ) devono essere inseriti manualmente sulla base di valutazioni condotte esternamente.

Infine, il report di classificazione sismica può essere **esportato su file PDF** attraverso un apposito comando nella barra degli strumenti.

## 4 ANALISI PUSHOVER: NUOVI PARAMETRI DI CALCOLO

### 4.1 FATTORE DI PARTECIPAZIONE MODALE

In Analisi Pushover, il Fattore di partecipazione modale  $\Gamma$  consente il passaggio dal sistema reale a più gradi libertà (M-GDL) a un sistema equivalente ad un grado di libertà (1-GDL), attraverso le seguenti relazioni:

$$F^* = F_b/\Gamma$$

$$d^* = d_c/\Gamma$$

dove

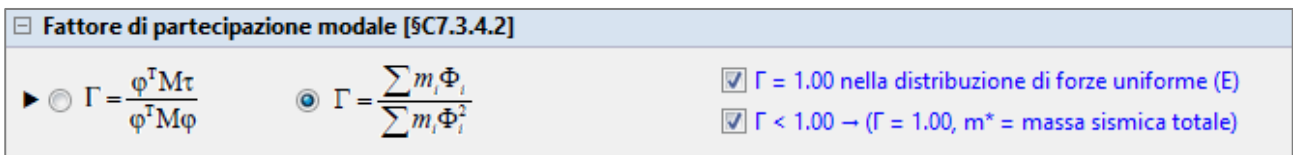
$F_b$  è il taglio alla base nel sistema reale;

$d_c$  è lo spostamento del punto di controllo nel sistema reale;

$F^*$  è la forza del sistema equivalente ad un grado di libertà;

$d^*$  è lo spostamento del sistema equivalente ad un grado di libertà.

Per determinare il fattore di partecipazione modale  $\Gamma$ , in Parametri di calcolo > Pushover(1), sono disponibili le seguenti opzioni.



#### Opzione 1

L'opzione 1 chiama in causa la matrice di massa del sistema reale e il vettore di spostamento nodale generalizzato del modo di vibrare fondamentale (NTC 2018, §C7.3.4.2):

$$\Gamma = \frac{\varphi^t M \tau}{\varphi^t M \varphi}$$

dove:

$\varphi$  è il modo di vibrare fondamentale del sistema reale, cioè il vettore di spostamento generalizzato del modo di vibrare con maggior massa partecipante nella direzione considerata, normalizzato ponendo  $d_c = 1$ ;

$M$  è la matrice di massa del sistema reale;

$\tau$  è il vettore di trascinarsi corrispondente alla direzione sismica considerata.

L'espressione è identica alla definizione dei coefficienti di partecipazione nota dalla teoria dell'analisi modale. Nell'ipotesi più generale che le masse nodali traslazionali siano indipendenti dalla direzione e che le inerzie rotazionali siano quelle torsionali, sviluppando l'espressione si ottiene:

$$\Gamma = \frac{m_1 x_1 \cos \alpha + m_1 y_1 \sin \alpha + \dots + m_n x_n \cos \alpha + m_n y_n \sin \alpha}{m_1 x_1^2 + m_1 y_1^2 + m_1 z_1^2 + J_1 \theta_1^2 + \dots + m_n x_n^2 + m_n y_n^2 + m_n z_n^2 + J_n \theta_n^2}$$

dove:

$n$  è il numero di nodi;

- $m_i$  è la massa nodale traslazionale del nodo  $i$ ;
- $J_i$  è l'inerzia torsionale del nodo  $i$  (normalmente presente solo nei nodi master);
- $x_i, y_i, z_i$  sono le componenti di spostamento nodale del nodo  $i$  in direzione X, Y e Z;
- $\theta_i$  è la rotazione del nodo  $i$  intorno all'asse Z (verticale);
- $\alpha$  è l'angolo tra la direzione sismica e l'asse X globale.

Le componenti di spostamento nodale generalizzato ( $x, y, z, \theta$ ) sono normalizzate rispetto allo spostamento del punto di controllo. Al numeratore compaiono le componenti traslazionali nella direzione considerata, mentre al denominatore compaiono tutte le componenti di spostamento generalizzato, incluse le inerzie torsionali.

Per sisma in direzione X ( $\alpha=0^\circ$ ):

$$\Gamma = \frac{m_1 x_1 + \dots + m_n x_n}{m_1 x_1^2 + m_1 y_1^2 + m_1 z_1^2 + J_1 \theta_1^2 + \dots + m_n x_n^2 + m_n y_n^2 + m_n z_n^2 + J_n \theta_n^2}$$

## Opzione 2

L'opzione 2 chiama in causa le masse di piano e gli spostamenti dei baricentri di piano nel modo di vibrare fondamentale (EC8.1, §B.2; OPCM 3274, §4.5.4.3):

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2}$$

Dove:

- $m_i$  è la massa del piano  $i$ ;
- $\Phi_i$  è lo spostamento del baricentro del piano  $i$  nella direzione considerata, individuata dall'angolo  $\alpha$ , nel modo di vibrare fondamentale (modo con maggior massa partecipante nella direzione considerata), normalizzato ponendo  $d_c = 1$ .

Nell'ipotesi più generale che le masse di piano siano indipendenti dalla direzione, sviluppando l'espressione si ottiene:

$$\Gamma = \frac{m_1 x_1 \cos \alpha + m_1 y_1 \sin \alpha + \dots + m_n x_n \cos \alpha + m_n y_n \sin \alpha}{m_1 (x_1 \cos \alpha)^2 + m_1 (y_1 \sin \alpha)^2 + \dots + m_n (x_n \cos \alpha)^2 + m_n (y_n \sin \alpha)^2}$$

dove:

- $n$  è il numero di piani;
- $m_i$  è la massa del piano  $i$ ;
- $x_i, y_i$  sono le componenti di spostamento del baricentro del piano  $i$ , in direzione X e Y;
- $\alpha$  è l'angolo tra la direzione sismica e l'asse X globale.

Le componenti di spostamento ( $x, y$ ) sono normalizzate rispetto allo spostamento del punto di controllo. Sia al numeratore che al denominatore compaiono le componenti traslazionali orizzontali dei baricentri di piano nella direzione considerata.

Per sisma in direzione X ( $\alpha=0^\circ$ ):

$$\Gamma = \frac{m_1 x_1 + \dots + m_n x_n}{m_1 x_1^2 + \dots + m_n x_n^2}$$

La scelta fra le due opzioni può comportare differenze rilevanti nella verifica in analisi pushover. L'Opzione 2 è la scelta consigliata per le strutture con impalcati deformabili, dove, più che gli spostamenti nodali del modo di vibrare fondamentale, risultano rappresentativi del comportamento globale della struttura gli spostamenti dei baricentri, calcolati come distanza tra il baricentro delle masse spostate e il baricentro delle masse nella posizione originaria. Nelle strutture con impalcati rigidi, l'Opzione 2 fornisce valori di  $\Gamma$  maggiori rispetto all'opzione 1 dato che il denominatore è minore. Ciò comporta una minore capacità di spostamento dell'oscillatore monodimensionale equivalente e può condurre ad una valutazione a favore sicurezza in dipendenza dalla relazione tra  $T^*$  e  $T_C$ , come evidente dalla rappresentazione della curva di capacità nel piano ADRS.

### **$\Gamma = 1.00$ nella distribuzione di forze uniforme (E)**

Per la distribuzione uniforme (E) è possibile considerare un fattore di partecipazione modale sempre pari a 1, il che equivale a considerare coincidenti le curve dei sistemi M-GDL e 1-GDL (un esempio di valore 1.000 per la distribuzione uniforme è riportato in: *"The N2 method for simplified non-linear seismic analysis - overview and recent developments"*, P.Fajfar and M.Dolsek, *L'Ingegneria Sismica in Italia, XI Convegno ANIDIS (Relazioni ad invito), 2004*).

Fisicamente, questo può essere interpretato con il fatto che forze uniformi ai vari piani corrispondono ad un campo di spostamenti uniforme, tipico della formazione di un piano di collasso al piano terra (piano soffice): in effetti, in questo caso il sistema M-GDL si comporta come un sistema ad 1 grado di libertà dato dal solo spostamento del piano terra.

### **$\Gamma < 1.00 \rightarrow (\Gamma = 1.00, m^* = \text{massa sismica totale})$**

In alcuni casi, il fattore di partecipazione modale può risultare minore di 1.00.

Valori di  $\Gamma$  minori di 1.00 sono accettabili nei casi in cui il punto di controllo sia stato posizionato ad un livello inferiore a quello della copertura, ad esempio perché l'ultimo piano della costruzione si differenzia nettamente dai piani sottostanti (presenza di torrioni, tetti inclinati, ecc.).

In tutti gli altri casi,  $\Gamma$  minore di 1.00 identifica situazioni in cui il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata è poco rappresentativo del reale comportamento strutturale.

Attivando l'opzione di cui sopra, è possibile forzare  $\Gamma$  ad essere sempre maggiore o tutt'al più uguale a 1.00. Qualora  $\Gamma$  risulti minore di 1.00, viene reimpostato pari a 1.00 e la massa  $m^*$  viene impostata pari alla massa sismica totale. Ciò equivale di fatto a considerare un campo di spostamenti uniforme. Attivando questa opzione si ottiene una minore capacità di spostamento dell'oscillatore monodimensionale equivalente e questo può condurre ad una valutazione più conservativa.



## 4.2 PUNTI DI CONTROLLO

Per determinare i punti di controllo da considerare in Analisi Pushover, In Parametri di Calcolo > Pushover (1) sono disponibili le seguenti opzioni.

Punto di controllo

Baricentro del piano  (n° piani = 2)

Baricentro del piano con spostamento maggiore nel modo di vibrare principale nella direzione di analisi

Nodi   solo in caso di spostamento modale maggiore rispetto al baricentro del piano

Il punto di controllo principale può essere determinato come:

- 1) **Baricentro di un dato piano.** In genere il baricentro dell'ultimo piano della costruzione (esclusi eventuali torrini) [§7.3.4.2]. Per rispettare alla lettera la prescrizione normativa occorre quindi specificare il numero dell'ultimo piano a meno che questo non si differenzi nettamente dai piani sottostanti (presenza di torrini, tetti inclinati, ecc.). È evidente che collocare il punto di controllo nel baricentro della copertura di un torrino può non essere rappresentativo del comportamento dell'intero edificio, meglio quindi posizionare il punto di controllo al piano inferiore.
- 2) **Baricentro del piano con spostamento maggiore nel modo di vibrare principale nella direzione di analisi.** In questo caso il piano considerato può variare da curva a curva e viene indicato nella relazione di calcolo.

### Punti di controllo aggiuntivi

Le curve di capacità possono essere elaborate anche per punti di controllo aggiuntivi. Quando nel comportamento dinamico della struttura è significativo l'accoppiamento di traslazioni e rotazioni è opportuno considerare come punti di controllo anche i nodi alle estremità della pianta all'ultimo livello [§7.3.4.2]. Per farlo è sufficiente attivare il check Nodi e specificare gli ID dei nodi desiderati separati da una virgola (come mostrato in figura).

L'elaborazione della curva pushover per un punto di controllo aggiuntivo è una post elaborazione dell'analisi pushover e non incide, quindi, sui tempi di calcolo. Il nome delle curve elaborate contiene un codice rappresentativo del punto di controllo utilizzato. Ad esempio, (L2) indica che il punto di controllo è il baricentro del Livello 2 mentre (J89) indica che il punto di controllo è il Nodo 89.

### Solo in caso di spostamento modali maggiori rispetto al baricentro del piano

Attivando questa opzione saranno considerati solo i nodi della lista caratterizzati da uno spostamento, nel modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata, maggiore rispetto a quello del baricentro del piano di controllo. In questo modo si evita di considerare punti di controllo che, per effetto della torsione, fanno registrare spostamenti molto minori rispetto al resto della struttura.