



## Aedes.PCM 2019

### PROGETTAZIONE DI COSTRUZIONI IN MURATURA

Analisi strutturale di costruzioni in muratura secondo la Normativa Tecnica vigente

## Aggiornamento 2019

*include:*

- **Componente sismica verticale**
- **Risposta sismica locale**

*Ultima revisione di questo documento: 21.03.2019*

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.

© 1997-2019 AEDES Software per Ingegneria Civile

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

Tel.: +39 0571 401073 - Fax: +39 0571 418350

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**

### INTRODUZIONE

#### 1. COMPONENTE SISMICA VERTICALE

##### 1.1. ANALISI DINAMICA MODALE

##### 1.2. ANALISI STATICA NON LINEARE (PUSHOVER)

##### 1.3. ANALISI CINEMATICA

##### 1.4. ASPETTI COMUNI A TUTTE LE ANALISI

#### 2. PARAMETRI MECCANICI DELLE MURATURE

#### 3. VERIFICA A TAGLIO DEI PANNELLI MURARI

#### 4. COMPORTAMENTO DELLE FASCE DI PIANO

##### 4.1. PRESSOFLESSIONE

##### 4.2. TAGLIO

#### 5. CALCOLO DEFORMAZIONE ANGOLARE

#### 6. RIGIDEZZA FUORI PIANO DEI LINK ORIZZONTALI

#### 7. PUSHOVER: DEFORMAZIONE PLASTICA DELLA STRUTTURA CALCOLATA ANALITICAMENTE

#### 8. PUSHOVER: CURVA DI CAPACITA' DEL SISTEMA BILINEARE EQUIVALENTE

#### 9. PUSHOVER: LIMITAZIONE DELLA CAPACITA' DI SPOSTAMENTO PER I LIMITI PREVISTI SU $q^*$

#### 10. RISPOSTA SISMICA LOCALE

##### 10.1. PERICOLOSITA' SISMICA: NTC E ORDINANZA n.55 PER LA RICOSTRUZIONE

##### 10.2. INDICATORI DI RISCHIO SISMICO

##### 10.3. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

##### 10.4. ESEMPIO APPLICATIVO

##### 10.5. CONCLUSIONI

##### 10.6. IMPLEMENTAZIONE IN AEDES.PCM

## INTRODUZIONE

La Circolare applicativa delle NTC 2018 (Circolare 21 gennaio 2019, n. 7), nel seguito indicata per semplicità con 'Circolare', ha introdotto diverse novità riguardo l'analisi degli edifici in muratura e in particolare per la valutazione delle costruzioni esistenti.

In questa guida alle nuove funzionalità della versione 2019 di Aedes.PCM analizzeremo gli aspetti più importanti introdotti dalla Circolare spiegando come sono stati implementati nel software. Il riferimento a sezioni specifiche delle NTC 2018 e della Circolare applicativa è fornito rispettivamente nella forma (ad es.): §7.3.5 e §C7.3.5.

Alla data di rilascio di questo documento, è in preparazione una revisione manualistica completa di PCM riguardante Teoria, Manuale d'uso ed Esempi Applicativi, disponibile in download nel corso dei prossimi aggiornamenti 2019.

## 1 COMPONENTE SISMICA VERTICALE

Riportiamo un estratto del §C7.3.5 della Circolare:

*"C7.3.5 RISPOSTA ALLE DIVERSE COMPONENTI DELL'AZIONE SISMICA ED ALLA VARIABILITÀ SPAZIALE DEL MOTO  
Nel caso di analisi statiche non lineari e possibile applicare separatamente ciascuna delle due componenti orizzontali (**insieme a quella verticale ove necessario**) ed agli spostamenti relativi prodotti della variabilità spaziale del moto ove necessario), riconducendo quindi la valutazione unitaria degli effetti massimi ai valori più sfavorevoli così ottenuti."*

Si nota quindi che anche nell'analisi statica non lineare così come nelle analisi lineari è prevista l'applicazione della componente sismica verticale "ove necessario". Per valutare se gli effetti della componente sismica verticale siano o meno significativi è quindi necessario svolgere le analisi che includano anche tale componente per poi poterne trarre un giudizio finale.

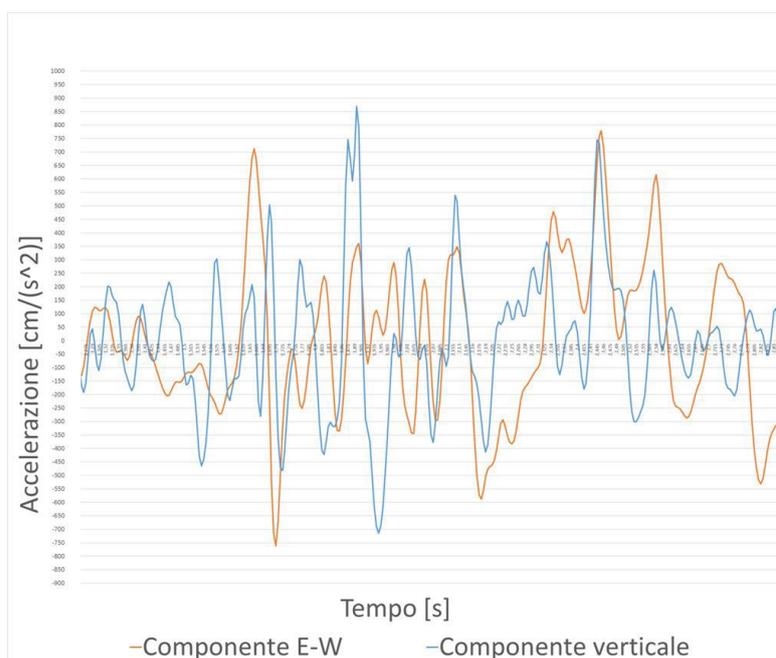
Per approfondimenti sugli effetti della componente sismica verticale si rinvia alla documentazione pubblicata da Massimo Mariani e Francesco Pugi nel sito web Ingenio. Gli Autori hanno prodotto una serie di articoli fornendo un quadro generale sull'argomento, a partire dalla constatazione dei danni rilevati nei recenti eventi sismici, fino alla possibilità di includere gli effetti del "sisma verticale" nelle analisi strutturali professionali, in completa conformità con i contenuti normativi vigenti. Gli articoli, accessibili dai corrispondenti link, sono qui di seguito elencati insieme ad un breve estratto dei contenuti.

1. 23.12.2017: [Terremoto e caos: un nuovo percorso di analisi del comportamento dei sismi](#)
2. 25.07.2018: [Effetti negativi del sisma verticale sul comportamento delle pareti esistenti in muratura](#)
3. 01.10.2018: [Sisma verticale: amplificazione della vulnerabilità degli edifici esistenti in muratura](#)
4. 20.12.2018: [Sisma verticale: modellazione e analisi in ambito professionale sugli edifici esistenti in muratura](#)
5. 18.02.2019: [Circolare NTC2018: finalmente si dovrà progettare considerando il sisma verticale](#)
6. 24.06.2019: CompDyn 2019: VERTICAL COMPONENT OF THE SEISMIC ACTION: AMPLIFIED VULNERABILITY OF EXISTING MASONRY BUILDINGS  
Articolo in corso di pubblicazione. CompDyn 2019: 24-26 June 2019, Crete, Greece: 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering

*Autori: 1-2-3-4-5-6: Massimo Mariani; 2-3-4-5-6: Francesco Pugi; 2-3-4-6: Alessio Francioso*

## Sintesi del percorso di indagine sulla componente sismica verticale

### Art. 1. Terremoto e caos: un nuovo percorso di analisi del comportamento dei sismi

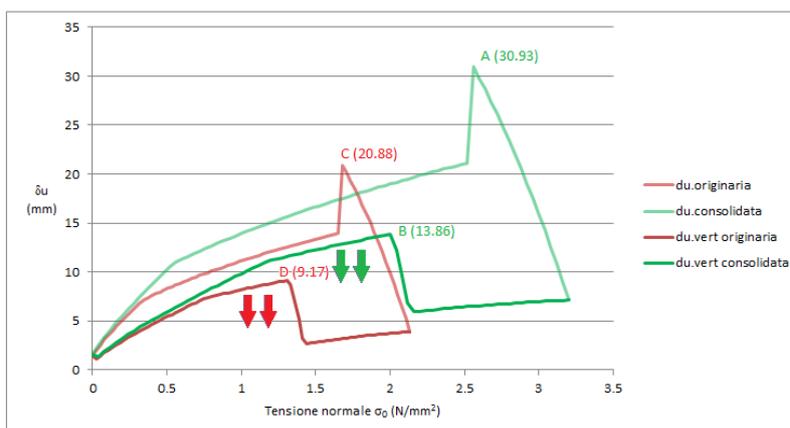


Il percorso di studio è partito dall'esame dei danni prodotti dai recenti terremoti nel Centro Italia, danni dovuti principalmente alla scarsa qualità della muratura. Si è potuto constatare come le accelerazioni sismiche verticali abbiano svolto un ruolo cruciale. Gli edifici ubicati in zone vicine alla faglia attiva ricevono accelerazioni sussultorie i cui effetti si compongono con quelli dovuti alle accelerazioni orizzontali. Nell'ambito della valutazione di vulnerabilità sismica è molto importante considerare questo aspetto per non rischiare la sovrastima della capacità e un conseguente giudizio di sicurezza inappropriato.

Si è quindi dato inizio ad un'indagine volta a quantificare l'entità degli effetti negativi della componente sismica verticale, considerando il comportamento non lineare degli elementi resistenti murari, e seguendo una metodologia coerente con la Normativa tecnica vigente (D.M. 17.1.2018). L'indagine si è progressivamente sviluppata attraverso i seguenti contributi:

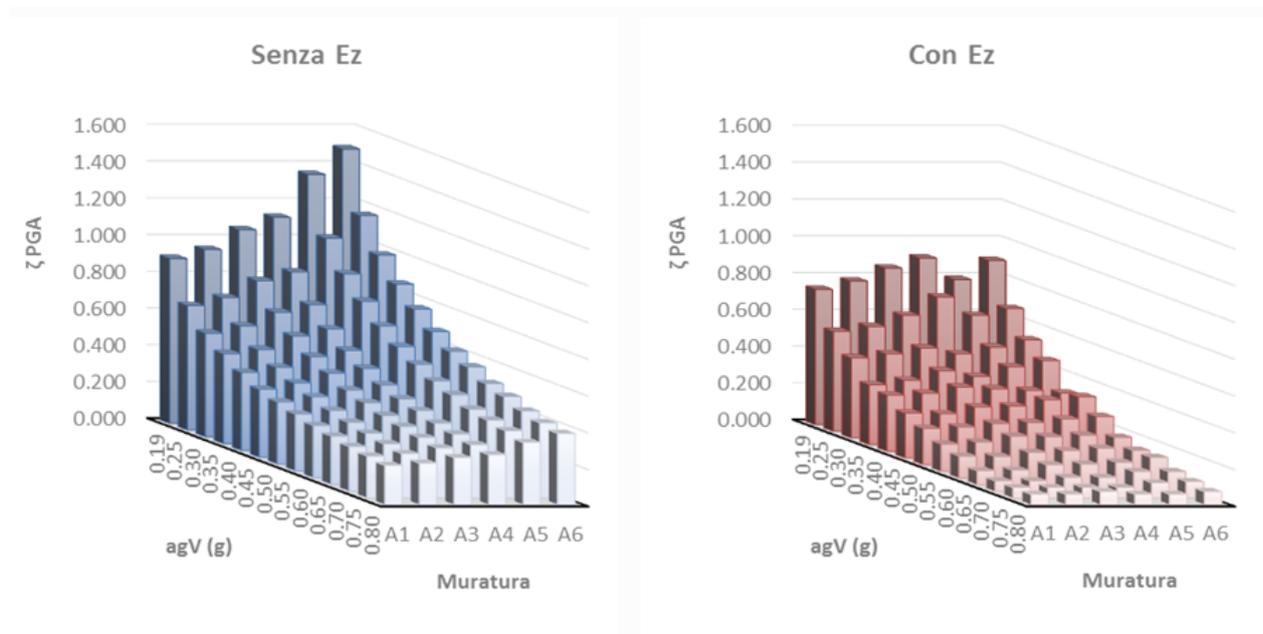
### Art. 2. Effetti negativi del sisma verticale sul comportamento delle pareti esistenti in muratura

**Mattoni pieni**, doppio incastro  
 $t = 250$ ,  $l = 2500$ ,  $h = 3000$ ,  $\sigma_0 =$  variabile da 0.0 a  $0.8f_d$  - codici: **M6 e M132**  
**sisma verticale:  $agV = 0.50 g$**   
Confronto fra  $\delta u$  per muratura originaria e  $\delta u$  per muratura consolidata



In questa prima parte dell'indagine si è evidenziata la diminuzione di capacità sia in termini di resistenza che di spostamento ultimo mostrata dai pannelli murari sottoposti a sisma verticale. Sono state registrate riduzioni percentuali significative a causa della variazione di carico assiale prodotta dalle accelerazioni verticali.

### Art. 3. Sisma verticale: amplificazione della vulnerabilità degli edifici esistenti in muratura



(zeta)E in funzione dell'accelerazione al suolo e della qualità muraria

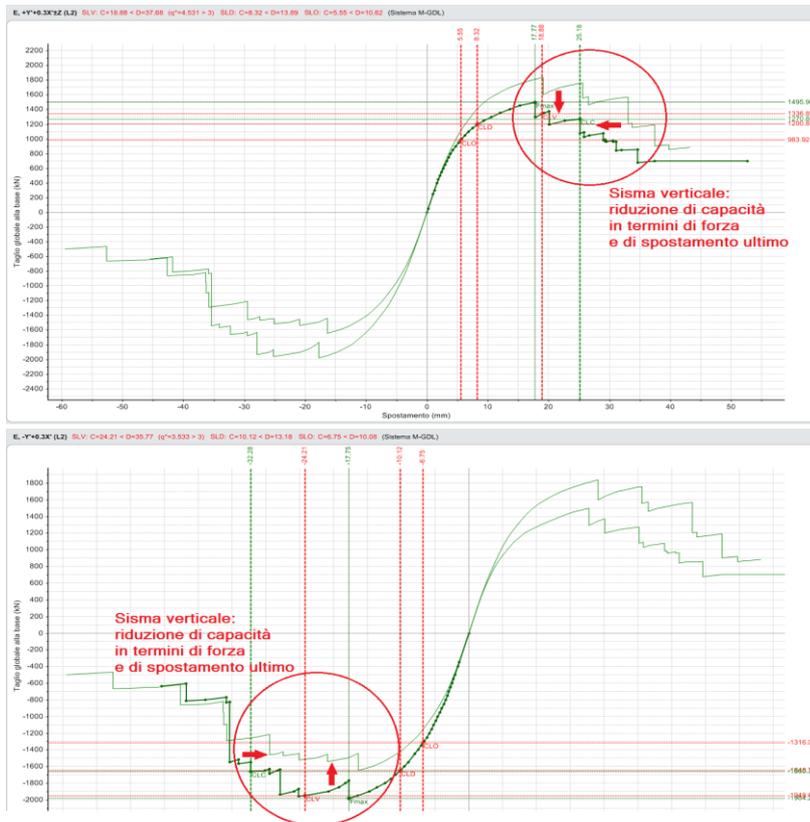
Si è quindi reso opportuno il trasferimento dell'indagine da singoli pannelli verso edifici reali, cioè organismi murari composti da più pareti e da strutture complementari fra loro interagenti, con la finalità di focalizzare gli effetti negativi delle azioni sismiche verticali sulla valutazione di sicurezza degli edifici stessi.

Si è indagato sugli effetti delle accelerazioni verticali in relazione sia all'entità dell'evento sismico, sia a diversi livelli di qualità muraria (incluso gli effetti dei principali interventi di consolidamento), con riferimento alle murature irregolari.

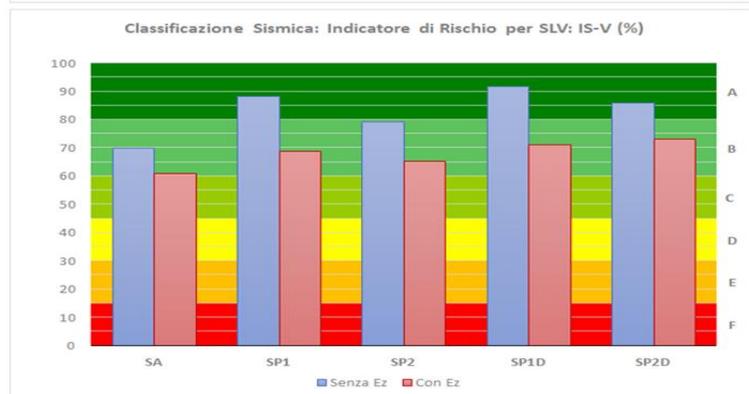
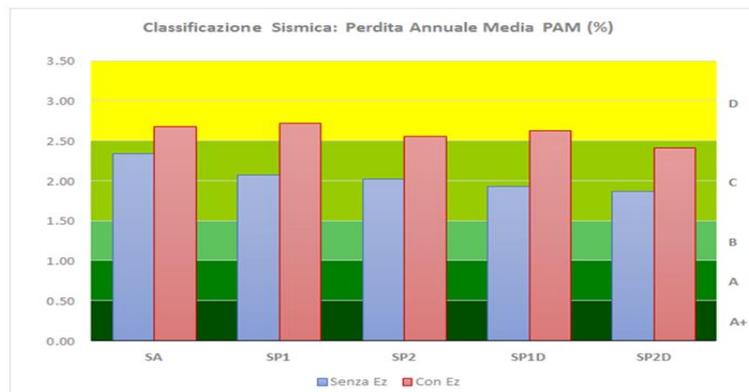
### Art. 4. Sisma verticale: modellazione e analisi in ambito professionale sugli edifici esistenti in muratura

Il percorso di studio è stato infine orientato verso le applicazioni professionali, attraverso i seguenti punti:

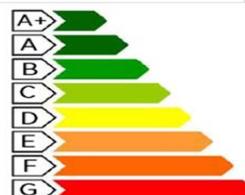
- Influenza delle fessurazioni da cicli di compressione e decompressione del sisma verticale su rigidezza, resistenza e capacità di deformazione
- Contributi singoli o simultanei delle componenti sismiche orizzontali e verticale
- Definizione di un algoritmo conforme alle Norme vigenti implementabile in qualsiasi software professionale



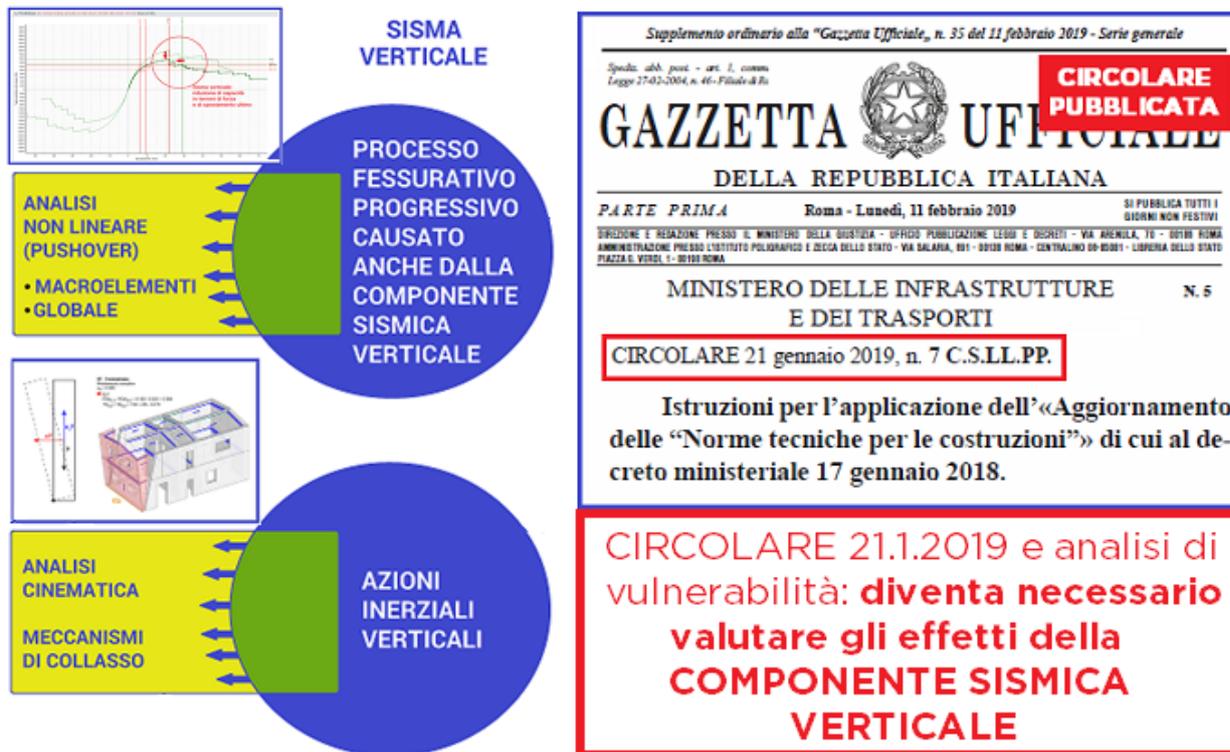
- Conseguenze del sisma verticale sulla Perdita Annuale Media attesa (PAM)



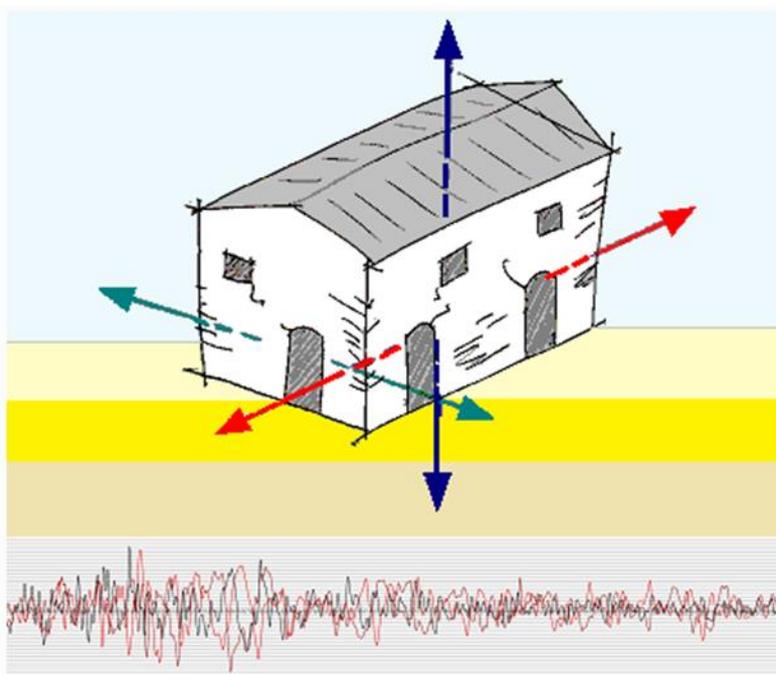
Classe PAM	Classe IS-V
A <sup>+</sup> PAM	A <sup>+</sup> IS-V
A PAM	A IS-V
B PAM	B IS-V
C PAM	C IS-V
D PAM	D IS-V
E PAM	E IS-V
F PAM	F IS-V
G PAM	



## Art. 5. Circolare NTC2018: finalmente si dovrà progettare considerando il sisma verticale



In questo articolo si è infine evidenziato come la nuova Circolare contenga riferimenti al sisma verticale che implicano importanti progressi nella progettazione, e conseguentemente esortano alla verifica da parte degli organismi di controllo e tutela affinché questo nuovo fronte sia praticato. Le analisi pushover non possono prescindere dal considerare la multidirezionalità e la componente verticale. Il combinato disposto del D.M. 17.1.2018 e della Circ.7 del 21.1.2019 non può fornire giustificazioni per omissioni sullo studio degli effetti della contemporaneità delle componenti sismiche.



Contemporaneità delle componenti sismiche orizzontali e verticali

## **Art. 6. VERTICAL COMPONENT OF THE SEISMIC ACTION: AMPLIFIED VULNERABILITY OF EXISTING MASONRY BUILDINGS**

L'articolo, presentato al Convegno Internazionale CompDyn 2019, riepiloga il percorso di studio illustrato ai punti precedenti.

Dall'abstract:

"Ad ogni passo dell'analisi pushover, le forze inerziali causate dal terremoto verticale vengono prese in considerazione nelle verifiche di sicurezza degli elementi: si registra una caduta della resistenza globale e della capacità di spostamento della struttura. La metodologia proposta è applicata al caso di studio di un edificio in muratura modellato secondo il metodo del telaio equivalente. Le analisi sono eseguite per diversi livelli di azione sismica e per diverse qualità della muratura, e sono stati discussi e confrontati i risultati delle analisi in assenza e in presenza della componente sismica verticale."

### **Procedure applicative per i software professionali**

Come accennato, nel percorso di indagine è stato prodotto un algoritmo, presentato nell'articolo 4., che consente l'implementazione in analisi pushover del contributo della componente sismica verticale in qualsiasi software dedicato agli edifici esistenti in muratura.

Aedes.PCM 2019 accoglie ed implementa questo algoritmo, permettendo così di considerare gli effetti della componente verticale dell'azione sismica in analisi pushover oltre che nelle altre analisi disponibili. Vengono quindi proposti parametri specifici che consentono di attivare il contributo del sisma verticale in modo distinto per l'Analisi Dinamica Modale, per l'Analisi Statica non Lineare (Pushover) e per l'Analisi Cinematica dei meccanismi di collasso, come descritto in dettaglio nei paragrafi seguenti.

## 1.1 ANALISI DINAMICA MODALE

Nella finestra dei Parametri di Calcolo, scheda Sismica, gruppo "Analisi Sismiche Lineari", è possibile selezionare le direzioni di analisi X, Y e Z. Nel caso in cui la direzione Z sia attiva, l'Analisi Dinamica Modale terrà conto delle forze inerziali dovute alla componente verticale del sisma.

I risultati ottenuti per il sisma verticale saranno quindi ricombinati con i risultati relativi alle direzioni orizzontali secondo il metodo di combinazione selezionato: l'opzione di Default, coerente con la normativa vigente, consente di individuare gli effetti più gravosi confrontando le tre combinazioni ottenute permutando circolarmente i coefficienti della seguente espressione [§7.3.5]:

$$1.00 \cdot E_x + 0.30 \cdot E_y + 0.30 \cdot E_z$$

Parametri di Calcolo

OK Annulla Reimposta Importa ?

Generale Sismica Modale Muratura Valutazione Verifiche Pushover (1) Pushover (2) Muratura armata Calcestruzzo armato Interventi

**Direzione sismica e quote di riferimento**

Angolo tra sistema di riferimento globale XY e direzioni sismiche X'Y'  $\alpha =$   (-90° <  $\alpha$  < 90°, + se antiorario)

Altezza della costruzione a partire dal piano di fondazione (m) H =  3.000

Quota di inizio degli effetti sismici (m) H<sub>S</sub> =  0.000

In caso di sisma verticale considerare sempre il 100% degli effetti

**Analisi Sismiche Lineari**

**Direzioni di analisi**  X  Y  Z

**Combinazione delle componenti**

Radice quadrata della somma dei quadrati  Sommare ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nelle altre direzioni [§7.3.5]

Ignorare gli effetti dei momenti torcenti dovuti all'eccentricità accidentale [§7.2.6]

Ignorare l'amplificazione degli spostamenti con fattore  $\mu$  nel calcolo delle tensioni sul terreno [§7.3.3.3]

Eseguire le verifiche di sicurezza anche per le combinazioni (N<sub>min</sub>, T/M<sub>max</sub>), (N<sub>max</sub>, T/M<sub>min</sub>)

**Analisi Sismica Statica Lineare**

**Periodo principale T<sub>1</sub>**

T<sub>1X</sub> =  0.114 sec, T<sub>1Y</sub> =  0.114 sec

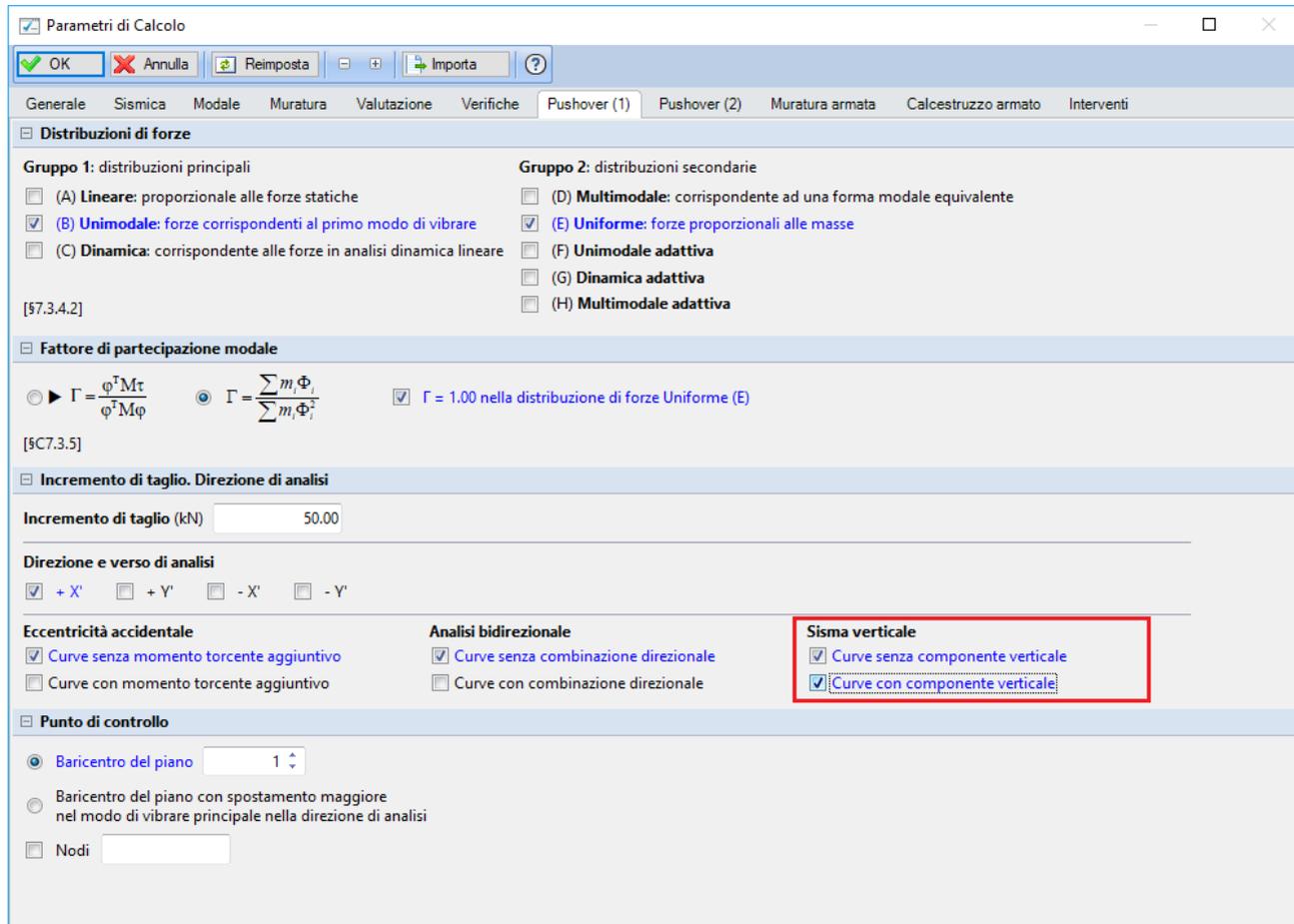
T<sub>1</sub> = C<sub>1</sub> \* H<sup>3/4</sup>, dove C<sub>1</sub> =  0.050 => T<sub>1</sub> = 0.114 sec [NTC2008, §7.3.3.2]

$\lambda = 1.00$  nella definizione delle forze sismiche [§7.3.3.2]

Progettazione semplificata per zone a bassa sismicità [§7]: S<sub>d</sub>(T<sub>1</sub>) =  0.10 g

## 1.2 ANALISI STATICA NON LINEARE (PUSHOVER)

Nella finestra dei Parametri di Calcolo, scheda Pushover (1), gruppo "Incremento di Taglio. Direzione di Analisi" è possibile specificare se si intende elaborare le curve che tengono conto della componente verticale dell'azione sismica in aggiunta alle curve che ignorano tale effetto.



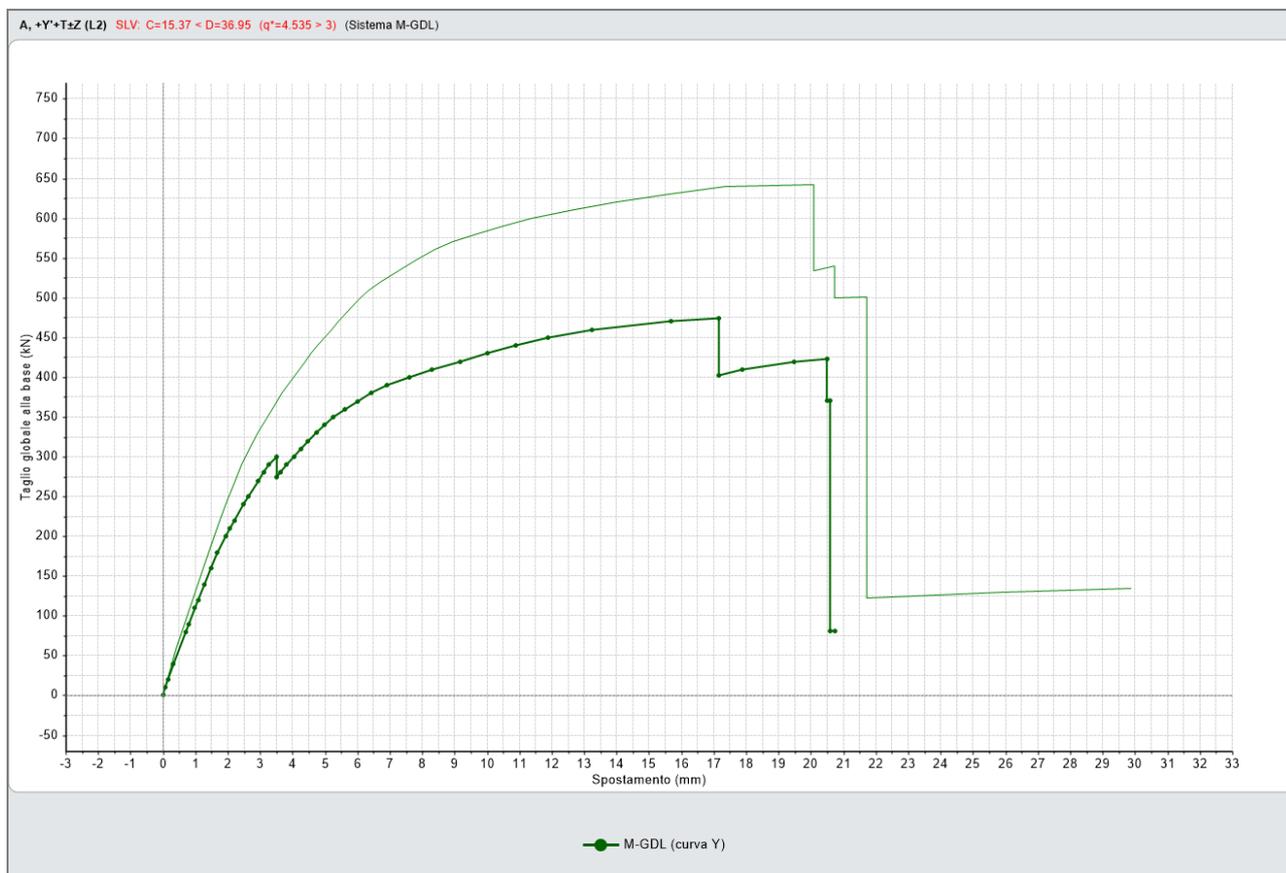
Una volta eseguita l'analisi, le curve che tengono conto della componente sismica verticale sono riconoscibili dal termine  $\pm Z$  contenuto nel nome della curva.

Nell'esempio della figura seguente si è scelto di elaborare anche le curve che tengono conto della componente sismica verticale. È stato quindi possibile visualizzare in un unico grafico sia la curva "A,+Y'+T (L2)" con linea sottile che la curva "A,+Y'+T $\pm Z$  (L2)" con linea spessa.

I nomi delle curve forniscono le seguenti informazioni:

- A Le forze Pushover hanno un andamento lineare e sono proporzionali a massa e altezza
- +Y' La direzione di analisi è la direzione trasversale dell'edificio analizzato e il senso è positivo
- +T La curva tiene conto degli effetti dell'eccentricità accidentale considerando un momento torcente aggiuntivo in senso antiorario
- $\pm Z$  La curva tiene conto degli effetti relativi alla componente verticale del sisma
- (L2) Il punto di controllo è collocato al baricentro del Livello 2

Dal confronto tra le due curve è possibile apprezzare come gli effetti della componente verticale del sisma si traducano in una riduzione di resistenza e capacità di spostamento della struttura.

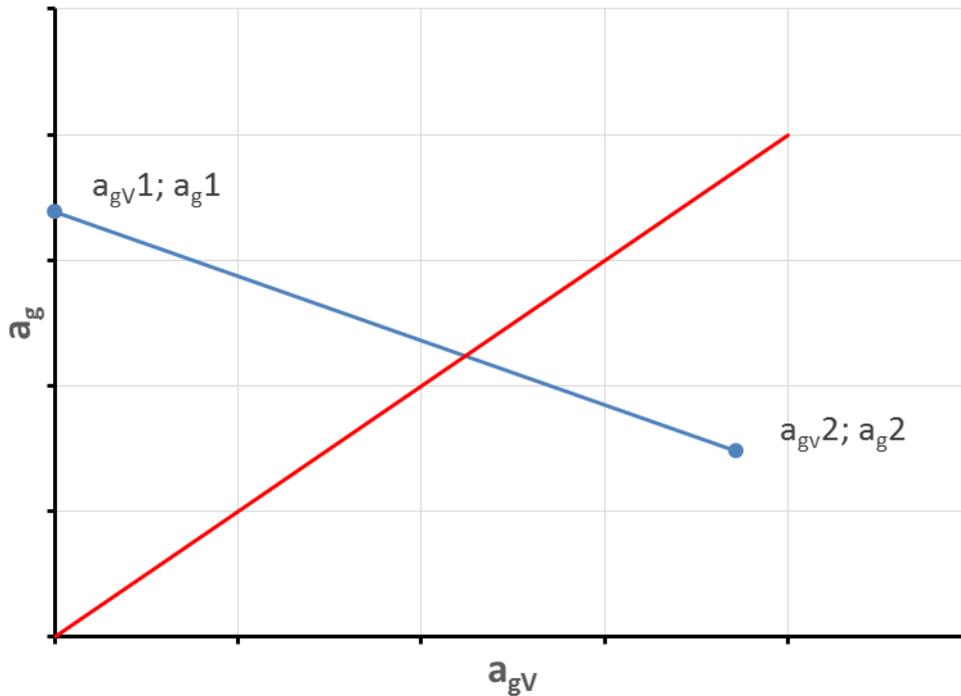


## Calcolo dell'indicatore di rischio sismico nelle curve con componente verticale

Il calcolo dell'indicatore di rischio sismico consiste nell'individuare l'azione sismica sostenibile dalla struttura. Per individuare la capacità della struttura in termini di PGA o TR occorre svolgere dei cicli iterativi in cui rieseguire la verifica al variare della domanda: l'azione sismica che porta ad un coefficiente di sicurezza pari a 1 determina la capacità della struttura.

Nelle curve Pushover che non tengono conto della componente verticale del sisma, lo svolgimento della verifica in termini di spostamento al variare della domanda non richiede la rielaborazione della curva in quanto la capacità è indipendente dall'azione sismica sollecitante. Le curve che considerano la componente verticale, invece, sono legate all'azione sismica in input che influenza il calcolo delle forze inerziali in direzione verticale. Le iterazioni per la ricerca della capacità forniscono quindi il valore dell'accelerazione al suolo orizzontale sostenibile ipotizzando che l'accelerazione verticale sia fissa e pari al valore in input. Per determinare la capacità della struttura tenendo conto della variabilità della componente verticale sarebbe necessario rieseguire la curva Pushover ad ogni ciclo iterativo, ma ciò porterebbe ad un considerevole aumento dei tempi di calcolo. Il metodo illustrato di seguito permette invece di ottenere lo stesso risultato per mezzo di un'interpolazione che sfrutta i risultati ottenuti dalle curve con e senza componente verticale.

Consideriamo il seguente grafico in cui in ascisse troviamo le accelerazioni verticali considerate nelle analisi  $a_{gV}$  e in ordinate la corrispondente capacità della struttura in termini di accelerazione orizzontale  $a_g$ , ottenuta per mezzo dei cicli iterativi.

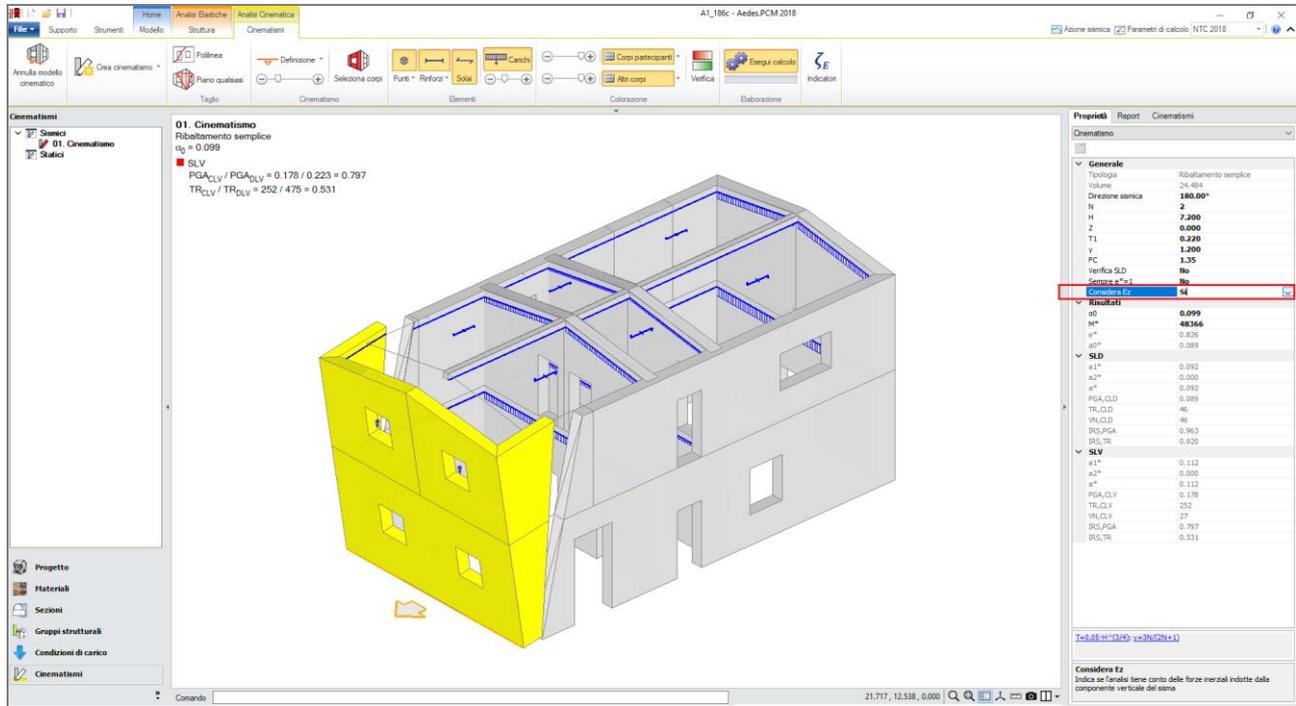


Il primo punto di coordinate  $(a_{gV1}, a_{g1})$  individua la curva svolta senza tener conto della componente verticale del sisma (infatti  $a_{gV1} = 0$ ) mentre il secondo punto di coordinate  $(a_{gV2}, a_{g2})$  individua la curva svolta considerando la componente verticale. Le capacità in termini di  $a_g$  ottenute da entrambe le curve si riferiscono all'ipotesi di azione sismica verticale costante, quindi la retta passante per i punti 1 e 2 (linea blu) individua la tendenza della capacità in termini di  $a_g$  al variare dell'accelerazione verticale  $a_{gV}$  considerata. La linea rossa invece rappresenta la relazione tra  $a_{gV}$  e  $a_g$ : secondo la normativa italiana il rapporto tra le due accelerazioni è pari a 1, quindi la retta coincide con la bisettrice del quadrante. Tra tutti i punti della retta blu il punto che individua la reale capacità della struttura in termini di  $a_g$  quando si considera la componente verticale del sisma è proprio l'intersezione tra la retta blu e la retta rossa.

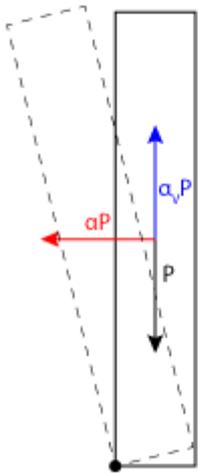
Una volta individuata la capacità della struttura in termini di  $a_g$ , nei risultati della curva con componente verticale gli indicatori di rischio sismico in termini di PGA e TR possono essere ricalcolati per tener conto della variabilità dell'azione sismica verticale.

### 1.3 ANALISI CINEMATICA

Nelle proprietà del Cinematismo è presente l'opzione "Considera Ez" che permette di tener conto delle forze inerziali indotte dalla componente verticale del sisma. In questo modo è possibile apprezzare l'effetto che il sisma verticale produce sul moltiplicatore di collasso e di conseguenza sull'indicatore di rischio sismico in termini di PGA o TR.



Si faccia riferimento alla figura seguente relativa al cinematismo di ribaltamento semplice. Se si considera anche la componente verticale dell'azione sismica, le forze in gioco sono: la forza peso  $P$ , la forza inerziale orizzontale  $\alpha P$  e la forza inerziale verticale  $\alpha_v P$ .



Entrambe le forze inerziali sono proporzionali alla forza peso. Il rapporto tra il moltiplicatore della forza inerziale verticale  $\alpha_v$  e il moltiplicatore della forza inerziale orizzontale  $\alpha$  varia a seconda che si consideri un elemento isolato o sostanzialmente appoggiato a terra (sistema rigido) o un elemento posto ad una certa quota (sistema deformabile):

$$\frac{\alpha_V}{\alpha} = 0.3 \cdot \frac{S_{sz}(0)}{S_{sx}(0)} \quad \text{sistema rigido}$$

$$\frac{\alpha_V}{\alpha} = 0.3 \cdot \frac{S_{sz}(0)}{S_{sx}(T_1) \cdot \Psi(Z) \cdot \gamma} \quad \text{sistema deformabile}$$

dove:  $S_{sx}(T)$  e  $S_{sz}(T)$  sono i valori dello spettro elastico di accelerazione in corrispondenza del periodo  $T$  rispettivamente in direzione orizzontale e verticale;  $T_1$  è il primo periodo di vibrazione dell'intera struttura nella direzione orizzontale considerata;  $\Psi(Z)$  è il corrispondente modo di vibrazione normalizzato ad uno in sommità dell'edificio;  $\gamma$  è il corrispondente coefficiente di partecipazione modale;  $Z$  è la quota dell'asse di rotazione.

Si noti che in entrambe le espressioni del rapporto  $\alpha_V/\alpha$ , al numeratore troviamo  $S_{sz}(0)$ , cioè lo spettro di accelerazione elastico in direzione verticale per  $T = 0$ . Questo perché si assume che il moltiplicatore delle forze inerziali sia sempre analogo a quello di un sistema rigido. Il fattore 0.3 che riduce gli effetti della componente verticale è relativo all'applicazione della combinazione direzionale dell'azione sismica.

Il moltiplicatore di collasso delle forze inerziali orizzontali  $\alpha_0$  si ottiene applicando il principio dei lavori virtuali secondo la seguente relazione:

$$LV1 + \alpha_0 \cdot LV2 + \alpha_{0V} \cdot LV3 = 0$$

$$LV1 + \alpha_0 \cdot LV2 + \alpha_0 \cdot \frac{\alpha_V}{\alpha} \cdot LV3 = 0$$

$$\alpha_0 = \frac{-LV1}{LV2 + \frac{\alpha_V}{\alpha} LV3}$$

dove: LV1, LV2 e LV3 sono i lavori virtuali svolti rispettivamente dalle forze statiche, dalle forze inerziali orizzontali e dalle forze inerziali verticali considerando  $\alpha$  e  $\alpha_V$  pari a 1.

Il rapporto  $\alpha_V/\alpha$  varia a seconda che si consideri un meccanismo su sistema rigido o su sistema deformabile, ma varia anche in base allo stato limite considerato e al variare dell'intensità sismica. Di conseguenza anche il moltiplicatore di collasso e quindi l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo assumono valori diversi a seconda dei casi.

Nel calcolo dell'indicatore di rischio sismico, ovvero nella ricerca dell'azione sismica sostenibile dal meccanismo, la variabilità del moltiplicatore di collasso impone il ricalcolo dello stesso nei vari cicli iterativi in cui viene svolta la verifica. Ma dato che i lavori virtuali LV1, LV2, LV3 rimangono costanti nel corso delle iterazioni, il calcolo del moltiplicatore di collasso è immediato

## 1.4 ASPETTI COMUNI A TUTTE LE ANALISI

Nella finestra dei Parametri di Calcolo, scheda "Sismica", è presente un'opzione che permette di considerare sempre il 100% degli effetti legati alla componente verticale dell'azione sismica anche quando la combinazione direzionale imporrebbe di considerare solo il 30% degli effetti.

Parametri di Calcolo

OK Annulla Reimposta Importa ?

Generale Sismica Modale Muratura Valutazione Verifiche Pushover (1) Pushover (2) Muratura armata Calcestruzzo armato Interventi

**Direzione sismica e quote di riferimento**

Angolo tra sistema di riferimento globale XY e direzioni sismiche X'Y'  $\alpha =$   ( $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ , + se antiorario)

Altezza della costruzione a partire dal piano di fondazione (m) H =

Quota di inizio degli effetti sismici (m)  $H_s =$

In caso di sisma verticale considerare sempre il 100% degli effetti

**Analisi Sismiche Lineari**

Direzioni di analisi  X  Y  Z

**Combinazione delle componenti**

Radice quadrata della somma dei quadrati  Sommare ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nelle altre direzioni

Ignorare gli effetti dei momenti torcenti dovuti all'eccentricità accidentale

Amplificazione spostamenti con fattore  $\mu$  [57.3.3.3 per SLV, §C7.3.7 per SLO e SLD]; ignorare ai fini del calcolo delle tensioni sul terreno

Eseguire le verifiche di sicurezza anche per le combinazioni  $(N_{min}, T/M_{max}), (N_{max}, T/M_{min})$

**Analisi Sismica Statica Lineare**

Periodo principale  $T_1$  (sec): - in dir. X':  $T_{1X} =$   - in dir. Y':  $T_{1Y} =$

$T_1$  approssimato:  $T_1 = C_1 * H^{3/4}$ , dove:  $C_1 =$   ( $= T_1$  (sec) = 0.114)

$\lambda = 1.00$  nella definizione delle forze sismiche

Progettazione semplificata per zone a bassa sismicità:  $S_d(T_1) =$   g

## 2 PARAMETRI MECCANICI DELLE MURATURE

La Circolare al §C8.5.3.1 introduce nuovi valori di riferimento per i parametri meccanici della muratura esistente e specifica le modalità con cui è possibile tener conto di opportuni coefficienti migliorativi per descrivere correttamente lo stato di fatto o applicare determinati interventi di rinforzo.

Le indicazioni della Circolare sono state recepite da Aedes.PCM mediante opportune modifiche della finestra Materiali per la tipologia Muratura esistente.

In particolare, è stata introdotta la proprietà "Riferimento" che permette di scegliere la tabella da cui attingere i valori dei parametri meccanici delle murature. Le opzioni disponibili includono ovviamente la circolare applicativa delle NTC 2018 (Tab. C8.5.1) ma anche la circolare applicativa delle NTC 2008 (Tab. C8A.2.1). La scelta del riferimento ha effetto sui valori dei parametri meccanici e dei coefficienti correttivi nonché sul metodo di applicazione di quest'ultimi.

La proprietà "Condizioni" permette di tener conto di alcune indicazioni specifiche per determinate tipologie di muratura. Ad esempio, per la tipologia "Muratura a conci sbozzati", la Circolare permette di incrementare i valori di resistenza con un coefficiente pari a 1.2 se "si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei". Questa condizione può essere appunto selezionata nella proprietà Condizioni e i parametri meccanici vengono aggiornati di conseguenza. Allo stesso modo, per la tipologia "Muratura in mattoni pieni e malta di calce" è possibile tener conto degli opportuni coefficienti correttivi in caso di giunti con spessore superiore a 13 mm.

Materiali
✕

- ▼ Calcestruzzo
  - C25/30
- ▼ Acciaio
  - Acciaio S235
- ▼ Muratura esistente
  - Muratura esistente
- ▼ Muratura nuova
  - Muratura nuova
- ▼ Materiale generico
  - Legno
- ▼ Blocchi e giunti
  - Blocchi e giunti

▼ Generale	
Nome	Muratura esistente
Riferimento	NTC 2018, Tab. C8.5.1
Tipologia	Conci sbozzati
Condizioni	Sistematica presenza di zeppe profonde in pietra
Fattore di Confidenza	1.35
▼ Moduli elastici	
Valori	Medi
E	1230
G	410
▼ Resistenze	
Valori	Minimi
f,m	2.400
f,tm	0.240
f,hm	1.200
$\tau_0$	0.042
f,vm0	
▼ Altre proprietà meccaniche	
w	20.00
$\alpha$	0.000010
f,b	
$\mu$	
$\phi$	
▼ Coefficienti correttivi	
Malta scadente	0.70
Malta buona	1.40
Giunti sottili	
Ricorsi o listature	1.20
Connessione trasversale	1.50
Nucleo scadente o ampio	0.80
Iniezioni di malta	1.70
Intonaco amato	2.00
Ristilatura armata con connessione dei paramenti	1.50
Massimo coefficiente complessivo	3.00
▼ Proprietà grafiche	
Colore 2D	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: gray; border: 1px solid gray;"></span> DarkGray
Colore 3D	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #f5deb3; border: 1px solid gray;"></span> Wheat
Texture	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, gray 2px, gray 4px); border: 1px solid gray;"></span> Pietra_1
▼ Requisiti geometrici maschi murari	
Spessore minimo	0.300
Snellezza complanare limite	2.000
Snellezza ortogonale limite	10.000

[Anteprima proprietà di calcolo](#)

**Condizioni**

Aggiungi
Rimuovi

OK

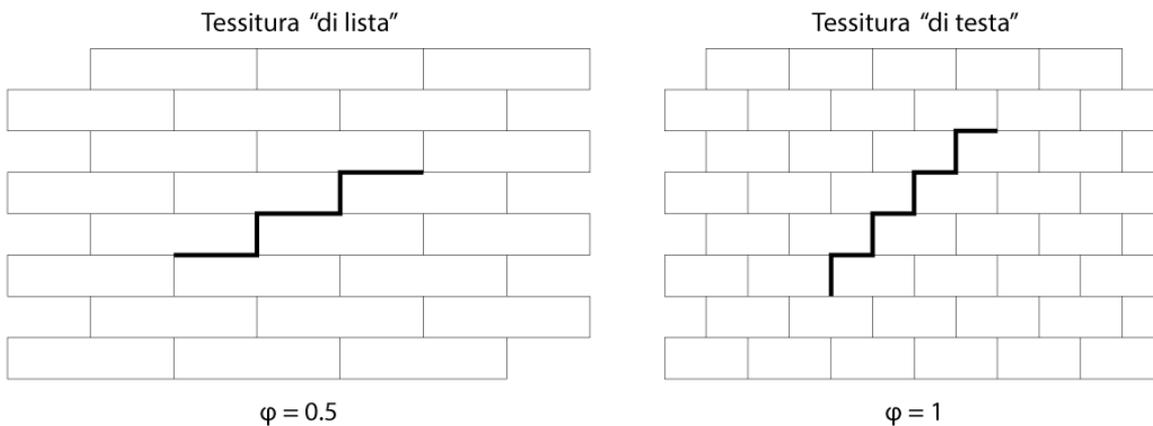
Tra i vari coefficienti corretti è ora presente un coefficiente relativo al consolidamento con ristilatura armata e connessione dei paramenti. Per applicare questo intervento, è stata predisposta la relativa opzione nelle proprietà delle aste in muratura, nella scheda Interventi. Sempre nei coefficienti correttivi è inoltre presente il valore del massimo coefficiente complessivo nel caso in cui si decida di applicare due o più tecniche di consolidamento.

A seconda che la tipologia si riferisca ad una muratura a **tessitura regolare o irregolare**, cambia il numero di parametri meccanici disponibili. In particolare, si noti che sono presenti due resistenze iniziali a taglio:  $\tau_0$  per murature a tessitura irregolare e  $f_{v0}$  per murature a tessitura regolare. Nel caso in cui i valori dei parametri non siano "Personalizzati", la scelta della tipologia aggiorna automaticamente i valori delle resistenze annullando eventualmente l'una o l'altra resistenza iniziale a taglio in accordo alle indicazioni fornite nella Circolare. L'utente può eventualmente modificare questa impostazione di default, specificando valori personalizzati delle resistenze a taglio anche laddove il valore di default sia nullo. Allo stesso modo è possibile annullare manualmente il valore della resistenza a taglio. La scelta effettuata in questa sede è molto importante ai fini della verifica a taglio dei pannelli murari di cui si parlerà nel prossimo capitolo.

Per le murature a tessitura regolare sono stati introdotti i seguenti parametri meccanici:

- $F_b$  resistenza a compressione normalizzata del blocco. Il valore di default è pari a  $10 \text{ N/mm}^2$ ,
- $\mu$  coefficiente d'attrito locale del giunto. Il valore di default è pari a  $0.577$  [§C8.7.1.3.1.1],
- $\varphi$  coefficiente di ingranamento murario, definito come rapporto tra l'altezza del blocco e la lunghezza di sovrapposizione minima dei blocchi di due corsi successivi. Il valore di default è pari a  $1$ .

Il coefficiente di ingranamento murario permette di distinguere il comportamento della muratura al variare della tessitura. Ad esempio, in una muratura di mattoni pieni disposti "di lista" il valore di  $\varphi$  è pari a  $0.5$  perché la lunghezza minima del giunto è pari al doppio dell'altezza del blocco; nella tessitura "di testa" invece  $\varphi$  è pari a  $1$  essendo la lunghezza minima del giunto proprio uguale all'altezza del blocco.



### 3 VERIFICA A TAGLIO NEI PANNELLI MURARI

La Circolare al §C8.7.1.3.1.1 introduce un nuovo meccanismo di taglio per fessurazione diagonale tipico delle murature a tessitura regolare. Complessivamente si hanno quindi i seguenti meccanismi di rottura per taglio:

- **Taglio per scorrimento**
- **Taglio per fessurazione diagonale**, nelle murature a **tessitura irregolare**, con rottura per trazione diagonale (governata dal parametro  $\tau_0$ )
- **Taglio per fessurazione diagonale**, nelle murature a **tessitura regolare**, con fessurazione "a scaletta" attraverso i giunti di malta (governata dal parametro  $f_{v0}$ ), oppure diagonale attraverso gli inerti della muratura (governata dal parametro di resistenza  $f_{v,lim}$ )

Il criterio di resistenza per la verifica a taglio per scorrimento è quello indicato al §7.8.2.2.2 delle NTC:

$$V_t = l \cdot t \cdot f_{vd} \quad [7.8.3]$$

I criteri di resistenza per la verifica a taglio per fessurazione diagonale nelle murature a tessitura irregolare e nelle murature a tessitura regolare sono indicati nella Circolare:

tessitura irregolare

$$V_t = l \cdot t \cdot \frac{1.5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}} = l \cdot t \cdot \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}} \quad [C8.7.1.16]$$

tessitura regolare

$$V_t = \frac{l \cdot t}{b} (\tilde{f}_{v0d} + \tilde{\mu}\sigma_0) = \frac{l \cdot t}{b} \left( \frac{f_{v0d}}{1 + \mu\varphi} + \frac{\mu}{1 + \mu\varphi} \sigma_0 \right) \leq V_{t,lim} \quad [C8.7.1.17]$$

La Tabella C8.5.I, fornendo i valori di riferimento per  $\tau_0$  e  $f_{v0}$ , suggerisce quale criterio adottare in funzione della tipologia muraria. Questo ha dato lo spunto per una completa revisione del metodo di scelta della verifica a taglio che è stato notevolmente semplificato.

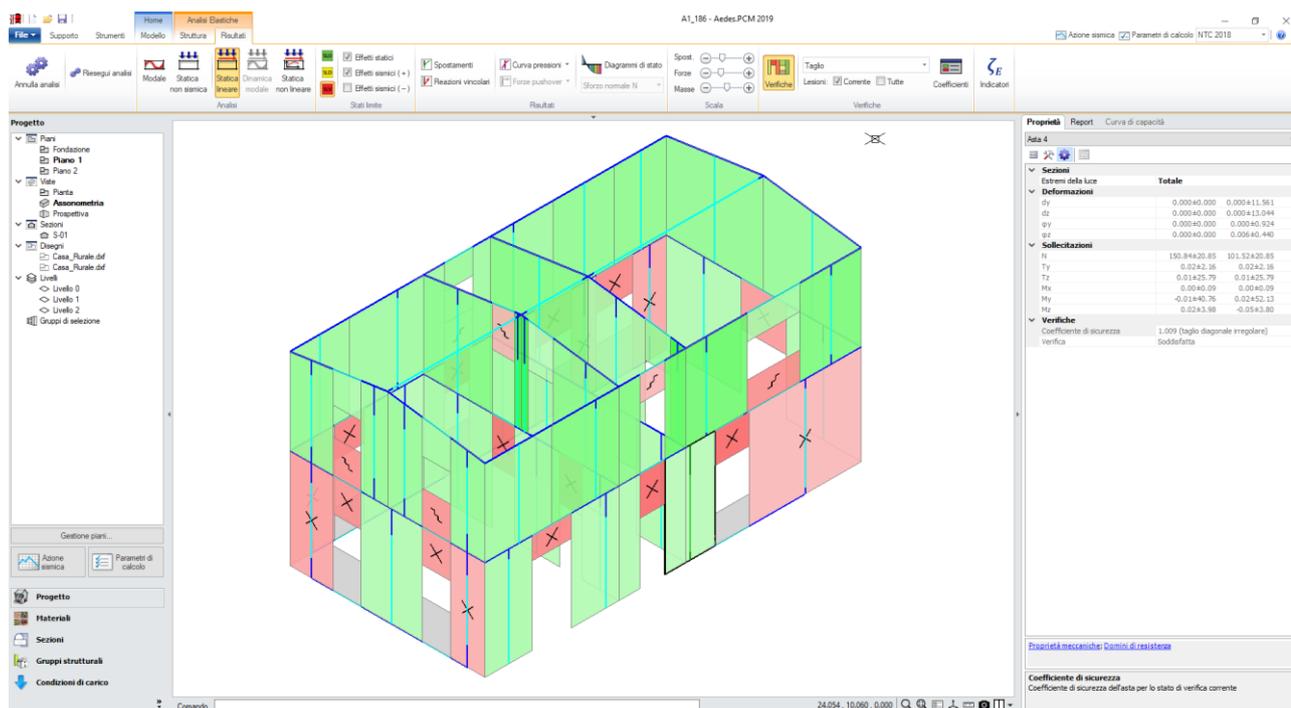
Per ogni pannello in muratura (maschi, fasce di piano) la verifica a taglio sarà eseguita se è attiva la relativa proprietà nel gruppo Verifiche. Il tipo di meccanismo di rottura dipenderà dalla tipologia di asta e dai parametri del materiale. Si faccia riferimento al seguente schema riassuntivo.

		Taglio per scorrimento	Taglio per fessurazione diagonale	
			Tessitura irregolare	Tessitura regolare
Muratura esistente	Maschi	se $f_{v0}$ non è nullo	se $\tau_0$ non è nullo	in murature regolari, se $f_{v0}$ non è nullo
	Fasce	mai		
Muratura nuova	Maschi	se $f_{v0}$ non è nullo		
	Fasce			

Specificando o annullando i valori relativi a  $\tau_0$  e  $f_{v0}$  nelle proprietà del materiale è quindi possibile indicare che tipo di verifica a taglio si intende svolgere per un determinato pannello murario.

La rappresentazione grafica dello stato di verifica permette di visualizzare in un'unica soluzione le aste che non soddisfano la verifica a taglio per uno dei tre meccanismi di rottura. Nel caso in cui un'asta sia sottoposta a più tipi di verifica a taglio, lo stato di verifica è relativo al meccanismo che ha prodotto il coefficiente di sicurezza minore (come indicato nella griglia delle proprietà, scheda Risultati). In caso di verifica non soddisfatta un apposito simbolo chiarisce qual è il meccanismo di rottura a taglio che è intervenuto.

-  Taglio per scorrimento
-  Taglio per fessurazione diagonale, tessitura irregolare
-  Taglio per fessurazione diagonale, tessitura regolare



## 4 COMPORTAMENTO DELLE FASCE DI PIANO

La Circolare al §C8.7.1.3.1.1, fornisce indicazioni precise su come modellare il comportamento delle fasce di piano nei confronti dei possibili meccanismi di rottura nel piano: pressoflessione e taglio. Un aspetto critico della modellazione delle fasce è la valutazione dell'azione assiale, influenzata dall'interazione con i diaframmi orizzontali talvolta assunti rigidi. Per questo motivo nelle verifiche di sicurezza lo sforzo normale viene assunto nullo a meno che la fascia non sia stata consolidata con interventi che inducano una precompressione nella fascia stessa.

### 4.1 PRESSOFLESSIONE

Per le fasce in muratura ordinaria, in presenza di elementi resistenti a trazione (cordolo, architrave), il criterio di resistenza è indicato al §7.8.2.2.4 delle NTC:

$$M_u = H_p \cdot \frac{h}{2} \cdot \left[ 1 - \frac{H_p}{(0,85 \cdot f_{hd} \cdot h \cdot t)} \right] \quad [7.8.5]$$

dove

$H_p$  è il minimo tra la capacità a trazione dell'elemento teso disposto orizzontalmente ed il valore  $0,4 f_{hd} h t$

$f_{hd} = f_{hk} / \gamma_M$  è la resistenza di progetto a compressione della muratura in direzione orizzontale (nel piano della parete). Nel caso di analisi statica non lineare essa può essere posta uguale al valore medio ( $f_{hd} = f_{hm}$ ).

Nelle proprietà delle Strisce e dei Sottofinestra, nel gruppo "Cordolo e Architrave", è quindi possibile specificare la resistenza a trazione dell'elemento teso e il relativo coefficiente parziale di sicurezza applicato alle verifiche in analisi lineare.

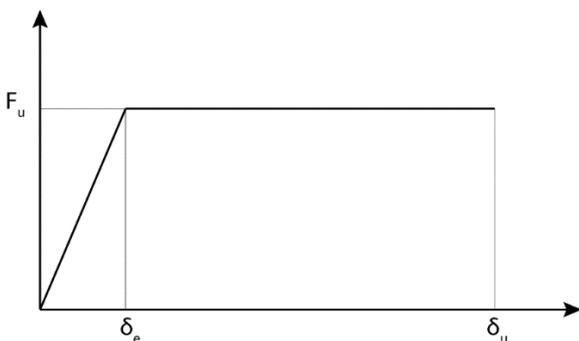
In assenza di un elemento resistente a trazione per le fasce in muratura ordinaria è comunque possibile tener conto di una certa resistenza a trazione del materiale che si genera nelle sezioni di estremità per effetto dell'ingranamento con le porzioni di muratura adiacenti. I meccanismi di rottura possono coinvolgere la resistenza per trazione dei blocchi o avvenire per scorrimento lungo i giunti orizzontali. La resistenza a trazione è quindi data dalla seguente formula fornita nella Circolare:

$$f_{tt} = \min \left( \frac{f_{td}}{2} ; f_{v0d} + \frac{\mu \sigma_y}{\phi} \right) \quad [8.7.1.15]$$

Il relativo paragrafo specifica il significato dei termini presenti nella formula e indica come calcolare il dominio di resistenza della fascia per entrambi i meccanismi di rottura.

Nelle fasce consolidate per mezzo di rinforzi longitudinali e nelle fasce in muratura armata il momento ultimo viene calcolato per mezzo del dominio di resistenza che tiene conto della resistenza e dell'esatta posizione dei rinforzi.

In analisi Pushover, in caso di crisi per pressoflessione, il comportamento della fascia è di tipo bilineare come illustrato nella figura seguente, dove  $F_u$  indica il taglio corrispondente al momento ultimo,  $\delta_e$  indica la deformazione angolare al momento della crisi a pressoflessione e  $\delta_u$  indica la deformazione angolare limite che per le fasce è pari a 0.020 in presenza di elementi resistenti a trazione e 0.015 negli alti casi.



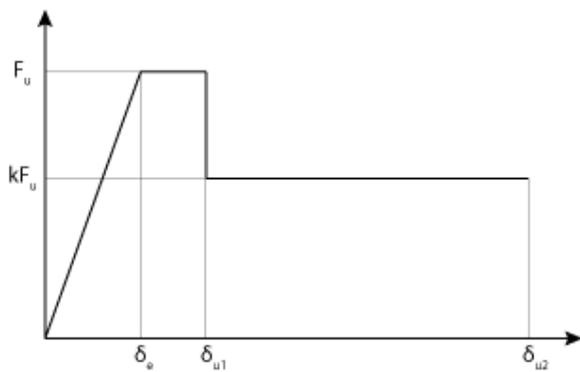
## 4.2 TAGLIO

La Circolare specifica che negli edifici esistenti in muratura il meccanismo di rottura per taglio nelle fasce è il taglio per fessurazione diagonale. La verifica viene condotta in accordo alla Circolare secondo quanto specificato nel capitolo precedente riguardo la verifica a taglio nei pannelli murari.

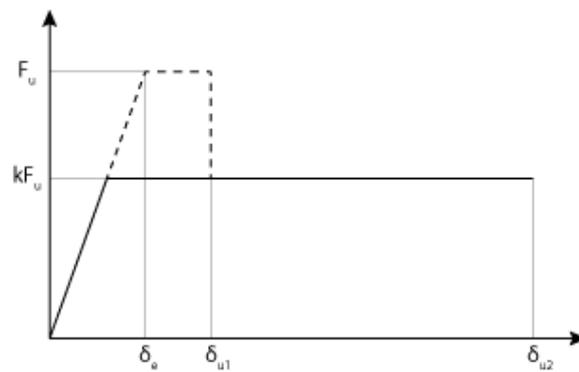
Per le fasce in muratura nuova, oltre alla verifica a taglio per fessurazione diagonale viene condotta una verifica semplificata a taglio per scorrimento secondo quanto riportato al §7.8.2.2.4 delle NTC.

In analisi Pushover, in caso di crisi per taglio, il comportamento della fascia può essere di tipo multilineare o bilineare. Si consideri la figura seguente. Nel comportamento multilineare una volta raggiunta la prima deformazione angolare limite  $\delta_{u1}$  pari a 0.005 la fascia mantiene una resistenza residua pari a  $kF_u$  fino alla seconda deformazione angolare limite  $\delta_{u2}$  pari a 0.015. Il rapporto tra la resistenza iniziale e la resistenza residua è specificato nella Circolare ed è pari: al 60% in presenza di architrave in CA o acciaio, al 40% in presenza di architrave in legno e al 10% in caso di arco in muratura.

Nel comportamento bilineare la resistenza a taglio della fascia viene assunta direttamente pari alla resistenza residua e la fascia mantiene questa resistenza fino alla seconda deformazione angolare limite  $\delta_{u2}$ . I parametri necessari per descrivere il comportamento multilineare o bilineare sono forniti nelle proprietà della fascia nel gruppo "Resistenza e Capacità". Invece, la scelta del tipo di comportamento può essere effettuata nei Parametri di Calcolo nella scheda "Pushover(2)". Il comportamento bilineare permette di cogliere con giusta approssimazione la resistenza e la capacità della fascia, rimanendo a favore di sicurezza e senza incidere sui tempi di elaborazione delle analisi; per questo motivo è la scelta consigliata.



Comportamento Multilineare



Comportamento Bilineare

## 5 CALCOLO DEFORMAZIONE ANGOLARE

La Circolare al §7.8.2.2.1 precisa che la deformazione angolare dei pannelli murari è valutata in base alla rotazione della corda nelle due sezioni di estremità  $i$  e  $j$ . Una trattazione più approfondita del calcolo della deformazione angolare come rotazione della corda è fornita nel documento CNR DT212/2013 al §3.2.1.1, di cui riportiamo un estratto.

Il *drift* dell'elemento è definito come somma della deformazione flessionale e di quella a taglio. Esso può essere valutato alle due estremità del pannello, facendo riferimento al punto di flesso, attraverso le seguenti espressioni (Figura 3-2):

$$\theta_i = \varphi_i - \frac{u_i - u_0}{h'}$$

$$\theta_j = \varphi_j - \frac{u_0 - u_j}{h - h'}$$
(3.11)

dove:  $\varphi_i$  e  $\varphi_j$  sono le rotazioni dei nodi  $i$  e  $j$ ;  $u_j$  e  $u_i$  sono rispettivamente gli spostamenti trasversali dei due nodi;  $h$  è l'altezza dell'elemento e  $h'$  la luce di taglio.

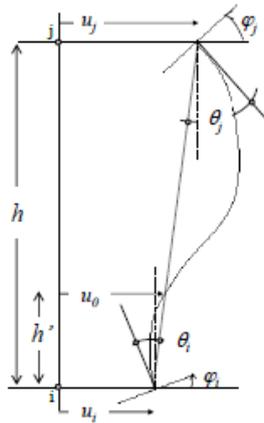


Fig. 3-2. Definizione delle grandezze utili al calcolo del *drift* secondo la (3.10)

In alternativa possono essere adottate formulazioni che considerano un *drift* medio del pannello, ad esempio fornito dall'espressione:

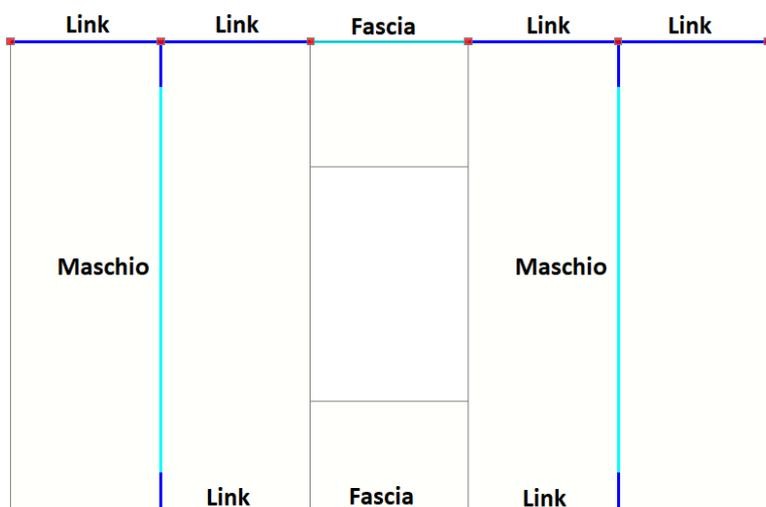
$$\theta = \frac{\varphi_i + \varphi_j}{2} + \frac{u_j - u_i}{h}$$
(3.12)

In Aedes.PCM 2018 si era adottata la formulazione che considera il drift medio del pannello secondo la formula 3.12. Nella versione 2019, invece, coerentemente con le indicazioni della Circolare, la deformazione angolare viene valutata ai due estremi dell'asta e la verifica viene svolta considerando il valore massimo.

## 6 RIGIDEZZA FUORI PIANO DEI LINK ORIZZONTALI

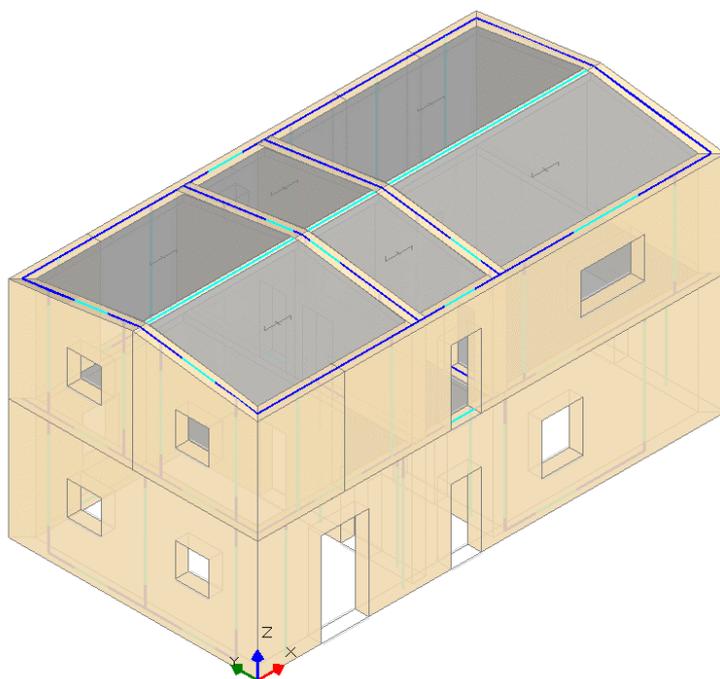
Nella modellazione a telaio equivalente di una struttura in muratura, il collegamento tra fasce di piano e maschi murari adiacenti o tra maschi di muri ortogonali è realizzato per mezzo di link rigidi orizzontali. Per impostazione di default i link sono infinitamente rigidi sia nel piano del muro che nel fuori piano, cioè nel piano dell'impalcato.

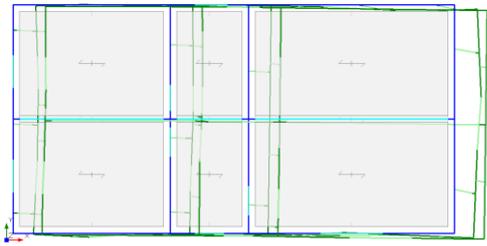
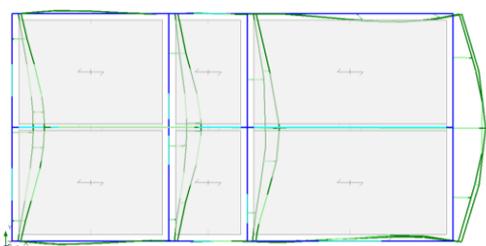
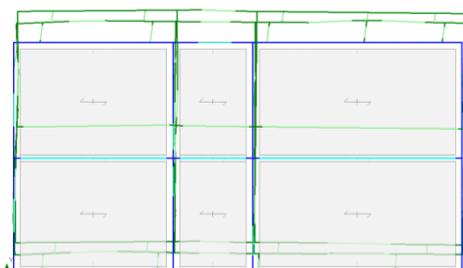
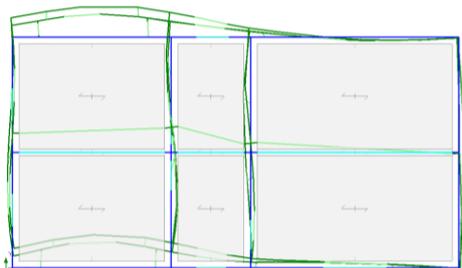
In questa condizione e in assenza di svincolamenti interni nelle aste, il contorno dei solai è deformabile nel piano orizzontale solo in corrispondenza di travi e fasce di piano mentre in corrispondenza dei maschi murari si comporta in modo rigido.



A partire dalla versione 2019 è possibile considerare i link come infinitamente rigidi nel piano del muro ma con rigidità finita nel fuori piano. In questo caso, la rigidità dei link nel piano di flessione orizzontale sarà quella di un'asta col materiale del muro di appartenenza e sezione rettangolare di dimensioni pari allo spessore del muro e metà della sua altezza. Per applicare questo tipo di modellazione è sufficiente disattivare l'opzione "Link orizzontali rigidi anche fuori piano" presente nei Parametri di Calcolo, nella scheda Muratura.

Ovviamente la rigidità dei link orizzontali condiziona la rigidità di tutta la struttura. Vediamo come cambiano i risultati dell'analisi dinamica su una struttura d'esempio, a seconda che i link orizzontali siano considerati infinitamente rigidi su entrambi i piani di flessione o solo nel piano del muro.

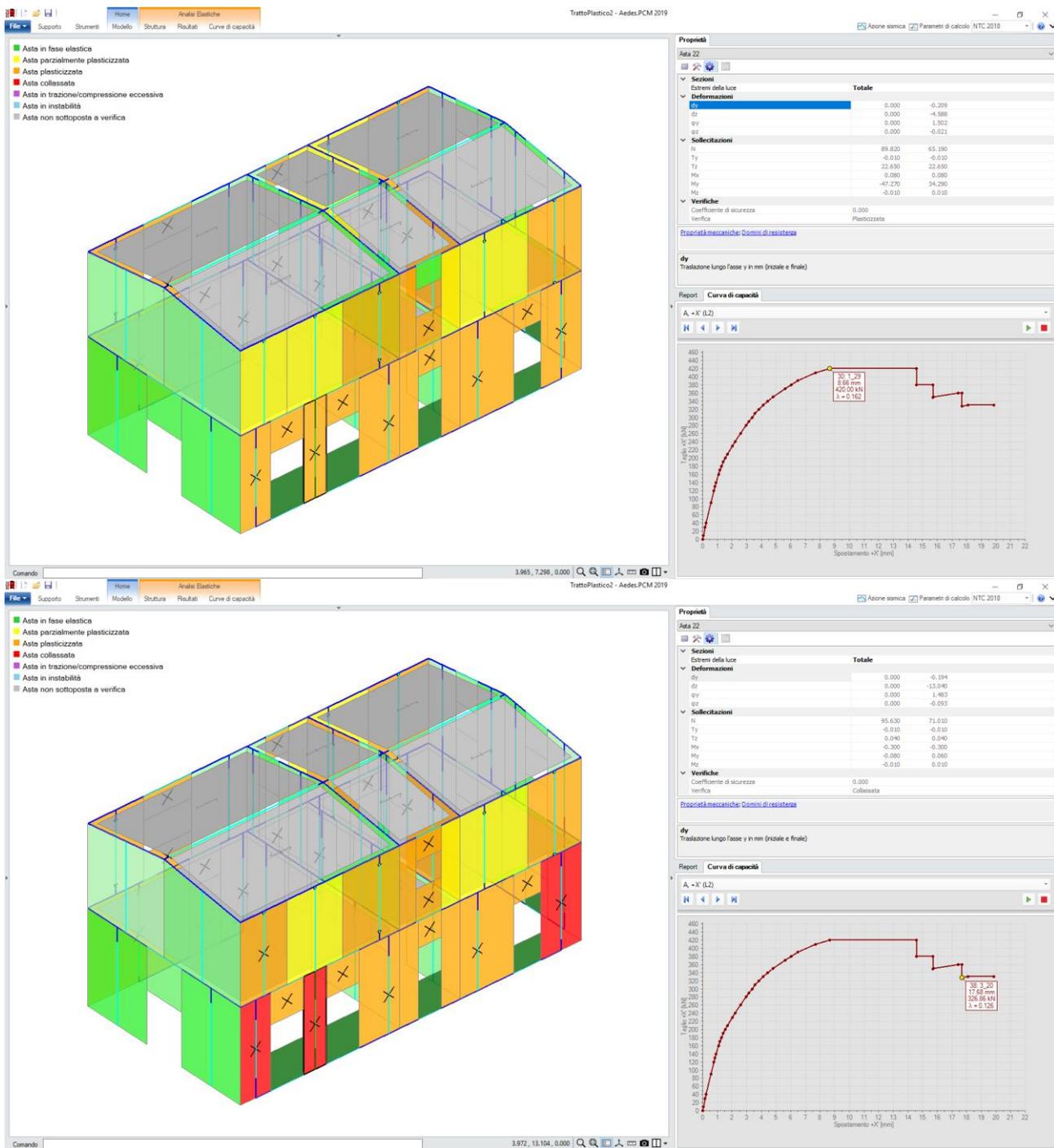


	<b>Link infinitamente rigidi in entrambi i piani</b>	<b>Link infinitamente rigidi solo nel piano del muro</b>
<b>Modo fondamentale X</b>	Periodo T = 0.261 sec Massa partecipante 95.2% 	Periodo T = 0.349 sec Massa partecipante 74.0% 
<b>Modo fondamentale Y</b>	Periodo T = 0.246 sec Massa partecipante 94.9% 	Periodo T = 0.255 sec Massa partecipante 52.7% 

## 7 PUSHOVER: DEFORMAZIONE PLASTICA DELLA STRUTTURA CALCOLATA ANALITICAMENTE

Nel corso dell'Analisi Pushover può capitare che, a causa della progressiva plasticizzazione dei pannelli murari gestita per mezzo di cerniere plastiche, la struttura diventi labile e non sia più possibile con un ulteriore incremento della forza risolvere il problema lineare e trovare gli spostamenti corrispondenti. In versioni precedenti del software, in questi casi l'analisi Pushover si interrompe e la capacità di spostamento della struttura viene completata per mezzo di un tratto finale perfettamente orizzontale stimato in base alla residua capacità di spostamento del maschio nelle condizioni più gravose. A partire dalla versione 2019, al raggiungimento di una situazione di labilità, la struttura viene modificata restituendo alle zone di plasticizzazione una rigidità infinitesima che permetta di proseguire l'analisi fino al raggiungimento del collasso. Questo metodo permette di seguire la struttura lungo tutto il ramo decrescente della curva Pushover e di individuare con maggiore precisione i punti di collasso dei maschi murari.

Un esempio che mette in luce le potenzialità di questo metodo è fornito nelle figure seguenti, relative all'analisi Pushover di un edificio in muratura in direzione longitudinale. Al passo selezionato nella prima immagine la struttura entra in una fase di labilità in quanto le progressive plasticizzazioni hanno annullato la sua rigidità. Si noti che i pannelli murari resistenti nella direzione del sisma sono in fase plastica (colore giallo o arancione) e non hanno ancora raggiunto il collasso. Grazie all'aver considerato una rigidità infinitesima nelle zone di plasticizzazione, è stato possibile proseguire l'analisi e individuare i punti di collasso per diversi maschi del piano terra, come evidenziato dalle aste di colore rosso nella seconda figura relativa ad un passo successivo della curva Pushover.



## 8 PUSHOVER: CURVA DI CAPACITÀ DEL SISTEMA BILINEARE EQUIVALENTE

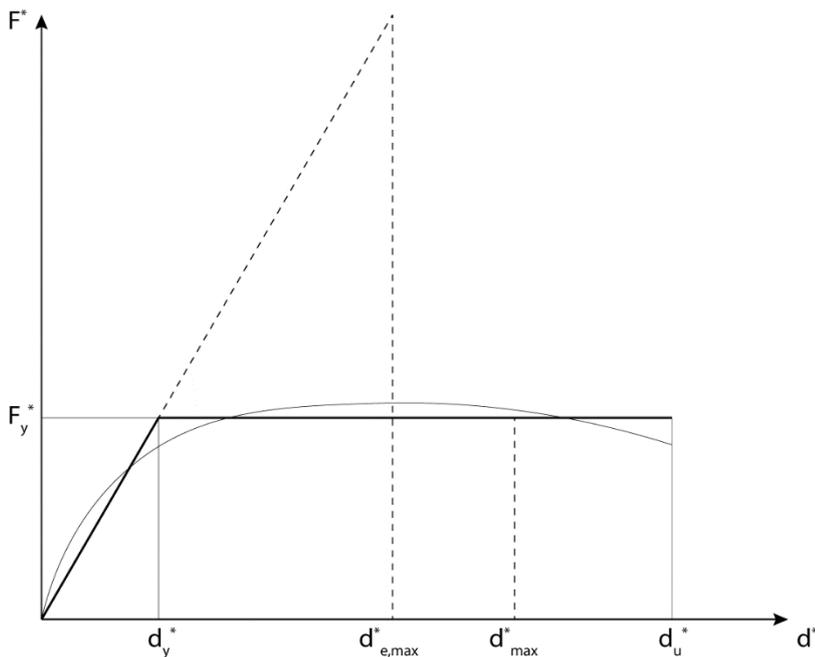
A partire dalla versione 2019, coerentemente con le indicazioni della Circolare (§C8.7.1.3.1), la curva di capacità del sistema bilineare equivalente viene ricavata a partire dalla curva di capacità del sistema equivalente ad un grado di libertà imponendo l'equivalenza delle aree sottese dalle due curve fino allo spostamento ultimo a SLC. La curva bilineare così ottenuta è utilizzata per individuare la domanda di spostamento relativa a tutti gli stati limite.

## 9 PUSHOVER: LIMITAZIONE DELLA CAPACITÀ DI SPOSTAMENTO PER I LIMITI PREVISTI SU $Q^*$

Nell'analisi statica non inerea la verifica consiste nel confronto tra capacità e domanda di spostamento della struttura, ai diversi stati limite. Per le strutture in muratura le indicazioni per determinare la capacità di spostamento sono fornite dalla Circolare al §C7.8.1.5.4 e al §C8.7.1.3.1, mentre le indicazioni per determinare la domanda sono fornite al §C7.3.4.2.

Secondo quanto specificato al §C7.8.1.6, nel caso di SLC e SLV occorre inoltre verificare che il valore di  $q^*$  non superi un valore limite, in particolare deve essere  $q^* \leq 4$  per SLC e  $q^* \leq 3$  per SLV. Questo si traduce in una limitazione della capacità di spostamento la quale non potrà mai eccedere lo spostamento corrispondente al valore limite di  $q^*$ .

Si faccia riferimento al §C7.3.4.2 e alla figura seguente che illustra la curva bilineare associata alla curva di capacità del sistema strutturale equivalente ad un grado di libertà.



$F_y^*$  e  $d_y^*$  sono rispettivamente la forza e lo spostamento corrispondenti al punto di snervamento del sistema equivalente,  $d_u^*$  è lo spostamento ultimo,  $d_{e,max}^*$  e  $d_{max}^*$  sono rispettivamente la domanda in spostamento per il sistema elastico ed anelastico. Valgono le seguenti relazioni:

se  $T^* \geq T_C$ ,

$$d_{max}^* = d_{e,max}^*$$

se  $T^* < T_C$ ,

$$d_{max}^* = \frac{d_{e,max}^*}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_C}{T^*} \right]$$

La capacità di spostamento allo Stato Limite di Collasso non può eccedere lo spostamento relativo a  $d_{max}^*$  corrispondente a  $q^* = 4$ , dove:

$$d_{e,max}^* = 4 \cdot d_y^*$$

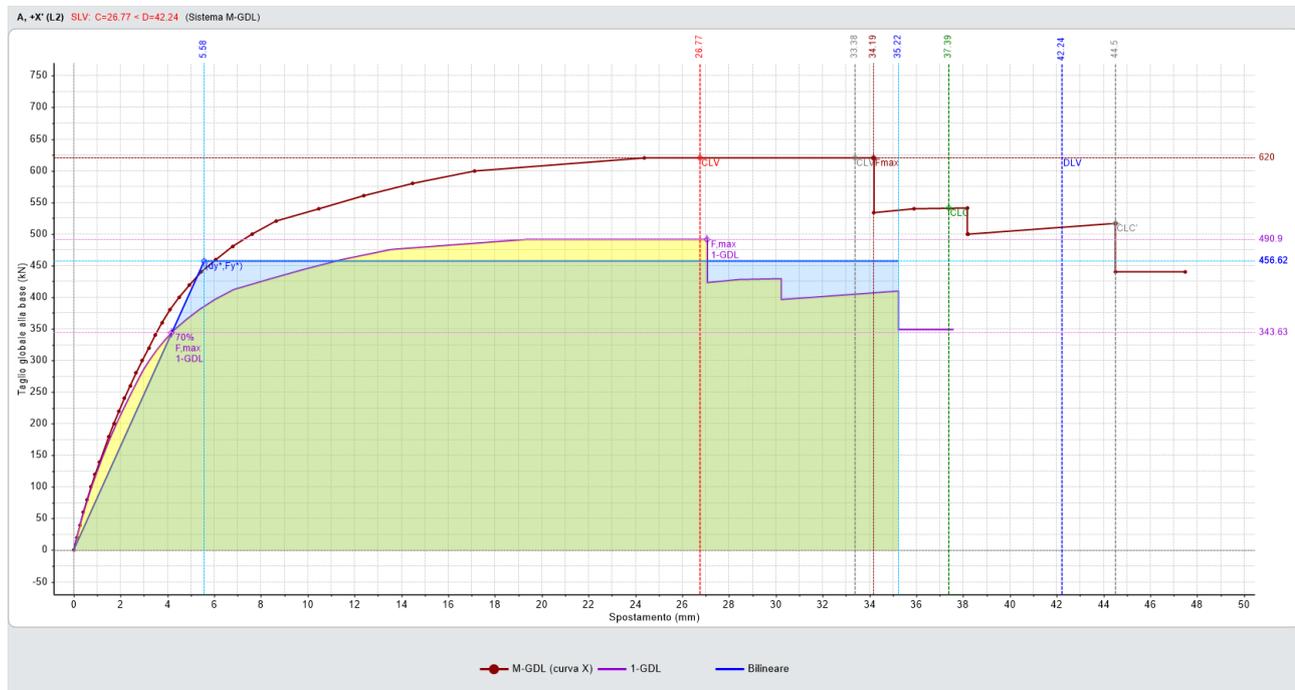
Analogamente, la capacità di spostamento allo Stato Limite di salvaguardia della Vita non può eccedere lo spostamento relativo a  $d_{max}^*$  corrispondente a  $q^* = 3$ , dove:

$$d_{e,max}^* = 3 \cdot d_y^*$$

## Esempio

Si consideri la curva Pushover illustrata nella figura seguente. La capacità di spostamento allo Stato limite di Collasso è stata inizialmente fissata in corrispondenza di un taglio alla base residuo pari all'80% del massimo, come indicato dal riferimento CLC' posto a 44.5 mm.

Di conseguenza la capacità di spostamento allo Stato Limite di salvaguardia della Vita è stata inizialmente fissata pari a  $\frac{3}{4}$  della capacità a SLC, come indicato dal riferimento CLV' posto a 33.38 mm.



Per entrambi gli stati limite la capacità di spostamento è stata ridotta per rientrare nei limiti previsti su  $q^*$ . Il fattore di partecipazione modale per passare dal sistema a più gradi di libertà al sistema equivalente ad un grado di libertà è  $\Gamma = 1.263$ , mentre il periodo elastico del sistema bilineare equivalente è  $T^* = 0.308$  s ed è minore del periodo di riferimento  $T_c$  sia per SLC che per SLV.

Quindi, per lo Stato Limite di Collasso:

$$d_{s,max}^* = 4 \cdot d_y^* = 4 \cdot 5.58 = 22.32 \text{ mm}$$

$$d_{max}^* = \frac{d_{s,max}^*}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T^*} \right] = \frac{22.32}{4} \left[ 1 + (4 - 1) \frac{0.442}{0.308} \right] = 29.60 \text{ mm}$$

$$CLC = \text{Min}(CLC', d_{max}^* \cdot \Gamma) = \text{Min}(44.50, 37.39) = 37.39 \text{ mm}$$

Analogamente, per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita:

$$d_{s,max}^* = 3 \cdot d_y^* = 3 \cdot 5.58 = 16.74 \text{ mm}$$

$$d_{max}^* = \frac{d_{s,max}^*}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T^*} \right] = \frac{16.74}{3} \left[ 1 + (3 - 1) \frac{0.431}{0.308} \right] = 21.20 \text{ mm}$$

$$CLV = \text{Min}(CLV', d_{max}^* \cdot \Gamma) = \text{Min}(33.38, 26.77) = 26.77 \text{ mm}$$

In questo modo la verifica può limitarsi al confronto tra capacità e domanda di spostamento in quanto il limite previsto per  $q^*$  è stato tenuto in conto riducendo opportunamente la capacità di spostamento.

## 10 RISPOSTA SISMICA LOCALE

In questo paragrafo vengono trattati i seguenti argomenti:

- Pericolosità sismica: NTC e Ordinanza 55 per la Ricostruzione
- Analisi della Risposta Sismica Locale e Indicatori di Rischio Sismico  $\zeta_E$
- Approccio semplificato (NTC) e approccio rigoroso (RSL): confronto fra spettri di progetto
- Variabilità dell'accelerazione massima al suolo  $a_{max}$  con i periodi di ritorno  $T_R$

### 10.1 PERICOLOSITA' SISMICA: NTC E ORDINANZA N.55 PER LA RICOSTRUZIONE

Secondo il §3.2 delle NTC 2018, le azioni sismiche di progetto si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la "risposta sismica locale".

La **Pericolosità Sismica** di una data località è nota se, per prefissati valori del periodo di ritorno  $T_R$ , sono note le ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione  $S_e(T)$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido e superficie topografica orizzontale. Pertanto, la pericolosità sismica è definita dai seguenti parametri:

$a_g$  massima accelerazione attesa sul sito

$F_o$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro di accelerazione orizzontale

$T_C^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

La normativa fornisce i valori di  $a_g$ ,  $F_o$  e  $T_C^*$  su tutto il territorio nazionale per 10751 punti di un reticolo di riferimento e per le isole. I valori sono forniti per 9 valori del periodo di ritorno  $T_R$ : 30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2475 anni. La normativa specifica inoltre come interpolare i valori di riferimento per ottenere i valori di  $a_g$ ,  $F_o$  e  $T_C^*$  per qualunque sito del territorio nazionale e per qualunque valore del periodo di ritorno  $T_R$  compreso nell'intervallo [30 -2475] (Allegati A e B delle NTC 2008). Per  $T_R < 30$ , con riferimento al programma di ricerca DPC-ReLUIS si opera un'estrapolazione con una funzione del tipo  $a_g(T_R) = k (T_R)^\alpha$ , dove  $k$  e  $\alpha$  sono calcolati sulla base delle prime tre coppie ( $T_R$ ,  $a_g$ ).

La **Risposta Sismica Locale** deriva dalla pericolosità sismica di base e tiene conto delle amplificazioni di origine stratigrafica e topografica. Per determinare la risposta sismica locale sono disponibili due approcci:

- un **approccio semplificato** che si basa sulla classificazione del sottosuolo e l'individuazione, mediante apposite tabelle fornite dalla normativa, del coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_S$ , del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  nonché del coefficiente  $C_C$  che modifica il periodo  $T_C$  e di conseguenza gli altri periodi notevoli dello spettro (NTC 2018, §3.2.2-3)

- un **approccio rigoroso** che per mezzo di un'analisi della risposta sismica locale fornisce in modo più accurato i valori dei parametri necessari per definire gli spettri di risposta in accelerazione per il sito della costruzione.

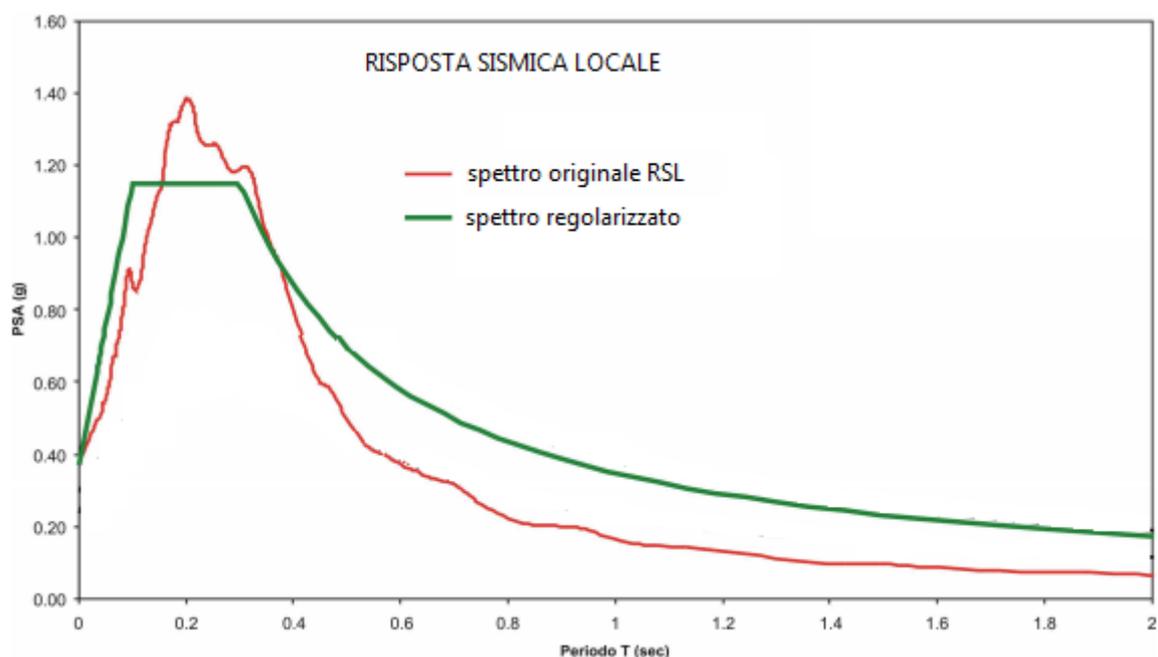
In merito all'approccio rigoroso, l'**Ordinanza n.55 del 24 aprile 2018 del Commissario del Governo per la Ricostruzione nei territori interessati dal sisma del 24 agosto 2016** fornisce i criteri generali per l'utilizzo dei risultati degli studi di Microzonazione Sismica di livello 3 (MS3).

Gli studi di MS3 trattano le amplificazioni locali del moto sismico e, dal punto di vista strutturale, consentono la corretta interpretazione dei diversi livelli di danneggiamento subiti da edifici ubicati in località vicine ma con differenti effetti locali.



*Terremoto Umbria-Marche, 1997. Differenza di danneggiamento in località vicine, dovute ad effetti locali. A sinistra Cesi Bassa (IX MCS), a destra Cesi Villa (VII MCS) (illustrazione tratta da: Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica, Parti I e II, a cura di F. Bramerini, G. Di Pasquale, G. Naso, M. Severino, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della protezione civile, Roma, 2008)*

Nell'Appendice 1 dell'Ordinanza n.55 viene indicata una procedura di regolarizzazione di uno spettro ottenuto con gli studi di MS3 che permette di risalire a tutti i parametri necessari per la definizione dello spettro di risposta elastico normalizzato ( $a_g$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ ,  $F_o$ ,  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $S_S$ ,  $S_T$ ).



*Regolarizzazione di uno spettro di risposta ottenuto dall'analisi della Risposta Sismica Locale secondo la procedura indicata nell'Ordinanza n.55 del 24.4.2018 per la Ricostruzione*

Secondo questa procedura:  $a_g = a_{max}$  dove  $a_{max}$  è l'accelerazione al punto di ancoraggio per  $T=0$  dello spettro normalizzato,  $S_S=1$ ,  $S_T=1$ . Rispetto alla definizione delle NTC, i valori di  $a_g$ ,  $S_S$  e  $S_T$  risultano evidentemente fittizi in quanto non riferiti alla condizione ideale di suolo rigido e pianeggiante, questo perché gli effetti di

amplificazione stratigrafica e morfologica sono già messi in conto nei risultati delle analisi della Risposta Sismica Locale.

I risultati dell'analisi della Risposta Sismica Locale dovrebbero essere disponibili per diversi valori del periodo di ritorno  $T_R$  in modo analogo a quanto avviene per i parametri che definiscono la pericolosità sismica di base. Si ponga infatti attenzione al contenuto dell'allegato A alle NTC 2008:

### **"ALLEGATO A ALLE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI: PERICOLOSITÀ SISMICA**

(...) Nei riguardi dell'azione sismica l'obiettivo è il controllo del livello di danneggiamento della costruzione a fronte dei terremoti che possono verificarsi nel sito di costruzione.

L'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A nelle NTC).

Le valutazioni della "pericolosità sismica di base" debbono derivare da studi condotti a livello nazionale, su dati aggiornati, con procedure trasparenti e metodologie validate.

I dati utilizzati per le valutazioni devono essere resi pubblici, in modo che sia possibile la riproduzione dell'intero processo.

La "pericolosità sismica di base", nel seguito chiamata semplicemente pericolosità sismica, costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche; le sue attuali fonti di riferimento sono indicate nel seguito del presente paragrafo.

**La pericolosità sismica in un generico sito deve essere descritta in modo da renderla compatibile con le NTC e da dotarla di un sufficiente livello di dettaglio, sia in termini geografici che in termini temporali; tali condizioni possono ritenersi soddisfatte se i risultati dello studio di pericolosità sono forniti:**

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$  e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale sopra definite
- in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km);

- **per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi;**

L'azione sismica così individuata viene successivamente variata, nei modi chiaramente precisati dalle NTC, per tener conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presente nel sito di costruzione e dalla morfologia della superficie.

Tali modifiche caratterizzano la risposta sismica locale. (...)"

## **10.2 INDICATORI DI RISCHIO SISMICO**

Per quanto espresso nell'Allegato A alle NTC 2008, i risultati dello studio di pericolosità devono essere forniti per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi.

Queste indicazioni, che corrispondono ai criteri con cui la Normativa propone il reticolo sismico di riferimento ai fini della determinazione degli spettri di risposta, possono essere considerate valide anche per l'analisi della Risposta Sismica Locale, che dovrebbe quindi includere diversi valori di  $T_R$  compresi fra 30 e 2475 anni inclusi gli estremi.

Nelle applicazioni professionali correnti, si può attualmente riscontrare una non completa disponibilità di elaborazioni di Risposta Sismica Locale, spesso limitate ai periodi di ritorno che caratterizzano gli stati limite di riferimento, talvolta anche solo SLV.

Dal punto di vista professionale, ai fini della definizione di una verifica soddisfatta o meno per gli stati limite

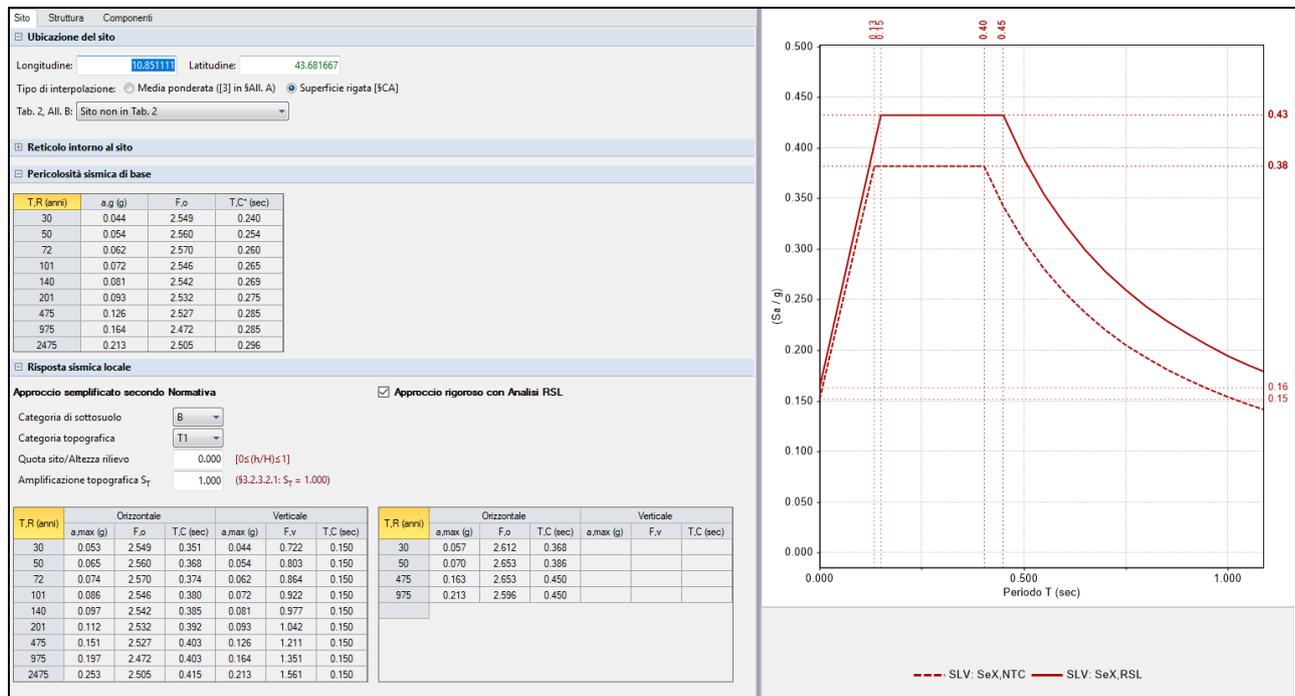
di interesse è sufficiente la conoscenza degli spettri di risposta sismica locale per tali stati limite. Per quanto riguarda invece le analisi di vulnerabilità degli edifici esistenti, la definizione di un **indicatore di rischio sismico**  $\zeta_E$  richiede la valutazione dell'azione sismica per tutti i periodi di ritorno compresi nell'intervallo che va da  $T_R \leq 30$  a  $T_R = 2475$  anni, con particolare attenzione per i valori più bassi di  $T_R$ , laddove si collocano le capacità di strutture esistenti ad alta vulnerabilità. **Risulta quindi importante disporre di un'informazione completa sulla risposta sismica locale per i diversi periodi di ritorno.** E' peraltro indispensabile definire una procedura idonea per svolgere l'elaborazione degli indicatori di rischio anche in presenza di informazioni parziali, ossia limitate ad alcuni valori di  $T_R$ .

### 10.3 ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

Per un dato edificio, la pericolosità sismica viene identificata a partire dall'ubicazione del sito della costruzione inserendo le relative coordinate geografiche. Una volta specificata l'ubicazione del sito, i parametri che identificano la pericolosità sismica di base ( $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_C^*$ ) vengono determinati sulla base dei valori di riferimento forniti dalla normativa e sono forniti in tabella per 9 diversi valori del periodo di ritorno  $T_R$  nell'intervallo [30 - 2475] anni.

Qualora non sia disponibile un'analisi della Risposta Sismica Locale, i parametri degli spettri di risposta elastici in accelerazione per un dato tempo di ritorno  $T_R$  vengono determinati a partire dalla pericolosità sismica di base seguendo l'approccio semplificato previsto dalla normativa.

È necessario quindi specificare la categoria di sottosuolo e le condizioni topografiche per ottenere i valori dei coefficienti di amplificazione stratigrafica  $S_S$ , di amplificazione topografica  $S_T$  e il coefficiente  $C_C$  che modifica il periodo  $T_C$ . E' quindi possibile consultare i parametri degli spettri di risposta elastici per i tempi di ritorno associati ai vari Stati Limite in base alla probabilità di superamento  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$ . Se invece è stata condotta un'**Analisi della Risposta Sismica Locale**, la pericolosità viene definita attraverso i parametri di riferimento degli spettri normalizzati per i periodi di ritorno analizzati. Dato che nella procedura di regolarizzazione i periodi notevoli dello spettro  $T_B$ ,  $T_C$  e  $T_D$  sono legati dalle stesse relazioni fornite dalla normativa, per un dato  $T_R$  sarà sufficiente specificare i valori di  $a_{max}$  (accelerazione al punto di ancoraggio dello spettro),  $F_o$  e  $T_C$ .



*Confronto fra spettro di risposta da NTC (in tratteggio)  
e da Analisi della Risposta Sismica Locale (linea continua)*

Supponiamo che i risultati dell'analisi della Risposta Sismica Locale siano disponibili per n valori di  $T_R$  compresi nell'intervallo  $[T_{R1} - T_{Rn}]$ . Per risalire al valore di  $a_{max}$  per un tempo di ritorno  $T_R$  compreso nell'intervallo  $[1 - 2475]$  si segue la seguente procedura:

- se  $T_R$  è compreso nell'intervallo  $[T_{Ra} - T_{Rb}]$ , dove  $T_{Ra}$  e  $T_{Rb}$  sono periodi di ritorno forniti dall'analisi RSL,  $a_{max}(T_R)$  viene calcolato interpolando tra  $a_{max}(T_{Ra})$  e  $a_{max}(T_{Rb})$  utilizzando l'espressione fornita nell'allegato A delle NTC 2008. Nello specifico:

$$\log(a_{max}(T_R)) = \log(a_{max}(T_{Ra})) + \log\left(\frac{a_{max}(T_{Ra})}{a_{max}(T_{Rb})}\right) \cdot \log\left(\frac{T_{Ra}}{T_{Rb}}\right) \cdot \left[\log\left(\frac{T_{Rb}}{T_{Ra}}\right)\right]^{-1}$$

- se  $T_R < T_{R1}$ , l'accelerazione da analisi della Risposta Sismica Locale  $a_{max}(T_R)^{RSL}$  viene calcolata scalando il corrispondente valore da approccio semplificato  $a_{max}(T_R)^{NTC}$ , secondo la seguente espressione:

$$a_{max}(T_R)^{RSL} = a_{max}(T_R)^{NTC} \cdot \frac{a_{max}(T_{R1})^{RSL}}{a_{max}(T_{R1})^{NTC}}$$

- se  $T_R > T_{Rn}$ , l'accelerazione da analisi della risposta sismica locale  $a_{max}(T_R)^{RSL}$  viene calcolata scalando il corrispondente valore da approccio semplificato  $a_{max}(T_R)^{NTC}$ , secondo la seguente espressione:

$$a_{max}(T_R)^{RSL} = a_{max}(T_R)^{NTC} \cdot \frac{a_{max}(T_{Rn})^{RSL}}{a_{max}(T_{Rn})^{NTC}}$$

Una procedura analoga viene applicata per risalire ai valori di  $F_o(T_R)$  e  $T_C(T_R)$ .

Una volta inseriti i dati degli spettri normalizzati, per i diversi "Stati Limite" sarà possibile rilevare i parametri degli spettri da Analisi RSL e confrontarli con quelli relativi all'approccio semplificato previsto dalla normativa NTC. Come già osservato, per gli spettri da analisi RSL non si specificano coefficienti di amplificazione stratigrafica  $S_S$  e topografica  $S_T$ , che vengono formalmente posti pari a 1, seguendo le indicazioni dell'Ordinanza n. 55.

Per la completa descrizione degli effetti spaziali del moto sismico, **i parametri degli spettri normalizzati sono da riferirsi sia alla componente orizzontale sia a quella verticale**; quest'ultima, come noto, assume particolare importanza per gli edifici ubicati in siti vicino alla sorgente sismica, interessati dalla contemporaneità dei valori massimi di accelerazione orizzontale e verticale.

Pertanto, per ogni valore di  $T_R$  considerato nell'analisi RSL saranno forniti, per la componente verticale:  $a_{max}$ ,  $F_V$  e  $T_C$ .

Dal punto di vista grafico, è utile ed interessante confrontare per ogni stato limite lo spettro da analisi RSL con lo spettro da normativa NTC (cfr. figura precedente).

La **verifica di sicurezza di una struttura relativa ad uno specifico Stato Limite** per il quale è stato fornito lo spettro da analisi RSL, consistente nel definire se la verifica stessa sia soddisfatta o meno, è eseguibile senza che vi sia una relazione diretta con altri spettri corrispondenti a diversi valori di  $T_R$ .

**Per gli edifici esistenti**, sia per la valutazione dello stato di fatto che per la progettazione degli interventi, **vi è in aggiunta la richiesta della definizione dell'indicatore di rischio sismico  $\zeta_E$** , ossia del rapporto tra capacità e domanda in termini di accelerazione al suolo ( $P_{GA}$ ). La capacità corrisponde alla massima azione sismica in input che l'edificio è in grado di sostenere, mentre la domanda è l'azione sismica prevista da Normativa.

Per determinare  $\zeta_E$  occorre instaurare un **processo iterativo, fondato sulla variazione del periodo di ritorno  $T_R$** , finalizzato a centrare il valore di  $T_R$  cui corrispondono parametri di spettro ( $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_C^*$  e derivati) tali da identificare la soglia sopra la quale la verifica di sicurezza non è più soddisfatta.

**Tale processo iterativo richiede la conoscenza dei parametri di spettro per diversi periodi di ritorno.** Il

calcolo degli indicatori di rischio  $\zeta_E$  in ambito RSL viene condotto in modo del tutto analogo alla consueta procedura seguita per l'approccio semplificato secondo Normativa. Come osservato in precedenza, è preferibile disporre delle necessarie elaborazioni di risposta per i diversi periodi di ritorno notevoli; tuttavia, seguendo la procedura sopra illustrata è possibile includere nel calcolo dell'indicatore di rischio valori di  $T_R$  esterni all'intervallo 'coperto' dai dati di RSL.

## 10.4 ESEMPIO APPLICATIVO

Si consideri il caso di un edificio di Classe d'uso IV cui corrisponde un coefficiente d'uso  $C_U$  pari a 2. Assegnando una vita nominale  $V_N$  pari a 50 anni si ricava il periodo di riferimento dell'azione sismica:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 100 \text{ anni}$$

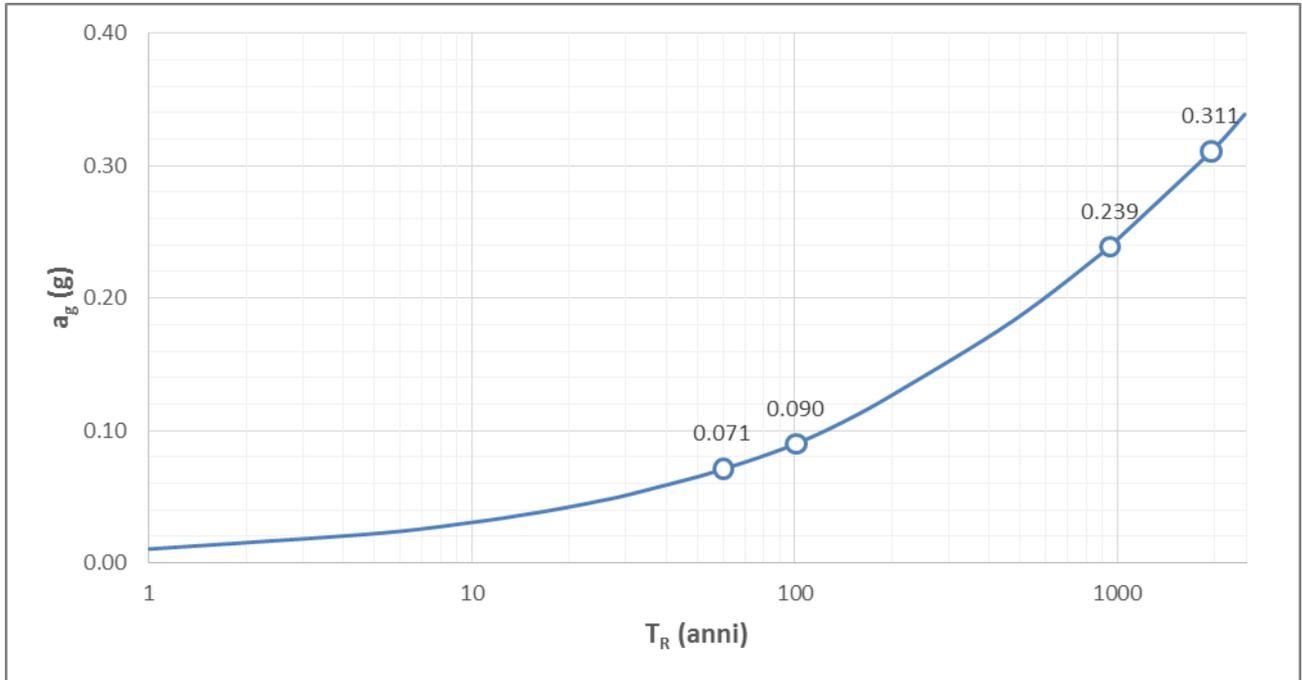
La pericolosità sismica di base del sito su cui insiste la costruzione sia descritta dai valori dei parametri di riferimento riportati nella tabella seguente.

TR (anni)	a.g (g)	F.o	T.C* (sec)
30	0.051	2.420	0.280
50	0.065	2.434	0.290
72	0.077	2.500	0.290
101	0.090	2.476	0.301
140	0.106	2.449	0.309
201	0.127	2.426	0.318
475	0.183	2.469	0.320
975	0.242	2.475	0.320
2475	0.339	2.452	0.339

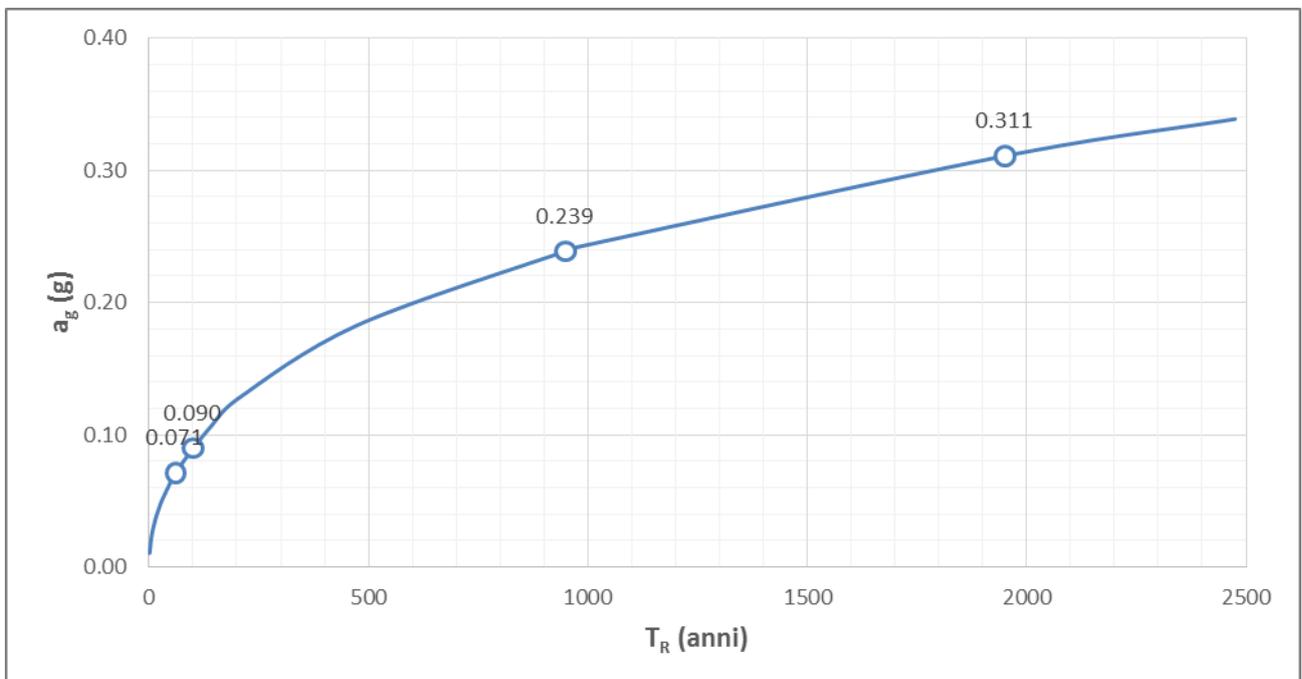
I periodi di ritorno  $T_R$  associati ai diversi stati limite considerati nell'analisi dell'edificio siano i seguenti:

Stati Limite	P.VR (%)	T.R (anni)
SLE: SLO	81	60
SLE: SLD	63	101
SLU: SLV	10	949
SLU: SLC	5	1950

Il grafico seguente mostra la variabilità di  $a_g$  con  $T_R$  evidenziando sulla curva i valori relativi ai 4 stati limite considerati.



*Variabilità di  $a_g$  con  $T_R$  (scala logaritmica)*



*Variabilità di  $a_g$  con  $T_R$  (scala ordinaria)*

Per determinare la risposta sismica locale e l'azione sismica di progetto si confrontano due approcci:

- **approccio semplificato**, con la classificazione del sottosuolo e l'individuazione dei coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica attraverso le tabelle fornite dalla Normativa
- **approccio rigoroso**, con l'analisi della Risposta Sismica Locale

## Approccio semplificato

Il terreno di fondazione dell'edificio viene classificato come Categoria di sottosuolo C e Categoria topografica T1. In base alle indicazioni delle NTC 2018 i parametri che caratterizzano l'azione sismica per i vari Stati Limite considerati sono riportati in tabella seguente.

Stati Limite	T,R (anni)	Orizzontale							Verticale					
		a.g (g)	S,S	S	F.o	T,B (sec)	T,C (sec)	T,D (sec)	a.g (g)	S	F,v	T,B (sec)	T,C (sec)	T,D (sec)
SLE: SLO	60	0.071	1.500	1.500	2.467	0.153	0.458	1.884	0.071	1.000	0.887	0.050	0.150	1.000
SLE: SLD	101	0.090	1.500	1.500	2.476	0.157	0.470	1.960	0.090	1.000	1.003	0.050	0.150	1.000
SLU: SLV	949	0.239	1.345	1.345	2.475	0.163	0.489	2.556	0.239	1.000	1.633	0.050	0.150	1.000
SLU: SLC	1950	0.311	1.241	1.241	2.458	0.168	0.504	2.844	0.311	1.000	1.851	0.050	0.150	1.000

## Approccio rigoroso

L'analisi della Risposta Sismica Locale condotta nell'ambito di un'indagine geologica del terreno di fondazione ha fornito i parametri degli spettri di risposta elastici in accelerazione normalizzati secondo la procedura indicata dall'Ordinanza n. 55. Gli spettri normalizzati sono stati ricavati per i 4 periodi di ritorno relativi agli stati limite considerati; i dati sono riportati nelle seguenti tabelle.

### TR = 60

Ordinata dello spettro in corrispondenza del tratto ad accelerazione costante	$SA_m$	=	0.329	g
Periodo iniziale del tratto a velocità costante	$T_C$	=	0.275	S
Ordinata dello spettro al punto di ancoraggio per T=0	$a_{max}$	=	0.158	g

### TR = 101

Ordinata dello spettro in corrispondenza del tratto ad accelerazione costante	$SA_m$	=	0.329	g
Periodo iniziale del tratto a velocità costante	$T_C$	=	0.275	S
Ordinata dello spettro al punto di ancoraggio per T=0	$a_{max}$	=	0.158	g

### TR = 949

Ordinata dello spettro in corrispondenza del tratto ad accelerazione costante	$SA_m$	=	0.329	g
Periodo iniziale del tratto a velocità costante	$T_C$	=	0.275	S
Ordinata dello spettro al punto di ancoraggio per T=0	$a_{max}$	=	0.158	g

### TR = 1950

Ordinata dello spettro in corrispondenza del tratto ad accelerazione costante	$SA_m$	=	0.329	g
Periodo iniziale del tratto a velocità costante	$T_C$	=	0.275	S
Ordinata dello spettro al punto di ancoraggio per T=0	$a_{max}$	=	0.158	g

La pericolosità da analisi della Risposta Sismica Locale viene descritta specificando per ognuno dei quattro valori di  $T_R$  i seguenti parametri: accelerazione di ancoraggio  $a_{max}$ , periodo  $T_C$  e fattore di amplificazione dello spettro normalizzato  $F_o$  pari a  $SA_m/a_{max}$ . Questi valori vengono rappresentati nella tabella seguente.

T.R (anni)	Orizzontale			Verticale		
	a,max (g)	F.o	T.C (sec)	a,max (g)	F.v	T.C (sec)
60	0.158	2.082	0.275			
101	0.191	2.115	0.297			
949	0.442	2.233	0.319			
1950	0.579	2.019	0.396			

Una volta definiti i parametri dell'analisi RSL, per i diversi Stati Limite di riferimento è possibile consultare gli altri parametri caratteristici degli spettri elastici in accelerazione e confrontarli con quelli relativi al metodo semplificato secondo Normativa.

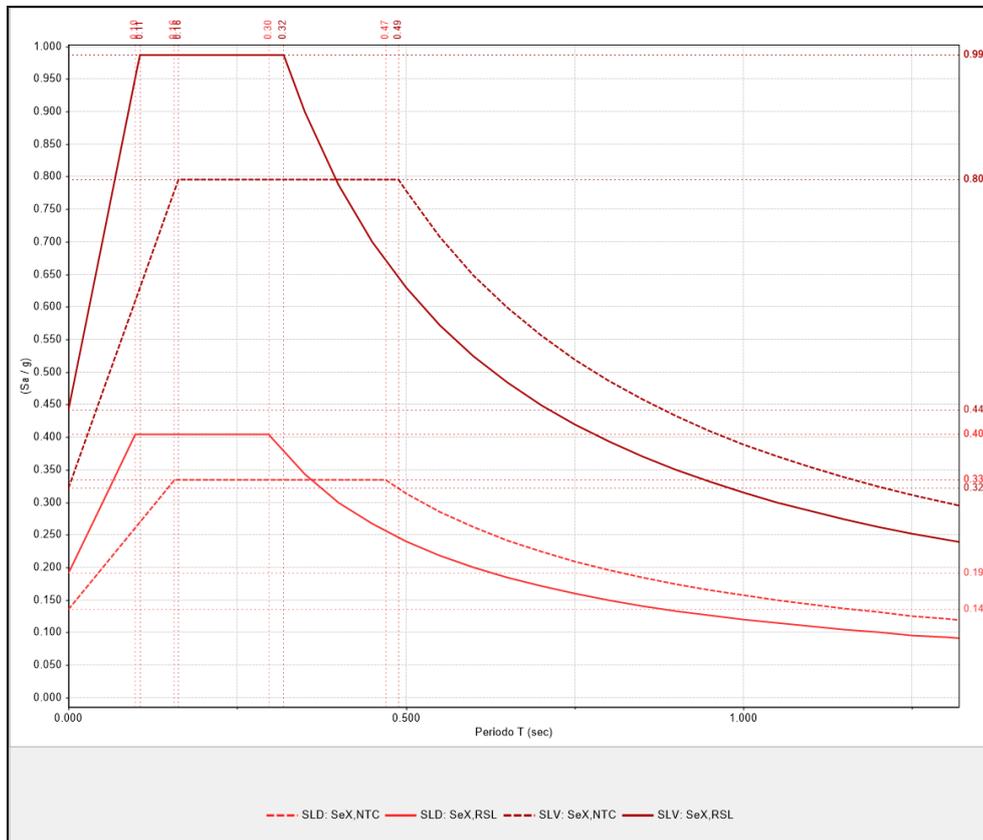
Parametri di Spettro														
Approccio semplificato secondo Normativa:														
Stati Limite	T.R (anni)	Orizzontale							Verticale					
		a.g (g)	S,S	S	F.o	T.B (sec)	T.C (sec)	T.D (sec)	a.g (g)	S	F.v	T.B (sec)	T.C (sec)	T.D (sec)
SLE: SLO	60	0.071	1.500	1.500	2.467	0.153	0.458	1.884	0.071	1.000	0.887	0.050	0.150	1.000
SLE: SLD	101	0.090	1.500	1.500	2.476	0.157	0.470	1.960	0.090	1.000	1.003	0.050	0.150	1.000
SLU: SLV	949	0.239	1.345	1.345	2.475	0.163	0.489	2.556	0.239	1.000	1.633	0.050	0.150	1.000
SLU: SLC	1950	0.311	1.241	1.241	2.458	0.168	0.504	2.844	0.311	1.000	1.851	0.050	0.150	1.000

Approccio rigoroso con Analisi RSL:														
Stati Limite	T.R (anni)	Orizzontale												
		a,max (g)	F.o	T.B (sec)	T.C (sec)	T.D (sec)								
SLE: SLO	60	0.158	2.082	0.092	0.275	2.232								
SLE: SLD	101	0.191	2.115	0.099	0.297	2.364								
SLU: SLV	949	0.442	2.233	0.106	0.319	3.368								
SLU: SLC	1950	0.579	2.019	0.132	0.396	3.916								

In questo caso, nella tabella relativa all'approccio rigoroso con Analisi RSL non sono presenti i parametri relativi alla componente verticale dell'azione sismica che verrà comunque considerata seguendo l'approccio semplificato da Normativa.

Un ulteriore confronto tra l'approccio semplificato e l'approccio rigoroso può essere operato nel grafico degli spettri (cfr. figura seguente), confrontando per i vari stati limite gli spettri elastici da normativa NTC (approccio semplificato, linea tratteggiata) e gli spettri da analisi RSL (approccio rigoroso, linea continua).

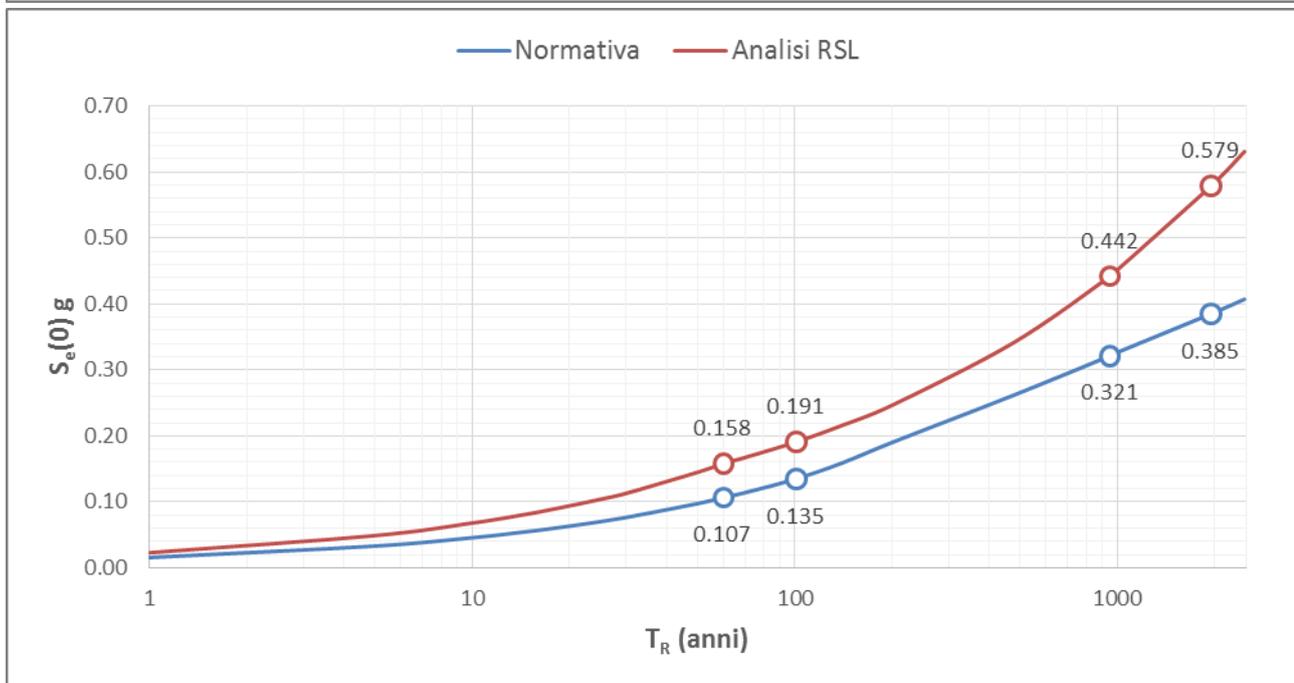
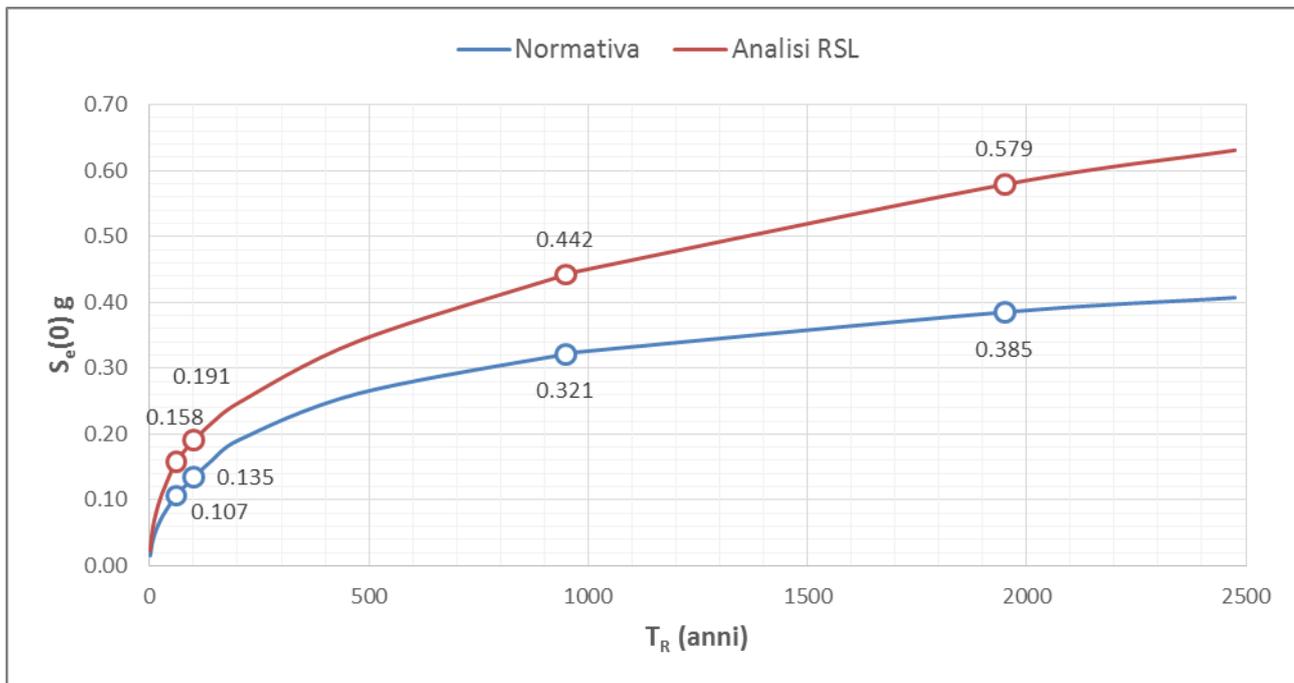


*Spettri di risposta per SLD e SLV da NTC e da Analisi della Risposta Sismica Locale*

A questo punto il Progettista può condurre l'analisi con riferimento agli spettri da analisi RSL, piuttosto che a quelli da Normativa. Indipendentemente dal tipo di analisi (lineare o non lineare), i risultati relativi al singolo stato limite indicheranno se la verifica di sicurezza è soddisfatta o meno, cioè se la capacità è maggiore o minore della domanda.

Per quanto riguarda infine il **calcolo degli indicatori di rischio sismico**  $\zeta_E$ , il processo iterativo volto a definire la massima azione sismica che la costruzione può sostenere (cioè l'azione sismica cui corrisponde una domanda uguale alla capacità) si svolge variando  $T_R$  e calcolando i corrispondenti parametri di spettro. All'esempio illustrato corrisponde il grafico in figura seguente, che mostra la variabilità dell'accelerazione spettrale per  $T=0$ , con il tempo di ritorno  $T_R$ .

Si svolge il confronto fra l'approccio semplificato da Normativa dove  $S_e(0) = a_g \cdot S$  e l'approccio rigoroso da Analisi RSL dove  $S_e(0) = a_{max}$ . Dai diversi valori dell'accelerazione sismica in input (oltre che dagli altri parametri di spettro  $F_0$  e  $T_C$ ) deriveranno differenti risultati sugli indicatori di rischio prodotti dai due approcci.



Nel grafico (in formato logaritmico nell'immagine superiore, e ordinario in quella inferiore) è rappresentata la variabilità della massima accelerazione di ancoraggio ( $a_{max}$ ) per l'esempio considerato, in funzione di  $T_R$ . Vengono confrontate le curve secondo NTC e secondo Analisi della Risposta Sismica Locale; in evidenza: i valori di  $a_{max}$  per i periodi di ritorno corrispondenti ai 4 stati limite di riferimento.

Nella procedura di calcolo degli indicatori di rischio, lungo le iterazioni successive il periodo  $T_R$  assume valori via via diversi, fino a determinare una domanda uguale alla capacità, muovendosi quindi lungo l'asse delle ascisse del grafico.

## 10.5 CONCLUSIONI

L'analisi sismica di un edificio può essere condotta in conformità sia alla pericolosità sismica secondo NTC (approccio semplificato) sia alla Risposta Sismica Locale (RSL) da microzonazione (approccio rigoroso). Attraverso l'approccio rigoroso da Risposta Sismica Locale, in modo del tutto analogo all'approccio

semplificato secondo Normativa, l'analisi strutturale:

- inizia con la **definizione della pericolosità** per i vari periodi di ritorno  $T_R$ ,
- giunge alla **verifica di sicurezza per i diversi stati limite** di riferimento
- e, per una costruzione esistente, termina con il **calcolo dell'indicatore di rischio sismico**  $\zeta_E$ , necessario per la classificazione sismica e per la quantificazione degli effetti degli interventi di consolidamento.

**Per la definizione completa del moto sismico secondo l'approccio rigoroso (RSL), devono essere definiti i parametri spettrali (accelerazione massima, fattore di amplificazione, periodo  $T_C$ ), ottenuti mediante la procedura di regolarizzazione:**

- **per le componenti orizzontale e verticale (quest'ultima molto importante per edifici posti vicino alla sorgente sismica)**
- **e per diversi valori del periodo di ritorno  $T_R$  nell'intervallo di riferimento (30 ÷ 2475 anni).**

## 10.6 IMPLEMENTAZIONE IN AEDES.PCM

La finestra "Azione Sismica" è stata modificata alla luce delle considerazioni sulla risposta sismica locale. Nella scheda "Sito" oltre a specificare l'ubicazione e consultare i parametri relativi alla Pericolosità Sismica di base è possibile definire la Risposta Sismica Locale secondo l'approccio semplificato o l'approccio rigoroso. Qualora sia disponibile un'analisi della risposta sismica locale è sufficiente attivare il check relativo all'**approccio rigoroso con Analisi RSL** e inserire in tabella i parametri caratteristici degli spettri normalizzati per la componente sismica orizzontale e verticale per i tempi di ritorno analizzati. Qualora i valori siano disponibili per la sola componente orizzontale è possibile lasciare i campi della componente verticale vuoti e seguire per quest'ultima l'approccio semplificato secondo Normativa. Una volta inseriti i parametri si raccomanda di confermare l'inserimento con l'apposito pulsante.

Nella scheda "Struttura", una volta specificata la vita nominale e la classe d'uso dell'edificio, è quindi possibile consultare tutti i parametri di spettro per i 4 stati limite considerati sia per l'approccio semplificato che per l'approccio rigoroso.

Un simile confronto può essere operato nella finestra grafica dove gli spettri da approccio semplificato (NTC) sono rappresentati con linea tratteggiata e gli spettri da approccio rigoroso (RSL) sono rappresentati con linea continua.

Nelle analisi sismiche si farà riferimento agli spettri da approccio rigoroso qualora il relativo check nella scheda Sito sia attivo. In caso contrario le analisi faranno riferimento agli spettri da approccio semplificato.