

DOCUMENTO redatto da AEDES Software (prima ed. 14.10.2013, rev. 20.11.2013)

PER GLI UTENTI della Regione EMILIA ROMAGNA:

Considerazioni sulla valutazione di vulnerabilità ai fini dell'Ordinanza n.86 del 6.12.2012.

Quesito:

La valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici richiede il calcolo del fattore di accelerazione f_{aSLV} (coincidente con l'indicatore di rischio sismico in termini di accelerazione, in PCM indicato con: α_v, PGA , con $PGA=ag$), e distingue 3 fasce di vulnerabilità in base al valore di tale fattore:

bassa se $f_{aSLV} > 0.5$, media se $0.3 \leq f_{aSLV} \leq 0.5$, alta se $f_{aSLV} < 0.3$.

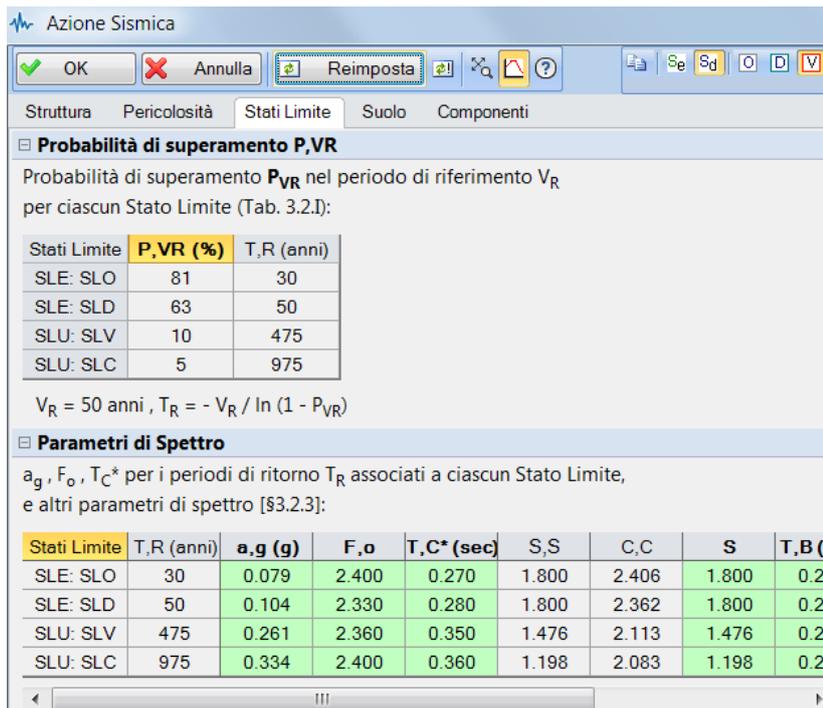
Il DM 14.1.2008 in §12 afferma che se "TR<30 anni si porrà TR=30 anni": questo di fatto implica che tutte le analisi sismiche si svolgono per valori non inferiori a TR=30 anni, con corrispondente ag (da reticolo sismico). Nel caso che la struttura non risulti verificata neppure per TR=30 (abbia cioè un TR<30), non si può conoscere quale sia la capacità in termini di ag : nei calcoli che legano TR ad ag e agli altri parametri di spettro (durante questi calcoli iterativi si cerca il TR che segna la verifica soddisfatta, e quindi la corrispondente ag) non è possibile scendere sotto 30 anni, e PCM di conseguenza fornisce valori di capacità in termini di TR≤30 anni.

Tuttavia, per edifici per i quali TR<30 (e questo è noto, perché la verifica non è soddisfatta per TR=30), esiste un metodo per ottenere una capacità in termini di ag , necessaria per la definizione del 'fattore di accelerazione'? Altrimenti, tale fattore (a_{SLV} / a_{gSLV}) non può mai scendere sotto il valore $a_{g(30)}/a_{g(475)}$, e se questo valore è > 0.3 risulta impossibile per qualsiasi edificio di tale sito riscontrare una 'vulnerabilità alta'. Ciò contrasta con l'evidenza di edifici aventi gravi carenze, e per i quali peraltro i modelli di calcolo indicano che la capacità in termini di PGA (ag) è inferiore al valore corrispondente a TR=30 anni.

Risposta:

Con PCM è possibile calcolare f_{aSLV} anche nel caso di $TR < 30$ anni secondo la seguente procedura.

Premessa. Si è eseguita la verifica sismica. Si è ottenuto un $\alpha_{v,PGA}$ (indicatore di rischio sismico in termini di PGA = fattore di accelerazione $f_{aSLV} \leq [ag(30)/ag(475)]$, in quanto la capacità in termini di TR risulta ≤ 30 anni. E' necessario quindi trovare la capacità ag^* che sostituisce $ag(30)$ al numeratore di f_{aSLV} . Ovviamente: $ag^* \leq ag(30)$, e supponiamo sia strettamente minore in quanto siamo nell'ipotesi di struttura non verificata per $TR=30$. I dati originari sull'Azione Sismica siano ad esempio i seguenti:



The screenshot shows the 'Azione Sismica' software interface. It has a menu bar with 'Struttura', 'Pericolosità', 'Stati Limite', 'Suolo', and 'Componenti'. The 'Stati Limite' tab is active, showing two sections: 'Probabilità di superamento P,VR' and 'Parametri di Spettro'.

Probabilità di superamento P,VR
Probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R per ciascun Stato Limite (Tab. 3.2.I):

Stati Limite	P,VR (%)	T,R (anni)
SLE: SLO	81	30
SLE: SLD	63	50
SLU: SLV	10	475
SLU: SLC	5	975

$V_R = 50$ anni, $T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR})$

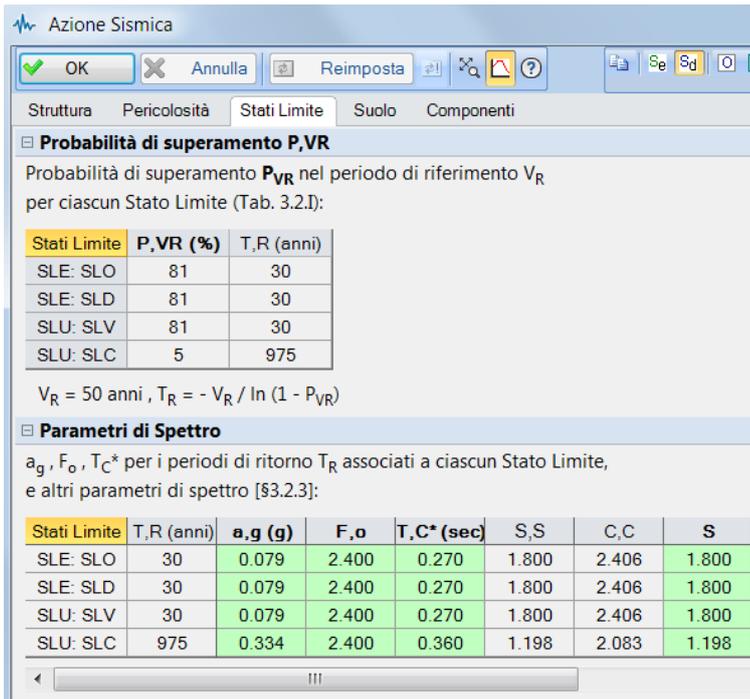
Parametri di Spettro
 a_g, F_o, T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascun Stato Limite, e altri parametri di spettro [§3.2.3]:

Stati Limite	T,R (anni)	a_g (g)	F_o	T_C^* (sec)	S,S	C,C	S	T,B (sec)
SLE: SLO	30	0.079	2.400	0.270	1.800	2.406	1.800	0.2
SLE: SLD	50	0.104	2.330	0.280	1.800	2.362	1.800	0.2
SLU: SLV	475	0.261	2.360	0.350	1.476	2.113	1.476	0.2
SLU: SLC	975	0.334	2.400	0.360	1.198	2.083	1.198	0.2

e dunque $ag_{SLV} = ag(475) = 0.261$ g, $ag(30) = 0.079$.

Supponiamo di aver ottenuto nei risultati: $TR_{CLV} \leq 30$ anni, e un indicatore di rischio $\alpha_{v,PGA}$ (o fattore di accelerazione) $\leq 0.079/0.261 = 0.302$. Per ottenere il valore di ag^* , procediamo con i punti seguenti.

1. Si crea un nuovo modello ottenuto per Copia dall'edificio in esame
2. Nei parametri in input relativi all'Azione Sismica, si specifica $P_{VR}=81\%$ per i 3 stati limite: SLO, SLD, SLV:

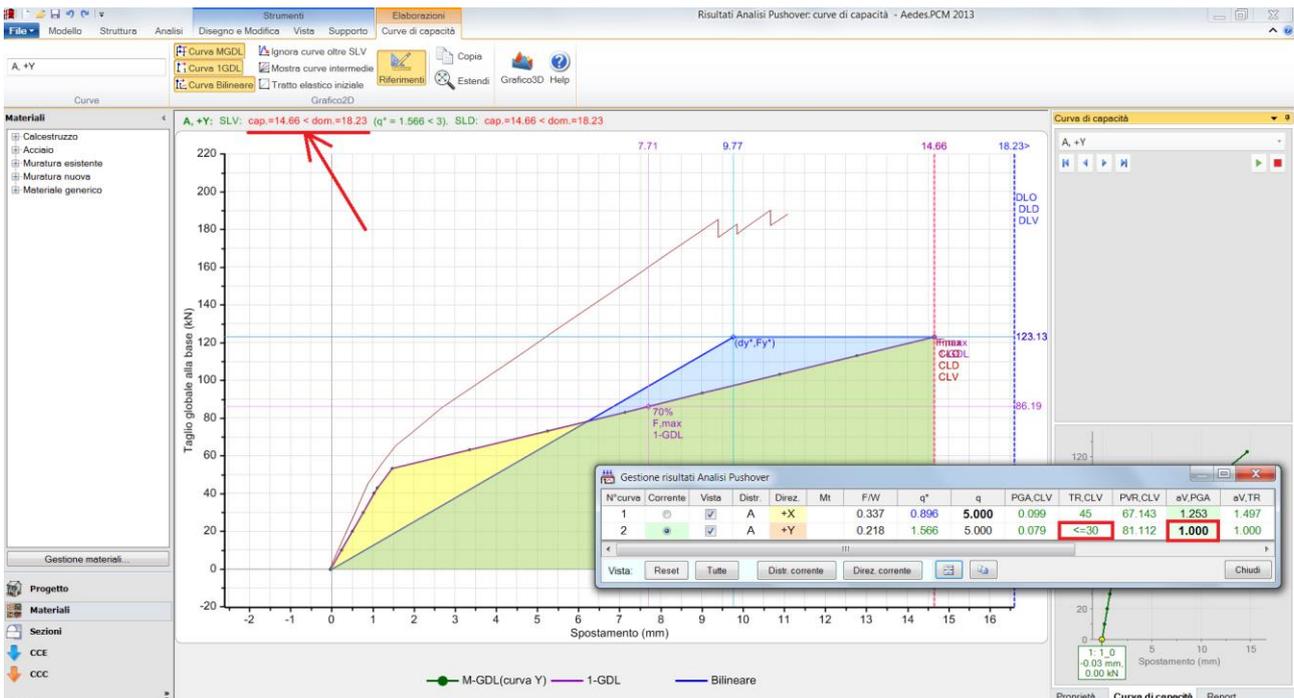


In tal modo, il parametro di spettro a_g assume, per SLV ($TR=475$ anni), il valore uguale al valore minimo cioè il valore corrispondente a $TR=30$ anni (siamo nell'ipotesi di $VR=50$ anni; in caso di VR diversa si modificherà PVR in modo da ottenere $TR=30$ anni, cioè invece di $PVR=81\%$ si avrà un altro valore).

3A. Si esegue l'analisi, supponiamo non lineare (pushover) (la stessa analisi eseguita per il modello originario).

Alcuni risultati relativi alle curve esaminate presenteranno un $\alpha_{v,PGA} = 1.000$ (sono le curve che nel modello originario presentavano $TR \leq 30$ anni, ed anche ora per tali curve si ha $TR \leq 30$).

Esaminando queste curve, per ognuna di esse si rilevano la capacità e la domanda in termini di spostamento, come risulta dal grafico (nell'esempio in figura, la curva più sfavorevole è la (A)+Y):



In questo esempio, in termini di spostamento: capacità = 14.66 mm, domanda = 18.23 mm.
 Dalla definizione degli Spettri di Risposta, è noto che lo spettro in spostamento è proporzionale all'accelerazione. Ipotizzando che gli altri parametri di spettro (S , F_o , T_C^*) per valori di $T_R < 30$ anni siano costanti e pari al valore che assumono per $T_R = 30$, si può sfruttare la proporzionalità diretta tra spettro in spostamenti e accelerazione a_g , per cui il rapporto capacità/domanda può essere applicato alla $a_g(30)$ per trovare a_g^* . Nel caso in esame:
 $a_g^* = (14.66/18.23) * 0.079 = 0.064$
 e di conseguenza si può calcolare α_V, PGA (cioè: $f_{aSLV} = 0.064/0.261 = 0.245$)
 che risulta, ovviamente, < 0.302 .

3B. Se invece di eseguire l'analisi non lineare si è valutata la capacità con **analisi lineare**, le verifiche di sicurezza vengono svolte confrontando le resistenze con le sollecitazioni di calcolo, e quindi non è possibile applicare una relazione tra gli spostamenti come in pushover.

Si può però procedere per tentativi, ottenendo comunque il corretto risultato in termini di a_g . Il percorso operativo consigliato è il seguente.

- Come già illustrato ai punti precedenti, nei parametri in input relativi all'Azione Sismica, si specifica $P_{VR} = 81\%$ per i 3 stati limite: SLO, SLD, SLV. Questo imposta automaticamente i valori di a_g per SLO, SLD e SLV al valore minimo previsto dal reticolo di Normativa: $a_g(30)$, e gli altri parametri di spettro (S , F_o e T_C^*) ai valori corrispondenti. Si ricorda che per S , F_o e T_C^* si suppongono valori costanti per $a_g < a_g(30)$, e pari ai valori corrispondenti ad $a_g(30)$.
- Si specifica per a_g SLO e SLD un valore minimo (0.001 g) (in input, il valore di a_g SLV deve essere superiore ad a_g SLD e a_g SLO). Questo consente di iniziare i tentativi a partire da $a_g = 0.001$ g (valore minimo possibile significativo per l'azione sismica). Si osservi che digitando tali valori, le caselle in input sono evidenziate in giallo al fine di indicare che non corrispondono direttamente ai valori del reticolo sismico (infatti, ci siamo proposti di studiare la risposta della struttura per valori di a_g minori di quelli previsti dal reticolo di Normativa).
- Ogni volta che si modifica a_g SLV si riesegue l'analisi; ad ogni tentativo successivo, il valore di a_g SLV viene progressivamente aumentato. Ad un certo punto si trova il valore di a_g che segna il passaggio da verifica soddisfatta a non soddisfatta: la più alta a_g cui corrisponde verifica soddisfatta è il valore sostenibile dall'edificio, cioè la sua capacità. Segue immediatamente il calcolo dell'indicatore di rischio α_V, PGA (cioè: f_{aSLV}).

In figura, si riporta un esempio della tabella dei parametri di spettro durante la fase dei tentativi successivi:

Probabilità di superamento P,VR
 Probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R
 per ciascun Stato Limite (Tab. 3.2.I):

Stati Limite	P,VR (%)	T _R (anni)
SLE: SLO	81	30
SLE: SLD	81	30
SLU: SLV	81	30
SLU: SLC	5	975

$V_R = 50$ anni, $T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR})$

Parametri di Spettro
 a_g, F_o, T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascun Stato Limite,
 e altri parametri di spettro [§3.2.3]:

Stati Limite	T _R (anni)	a.g (g)	F.o	T.C* (sec)	S,S	C,C	S	T.B (sec)	T.C (sec)	T.D (sec)	F.v
SLE: SLO	30	0.001	2.400	0.270	1.800	2.406	1.800	0.217	0.650	1.916	0.102
SLE: SLD	30	0.001	2.400	0.270	1.800	2.406	1.800	0.217	0.650	1.916	0.102
SLU: SLV	30	0.035	2.400	0.270	1.800	2.406	1.800	0.217	0.650	1.916	0.606
SLU: SLC	975	0.334	2.400	0.360	1.198	2.083	1.198	0.250	0.750	2.936	1.872

E' opportuno evidenziare che **la via dell'analisi non lineare è sempre preferibile**: le valutazioni di vulnerabilità che richiedono un valore assoluto 'preciso', devono utilizzare metodi che possano identificarlo in modo appropriato (è noto che l'analisi lineare non è in grado di tener conto della redistribuzione degli sforzi che avviene nella struttura muraria a causa della fessurazione).

4. Osservazioni complementari.

4.1. Se il fattore di accelerazione richiede l'accelerazione al suolo che contiene gli effetti di suolo (e quindi non l'accelerazione su roccia), occorre considerare che a_g è data dal prodotto $a_g * S$, ma le considerazioni svolte restano tutte uguali (si suppone che S per $TR < 30$ anni resti costante e uguale al valore che assume per $TR = 30$).

4.2. Secondo le indicazioni di Normativa, non è possibile associare una capacità in termini di periodo di ritorno TR ad a_g . Possiamo comunque sfruttare una relazione fra gli indicatori di rischio proposta da alcuni documenti normativi (ad. es.: Regione Toscana, Istruzioni tecniche per edifici pubblici strategici e rilevanti): all'indicatore di rischio in termini di TR si applica un elevamento a potenza a 0.41 (coefficiente derivato dall'analisi statistica delle curve di pericolosità a livello nazionale) al fine di ottenere una scala analoga a quella degli indicatori in PGA. Si può quindi scrivere, con approssimazione accettabile:

$$0.245 \cong (TR_{CLV} / TR_{DLV})^{0.41}$$

ed essendo $TR_{DLV} = 475$, si ottiene: $TR_{CLV} = 15$ anni.

ANALISI CINEMATICA (MECCANISMI DI COLLASSO)

E' stata fin qui esaminata l'analisi globale della struttura. La stessa problematica si presenta anche nel **calcolo dei meccanismi di collasso** (analisi dei cinematismi).

Per l'analisi cinematica, PCM propone l'ambiente ESP dove i singoli meccanismi di collasso vengono sottoposti ad analisi strutturale, con determinazione delle capacità e dei corrispondenti indicatori di rischio sismico.

Come per l'analisi globale, la determinazione della capacità in termini di a_g non può scendere sotto al periodo di ritorno di 30 anni; da qui deriva che la capacità minima prevista è quella corrispondente a $TR = 30$ anni ($a_g(30)$).

Tuttavia, il legame tra l'accelerazione spettrale richiesta (cfr. §C8A.4.3.2) ($a^*, R_{ig} = a_g * S / q$ oppure $a^*, D_{ef} = S_e(T_1) \psi(Z) \gamma / q$) e l'accelerazione al suolo a_g è di tipo lineare ($S_e(T_1)$ può essere espresso come $a_g * S'_e(T_1)$). Questo consente di poter ragionare sulla determinazione della capacità in termini di a_g in modo indipendente dal periodo di riferimento TR . In altre parole, la procedura che verrà illustrata non si propone la determinazione di un indicatore di rischio in termini di TR (ossia, non sarà nota la capacità in termini di $TR < 30$), ma rende possibile esprimere correttamente la capacità in termini di a_g e quindi calcolare l'effettivo fattore di accelerazione $f_{a_{SLV}}$.

Con riferimento ad un esempio, i parametri sismici siano i seguenti:

Parametri di Spettro											
a_g, F_o, T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascun Stato Limite, e altri parametri di spettro [§3.2.3]:											
Stati Limite	T.R (anni)	a_g (g)	F.o	T.C* (sec)	S,S	C,C	S	T.B (sec)	T.C (sec)	T.D (sec)	F.v
SLE: SLO	30	0.040	2.562	0.250	1.500	1.659	1.500	0.138	0.415	1.760	0.692
SLE: SLD	35	0.043	2.546	0.256	1.500	1.646	1.500	0.140	0.421	1.772	0.713
SLU: SLV	332	0.129	2.587	0.268	1.500	1.621	1.500	0.145	0.435	2.116	1.254
SLU: SLC	682	0.175	2.559	0.275	1.431	1.608	1.431	0.147	0.442	2.300	1.445

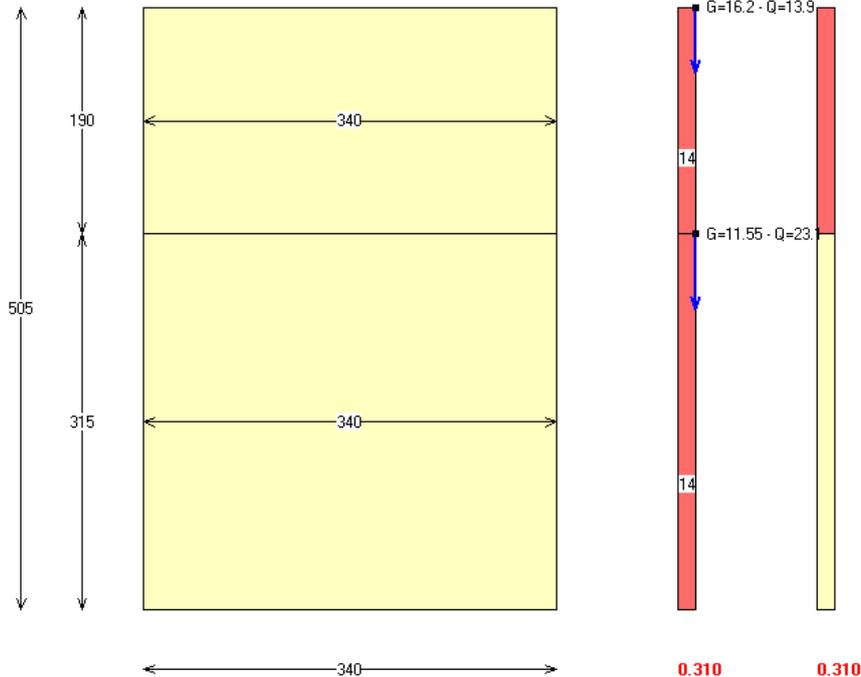
La domanda sismica in termini di a_g per SLV vale quindi: $a_{g,SLV} = 0.129$

Come illustrato in figura seguente, si ipotizza che la parete di esempio, oggetto della verifica di ribaltamento, sia costituita da due piani in elevazione.

Cinematismo fuori dal piano: 2 piani

Prospetto frontale

Sezione verticale



Svolgendo la verifica con il modulo ESP di PCM, si ottiene:

Al livello 1:

Acc.spettrale attivazione meccanismo $a_{0^*,1} (* g) = 0.023$

Poiché ci si trova al primo livello, la domanda in questo caso coincide con la sola formulazione di accelerazione spettrale su sottostante corpo rigido:

Acc.spettrale richiesta SLV su sottostante corpo rigido $a^*,1Rig (* g) = 0.097$

Visualizzando anche le formule utilizzate, si nota infatti che:

$$a^*,1Rig = (a_{g,SLV} * S) / q = (0.129 * 1.50) / 2 = 0.097$$

La procedura di calcolo del software ricerca, operando iterativamente su TR nel reticolo di normativa, il valore di a_g (e corrispondi parametri di spettro F_0 e TC^*) cui corrisponde un'accelerazione richiesta uguale all'accelerazione di attivazione del meccanismo a_{0^*} .

Se però non riesce a trovarla, perché a_{0^*} ha un valore troppo basso, pone la capacità in termini di a_g pari ad $a_g(30)$ in quanto nel rispetto del DM 2008 non è possibile scendere sotto a $TR=30$; infatti il software propone questo risultato (per semplicità si sostituisce PGA con a_g):

Capacità in termini di a_g per SLV $ag_{CLV,1} (* g) = 0.040$

Quindi l'indicatore finale che si ottiene vale: $IRS_{ag,1} = ag_{CLV,1} / ag_{DLV} = 0.040 / 0.129 = 0.310$

Per calcolare la reale capacità si uguaglia l'accelerazione di attivazione del meccanismo all'espressione dell'accelerazione spettrale richiesta, tenendo come incognita a_g .

Questa operazione è lecita sotto l'ipotesi che il fattore di suolo S resti costante per valori di $a_g < a_g(30)$ (in

generale S, in qualità di parametro di spettro del reticolo, varia insieme a TR; in questo caso è costante e pari a 1.5 per un ampio intervallo di TR). Dunque si ha:

$$a^*_0 = (a_{g,CLV} \times S_{(30)}) / q, \text{ da cui: } a_{g,CLV} = (a^*_0 \times q) / S_{(30)} = (0.023 \times 1.50) / 2 = 0.0307$$

$$\text{L'indicatore finale corrispondente vale: } IRS_{ag,1} = a_{g,CLV} / a_{g,DLV} = 0.0307 / 0.129 = \mathbf{0.237}$$

La capacità ottenuta (e quindi l'indicatore di rischio) risulta inferiori rispetto al valore corrispondente a TR=30 anni.

La procedura illustrata diviene leggermente più complessa quando si analizzano le verifiche dei cinematismi di pareti in elevazione, in quanto bisogna considerare anche l'accelerazione spettrale richiesta per sottostante corpo deformabile. Questo è ciò che accade al livello superiore dell'esempio considerato.

Al livello 2:

$$\text{Acc.spettrale attivazione meccanismo } a_{0^*,2} (*g) = \mathbf{0.057}$$

La domanda in questo caso è la massima accelerazione tra quella su sottostante corpo rigido e quella su sottostante corpo deformabile:

$$\text{Acc.spettrale richiesta SLV su sottostante corpo rigido } a^*,2Rig (*g) = 0.097$$

$$\text{Acc.spettrale richiesta SLV su sottostante corpo deformabile } a^*,2Def (*g) = 0.187$$

Si opera direttamente con $a^*,2Def$ che risulta maggiore.

$$a^*,2Def = (S_e(T) * (Z_b / H) * \gamma) / q, \text{ dove:}$$

$S_e(T)$ si calcola in base al periodo della struttura (T_1), secondo le espressioni del §3.2.3.2.1:

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Z_b è la quota della parete dal piano di fondazione; H è l'altezza totale della costruzione; γ è il coefficiente di partecipazione modale; q = fattore di struttura = 2.

Per questo esempio, si ha che:

il periodo della struttura è $T_1 = 0.168$ sec;

$T_B = 0.145$ sec; $T_C = 0.435$ sec; $F_o = 2.587$.

Quindi, poiché $T_B < T_1 < T_C$, si ottiene che:

$$S_e(T_1) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o = 0.129 \cdot 1.50 \cdot 1 \cdot 2.587 = 0.500$$

$Z_b = 315$ cm; H = 505 cm; $\gamma = 1.20$.

In definitiva, con i valori sopra indicati, si ottiene il risultato proposto dal software:

$$a^*,2Def = (S_e(T) * (Z_b / H) * \gamma) / q = (0.500 * (315/505) * 1.20) / 2 = 0.374 / 2 = \mathbf{0.187}$$

Anche in questo caso, ricercando il valore di a_g cui corrisponde questa domanda di accelerazione spettrale si ottiene il minimo: $a_g(30)$, in quanto limite inferiore di un intervallo sotto cui la procedura iterativa condotta su TR non può scendere.

$$IRS_{ag,2} = a_{g,CLV,2} / a_{g,DLV} = 0.040 / 0.129 = \mathbf{0.310}$$

La reale capacità può ottenersi, analogamente a quanto visto in precedenza, uguagliando l'accelerazione di attivazione del meccanismo all'espressione di $a^*,2Def$ nella quale venga tenuta come incognita a_g e si utilizzino i parametri di spettro corrispondenti a TR=30 anni (invece che i parametri corrispondenti a TR per

SLV = 332 nell'esempio considerato). Il periodo della struttura rimane $T_1 = 0.168$ sec; ma stavolta (dalla tabella dei parametri sismici, per $T_R = 30$ anni): $T_B = 0.138$ sec; $T_C = 0.415$ sec.; $F_0 = 2.562$.

Poiché risulta ancora $T_B < T_1 < T_C$, l'espressione dello spettro rimane la stessa vista per il calcolo in corrispondenza di SLV:

$$S_e(T_1) = a_{g,CLV} * S * \eta * F_0 = a_{g,CLV} * 1.50 * 1 * 2.562 = a_{g,CLV} * 3.843$$

$$Z_b = 315 \text{ cm}; H = 505 \text{ cm}; \gamma = 1.20; q = 2; S = 1.5.$$

$$\text{Si ha: } a_{0,2}^* = (S_e(T_1) * (Z_b / H) * \gamma) / q = ((a_{g,CLV} * 3.843) * (315 / 505) * 1.20) / 2$$

$$\text{da cui: } a_{g,CLV} = (a_{0,2}^* * q) / ((3.843) * (315 / 505) * 1.20) = (0.057 * 2) / (2.876) = 0.0396$$

$$\text{Quindi l'indicatore finale che si ottiene vale: } \mathbf{IRS_{ag,2} = a_{g,CLV} / a_{g,DLV} = 0.0396 / 0.129 = 0.307}$$

La capacità (e quindi l'indicatore) risulta inferiore (seppur di poco) al valore corrispondente a $T_R = 30$ anni.