

Analisi pushover in Edisis

Il programma Edisis, nelle versioni 9.10 e successive, consente di eseguire l'analisi sismica statica nonlineare (pushover), attivabile solo nel caso si sia scelto il sistema normativo agli stati limite (Dm 2008), sia presente l'azione sismica e ad armature già dimensionate. Con le recenti evoluzioni normative c'è la possibilità, infatti, di valutare il comportamento nonlineare dell'edificio nelle varie direzioni del moto sismico, per conseguire le seguenti finalità [Opcm 3274 punto 4.5.4.1, Dm08 punto 7.3.4.1]:

- valutare i rapporti di sovrarresistenza α_0/α_1 che interviene nel calcolo del fattore di struttura q ,
- verificare l'effettiva distribuzione della domanda inelastica negli edifici progettati col fattore di struttura q ,
- in sostituzione dei metodi di analisi lineari per gli edifici di nuova costruzione,
- come metodo di valutazione della capacità di edifici esistenti.

A tal scopo EDISIS consente di effettuare un'analisi nonlineare al passo per scansione angolare, con carichi verticali fissi e carichi orizzontali variabili. Ciò consente di valutare a seguito del progetto delle armature il fattore di struttura effettivamente disponibile per l'edificio.

Modello strutturale dell'edificio

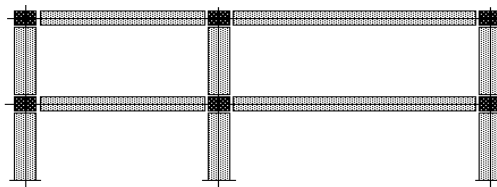
Può essere utile in questo contesto premettere alcune note informative riguardanti la modellazione. Il programma vede l'edificio come una struttura tridimensionale composta da una insieme di elementi 3D, interconnessi attraverso nodi a dimensione finita. Coerentemente con le caratteristiche degli edifici in cemento armato, il modello tiene conto del contributo irrigidente dei solai mediante degli elementi finiti appositamente studiati. L'analisi dinamica è svolta con le modalità prescritte dalle Norme, determinando i modi di vibrazione della struttura, valutando gli effetti delle componenti orizzontale e verticale della accelerazione sismica e combinando le sollecitazioni associate a ciascun modo con le regole SRSS e CQC. E' possibile, inoltre, assegnare una eccentricità accidentale delle masse e tenerne conto ai fini dell'analisi sismica, sia statica che dinamica. L'analisi modale utilizza un algoritmo agli autovalori di tipo restarted Lanczos altamente ottimizzato e direttamente integrato nel modellatore, caratterizzato da estrema velocità di calcolo.

Modellazione della struttura

L'edificio è visto come composto da un insieme di elementi resistenti (travi e pilastri) pensati collegati tra loro da nodi rigidi di dimensione trasversale finita. Sia le travi che i pilastri sono trattati dal programma come travi inflesse di spessore finito, secondo la teoria delle travi tozze deformabili a taglio, con deformabilità torsionale. Sia le travi che i pilastri sono considerati assialmente deformabili.

Il nodo rigido

Come indicato in figura, la dimensione trasversale del nodo è definita dall'ingombro massimo delle travi e dei pilastri che vi convergono e si tiene conto della sua parziale deformabilità arretrando, secondo quanto suggerito dalla normativa giapponese sull'argomento (si veda: Muto K., Analisi della progettazione antisismica degli edifici, Flaccovio Editore, Palermo, 1983), le sezioni terminali delle travi e dei pilastri che vi convergono di una quantità pari al 25% dello spessore dell'elemento e comunque limitata dalla mezzzeria del nodo.

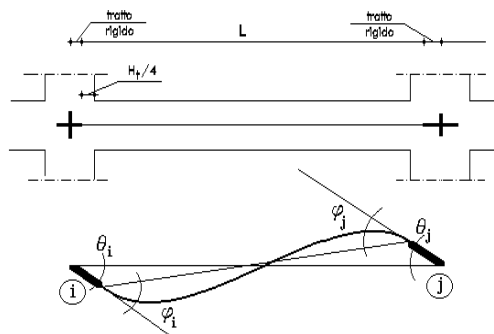


Gli elementi

Ciascun elemento si compone così di tre parti: due tratti rigidi di estremità, ciascuno di ampiezza pari al semi-spessore del nodo diminuito del 25% dello spessore dell'elemento, ed un tratto centrale deformabile di luce attiva inferiore alla lunghezza lorda dell'elemento.

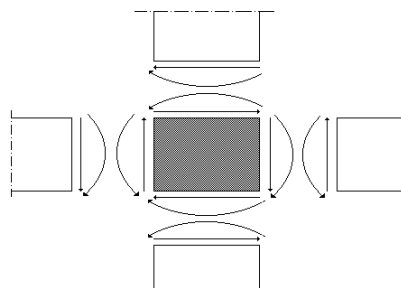
In presenza di dimensioni trasversali tipicamente ben maggiori di un decimo della luce dell'elemento, non appare in effetti giustificata l'ipotesi di comportamento alla De Saint Venant tipica di analisi condotte manualmente. L'uso di elementi deformabili a taglio, collegati attraverso nodi di dimensione finita, rappresenta quindi un sostanziale miglioramento del modello di calcolo e corrisponde ad una schematizzazione pressoché standard in analisi automatica delle strutture fin dai primi anni '60 (si veda: Clough, Wilson, King, Large capacity multistory frame analysis, J.Struct.Div. ASCE, aug. 1963).

In effetti tale modellazione, presente in EDISIS fin dai primi anni '80 ed ormai generalmente utilizzata, fornisce una descrizione del comportamento della struttura insieme più accurata e più semplice di quella fornita dalla ipotesi irrealistica, di elementi con sezione infinitesima rispetto alla luce e nodi puntiformi, che viene adottata, per semplicità di calcolo, nell'ambito di analisi condotte manualmente. Si perde in effetti la necessità, tipica dei procedimenti manuali, di distinguere i pilastri normali, per i quali si considera ancora valido un comportamento alla De Saint Venant, dalle pareti a mensola, soggette a tutt'altra schematizzazione, e si elimina al contempo il bisogno di ricorrere, in fase di verifica, a regole empiriche di spuntatura dei momenti ai nodi, anche queste tipiche dei procedimenti manuali.

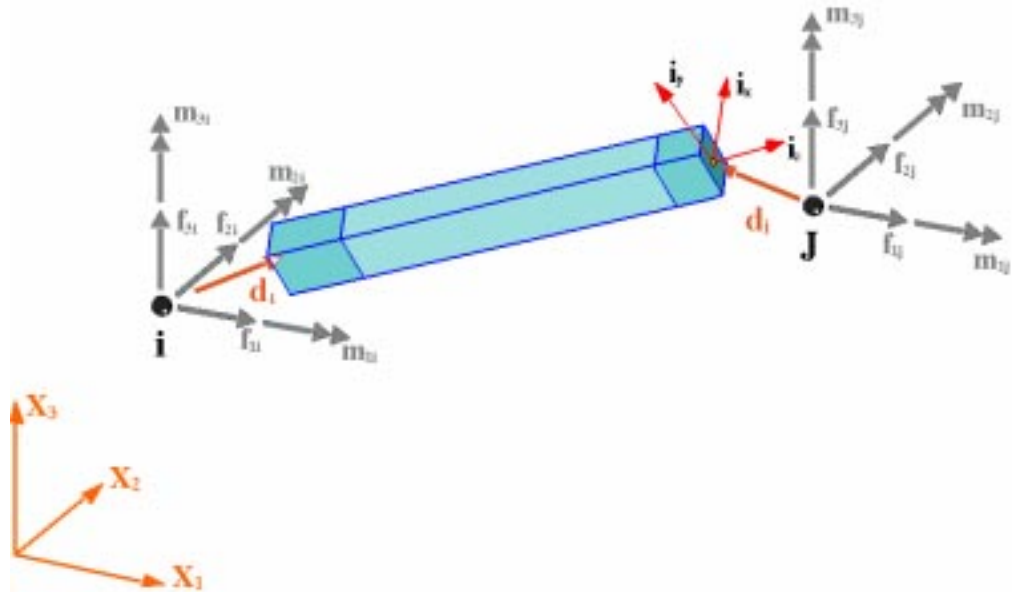


Si osservi che l'introduzione di nodi rigidi a dimensione finita rende più complesse tanto le condizioni di congruenza della deformazione degli elementi che le condizioni di equilibrio al nodo. In particolare, da un punto di vista cinematico, la rotazione del nodo provoca anche uno scorrimento trasversale tra le sezioni terminali degli elementi che vi concorrono. Ugualmente, nelle equazioni di equilibrio alla rotazione del nodo, oltre ai momenti agenti nelle sezioni terminali degli elementi, compaiono anche i momenti prodotti dai carichi e dagli sforzi di taglio applicati al nodo. Ne derivano sensibili differenze di comportamento rispetto al modello semplificato basato su elementi privi della dimensione trasversale.

La differenza diventa in particolare rilevante nel caso di travi corte poste tra pilastri di grosso spessore. In tal caso, il modello adottato valuta in pieno il contributo alla rigidezza complessiva offerto dal comportamento a mensola Vierendel dell'insieme dei due pilastri affiancati e ne descrive in modo più adeguato lo stato di sollecitazione.

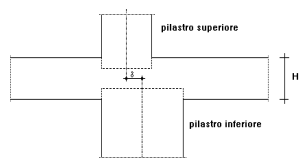


L'elemento implementato è basato sulla soluzione generale di De Saint Venant (si veda "Petrolo, Casciaro, 3d beam element based on De Saint Venant's rod theory, Computers & Structures, 2004"). La sua geometria è descritta assegnando la lunghezza, la sezione e l'orientazione nello spazio definita dal versore $\{ i_x, i_y, i_z \}$ del sistema di riferimento locale $\{ x, y, z \}$. I due nodi i e j sono associati alla sezione iniziale e finale dell'elemento mentre d_i e d_j rappresentano la differenza di posizione tra il centro della sezione terminale ed il nodo corrispondente. In termini meccanici l'elemento è definito dalle forze nodali f_i e f_j e dai momenti nodali m_i e m_j , associati rispettivamente agli spostamenti nodali u_i, u_j ed alle rotazioni nodali ϕ_i, ϕ_j . Al fine di arricchire la descrizione cinematica, l'elemento contempla anche dei modi deformativi tipo bolla (bubble functions) controllati da parametri interni (non nodali). Ciò rende l'elemento particolarmente adatto alle analisi dinamiche con massa distribuita, essendo capace di cogliere modi deformativi locali (che non coinvolgono spostamenti di estremità).



I disassamenti

La definizione di fili fissi e quindi di rastremazioni eccentriche nelle sezioni dei pilastri comporta un disassamento orizzontale fra i pilastri di una stessa linea montante. Questo fatto ovviamente influenza in modo non trascurabile il comportamento della struttura in quanto, se le sezioni dei due pilastri concorrenti nello stesso nodo non sono allineate, lo sforzo normale del pilastro superiore induce in quello inferiore anche un momento dovuto all'eccentricità tra i due baricentri. Il programma tiene conto di questo fenomeno utilizzando un nodo rigido eccentrico che permette una descrizione esatta della cinematica del nodo.



L'Analisi statica Nonlineare

I recenti sviluppi normativi hanno introdotto l'analisi statica nonlineare, detta anche Analisi Pushover, come ulteriore strumento di valutazione del comportamento di strutture soggette a sisma. In particolare l'Opcm 3274 al punto 4.5.4.1 e il Dm08 al punto 7.3.4.1 dispongono che l'analisi statica nonlineare può essere applicata per gli scopi e i casi seguenti:

- valutare i rapporti di sovraresistenza α_v/α_1 che interviene nel calcolo del fattore di struttura q ,
- verificare l'effettiva distribuzione della domanda inelastica negli edifici progettati col fattore di struttura q ,
- in sostituzione dei metodi di analisi lineari per gli edifici di nuova costruzione,
- come metodo di valutazione della capacità di edifici esistenti.

Questa modalità di analisi si basa su due assunzioni:

- che la risposta della struttura possa essere legata a quella di un sistema "ridotto equivalente" ad un solo grado di libertà;
- che la risposta dinamica alle azioni sismiche del sistema ridotto sia riconducibile a quella di un sistema elastico "equivalente".

La prima assunzione implica che la deformata della struttura sia in definitiva controllata da un solo modo deformativo e mantenga la stessa forma per tutta la durata del sisma; la seconda implica una appropriata definizione dei parametri del sistema elastico equivalente (massa, rigidità e viscosità) in modo che possa istituirsi una relazione semplice tra le escursioni massime in spostamento nei due sistemi.

Entrambe le ipotesi trovano riscontro solo come approssimazione grossolana, tuttavia una serie ormai numerosa di investigazioni ha mostrato come, per questa via, si possano ottenere informazioni significative del comportamento reale delle strutture, almeno nei casi, tutto sommato frequenti, in cui la risposta è dominata da un solo modo deformativo. L'analisi pushover fornisce in effetti informazioni, quanto meno sul piano qualitativo, su aspetti importanti della risposta che in analisi basate su una modellazione elastico-lineare sono messe in conto solo in modo forfettario attraverso l'introduzione euristica del cosiddetto fattore di struttura q , in particolare:

- permette di tener conto delle riserve di duttilità e di resistenza che la struttura conserva anche oltre il limite elastico;
- permette di tener conto del degrado di resistenza in elementi soggetti a deformazioni elevate;
- segnala la presenza di elementi potenzialmente fragili ed la loro influenza sulla sicurezza complessiva della struttura;
- segnala gli elementi e le zone della struttura potenzialmente soggette a deformazioni più elevate.

Informazioni generali sull'analisi pushover

L'analisi statica nonlineare (detta anche analisi pushover) si esegue sulla struttura di elevazione una volta che le armature risultino dimensionate. L'analisi è eseguita facendo variare la direzione sismica e la distribuzione delle accelerazioni sull'altezza del fabbricato. L'utente può impostare in particolare il numero di scansioni sismiche da effettuare e selezionare le distribuzioni di accelerazioni da applicare nell'analisi (solo lineare, solo costante, lineare e costante).

L'analisi è condotta applicando sulla struttura i carichi statici quasi-permanenti ed una distribuzione variabile di accelerazioni sismiche agenti in una prefissata direzione. Si instaura quindi un processo incrementale di carico sull'azione sismica, protratto fino al raggiungimento del collasso. Gli elementi resistenti sono considerati a comportamento elasto-plastico, a duttilità limitata e per essi sono valutate le rotazioni limiti allo snervamento e al collasso, secondo le indicazioni contenute nella Opcm 3274 e nelle Istruzioni per l'applicazione delle NTC 2008.

Nel corso dell'analisi sono riconosciuti i seguenti stati limite:

- stato limite di danno (SLD), segnalato dal primo raggiungimento dello scorrimento limite di interpiano, così come definito nel foglio Opzioni di verifica (vedi paragrafo omonimo nel seguito di questo capitolo), in corrispondenza di una delle maglie di telaio marcate per tale verifica nel foglio Travi;
- stato limite di salvaguardia vita (SLV), segnalato dal primo raggiungimento di una predefinita aliquota della rotazione di collasso in qualche elemento;
- stato limite di collasso (SLC), segnalato da una caduta di carico pari al 15% del valore massimo raggiunto.

Sia la Opcm 3274 che il Dm08 prevedono che tale tipo di analisi possa essere utilizzata per valutare con maggiore affidabilità il rapporto di sovraresistenza α_v/α_1 (fra le accelerazioni al limite

ultimo e al limite elastico) che interviene nel calcolo del fattore di struttura e come metodo alternativo per la valutazione della sicurezza sismica di edifici nuovi o esistenti. La valutazione della sicurezza sismica, in particolare, è eseguita calcolando le accelerazioni al suolo (a_g su roccia) sostenibili dalla struttura negli stati limite menzionati (SLD, SLV, SLC) e confrontandole con le corrispondenti accelerazioni di progetto, imposte dalla normativa.

Svolgimento dell'analisi

Si parte assumendo una distribuzione di accelerazioni, il più possibile rappresentativa del campo di accelerazioni indotto dal sisma. Indicando con \mathbf{w} la forma modale e con a_g il valore di riferimento dell'accelerazione sismica al suolo, il sistema di forze inerziali indotto sulla struttura è determinato dalla relazione:

$$a_g \mathbf{f} = a_g \rho \mathbf{M} \mathbf{w}$$

essendo \mathbf{M} la matrice delle masse della struttura e ρ il fattore di partecipazione definito dalla:

$$\rho = \frac{\mathbf{w}^T \mathbf{M} \mathbf{i}}{\mathbf{w}^T \mathbf{M} \mathbf{w}}$$

dove \mathbf{i} corrisponde ad un moto rigido unitario nella direzione dell'eccitazione sismica.

Si esegue una analisi statica nonlineare al passo assumendo la struttura soggetta ad un sistema di forze $\{a \mathbf{f}\}$, per incrementi successivi del parametro amplificativo a fino al collasso ultimo della struttura, tenendo conto sia dell'insorgenza di deformazioni plastiche che del degrado di resistenza negli elementi della struttura indotto da deformazioni eccessive. Come risultato si ottiene una successione di configurazioni di equilibrio $\{a_g, u\}$, che possono essere raccolte in una curva di equilibrio

$$a_g = a_g(u)$$

dove u è il valore scalare dello spostamento di riferimento, convenientemente definito dalla relazione

$$u = \frac{\mathbf{f}^T \mathbf{u}}{\mathbf{f}^T \mathbf{i}}$$

Si noti dalla precedente espressione che il valore dello spostamento di riferimento viene calcolato con una equivalenza energetica col lavoro di deformazione (spostamento = lavoro/forza). Questa modalità di calcolo ha il vantaggio di rendere i risultati di analisi indipendenti dalla scelta arbitraria del punto di controllo e dalle irregolarità in altezza della costruzione, dovute ad esempio alla presenza di torrioni o di piani di copertura inclinati o sfalsati.

Sulla curva di equilibrio sono individuati i punti corrispondenti agli stati limite di interesse:

stato limite elastico [SLE]:

corrisponde al punto in cui ha termine il comportamento elastico lineare;

stato limite di danno [SLD]:

rappresenta il punto in cui si ha il primo raggiungimento della raggiungimento dello scorrimento limite di interpiano in qualche maglia di telaio (fra quelle marcate);

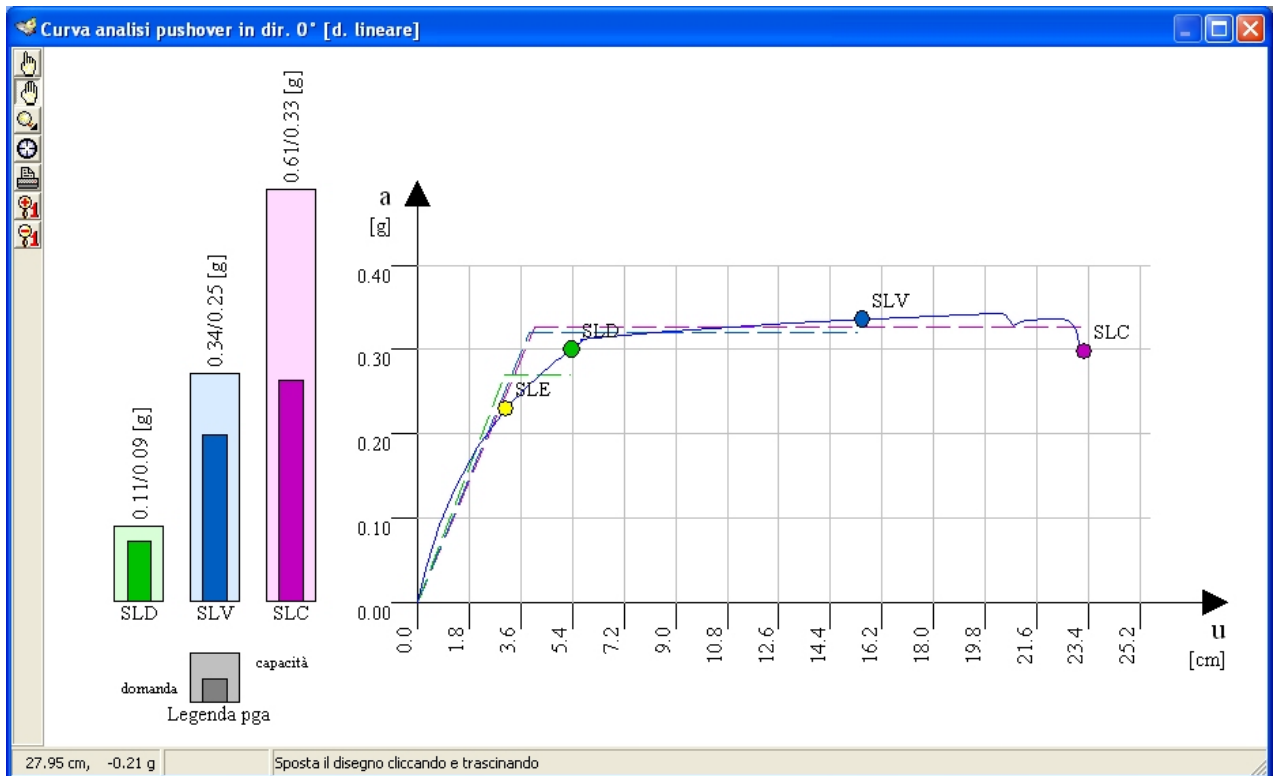
stato limite di salvaguardia vita [SLV]:

rappresenta il punto in cui si ha il primo raggiungimento di una aliquota prefissata (per default il 75%) della rotazione di collasso θ_u in qualche elemento;

stato limite di collasso [SLC]:

corrisponde ad una caduta di carico pari al 15% del valore massimo raggiunto.

L'osservazione della curva fornisce due informazioni significative del comportamento strutturale: il valore massimo dell'accelerazione sostenuta dalla struttura e l'escursione massima dello spostamento raggiunto. Il primo, considerato in rapporto alla accelerazione agente in corrispondenza al limite elastico, fornisce il cosiddetto rapporto di sovraresistenza che può essere utilizzato, come suggerito nelle norme, ai fini di una migliore caratterizzazione del fattore di struttura q e quindi a migliorare l'affidabilità dell'analisi lineare. La seconda individua, tramite il rapporto tra lo spostamento ultimo e quello al limite elastico, la duttilità complessiva della struttura, anche esso da porre in relazione col fattore di struttura q (valori ridotti della duttilità corrispondono a valori più bassi di q).



Vista di una curva di equilibrio ottenuta con l'analisi pushover

Verifica della capacità sismica negli stati limite SLD, SLV e SLC

Gli spostamenti u_L , u_S e u_C raggiunti nei punti limite SLD, SLV e SLC sono particolarmente significativi per una valutazione della capacità sismica della struttura. E' infatti possibile condurre una verifica "pushover" per ognuno degli stati limite menzionati, nel modo seguente:

La curva viene semplificata e ridotta a curva bilineare, caratterizzata da una rigidezza equivalente K_e , da una accelerazione equivalente allo snervamento a_y . Si viene così a definire un sistema elastoplastico ad un grado di libertà. E' possibile anche caratterizzare la risposta sismica di quest'ultimo attraverso la risposta sismica del sistema elastico corrispondente, di rigidezza K_e e quindi di periodo proprio

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{K_e g}}$$

Si è visto infatti, attraverso correlazioni statistiche che, sotto azione sismica, i due sistemi presentano la stessa escursione massima in spostamenti se $T > T_c$.

Per $T < T_c$, l'escursione in spostamento del sistema nonlineare u_{RN} è in generale maggiore di quella del sistema elastico u_{RE} , ma può essere messa in relazione con quest'ultima attraverso la formula:

$$u_{RN} = u_{RE} \frac{1 + (q^* - 1)T_c/T}{q^*}$$

dove il fattore q^* è calcolato in funzione del rapporto tra l'accelerazione spettrale $a_s = a_g S(T)$ e l'accelerazione al limite di snervamento del sistema bilineare equivalente a_y

$$q^* = \max(1; a_s/a_y)$$

Lo spostamento richiesto u_{RN} può essere pertanto espresso in funzione dell'accelerazione di riferimento al suolo a_g . Eguagliando l'espressione dello spostamento richiesto u_{RN} con gli spostamenti disponibili u_L , u_S ed u_C ai diversi limiti considerati, possono essere pertanto valutate le corrispondenti accelerazioni ammissibili al suolo (Accelerazione di picco al suolo o "pga").

Una volta che le accelerazioni al suolo sostenibili per gli stati limite SLD, SLV e SLC siano state calcolate, la verifica si intende soddisfatta se queste risultano maggiori delle corrispondenti accelerazioni al suolo di progetto (accelerazioni richieste), ovvero:

Verifica per s.l. di Danno (SLD) soddisfatta se	$pga_{SLD} \geq a_{gd}$
Verifica per s.l. di Salvaguardia Vita (SLV) soddisfatta se	$pga_{SLV} \geq a_{gv}$
Verifica per s.l. di Collasso (SLC) soddisfatta se	$pga_{SLC} \geq a_{gc}$

Le accelerazioni al suolo di progetto a_{gd} , a_{gv} , a_{gc} sono quelle impostate nel foglio Parametri sismici e corrispondono alle accelerazioni di riferimento del sito A_g^* , relative ai tre periodi di ritorno dell'azione sismica (per s.l. di danno, per s.l. ultimo, per s.l. di collasso). In termini di probabilità di superamento nella vita di riferimento P_{VR} , si hanno le seguenti corrispondenze:

a_{gd}	per s.l. di Danno (SLD)	corrispondente alla P_{VR} del 63%,
a_{gv}	per s.l. di Salvaguardia vita (SLV)	corrispondente alla P_{VR} del 10%,
a_{gc}	per s.l. di Collasso (SLC)	corrispondente alla P_{VR} del 5%.

Nel disegno della curva pushover sono riportati al riguardo tre istogrammi di verifica per i tre stati limite SLD, SLV e SLC, che riportano in grafico le pga sostenibili e quelle richieste e consentono di apprezzare immediatamente il soddisfacimento della verifica.

E' utile ricordare che una valutazione di sicurezza condotta in questo modo soffre fortemente delle assunzioni semplificative fatte, che non sempre trovano un pieno riscontro nella realtà sempre molto complessa ed articolata del comportamento strutturale. L'analisi pushover consente tuttavia di arricchire notevolmente le informazioni ottenute dall'analisi dinamica modale condotta in campo elastico ed insieme a questa fornisce un quadro complessivo utile ad una migliore e più affidabile dimensionamento della struttura. In particolare, permette di valutare, a valle del progetto delle armature, se effettivamente la struttura così progettata soddisfa le caratteristiche di duttilità richieste e quindi se il fattore di struttura utilizzato (assegnato da input) sia adeguato alle effettive risorse di duttilità della struttura.

Implementazione in Edisis

L'implementazione in Edisis dell'analisi statica nonlineare è svolta secondo quanto esposto in precedenza. Sono considerati i seguenti carichi:

- Carichi permanenti (assunti costanti nell'analisi)
- Carichi termici, affetti dal fattore di combinazione Ψ_2 (assunti costanti nell'analisi)
- Carichi variabili statici, Ψ_2 (assunti costanti nell'analisi)
- Azioni statiche $a_g f$, prodotte da una distribuzione di accelerazioni sismiche orizzontali, proporzionalmente crescenti.

e l'analisi è ripetuta per valori diversi dell'angolo di incidenza sismico, e per diverse distribuzioni di accelerazioni (costante o lineare lungo l'altezza).

All'attivazione dell'analisi, compare una finestra in cui vengono assegnati i parametri necessari. Questi ultimi sono inizializzati con valori di default ma possono essere variati dall'utente in relazione a esigenze specifiche.

Le rotazioni al limite di snervamento e al collasso sono inoltre valutate secondo le indicazioni fornite dall'Opcm 3274 e dalle Istruzioni Ntc2008, come riportato nei seguenti paragrafi.

Rotazione limite di snervamento

Per la valutazione della rotazione limite di snervamento θ_y si fa riferimento alle seguenti espressioni pubblicate nella Opcm 3274 e nelle Istruzioni Ntc2008:

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right) + 0.13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \text{per travi e pilastri}$$

Per i riferimenti di normativa vedi: Opcm 3274 p. 11.1a / Istruzioni Ntc2008 p. 8.7.2.1 a.

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0.0020 \left(1 - 0.125 \frac{L_v}{h} \right) + 0.13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \text{per pareti}$$

Per i riferimenti di normativa vedi: Opcm 3274 p. 11.1b / Istruzioni Ntc2008 p. 8.7.2.1 b.

in cui:

L_v	luce di taglio, ovvero distanza fra la sezione di estremità e quella a momento nullo,	
ϕ_y	curvatura a snervamento della sezione terminale,	
h	altezza della sezione,	
d_b	diametro medio delle barre longitudinali,	
f_c	resistenza a compressione del calcestruzzo	[espresso in Mpa],
f_y	resistenza a snervamento dell'acciaio longitudinale	[espresso in Mpa].

Rotazione limite di collasso

Per la valutazione della rotazione limite a collasso θ_u si fa riferimento alla seguente espressione pubblicata nella Opcm 3274 e nelle Istruzioni Ntc08:

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{PL} \left(1 - \frac{0.5 L_{PL}}{L_V} \right) \right)$$

Per i riferimenti di normativa vedi: Opcm 3274 p. 11.A.3 / Istruzioni Ntc2008 p. C8F.5.

in cui:

- γ_{el} fattore riduttivo di duttilità (pari a 1.5 per elementi primari e ad 1.0 per elementi secondari),
- θ_y rotazione rispetto alla corda allo snervamento
- ϕ_u curvatura ultima valutata considerando le deformazioni ultime del conglomerato (tenuto conto del confinamento) e dell'acciaio
- ϕ_y curvatura a snervamento valutata considerando l'acciaio alla deformazione di snervamento
- L_V luce di taglio, ovvero distanza fra la sezione di estremità e quella a momento nullo,
- L_{PL} lunghezza di cerniera plastica, valutabile come:

$$L_{PL} = 0.1 L_V + 0.17 h + 0.24 \frac{d_{bL} f_y}{\sqrt{f_c}}$$

in cui:

- h altezza della sezione,
- d_{bL} diametro medio delle barre longitudinali
- f_c resistenza a compressione del calcestruzzo [Mpa],
- f_y resistenza a snervamento dell'acciaio longitudinale [Mpa],
- f_{yw} resistenza a snervamento dell'acciaio trasversale.

La deformazione ultima del calcestruzzo confinato si valuta con la seguente espressione:

$$\varepsilon_{cu}^* = \varepsilon_{cu} + 0.25 \alpha \rho_s f_y / f_c$$

in cui:

- ε_{cu}^* deformazione ultima del calcestruzzo confinato
- ε_{cu} deformazione ultima del calcestruzzo adottata per le verifiche slv (tipicamente 0.0035)
- ρ_s percentuale di armatura trasversale $\rho_s = n_b A_{st} / b_o s_h$
- s_h interasse delle staffe nella zona critica,
- n_b numero di bracci staffe,
- A_{st} area trasversale del tondino staffa,
- α fattore di efficienza del confinamento:

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o} \right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o} \right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6h_o b_o} \right)$$

$b_o h_o$ base ed altezza del nucleo confinato,

b_i distanze delle barre longitudinali trattenute da tiranti o staffe presenti sul perimetro.

Il fattore di efficienza del confinamento α così calcolato viene quindi moltiplicato per il fattore riduttivo di duttilità per carenza di confinamento, assegnato come opzione nel quadro di avvio dell'analisi (vedi paragrafo successivo).

A titolo informativo si riporta anche una espressione alternativa per la rotazione al collasso, non utilizzata nella presente versione del programma, pubblicata nella Opcm 3274 e nelle Istruzioni Ntc2008:

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 (0.3^v) \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} \right]^{0.225} (L_V/h)^{0.35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} 1.25^{100 \rho_d}$$

Per i riferimenti di normativa vedi: Opcm 3274 p. 11.A.1 / Istruzioni Ntc2008 p. C8F.1.

in cui:

- L_V luce di taglio, ovvero distanza fra la sezione di estremità e quella a momento nullo,
- γ_{el} fattore riduttivo di duttilità (pari a 1.5 per elementi primari e ad 1.0 per elementi secondari),
- $b h$ base ed altezza della sezione,

ν	sfuerzo assiale normalizzato di compressione	$\nu = N/(A_c f_c)$
ω	percentuale meccanica di armatura longitudinale in trazione	$\omega = A_s f_y / (b h f_c)$
ω'	percentuale meccanica di armatura longitudinale in compressione	$\omega' = A'_s f_y / (b h f_c)$
f_c	resistenza a compressione del calcestruzzo,	
f_y	resistenza a snervamento dell'acciaio longitudinale,	
f_{yw}	resistenza a snervamento dell'acciaio trasversale,	
ρ_{sx}	percentuale di armatura trasversale	$\rho_{sx} = n_b A_{st} / b_o s_h$
s_h	interasse delle staffe nella zona critica,	
n_b	numero di bracci staffe,	
A_{st}	area trasversale del tondino staffa,	
s_h	interasse delle staffe nella zona critica,	
ρ_d	percentuale di eventuali armature diagonali,	
α	fattore di efficienza del confinamento (già definito nel precedente capoverso):	

Avvio dell'analisi pushover

Scegliendo "Analisi statica nonlineare" dal menù Analisi compare la seguente finestra. Nei due riquadri superiori è possibile impostare alcuni parametri specifici per l'analisi pushover ed avviare l'analisi dal pulsante omonimo. Ad analisi conclusa, nei riquadri sottostanti verranno riportati i risultati principali ottenuti. Il significato delle quantità è di seguito descritto.

Forme di distribuzione dell'accelerazione sismica

Aperto la tendina si ha la possibilità di scegliere fra le seguenti opzioni:

- Costante sull'altezza
- Lineare sull'altezza
- Costante e lineare sull'altezza

Nei primi due casi l'analisi nonlineare per una data direzione sismica è eseguita solo per la distribuzione selezionata, nel terzo l'analisi è eseguita due volte, applicando prima la distribuzione costante e poi quella lineare.

Numero di direzioni angolari per l'azione sismica

Il parametro fissa il numero di direzioni angolari su cui far variare l'azione sismica nell'analisi nonlineare. Se ad esempio si fissano 4 direzioni verranno effettuate 4 analisi incrementali al passo separate, orientando i carichi orizzontali rispettivamente secondo le angolazioni 0°, 90°, 180°, 270° rispetto all'asse X orizzontale.

Fattore riduttivo di duttilità per elementi travi e pilastri

Corrisponde al fattore riduttivo di duttilità γ_{el} che interviene nel calcolo della rotazione limite di collasso θ_u di una sezione di verifica.

La norma indica il valore 1.5 per tale parametro [Opcm 3274 p. 11.A / Istruzioni Ntc2008 p.C8F].

Fattore riduttivo di duttilità per elementi parete

Corrisponde ad un ulteriore fattore riduttivo che si applica in caso di pareti all'espressione della rotazione limite di collasso θ_u di una sezione. In EDISIS, date le modalità con cui viene svolta l'analisi non si ha una distinzione netta tra pilastri normali e pilastri-parete. Ai fini dell'utilizzo del fattore si considera pilastro (e quindi il fattore non viene applicato) se il rapporto $H/B < 2$ e si considera parete se $H/B > 5$, applicando una interpolazione lineare nei casi intermedi.

La norma indica il valore 1.6 per tale parametro [Opcm 3274 p.11.A / Istruzioni Ntc2008 p.C8F].

Fattore riduttivo di duttilità per carenza di dettagli sismici

Rappresenta un ulteriore fattore moltiplicativo di sicurezza da applicare all'espressione della rotazione limite di collasso θ_u di una sezione, nel caso gli elementi resistenti non siano dotati di adeguati dettagli di tipo antisismico, ossia non rispettino le percentuali minime di armatura trasversale e longitudinale indicate dalla normativa.

La norma indica il valore 0.85 per tale parametro [Opcm 3274 p.11.A / Istruzioni Ntc2008 p.C8F].

Fattore riduttivo di duttilità per carenza di confinamento

Rappresenta un fattore riduttivo dell'efficienza del confinamento prodotto dall'armatura trasversale e come tale viene applicato al termine α introdotto al paragrafo precedente.

Nel caso le staffe non siano dotate di adeguati ancoraggi idonei ad evitare l'eventuale loro apertura la norma dispone di assumere un fattore nullo, che equivale a trascurare completamente l'effetto di duttilità prodotto dal confinamento [Istruzioni Ntc2008 p.C8F].

Riduzione della duttilità limite per lo stato limite di Salvaguardia vita

Lo stato limite di Salvaguardia vita (Danno Severo) corrisponde al raggiungimento di danni importanti e generalmente irreversibili. Ai fini dell'analisi tale stato limite è definito dal primo raggiungimento, in una qualsiasi sezione della struttura, della rotazione limite di danno severo, che generalmente si ricava dalla rotazione limite di collasso applicando un opportuno fattore riduttivo.

La norma indica il valore 0.75 per tale parametro [Opcm 3274 p.11.3.2.1 / Istruzioni Ntc2008 p.C8.7.2.5].

Quadro riassuntivo dell'analisi pushover

Dopo aver eseguito l'analisi nello stesso foglio che ha consentito l'avvio dell'analisi vengono riportate le principali informazioni di calcolo e di verifica relative all'analisi sismica pushover.

Forma e direzioni della spinta sismica				
acc. sismica	Costante e Linear		n. direzioni	4
Analisi				
Fattori riduttivi della duttilità a collasso				
riduzione per Travi e Pilastri	1,50	per Pareti ($H > 5 \cdot B$)	1,60	
per carenza dettagli sismici	0,85	car. confinamento	1,00	
valori default		riduzione della rotazione limite per SLV	0,75	
Accelerazione al suolo				
	SLD	SLV	SLC	
pga richiesta (domanda)	0,091	0,250	0,330	
pga ammissibile (capacità)	0,092	0,278	0,416	
Duttilità limite				
	SLD	SLV	SLC	
valore ammissibile / richiesto	1,014	1,124	1,293	
Stima del fattore di struttura q (SLV)				
rapporto minimo di sovrarresistenza au/al	1,50		Ris. Analisi	
calcolato dal rapporto di sovrarresistenza	4,51		Ris. Verifica	
calcolato dalla verifica di duttilità pushover	4,58		Curve push.	

Accelerazione al suolo

Viene riportata l'accelerazione al suolo (Peak Ground Acceleration PGA) riferita a suolo su roccia (categoria A) nel valore richiesto e nel valore di capacità, per i tre stati limite di verifica (SLD, SLV, SLC).

Il valore richiesto è direttamente il valore della accelerazione al suolo assegnato nel foglio dei parametri sismici per lo stato limite, il valore di capacità è invece ottenuto dalla verifica pushover svolta e rappresenta il valore minimo fra tutte le analisi eseguite, al variare della direzione sismica e della distribuzione delle accelerazioni lungo l'altezza. La verifica consiste nel controllare che la pga ammissibile (capacità) sia maggiore della pga richiesta (domanda).

Se la verifica non è soddisfatta il valore di capacità viene riportato in rosso.

Duttilità limite

Viene riportato il rapporto fra lo spostamento ammissibile (capacità) e lo spostamento richiesto (domanda) per i tre stati limite di verifica (SLD, SLV, SLC).

La verifica consiste nel controllare che la duttilità limite sia non inferiore ad uno, ovvero che la capacità di spostamento sia superiore alla richiesta di spostamento.

Se la verifica non è soddisfatta il valore viene riportato in rosso.

Stima del fattore di struttura

Come dicevamo in precedenza, una delle finalità riservate all'analisi pushover è quella di fornire una migliore stima del fattore di struttura, che interviene nella valutazione delle accelerazioni spettrali nell'ambito dell'analisi modale elastica.

Fattore di struttura calcolato in funzione del rapporto di sovraresistenza

In particolare, l'analisi pushover fornisce il rapporto di sovraresistenza α_u/α_1 al variare della direzione sismica e della distribuzione delle accelerazioni lungo l'altezza. Secondo quanto espressamente suggerito dal Dm 2004, il fattore di struttura q può essere ricavato in funzione del rapporto di sovraresistenza con la relazione:

$$q = K_r K_w K_a \alpha_u/\alpha_1$$

in cui:

K_r	è il fattore di regolarità strutturale	$0.8 \leq K_r \leq 1.0$,
K_w	è il fattore di presenza di pareti	$0.5 \leq K_w \leq 1.0$,
K_a	è il fattore di sovraresistenza	$1.5 \leq K_a \leq 4.5$,
	dipendente dalla tipologia strutturale e dalla classe di duttilità,	
α_u/α_1	è il rapporto di sovraresistenza.	

Si tenga conto che questa stima, che spesso è conservativa ma che può risultare anche pericolosamente sovrastimata, si basa comunque su valutazioni euristiche e su dati qualitativi desunti dalla tipologia strutturale, che tengono conto solo di uno dei aspetti del comportamento elasto-plastico, cioè della sovraresistenza fra carico di collasso e carico al limite elastico, ma non mette in conto in modo esauriente la capacità di duttilità della struttura. Pertanto il valore ottenuto dalla stima, per quanto utilissimo per confrontare tra loro soluzioni progettuali diverse, deve essere utilizzato con grande prudenza. Si consiglia, almeno nella fase attuale di sperimentazione della normativa, di assumere, a vantaggio di sicurezza e come peraltro suggerito nello stesso Dm, valori di q corrispondenti ad un rapporto di sovraresistenza non superiore ad 1.6.

Fattore di struttura calcolato dalla verifica di duttilità pushover

Edisil fornisce una via alternativa, da ritenersi più affidabile, per il calcolo del fattore di struttura che si basa direttamente sul controllo di duttilità operato dalla verifica pushover. La stima è ottenuta estrapolando i risultati dell'analisi pushover in corrispondenza allo stato limite di Salvaguardia vita (Danno severo) e tenendo conto della relazione esistente tra l'incremento del fattore q e la conseguente riduzione della resistenza della struttura. Il valore fornito rappresenta pertanto una stima estrapolativa del fattore q che corrisponderebbe all'equaglianza fra lo spostamento richiesto (domanda di spostamento) e quello ammissibile (capacità di spostamento).

Questa stima presenta il vantaggio di utilizzare in maniera completa i risultati dell'analisi restando indipendente dai fattori qualitativo-empirici che figurano nell'espressione del paragrafo precedente. Anche in questo caso, tuttavia, la stima ottenuta, proprio in quanto basata su una estrapolazione, deve essere utilizzata con prudenza, evitando, a vantaggio di sicurezza, valori di q troppo elevati o comunque fortemente discosti dalla stima precedente.

Risultati analisi pushover

La griglia dei risultati dell'analisi pushover riporta le principali informazioni di calcolo relativamente ad ogni direzione sismica analizzata:

dir	Indicazione della direzione sismica e della distribuzione delle accelerazioni, la direzione è espressa come angolo antiorario rispetto all'asse X, la distribuzione di accelerazioni è indicata con C se costante, con L se lineare,
trv, pil	il numero di travi e pilastri plasticizzati,
ae	l'accelerazione corrispondente al limite elastico [g],
au	l'accelerazione massima raggiunta [g],
au/ae	fattore di sovraresistenza

q_r il fattore di struttura corrispondente (assumendo la limitazione au/ae ≤ 1.5),
 pga_r l'accelerazione al suolo [g] corrispondente all'accelerazione au.

Analisi a scansione										
id	dir	heq	trv	pil	ae	au	au/ae	q _r	pga _r	
1	0° C	8,92	2	19	0,19	0,33	1,73	5,20	0,57	
2	0° L	9,76	7	18	0,20	0,37	1,87	5,61	0,67	
3	90° C	8,92	7	17	0,17	0,38	2,30	6,89	0,86	
4	90° L	9,76	22	8	0,14	0,39	2,78	8,34	1,05	
5	180° C	8,92	3	19	0,17	0,33	1,95	5,85	0,64	
6	180° L	9,76	6	20	0,16	0,37	2,33	6,98	0,83	
7	270° C	8,92	16	19	0,16	0,37	2,27	6,81	0,84	
8	270° L	9,76	21	7	0,17	0,37	2,17	6,50	0,80	

I fattori di struttura riportati in questa tabella sono quelli che si ottengono dal corrispondente valore di sovrarresistenza au/ae ed applicando gli altri fattori che tengono conto della regolarità strutturale in pianta ed in altezza e della tipologia strutturale (a nucleo, a telaio, mista telaio parete ecc). Questi fattori compaiono nella espressione del fattore di struttura riportata in normativa [Opcm 3274 punto 5.3.2, Dm08 punto 7.4.3.2] e sono riportati nel foglio Fattori spettrali.

Il valore dell'accelerazione al suolo sostenibile riportata in questa tabella (pga_r) è ricavata con un approccio di verifica in termini di resistenza, ovvero è l'accelerazione al suolo a cui corrisponde una accelerazione spettrale (ottenuta applicando il fattore di struttura q_r) pari a quella limite (ay) del sistema bilineare equivalente. Il valore di pga_r così ottenuto non è richiesto espressamente dalla normativa ed è riportato come utile completamento dell'informazione. In particolare pga_r è analogo al valore pga_c (accelerazione al suolo al collasso) riportato nella tabella dei risultati di verifica pushover, con la differenza che quest'ultimo è ottenuto con un approccio agli spostamenti, ovvero è l'accelerazione al suolo a cui corrispondente uno spostamento richiesto pari allo spostamento massimo disponibile.

Risultati verifica pushover

Come abbiamo già detto l'analisi pushover è ripetuta per diverse direzioni sismiche e per una o più ipotesi di distribuzione di accelerazioni sull'altezza del fabbricato. A valle di ciascuna analisi viene definito il sistema ridotto equivalente e condotta la verifica pushover per i diversi stati limite considerati (SLD, SLV e SLC). I risultati delle verifiche condotte al variare delle direzioni angolari del sisma e della distribuzione delle accelerazioni sull'altezza sono riportate nella seguente griglia, nella quale i risultati per i tre stati limite di interesse sono riportati su tre righe corrispondenti.

In particolare, i valori riportati sono nell'ordine:

dir indicazione della direzione sismica e della distribuzione delle accelerazioni,
 la direzione è espressa come angolo antiorario rispetto all'asse X,
 la distribuzione di accelerazioni è indicata con C se costante, con L se lineare,

S.L. stato limite di riferimento:

SDL Danno (ovvero Danno Limitato secondo la terminologia Opcm),
 SLV Salvaguardia vita (ovvero Danno Severo secondo la terminologia Opcm),
 SLC Collasso,

Te periodo proprio del sistema bilineare equivalente,
 ay accelerazione limite del sistema bilineare equivalente,
 ur spostamento richiesto in rapporto all'altezza equivalente,
 ux spostamento ammissibile in rapporto all'altezza equivalente,
 pgar accelerazione richiesta di picco al suolo (su roccia),
 pga accelerazione ammissibile di picco al suolo (su roccia),
 q_{ef} fattore di struttura ottenuto dalla verifica a danno severo.

id	dir	S.L.	Te	ay	ur	ux	pgar	pga	q_ef	
1	0°	SLD: Danno	0.62	0.26	0.43	0.49	0.09	0.10	--	
		SLV: S.Vita	0.65	0.32	1.15	1.32	0.25	0.29	4.67	
		SLC: Collasso	0.65	0.32	1.25	1.86	0.33	0.48	--	
2	0°	L	SLD: Danno	0.66	0.27	0.43	0.52	0.09	0.11	--
		SLV: S.Vita	0.70	0.34	1.15	1.58	0.25	0.34	5.09	
		SLC: Collasso	0.70	0.34	1.26	2.34	0.33	0.61	--	
3	90°	C	SLD: Danno	0.52	0.30	0.31	0.33	0.09	0.10	--
		SLV: S.Vita	0.53	0.36	0.86	0.98	0.25	0.28	4.65	
		SLC: Collasso	0.53	0.36	0.95	1.22	0.33	0.42	--	
4	90°	L	SLD: Danno	0.55	0.29	0.32	0.33	0.09	0.09	--
		SLV: S.Vita	0.58	0.37	0.88	1.14	0.25	0.32	5.53	
		SLC: Collasso	0.58	0.38	0.97	1.64	0.33	0.54	--	
5	180°	C	SLD: Danno	0.62	0.26	0.43	0.48	0.09	0.10	--
		SLV: S.Vita	0.65	0.32	1.14	1.30	0.25	0.29	4.67	
		SLC: Collasso	0.65	0.32	1.24	1.88	0.33	0.49	--	
6	180°	L	SLD: Danno	0.65	0.27	0.43	0.52	0.09	0.11	--
		SLV: S.Vita	0.69	0.34	1.14	1.57	0.25	0.34	5.12	
		SLC: Collasso	0.70	0.35	1.25	2.30	0.33	0.60	--	
7	270°	C	SLD: Danno	0.51	0.30	0.31	0.33	0.09	0.10	--
		SLV: S.Vita	0.52	0.35	0.85	0.96	0.25	0.28	4.58	
		SLC: Collasso	0.53	0.36	0.93	1.21	0.33	0.42	--	
8	270°	L	SLD: Danno	0.55	0.29	0.32	0.33	0.09	0.09	--
		SLV: S.Vita	0.57	0.36	0.87	1.05	0.25	0.30	5.03	
		SLC: Collasso	0.57	0.37	0.95	2.06	0.33	0.68	--	

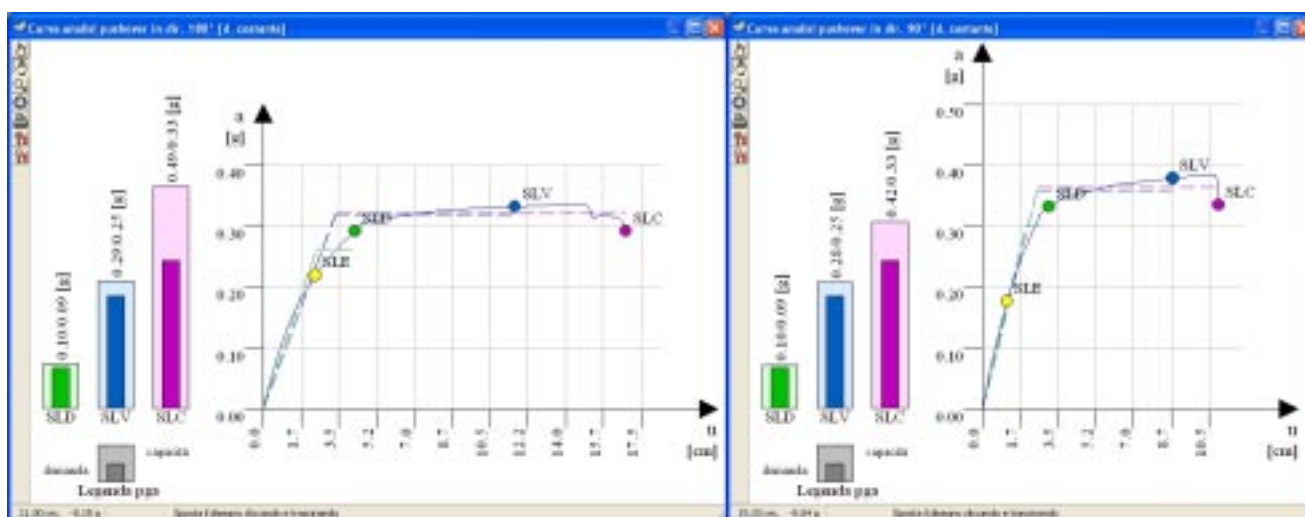
La verifica risulta soddisfatta se per gli stati limite di interesse risulta:

- $pga \geq pgar$ (capacità in accelerazione al suolo maggiore della domanda), ovvero in termini equivalenti se:
- $ux \geq ur$ (capacità in spostamento maggiore della domanda).

Nel caso di verifica non soddisfatta i valori di capacità ux e pga sono riportati in rosso.

Foglio Curve pushover

Nel foglio è possibile esaminare e scorrere le varie curve di equilibrio ottenute dall'analisi statica nonlineare, al variare della direzione sismica e dell'ipotesi di distribuzione delle accelerazioni sull'altezza del fabbricato. Per ogni analisi eseguita è disponibile una curva di equilibrio che sintetizza in maniera efficace i risultati del processo. Ogni punto della curva, espresso nelle coordinate $[a, u]$ (accelerazione-spostamento), rappresenta uno stato di equilibrio della struttura ed esprime il fatto che la struttura assoggettata all'accelerazione sismica a manifesta un valore di spostamento u .



Barra Strumenti

Nel foglio è presente una barra strumenti con i comandi usuali di gestione, comuni a tutte le finestre di disegno, che consentono di eseguire zoom, spostamenti, operazioni di preview e stampa.

Per passare alla curva successiva o precedente è possibile cliccare sui pulsanti della barra dei comandi frequenti:





Consente di passare alla curva dell'analisi successiva



Consente di passare alla curva dell'analisi precedente

La costruzione delle curve pushover

Le curve pushover sono le curve di equilibrio ottenute per ogni analisi statica nonlineare eseguita. Ricordiamo che l'utente ha la possibilità di stabilire il numero di scansioni angolari da utilizzare nell'analisi pushover e di selezionare le ipotesi di distribuzione delle accelerazioni sismiche lungo l'altezza del fabbricato. Stante queste impostazioni, il programma esegue le analisi in successione, facendo ogni volta variare l'angolo della direzione sismica e l'ipotesi di distribuzione delle accelerazioni.

L'analisi è svolta con processo incrementale iterativo, amplificando gradualmente l'accelerazione sismica in ogni passo di carico. Per ogni passo si perviene alla soluzione di equilibrio e si controlla lo stato di duttilità presente negli elementi, confrontando le rotazioni plastiche con i corrispondenti valori limiti, al fine di stabilire il contributo elastoplastico del singolo elemento alla soluzione. In particolare, raggiunta la soglia di plasticizzazione, il contributo dell'elemento in termini di forze rimarrà costante fino al collasso, determinato quest'ultimo dal raggiungimento della duttilità limite. Una volta raggiunto lo stato di collasso, ogni contributo dell'elemento sarà nullo.

Nel corso del processo di carico si identificano in successione i punti che corrispondono agli stati limite di interesse:

- lo **stato limite elastico [SLE]**, corrispondente al punto in cui ha termine il comportamento elastico lineare,
- lo **stato limite di danno [SLD]**, che rappresenta il punto in cui si ha il primo raggiungimento dello scorrimento limite di interpiano in qualche maglia di telaio (fra quelle marcate),
- lo **stato limite di salvaguardia vita [SLV]**, che rappresenta il punto in cui si ha il primo raggiungimento di una aliquota prefissata (75%) della rotazione di collasso θ_u ,
- lo **stato limite di collasso [SLC]**, corrispondente ad una caduta di carico pari al 15% del valore massimo raggiunto.

Interpretazione delle curve pushover

Esaminando una curva si possono evidenziare alcune caratteristiche generali. Si nota ad esempio un primo tratto rettilineo, che corrisponde al comportamento elastico lineare del modello, al termine del quale inizia la fase di fessurazione e di plasticizzazione e il percorso di equilibrio mostra zone di marcata curvatura, sebbene continui generalmente a crescere. Raggiunta la massima portanza, iniziano a manifestarsi collassi locali in qualche elemento e la curva inizia a decrescere, fino a che non si raggiungano le condizioni dello stato limite di collasso (perdita di portanza superiore al 15%) che porta alla terminazione dell'analisi.

Una informazione rilevante che si può ricavare dall'osservazione di una curva è l'escursione tra l'accelerazione massima raggiunta (α_u) e quella al limite elastico (α_1), da cui dipende il cosiddetto rapporto di sovrarresistenza α_u/α_1 utilizzabile ai fini di una migliore caratterizzazione del fattore di struttura q . In questa accezione, un risultato conseguito mediante l'analisi statica non lineare può essere utilizzato per migliorare l'affidabilità dell'analisi lineare.

L'escursione fra lo spostamento ultimo e lo spostamento elastico può inoltre dare una idea della duttilità complessiva posseduta dalla struttura e sulla sua capacità di escursione in campo plastico. Sulla curva sono chiaramente evidenziati con pallini di colore diverso i punti al limite elastico [SLE], di danno [SLD], di salvaguardia vita [SLV] e di collasso [SLC]. Sono altresì visibili gli schemi bilineari equivalenti, utilizzati per le verifiche degli stati limite corrispondenti.

Istogrammi per la verifica delle accelerazioni al suolo

Come abbiamo già detto in un precedente paragrafo, il processo di verifica porta alla valutazione delle accelerazioni al suolo sostenibili per gli stati limite SLD, SLV e SLC e al loro confronto con le corrispondenti accelerazioni al suolo di progetto a_{gd} , a_{gv} ed a_{gc} (accelerazioni richieste).

In particolare, la verifica è soddisfatta se:

- | | |
|--|-------------------------|
| per lo s.l. di Danno (SLD) risulta | $pga_{SLD} \geq a_{gd}$ |
| per lo s.l. di Salvaguardia vita (SLV) risulta | $pga_{SLV} \geq a_{gv}$ |
| per lo s.l. di Collasso (SLC) risulta | $pga_{SLC} \geq a_{gc}$ |

Per rendere più immediata l'informazione sul soddisfacimento di tali verifiche, nel disegno della curva pushover sono riportati tre istogrammi, che riportano in grafico le pga sostenibili e quelle richieste di verifica per i tre stati limite SLD, SLV e SLC.