

## **Note per l'analisi di edifici esistenti in c.a. con Edisis v.9**

Edisis v.9x è un programma di calcolo strutturale per la modellazione e l'analisi strutturale di edifici in c.a. Le caratteristiche e le funzioni di cui è dotato lo rendono adatto sia per il progetto delle nuove costruzioni, sia per la verifica e l'adeguamento di quelli esistenti, come vedremo in questa pubblicazione. In quest'ultimo caso, trovano applicazione i criteri e le disposizioni di normativa, riportate al capitolo 8 delle Ntc08 e al capitolo C8 delle relative istruzioni (C.M. n.627/09), che è utile richiamare sinteticamente. Entriamo nell'argomento descrivendo per larghe linee le fasi principali che sono tipicamente richieste per affrontare una analisi di questo tipo.

### **Rilievo dello stato di fatto**

In questa fase si esegue il rilievo dell'edificio allo stato di fatto, con riguardo agli aspetti geometrici, ai dettagli costruttivi, alla caratterizzazione dei materiali ed alla ricostruzione della storia edificatoria dell'edificio. Particolare attenzione sarà riservata allo stato di conservazione degli elementi resistenti ed alla valutazione delle loro capacità meccaniche, mediante una campagna di prove più o meno estese in funzione delle necessità contingenti e differenziate per i vari materiali: cemento armato, muratura, acciaio. Il livello di conoscenza raggiunto in questa fase avrà una ricaduta diretta sui risultati di analisi in quanto porta anche all'adozione di valori più o meno alti dei fattori di confidenza, previsti dalle Ntc08 come ulteriori fattori di sicurezza da applicare alle caratteristiche meccaniche dei materiali allo stato di fatto.

### **Fattore di confidenza**

Il fattore di confidenza è un fattore di sicurezza riguardante i materiali della struttura esistente, da assumere in base al livello di conoscenza raggiunto nelle indagini preliminari (analisi storico-critica, rilievi, caratterizzazione meccanica dei materiali), anche in maniera differenziata per il calcestruzzo e per il ferro. Per edifici in c.a., le incertezze maggiori sono tipicamente sul calcestruzzo e di solito sono minori per il ferro che, per le caratteristiche di produzione, è affetto da una minore variabilità, ma in ogni caso sono sempre da considerare possibili fenomeni di deterioramento avvenuti nel tempo.

I fattori di confidenza vanno preliminarmente a ridurre i valori medi di resistenza dei materiali della struttura esistente, per ricavare i valori da adottare nel progetto o nella verifica e da ulteriormente ridurre, quando previsto, mediante i coefficienti parziali di sicurezza (C8.2).

Nell'analisi di edifici esistenti i fattori di confidenza hanno un duplice scopo (p.C8.7.2.4):

- a) per definire le resistenze dei materiali da utilizzare nelle formule di capacità degli elementi duttili e fragili; le resistenze medie, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono divise per i fattori di confidenza;
- b) per definire le sollecitazioni trasmesse dagli elementi duttili a quelli fragili; a tale scopo, le resistenze medie degli elementi duttili, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono moltiplicate per i fattori di confidenza.

### **Definizione del modello e dei materiali**

Si procede quindi con la costruzione del modello di calcolo in Edisis v.9, sfruttando alcune funzionalità del programma che consentono di:

- definire in dettaglio le caratteristiche meccaniche dei materiali (calcestruzzo e ferro),
- definire in dettaglio la quantità di armatura (longitudinale e trasversale presente negli elementi), per impostazione diretta o mediante analisi simulata,
- eseguire l'analisi sismica lineare (dinamica modale) con fattore  $q$  e le relative verifiche,
- eseguire l'analisi sismica statica non lineare (analisi pushover), come metodo autonomo di verifica sismica o come ausilio per l'analisi lineare per valutare in maniera affidabile il fattore  $q$  effettivamente disponibile.

Nella costruzione del modello trovano applicazione le informazioni ottenute nel rilievo dello stato di fatto, quali il dimensionamento geometrico degli elementi e la definizione dei materiali. Verranno inoltre definiti i carichi di servizio in funzione della destinazione d'uso degli ambienti e l'azione sismica regolamentare.

### **Definizione dell'azione sismica**

La definizione dell'azione sismica si ottiene dalle tabelle di pericolosità sismica pubblicate in calce alle Ntc08, in funzione delle coordinate geografiche del sito, la classe d'uso e le categorie del suolo, stratigrafica e

topografica, da accertare mediante apposito studio geologico. Vengono valutati i periodi di ritorno dell'azione sismica per i quattro stati limite sismici (Sl0, Sl1, Sl2 e Sl3) e i relativi spettri di risposta che forniscono le accelerazioni spettrali in funzione dei periodi di vibrazione. In base alla classe d'uso, la norma dispone quali siano gli stati limite da considerare nelle verifiche.

## **Il fattore di struttura**

Un importante valore da definire nei parametri sismici è il fattore di struttura  $q$  che interviene nello spettro Sl2 utilizzato nelle analisi lineari, come fattore riduttivo delle accelerazioni che tiene conto del comportamento elasto-plastico dell'edificio sotto azione sismica. La norma indica una espressione per il fattore  $q$ , in cui compare il rapporto di sovrarresistenza  $au/a1$ , insieme ad altri fattori dipendenti da altri aspetti. Il rapporto di sovrarresistenza  $au/a1$  può essere impostato secondo le indicazioni empirico euristiche riportate nella norma oppure valutato con una analisi statica non lineare.

Tuttavia, nell'analisi di edifici esistenti assoggettati ad analisi lineare la norma è abbastanza restrittiva sui valori  $q$  adottabili, indicando il valore  $q=1.5$  e ammettendo possibili incrementi fino al valore 3, purchè adeguatamente giustificati, in quanto si presuppone che per questi edifici ci siano forti incertezze sulle risorse di duttilità effettivamente disponibili e non si possano escludere collassi di tipo fragile, al contrario di quanto avviene negli edifici di nuova progettazione in cui tali finalità sono perseguite mediante l'applicazione della gerarchia di resistenza.

## **Gerarchia delle resistenze**

La normativa attuale, per evitare l'eventualità di collassi di tipo fragile e favorire l'attivazione di meccanismi deformativi duttili, dispone alcune regole progettuali note come criteri di gerarchia delle resistenze, che hanno l'effetto di aumentare la resistenza dei possibili meccanismi fragili e di minimizzare la probabilità che essi si attivino prima dei meccanismi duttili. Il rispetto della gerarchia delle resistenze può risultare molto oneroso in termini di dimensionamento e di armature, specie se non si predispongono all'atto del dimensionamento opportuni accorgimenti per renderla meno invasiva, come ad esempio un adeguato dimensionamento dei pilastri o la disposizione di travi alte preferibilmente nella direzione di maggiore resistenza del pilastro. Per strutture esistenti il rispetto della gerarchia delle resistenze non è richiesto, d'altra parte sarebbe tecnicamente irrealizzabile su strutture progettate senza questo requisito, a meno di intervenire pesantemente con ringrossi di sezione e ricostituzione delle armature richieste.

## **Valutazione della sicurezza**

Al p. 8.2 la normativa dichiara esplicitamente che, se non diversamente specificato, le disposizioni di carattere generale contenute negli altri capitoli della norma costituiscono il riferimento anche per le costruzioni esistenti.

Al p. 8.3 si dispone che la valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguiti con riferimento ai soli SLU; nel caso in cui si effettui la verifica anche nei confronti degli SLE i relativi livelli di prestazione possono essere stabiliti dal Progettista di concerto con il Committente. Le Verifiche agli SLU possono essere eseguite rispetto alla condizione di salvaguardia della vita umana (SLV) o, in alternativa, alla condizione di collasso (SLC).

Nelle Istruzioni, al p. C8.3 si specifica che per valutazione della sicurezza si intende un procedimento quantitativo volto a:

- stabilire se una struttura esistente è in grado o meno di resistere alle combinazioni delle azioni di progetto contenute nelle NTC, oppure
- a determinare l'entità massima delle azioni, considerate nelle combinazioni di progetto previste, che la struttura è capace di sostenere con i margini di sicurezza richiesti dalle NTC, definiti dai coefficienti parziali di sicurezza sulle azioni e sui materiali.

## **Elementi/meccanismi duttili o fragili**

Gli elementi ed i meccanismi resistenti sono classificati in:

- duttili: travi, pilastri e pareti inflesse con e senza sforzo normale;
- fragili: meccanismi di taglio in travi, pilastri, pareti e nodi;

In caso di pilastri soggetti a valori di sforzo normale particolarmente elevato va presa in considerazione la possibilità di comportamento fragile.

I meccanismi "duttili" si verificano controllando che la domanda non superi la corrispondente capacità in termini di deformazione. I meccanismi "fragili" si verificano controllando che la domanda non superi la corrispondente capacità in termini di resistenza (p.8.7.2).

Per il calcolo della capacità di elementi/meccanismi duttili o fragili si impiegano le proprietà dei materiali esistenti, determinate secondo le modalità indicate al punto 8.5.3, divise per i fattori di confidenza in relazione al livello di conoscenza raggiunto (p.8.7.2).

## Classificazione degli interventi

Al p. 8.7.4 sono individuati le seguenti categorie di intervento:

- interventi di adeguamento atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle presenti norme;
- interventi di miglioramento atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle presenti norme;
- riparazioni o interventi locali che interessino elementi isolati, e che comunque comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

Gli interventi di adeguamento e miglioramento devono essere sottoposti a collaudo statico.

## Metodi di analisi e criteri di verifica

Al p. C8.7.2.4 si dispone che gli effetti dell'azione sismica, possono essere valutati con uno dei metodi elencati al p.7.3 delle NTC:

- Analisi statica lineare con spettro elastico o con fattore  $q$ ,
- Analisi dinamica modale con spettro elastico o con fattore  $q$ ,
- Analisi statica non lineare,
- Analisi dinamica non lineare,

con alcune precisazioni (riportate nelle seguenti note) riguardanti le condizioni di applicabilità e i criteri di verifica per gli elementi o i meccanismi duttili e fragili

### Nota 1

Per i casi di analisi lineare con spettro elastico, il p.C8.7.2.4 richiede il controllo di alcune condizioni di applicabilità, (basate sui rapporti  $p_i = C_i / D_i$ ). L'interpretazione comune, avvalorata anche dalla lettura dell'Ec8, Parte 3, è che tali condizioni sono riferite esclusivamente ai casi di analisi lineare (statica o dinamica) con spettro elastico e non si estendono quindi al caso di analisi lineare con fattore  $q$ .

### Nota 2

Per quanto riguarda i criteri di verifica, la norma dispone che le verifiche vengano in linea generale eseguite in termini di deformazione per gli elementi duttili e di resistenza per elementi fragili. Nel caso però si esegua l'analisi lineare con fattore  $q$  è possibile unificare i due criteri, eseguendo verifiche di resistenza per entrambi i tipi di elementi (Istruzioni Ntc08, p.C8.7.2.4, §Analisi statica lineare con fattore  $q$ ) (Ec8, parte 3, p.2.2.1 (4)P).

Con queste precisazioni, è possibile riordinare le disposizioni di normativa contenute nella tabella C.8.4, suddividendole in tre distinte tabelle (analisi lineare con spettro elastico, analisi lineare con fattore  $q$ , analisi non lineare), come riportato di seguito.

## Tabella C8.4 così come riportata nella C.M. n.617/09

Tabella C8.4 – Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza

		Modello Lineare		Modello Non Lineare	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo (e/m)	Duttile / Fragile	Accettazione del Modello Lineare (ML) (per il controllo dei valori di $p_i = D_i / C_i$ )		Dall'analisi. Usare i valori medi nel modello.	In termini di deformazione. Usare i valori medi <u>divisi</u> per il FC.
		Dall'analisi. Usare i valori medi dei moduli nel modello.	In termini di resistenza. Usare i valori medi.		
	Verifiche (se il ML è accettato)				
	Duttile	Dall'analisi.	In termini di deformazione. Usare i valori medi <u>divisi</u> per il FC.		
	Fragile	Verifiche (se il ML è accettato)			In termini di resistenza. Usare i valori medi <u>divisi</u> per il FC e per il coefficiente parziale.
		Se $p_i \leq 1$ , dall'analisi.			
Se $p_i > 1$ , dall'equilibrio con la resistenza degli e/m duttili. Usare i valori medi <u>moltiplicati</u> per FC.					

**Tabella C8.4 (\*): Sintesi disposizioni per modello lineare con spettro elastico**

		Modello lineare con spettro elastico	
		Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo (e/m)	Duttile / Fragile	Accettazione del Modello Lineare (ML) (per il controllo dei valori di $\pi_i = D_i/C_i$ )	
		Dall'analisi. Usare i valori medi dei moduli nel modello.	In termini di resistenza. Usare i valori medi.
	Verifiche (se il ML è accettato)		
	Duttile	Dall'analisi.	In termini di deformazione. Usare i valori medi divisi per il FC.
	Fragile	Se $\pi_i \leq 1$ , dall'analisi.	
Se $\pi_i > 1$ , dall'equilibrio con la resistenza degli e/m duttili. Usare i valori medi moltiplicati per FC.			

**Tabella C8.4 (\*): Sintesi disposizioni per modello lineare con fattore q**

		Modello lineare con fattore q	
		Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo (e/m)	Duttile / Fragile	Accettazione del Modello Lineare (ML) NON SI RICHIEDONO CONTROLLI DI ACCETTAZIONE	
		Verifiche	
	Duttile	Dall'analisi (con $q=1,5-3,0$ )	In termini di resistenza (**). Usare i valori medi divisi per il FC.
	Fragile	Dall'analisi. (con $q=1,5$ )	In termini di resistenza. Usare i valori medi divisi per il FC e per il coefficiente parziale.

**Tabella C8.4 (\*): Sintesi disposizioni per modello non lineare**

		Modello Non lineare	
		Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo (e/m)	Duttile	Dall'analisi. Usare i valori medi nel modello	In termini di deformazione. Usare i valori medi divisi per il FC
	Fragile		In termini di resistenza. Usare i valori medi divisi per il FC e per il coefficiente parziale.

(\*) Tabelle rielaborate, vedi Nota 1 e 2 e riferimenti collegati:

Ntc08, C8.7.2, C8.7.2.4,  
Ec8, parte 3, p.4.4.2 e 4.4.3.

(\*\*) Vedi Nota 2 e riferimenti collegati:

Ntc08, p.C8.7.2.4, §Analisi statica lineare con fattore q  
Ec8, parte 3, p.2.2.1 (4)P.

### Elementi strutturali primari o secondari

Nelle costruzioni in c.a. o in acciaio gli elementi strutturali possono essere distinti in:

- primari: sono detti primari gli elementi strutturali che contribuiscono alla capacità sismica (C8.7.8.2);
- secondari: sono detti secondari gli elementi strutturali di cui si trascura rigidità e resistenza nell'analisi sismica e che sono progettati per resistere ai soli carichi verticali; inoltre devono essere in grado di assorbire le deformazioni della struttura soggetta all'azione sismica di progetto, mantenendo la capacità portante nei confronti dei carichi verticali; pertanto, limitatamente al soddisfacimento di tale requisito, agli elementi "secondari" si applicano i particolari costruttivi definiti per gli elementi

strutturali In nessun caso la scelta degli elementi da considerare secondari può determinare il passaggio da struttura “irregolare” a struttura “regolare”, né il contributo alla rigidezza totale sotto azioni orizzontali degli elementi secondari può superare il 15% della analoga rigidezza degli elementi principali (p.7.2.3).

### Fasi operative per l'analisi di un edificio esistente in c.a.

Alcune fasi sono del tutto simili a quelle che usualmente si eseguono nei casi di nuove progettazioni. C'è da tener presente però che in questo caso non si è interessati al progetto delle armature, ma alla verifica degli elementi, una volta che le armature (ferri longitudinali e staffe) siano state riconfigurate nei vari elementi in base agli esecutivi dell'epoca di costruzione o in base a stime sperimentali eseguite in situ. Esiste anche la possibilità di ricavare le armature in via presuntiva, attraverso un'analisi simulata, assumendo materiali, carichi e altre disposizioni di normativa vigenti all'epoca di costruzione.

Probabilmente la parte più delicata del processo è proprio la ricostruzione delle armature. Una volta conclusa questa fase, si tratta solo di eseguire l'analisi secondo le disposizioni delle Ntc08 (p. C8.7.2.4 e p.7.3), viste nel paragrafo precedente. Tralasciando i metodi basati sull'analisi lineare statica, dinamica con spettro elastico (condizionate dai controlli applicabilità prescritti dalla norma) e dinamica non lineare (attualmente non supportata nella corrente versione del programma), sussistono le due seguenti alternative:

- Analisi dinamica modale con fattore  $q$ ,
- Analisi statica non lineare (analisi pushover).

La prima corrisponde sostanzialmente all'usuale verifica in campo lineare applicata per le nuove progettazioni (basata cioè sull'analisi dinamica, sull'involuppo delle azioni e sulle verifiche delle sezioni allo sl\_u). La seconda è invece una novità sostanziale introdotta dall'attuale normativa che offre probabilmente qualche vantaggio rispetto alla prima alternativa:

- consente di sfruttare tutte le risorse di resistenza e duttilità disponibili oltre il limite elastico, solitamente trascurate nelle analisi lineari,
- offre maggiori possibilità di successo rispetto alle verifiche ottenute dall'analisi lineare,
- consente di limitare i costi e l'invasività di eventuali interventi di rinforzo.

Sia che si voglia procedere con l'analisi lineare che con l'analisi pushover, alcune fasi sono comuni ad entrambi i percorsi.

### Costruzione del modello di calcolo

In questa fase il progettista definisce il modello strutturale, negli stessi termini delle strutture nuove.

### Caratterizzazione del ferro e del calcestruzzo

E' opportuno che il progettista predisponga una opportuna campagna di prove che consenta di determinare le caratteristiche del ferro di armatura e del calcestruzzo. Per tener conto di eventuali incertezze, i valori determinati dovranno essere ridotti mediante un opportuno fattore di confidenza, che tipicamente assume i valori 1.00, 1.20 e 1.35, in funzione del livello di conoscenza raggiunto, rispettivamente per alto, medio o basso. In Edisis il fattore di confidenza si dovrà applicare direttamente sulle caratteristiche meccaniche di riferimento, in particolare sul valore  $R_{bk}$  del calcestruzzo e sulla resistenza a snervamento  $f_y$  per il ferro.

#### Impostazione resistenza del calcestruzzo

Impostare la resistenza media del calcestruzzo, ridotta del relativo fattore di confidenza, nella colonna  $r_{ck}$  della griglia dei *Tipi di calcestruzzo*. Spuntare la casella *def* per ottenere il calcolo dei valori derivati, che altrimenti dovranno essere digitati autonomamente.

Tipologie di calcestruzzo												
id	nome	rck	def	fck	fctk	ftk	fbk	Ec	Gc	ps	ec	ecu
1	Rck medio	180	<input checked="" type="checkbox"/>	149,40	12,82	33,62	28,85	287	119	2500	0,20	0,35

#### Impostazione resistenza del ferro

Impostare la resistenza media dei ferri, ridotta del relativo fattore di confidenza, nella colonna  $f_y$  della griglia dei *Tipi di ferro*.

Tipi di ferro									
id	nome	tyk	gmb	E	Agt	lanc	lgan	lgst	
1	FeB44K (medi)	3660	1,00	2100	12,0	40	0	10	

### Ricostruzione delle armature esistenti

Per quanto dicevamo prima questa fase può essere eseguita dopo una prima tornata di analisi e progetto, editando direttamente le armature degli elementi (travi e pilastri) con gli strumenti disponibili nel programma: modificando cioè i ferri e le staffe nelle corrispondenti griglie dati o utilizzando gli appositi comandi grafici



predisposti nelle viste delle carpenterie, sulla scorta delle informazioni disponibili (esecutivi dell'epoca, prove sperimentali).

Una seconda possibilità è quella di impostare temporaneamente i materiali con i valori di progetto, impostare la normativa precedente (tensioni ammissibili o stati limite secondo Ntc96), impostare la zona sismica dell'epoca o l'assenza di zona sismica, a seconda dei casi, ed eseguire il progetto delle armature sotto queste condizioni. Si ottiene in questo modo una armatura presunta, che eventualmente può sempre essere ritoccata, nel caso siano disponibili informazioni di maggiore certezza (esecutivi dell'epoca, prove sperimentali).

## Fasi operative per l'analisi lineare con fattore q

Oltre alle fasi comuni descritte nel paragrafo precedente, per condurre l'analisi di un edificio esistente mediante analisi lineare con fattore q è necessario procedere con le seguenti operazioni.

### Impostazione delle opzioni di verifica

Nella tabella delle *Opzioni di verifica* deselezionare le verifiche per gli stati limite di esercizio quasi permanente, frequente, raro, cliccando nelle caselle Slq, Slf, Slr.

Se ci si trova in zona sismica, disattivare opzionalmente le verifiche per lo s.l. ultimo non sismico (Slu) ed attivare le verifiche per lo s.l. sismico di salvaguardia della vita (Slv). Per zone non sismiche, invece, l'opzione Slu deve rimanere attivata.

Inoltre possono essere disattivate le opzioni per la verifica a fessurazione, poste nel riquadro in basso a sinistra.

### Impostazione del fattore q

Come abbiamo visto, con questa modalità di verifica, la sollecitazione di taglio deve essere ottenuta per un fattore di struttura assunto prudenzialmente con il valore ridotto  $q=1.5$ . Questa impostazione può essere eseguita digitando il valore 1.5 nella casella q della tabella *Parametri sismici del sito*.

### Disattivazione della gerarchia delle resistenze

Nel caso di struttura esistente non è richiesto il controllo delle regole di gerarchia delle resistenze, che pertanto può essere disattivata aprendo il foglio *Opzioni di Gerarchia delle resistenze* (cliccando sull'omonimo pulsante del foglio *Opzioni di verifica*) ed attivando al suo interno l'opzione *Escludi*.

## Esecuzione dell'analisi e verifiche

A questo punto, supponendo che la modellazione sia compiutamente definita per tutti gli altri aspetti (geometria, carichi, azioni sismiche), si procede con l'esecuzione dell'analisi lineare (in genere dinamica per sovrapposizione modale), al termine della quale si esegue il calcolo delle armature per tutti gli elementi.

La fase successiva consisterà nella modifica delle armature negli elementi strutturali (travi, pilastri, pareti, plinti, platee) per ottenere in ogni elemento la configurazione effettiva delle armature, dedotta dagli esecutivi dell'epoca di costruzione o, se questi non siano disponibili, ricavata in via presuntiva mediante indagini a campione o mediante calcolo simulato, in base alla normativa dell'epoca e con materiali non degradati.

## Report dei sotto dimensionamenti riscontrati

Dopo queste operazioni alcune verifiche negli elementi potranno risultare non soddisfatte per vari motivi, come:

- per effetto del degrado dei materiali avvenuto nel tempo, con resistenze ulteriormente ridotte mediante i fattori di confidenza corrispondenti al livello di conoscenza raggiunto;
- per le variazioni dei carichi connesse ad eventuali variazioni della destinazione d'uso dei locali o dell'intensità sismica prescritta per il sito,
- per eventuali modifiche strutturali introdotte successivamente alla costruzione.

In queste condizioni, per garantire la fruibilità dell'opera potrebbero essere necessari interventi di rinforzo, tali da innalzare il grado di sicurezza su livelli accettabili. Per progettare le opere di rinforzo può essere utile avere un report di tutti i sotto-dimensionamenti riscontrati, nel quale risultino evidenti i valori di capacità attuale e di domanda (valori resistenti/agenti), per le verifiche a presso-flessione e a taglio.

Il report è compreso nel tabulato di stampa e si ottiene selezionando le opzioni nel foglio *Composizione del tabulato*, come indicato in figura.

Le tabelle dei sotto-dimensionamenti elencano tutti i casi in cui si è riscontrato una insufficiente copertura del momento flettente o del taglio e sono distinte per tipo di elementi: plinti, travi, pilastri/pareti e platee, come visibile nelle seguenti figure.

### Sezioni sotto dimensionate nei plinti

Pln	Sezione		Ma	Mr	Ta	Tr
	BxH	dir sl				
9	200x200	des slv			20,9	20,9
9	200x200	sin slv			21,3	21,3
9	200x200	sup slv			22,9	22,9
9	200x200	inf slv			23,2	23,2
10	200x200	sup slv			16,3	16,3
10	200x200	inf slv			16,6	16,6
12	200x200	des slv			23,6	23,6
12	200x200	sin slv			23,3	23,3
12	200x200	sup slv			22,8	22,8
12	200x200	inf slv			23,2	23,2

### Sezioni sotto dimensionate nelle travi

Trv	i-j	liv	BxH	zona	sl	Momento-		Momento+		Ta	Tr
						Ma-	Mr-	Ma+	Mr+		
1	2-3	0	40x110	sin	slv	-	-	-	-	37,9	19,5
1	2-3	0	40x110	mez	slv	48,28	24,59	-	-	-	-
1	2-3	0	40x110	des	slv	-	-	-	-	26,9	19,5
2	3-4	0	40x110	mez	slv	-	-	-	-	11,0	10,4
2	3-4	0	40x110	des	slv	-	-	24,97	24,59	-	-
4	4-5	0	40x110	sin	slv	39,92	24,59	46,36	24,59	28,6	19,5
4	4-5	0	40x110	mez	slv	-	-	-	-	19,4	10,4
3	4-6	0	40x110	sin	slv	-	-	26,32	24,59	21,2	19,5
7	7-8	0	40x110	sin	slv	-	-	24,94	24,59	22,8	19,5

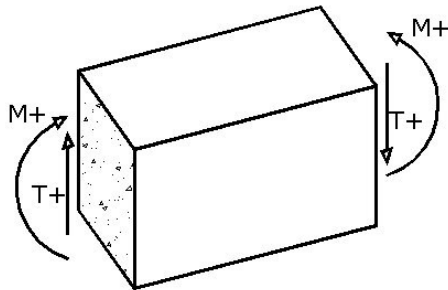
### Sezioni sotto dimensionate nei pilastri

Pil	alfa	BxH	liv	zona	dir	sl	Momento M1		Momento M2		fd	Taglio	
							Ma1	Mr1	Ma2	Mr2		Ta	Tr
1	0,0°	30x60	2-3	testa	des	slv	6,94	7,16	-1,54	3,42	1,15	-	-
1	0,0°	30x60	2-3	testa	sup	slv	3,77	3,93	3,05	8,28	1,06	-	-
1	0,0°	30x60	2-3	testa	inf	slv	-2,65	3,23	6,14	6,74	1,50	-	-
7	90,0°	30x60	2-3	testa	sin	slv	-4,98	6,26	2,50	3,02	1,32	-	-
7	90,0°	30x60	2-3	testa	sup	slv	3,44	3,37	-1,60	7,06	1,09	-	-
8	90,0°	30x60	0-1	piede	sin	slv	-0,96	0,00	0,50	0,00	>10	-	-
8	90,0°	30x60	0-1	testa	sin	slv	-0,96	0,00	-0,24	0,00	>10	-	-
9	0,0°	30x60	3-4	piede	des	slv	6,49	6,64	-3,07	3,18	1,89	-	-
9	0,0°	30x60	3-4	piede	sup	slv	3,28	3,19	-2,41	6,66	1,19	-	-
9	0,0°	30x60	3-4	piede	inf	slv	-4,47	3,41	4,54	7,14	2,12	-	-

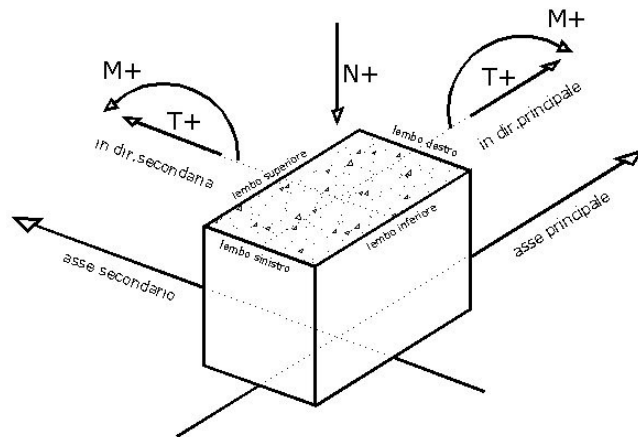
### Sezioni sotto dimensionate nelle platee

Pit	BxH	zona	sl	Momento-		Momento+		Ta	Taglio	
				Ma-	Mr-	Ma+	Mr+		Tr	Tr
11	100x40	Centro 2	slv	3,63	3,34	-	-	-	-	-
11	100x40	Trave 30	slv	-	-	6,53	3,34	-	-	-
11	100x40	Trave 25	slv	-	-	4,31	3,34	-	-	-
11	100x40	Trave 31	slv	-	-	5,79	3,34	-	-	-
12	100x40	Trave 26	slv	-	-	4,14	3,34	-	-	-
12	100x40	Trave 32	slv	-	-	5,74	3,34	-	-	-
14	100x40	Trave 39	slv	-	-	3,99	3,93	-	-	-
14	100x40	Trave 28	slv	-	-	4,94	3,93	-	-	-
14	100x40	Trave 34	slv	-	-	5,92	3,93	-	-	-
15	100x40	Centro 2	slv	3,79	3,34	-	-	-	-	-
15	100x40	Trave 29	slv	-	-	4,08	3,34	-	-	-

Si tenga presente che il programma (almeno per la versione attuale) non entra nel dettaglio del rinforzo, ma aiuta a quantificare l'incremento richiesto di rinforzo per l'elemento in esame, come differenza fra valore agente e valore resistente in termini di momento e taglio, secondo le convenzioni indicate in figura.



Convenzione per sollecitazioni travi



Convenzione per sollecitazioni pilastri



## Fasi operative per l'analisi statica non lineare (analisi pushover)

L'analisi statica non lineare, comunemente conosciuta come analisi pushover, è un ulteriore strumento di valutazione del comportamento di strutture soggette a sisma, previsto dalla normativa attuale, che al p. 7.3.4.1 dispone che possa essere utilizzata per:

- valutare i rapporti di sovrarresistenza  $\alpha/a1$  che interviene nel calcolo del fattore di struttura  $q$ ,
- verificare l'effettiva distribuzione della domanda inelastica in 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.

Si tratta di una analisi in cui la struttura è assoggettata ai carichi statici quasi-permanenti e ad una distribuzione di accelerazioni sismiche agenti in una prefissata direzione, le quali vengono a mano a mano incrementate fino al raggiungimento del collasso, che pone termine all'analisi. L'analisi è quindi ripetuta, facendo variare di volta in volta la direzione del sisma e la forma di distribuzione delle accelerazioni sull'altezza, in modo da campionare in maniera significativa le possibili forzanti. Nel corso dell'analisi sono riconosciute le condizioni di raggiungimento degli stati limite di interesse, SLO di operatività, SLD di danno, SLV di salvaguardia vita, SLC di collasso, diversificate in funzione della tipologia strutturale (muratura o c.a.). Gli elementi resistenti sono considerati a comportamento elasto-plastico, a duttilità limitata.

Per le strutture in c.a., oltre alle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo e dei ferri, è fondamentale valutare la quantità di armatura (staffe e ferri longitudinali) presente negli elementi (travi, pilastri, pareti), in quanto hanno influenza sulle sollecitazioni resistenti e sulle rotazioni limiti allo snervamento e al collasso. Per tale ragione, è necessario appurare se sono disponibili i disegni delle carpenterie delle armature dell'epoca di costruzione, in mancanza delle quali si potrebbe ricorrere ad una campagna di prove pacometriche più o meno estesa in funzione dei fondi a disposizione.

Per le murature è fondamentale l'accertamento della resistenza media a compressione e a taglio e i valori dei moduli elastici  $E$  e  $G$ . Allo scopo potranno essere eseguite prove di compressione in situ con martinetti. Le duttilità limiti sono espresse in percentuale dell'altezza e sono diversificate per lo stato limite di danno, per collasso a taglio e per collasso a pressoflessione.

Ogni analisi pushover, eseguita al variare della direzione sismica e della distribuzione di forze sull'altezza, può quindi essere rappresentata in termini di curva di equilibrio carico-spostamento, con l'indicazione dei punti corrispondenti al raggiungimento degli stati limite di interesse. Le verifiche di capacità sismica sono basate sul confronto fra domanda di spostamento e capacità di spostamento, ma possono essere equivalentemente ed efficacemente rappresentate in termini di accelerazione al suolo di classe A ( $P_g$ ) o in termini di periodo di ritorno dell'azione sismica, per gli stati limite di interesse.

Oltre alle fasi comuni descritte nel paragrafo precedente, per condurre l'analisi di un edificio esistente mediante analisi non lineare è necessario procedere con le seguenti operazioni.

### Esecuzione preliminare dell'analisi elastica

A questo punto, si può procedere con l'esecuzione dell'analisi. Prima di avviare l'analisi, è importante impostare le resistenze dei materiali per lo stato di fatto, eventualmente ridotte mediante un opportuno fattore di confidenza. Si imposti quindi il sistema normativo Ntc08 e si definisca l'azione sismica in accordo a questo sistema. Si esegua quindi l'analisi elastica. Una eventuale riesecuzione dell'analisi non annulla le armature, che verranno mantenute fino a che non si apportino modifiche sostanziali al modello. Si controlli quindi che le armature siano già presenti negli elementi, così come ottenute nella fase precedente di *Ricostruzione delle armature*. Se non lo fossero, provvedere alla loro ricostruzione secondo quanto indicato in precedenza, in quanto la presenza di armatura è necessaria per avviare l'analisi pushover.

### Esecuzione dell'analisi pushover

Selezionando il comando Analisi non lineare, si apre il *Quadro riassuntivo dell'analisi pushover*, nel quale possono essere impostati alcuni parametri caratteristici della modellazione elasto-plastica ed avviare le fasi di calcolo. Per informazioni dettagliate in merito rimandiamo al manuale d'uso.

Innanzitutto, cliccando sul pulsante *M.eccitata* si ottiene la valutazione della partecipazione di massa che le scansioni pushover hanno sui modi dinamici fondamentali. In accordo col p. 7.3.4.1, si assume che l'analisi pushover sia rappresentativa della risposta dinamica se si raggiunga in qualche scansione una partecipazione di massa di almeno il 75%. Nel caso non si riuscisse a rispettare tale limite, c'è la possibilità di infittire le scansioni pushover e rieseguire il controllo.



alfa	modo 1	modo 2
0° C	1,04	63,20
0° L	1,12	<b>66,21</b>
90° C	74,79	1,36
90° L	<b>81,71</b>	1,52
180° C	1,04	63,20
180° L	1,12	66,21
270° C	74,79	1,36
270° L	81,71	1,52

Si procede quindi con l'esecuzione dell'analisi pushover, cliccando sul pulsante *Analisi*.

Al termine dell'analisi, nello stesso foglio vengono riportati i valori di capacità e domanda in accelerazione al suolo (Peak Ground Acceleration PGA) riferita a suolo su roccia (categoria A), per i quattro stati limite di verifica (SLO, SLD, SLV, SLC). I valori di capacità in particolare rappresentano i valori minimi ottenuti nelle analisi pushover, al variare della direzione sismica e della distribuzione delle accelerazioni lungo l'altezza. La verifica consiste nel controllare che la capacità in Pga sia maggiore della corrispondente domanda.

**Quadro riassuntivo analisi pushover**

Forma e direzioni della spinta sismica  
 acc. sismica Costante e Lineare n. direzioni 4 **M.eccitata**  
 eccentricità sismica aggiuntiva in cm  120 **Analisi**

Fattori riduttivi della duttilità a collasso  
 riduzione per Travi e Pilastri 1,50 per Pareti (H>5\*B) 1,60  
 per carenza dettagli sismici 0,85 car. confinamento 1,00  
 valori default riduzione della rotazione limite per SLV 0,75

Condizioni Slo/Slid  Rotazione pr. fles.  Rotazione presso-flessionale  
 Scorrimento piani  Resistenza a taglio  Resistenza nodo

Acc. al suolo	SLO	SLD	SLV	SLC
domanda Pga	--	--	--	--
capacità Pga	--	--	--	--
Rapp. duttilità	SLO	SLD	SLV	SLC
cap./domanda	--	--	--	--

Stima del fattore di struttura q (SLV)  
 rapporto minimo di sovraresistenza au/al -- **Ris. Analisi**  
 calcolato dal rapporto di sovraresistenza -- **Ris. Verifica**  
 calcolato dalla verifica di duttilità pushover -- **Curve push.**

Meccanismi di crisi negli elementi  
 Collasso p.fles.pil.  Collasso fles.trv.  
 Collasso taglio pil.  Collasso taglio trv.  Collasso nodi

**Quadro riassuntivo analisi pushover**

Forma e direzioni della spinta sismica  
 acc. sismica Costante e Lineare n. direzioni 4 **M.eccitata**  
 eccentricità sismica aggiuntiva in cm  120 **Analisi**

Fattori riduttivi della duttilità a collasso  
 riduzione per Travi e Pilastri 1,50 per Pareti (H>5\*B) 1,60  
 per carenza dettagli sismici 0,85 car. confinamento 1,00  
 valori default riduzione della rotazione limite per SLV 0,75

Condizioni Slo/Slid  Rotazione pr. fles.  Rotazione presso-flessionale  
 Scorrimento piani  Resistenza a taglio  Resistenza nodo

Acc. al suolo	SLO	SLD	SLV	SLC
domanda Pga	0,071	0,087	0,258	0,348
capacità Pga	0,115	0,129	0,158	0,165
Rapp. duttilità	SLO	SLD	SLV	SLC
cap./domanda	2,143	2,042	0,482	0,357

Stima del fattore di struttura q (SLV)  
 rapporto minimo di sovraresistenza au/al 2,50 **Ris. Analisi**  
 calcolato dal rapporto di sovraresistenza 7,51 **Ris. Verifica**  
 calcolato dalla verifica di duttilità pushover 2,87 **Curve push.**

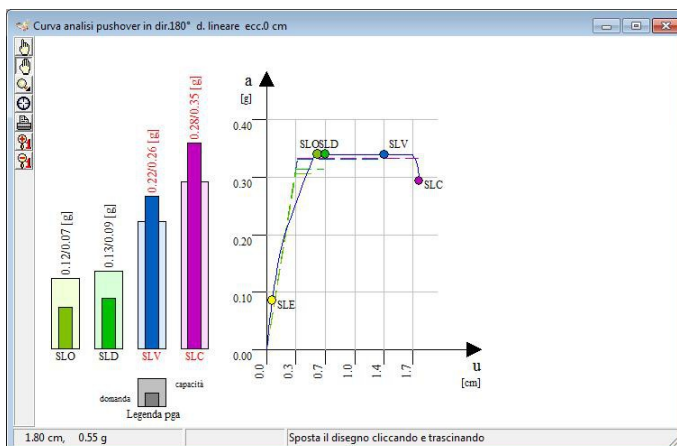
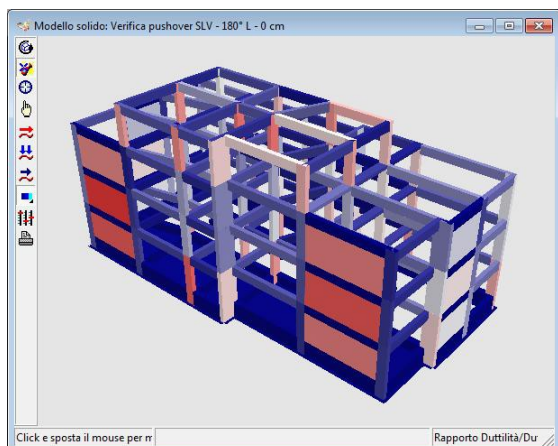
Meccanismi di crisi negli elementi  
 Collasso p.fles.pil.  Collasso fles.trv.  
 Collasso taglio pil.  Collasso taglio trv.  Collasso nodi

In questo quadro è possibile impostare alcuni parametri dell'analisi pushover ed avviare l'analisi (a sinistra). Al termine dell'analisi si ottengono i valori di capacità/domanda in Pga per gli stati limite di interesse (a destra).

### Interpretazione dei risultati e possibili interventi di rinforzo.

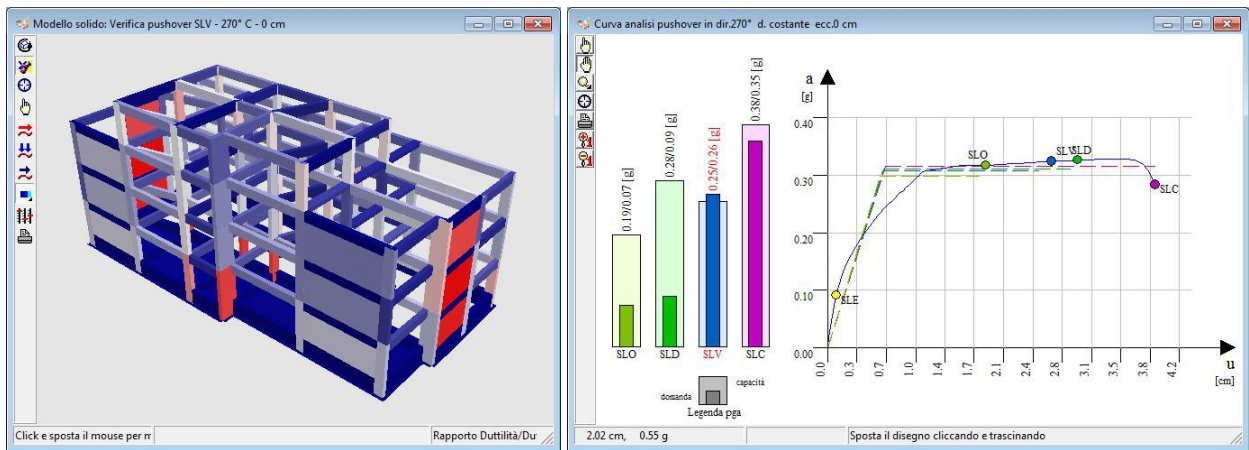
L'esecuzione dell'analisi pushover porta immediatamente ad informazioni sintetiche sui valori di capacità e domanda disponibili nella struttura. E' possibile però ottenere informazioni più approfondite, ad esempio per evidenziare il comportamento strutturale sulle varie scansioni pushover e per individuare eventuali punti di criticità che potrebbero essere sanati con interventi di rinforzo.

Sono disponibili infatti le curve delle analisi pushover e le mappe di duttilità nella vista solida 3D, per le quali rimandiamo al manuale d'uso per informazioni specifiche.



Mappe delle duttilità negli elementi per Slv e curva pushover per una scansione.

La risposta elastoplastica mostra una duttilità limitata, insufficiente a coprire la domanda per Slv e Slc.



*Mapa delle duttilità negli elementi per Slv e curva pushover per un'altra scansione.*

*La risposta elastoplastica è migliore che nel caso precedente, ma la capacità Slv resta leggermente al di sotto della domanda.*

Per quanto riguarda i rinforzi, la versione attuale permette il ringrosso della sezione di calcestruzzo, senza perdere le armature negli altri elementi. Altri interventi, come ad esempio l'inserimento di pareti o altri elementi non presenti prima, comporta la perdita delle armature, che pertanto dovranno essere riconfigurate. Ulteriori importanti sviluppi nella definizione e nella gestione di interventi di rinforzo si attendono per le versioni in preparazione.