



Analisi dinamica lineare con spettro di risposta: le ragioni alla base del metodo

Autore: ing. Federico Francia

BeEngineered s.r.l.



1. Introduzione: NTC 2018 e metodi di analisi

Il presente articolo vuole illustrare i motivi teorici secondo i quali le normative tecniche vigenti rendano sempre lecita l'applicazione dell'analisi dinamica lineare con spettro di risposta per lo studio della risposta sismica degli edifici.

La progettazione per azioni sismiche ai sensi del DM 17/01/2018 e dell'EC8 prevede quattro principali metodi di analisi strutturale:

- Analisi lineari, statiche (1);
- Analisi lineari dinamiche (2);
- Analisi non lineari statiche (3);
- Analisi non lineari dinamiche (4);

Le condizioni di applicabilità delle analisi lineari statiche (1) sono descritte al par. 7.3.3.2 delle NTC 2018, mentre al par. 7.3.4.2 si trovano le condizioni di applicabilità delle analisi non lineari statiche (3): le (1), ad esempio, richiedono una struttura regolare in altezza. Le analisi non lineari statiche prevedono due gruppi di distribuzioni di forze: il gruppo 1 consente di applicare forze proporzionali a quelle statiche equivalenti solo in presenza di un modo di vibrare principale con massa partecipante superiore al 75%; alternativamente forze proporzionali a quelle risultanti da un'analisi dinamica lineare con massa complessiva non inferiore all'85%.

Le analisi lineari dinamiche (2) sono invece sempre applicabili, eccezion fatta per strutture con sistema di isolamento alla base non rappresentabile mediante un modello lineare equivalente (par. 7.3.4.1 delle NTC 2018): in questo caso, è infatti obbligatoria l'applicazione di analisi non lineari dinamiche (4), per le quali è comunque prescritto un confronto con i risultati di un'analisi lineare dinamica (2).

2. Analisi dinamica lineare: perché è sempre possibile?

Si vuole ora ragionare sul motivo per cui le analisi lineari dinamiche risultano sempre applicabili, o comunque i loro risultati rappresentano un imprescindibile confronto con quelli delle analisi non lineari dinamiche per strutture con sistema di isolamento alla base non rappresentabile mediante un modello lineare equivalente.

L'obiettivo può essere perseguito tenendo in considerazione:

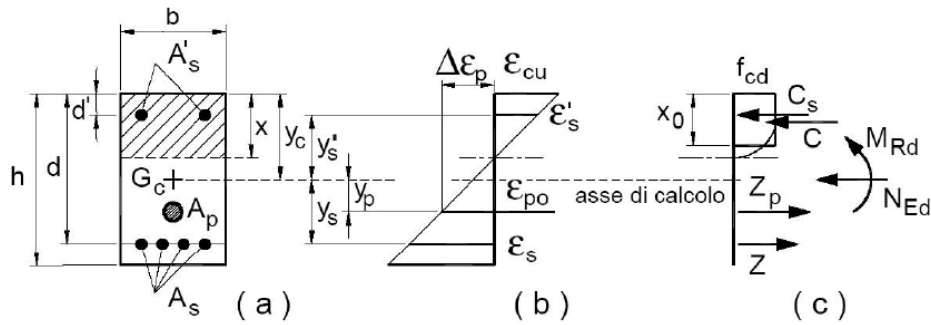
- I teoremi fondamentali dell'analisi limite, in particolare quello statico;
- il concetto di verifica strutturale in condizioni sismiche, che esula dal concetto di verifica tensionale.

2.1. Verifiche strutturali di strutture dissipative in condizioni sismiche

La progettazione agli Stati limite ultimi per azioni sismiche fa riferimento agli stati limite di salvaguardia della vita (SLV) e di collasso (SLC), così definiti al paragrafo 3.2.1 delle NTC 2018:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):** a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC):** a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

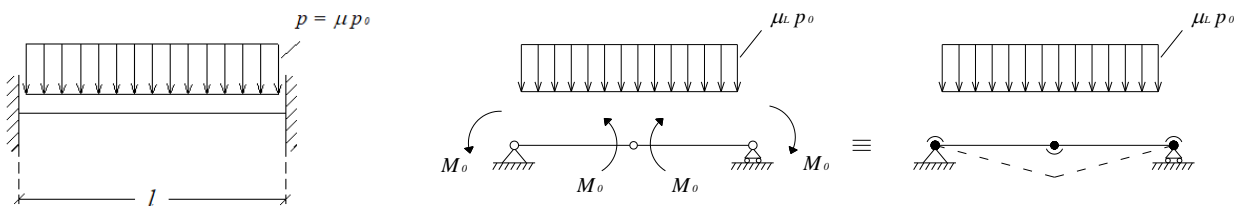
Entrambi gli stati limite sono associati al comportamento ultimo della struttura e al suo comportamento non lineare. Le conseguenti verifiche di sicurezza non riguardano più le tensioni nelle singole sezioni, ma confrontano le domande del relativo stato limite con le capacità offerte dagli elementi strutturali.



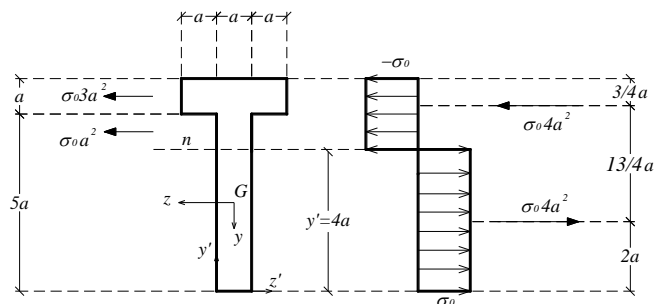
Verifiche a stato limite ultimo per sezioni pressoinflesse: estratto delle NTC 2018

Le norme tecniche prescrivono inoltre, per le classi di duttilità CD "B" e CD "A", il rispetto dei criteri della gerarchia delle resistenze, che garantisce la formazione di meccanismi di rottura duttili conseguentemente alla formazione di cerniere plastiche. Gli elementi si trovano così in campo plastico e non riescono ad offrire un contributo superiore al loro momento di plasticizzazione M_0 , tuttavia la struttura non perde la sua capacità portante nei confronti delle sollecitazioni.

2.1.1. Teoremi fondamentali dell'analisi limite, analisi spettrale e prescrizioni normative



Formazione del meccanismo di collasso in una trave doppiamente incastrata



Esempio di diagramma di sollecitazione, per sezione inflessa non parzializzata a T, completamente plasticizzata: tale situazione corrisponde all'applicazione del momento di plasticizzazione M_0 e alla formazione della cerniera plastica nell'elemento strutturale.

Si considera quanto segue:

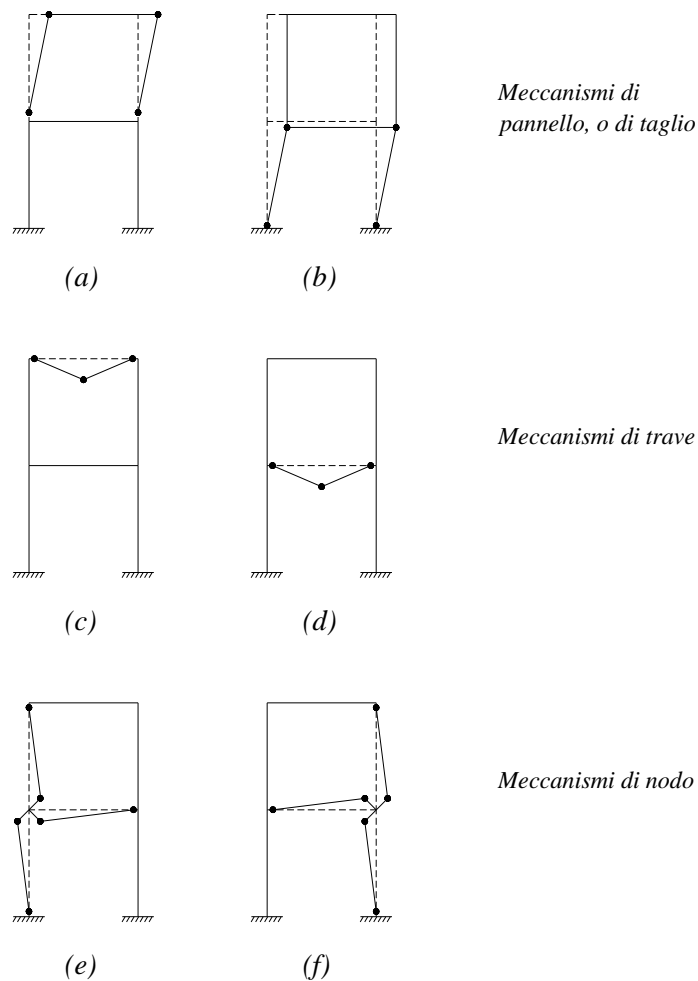
- il concetto di cerniera plastica deriva dalla teoria dell'analisi limite delle strutture ed è in stretto rapporto con la definizione dei moltiplicatori di collasso strutturali;
- le analisi spettrali si basano su procedure di natura puramente statica, poiché combinano i risultati dei modi di vibrare con gli spettri di risposta, al fine di determinare le sollecitazioni sugli elementi strutturali. Si tratta quindi di sollecitazioni staticamente ammissibili.

Si introduce allora il teorema statico dell'analisi limite, secondo cui:



[teorema] il moltiplicatore dei carichi ψ associato ad una qualsiasi distribuzione di momenti staticamente ammissibili è sempre inferiore, o al più uguale al carico di collasso μ_c . In altri termini, il moltiplicatore critico dei carichi λ_p è il maggiore fra tutti i moltiplicatori staticamente ammissibili ψ , per cui tale teorema si definisce anche Teorema del limite inferiore.

Ne deriva che l'applicazione dell'analisi dinamica lineare con spettri di risposta è in stretto rapporto con la ricerca di un moltiplicatore dei carichi mediante il teorema statico dell'analisi limite e che, pertanto, sottostima sempre il moltiplicatore di collasso reale della struttura, a favore di sicurezza.



Possibili meccanismi di collasso cinematicamente ammissibili per portale a due piani

L'analisi limite enuncia anche un teorema dinamico, duale di quello statico:

[teorema] Assegnato un arbitrario meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile, se il lavoro esterno dei carichi moltiplicati per β risulta uguale al lavoro compiuto nelle cerniere plastiche, allora il moltiplicatore β è sempre maggiore, o al più uguale, all'effettivo moltiplicatore critico μ_c . In altri termini, il moltiplicatore critico μ_c è il più piccolo fra tutti i moltiplicatori cinematicamente ammissibili β , per cui tale teorema si definisce anche Teorema del limite superiore.

Da cui deriva il teorema di Greenberg-Prager, secondo cui

[th] il moltiplicatore critico μ_c è contemporaneamente il massimo dei moltiplicatori staticamente ammissibili ψ ed il minimo dei moltiplicatori cinematicamente ammissibili β .

Ne deriva che un'analisi lineare dinamica con spettro di risposta che consideri una condizione di rottura cinematicamente ammissibile, permette di progettare la struttura in corrispondenza del suo moltiplicatore di collasso μ_c .



2.1.1.1. Prescrizioni normative alla base delle ipotesi

Affinché ciò risulti verificato anche nella prassi progettuale, occorre mettersi nelle condizioni di rendere fisicamente accettabili le ipotesi alla base dell'analisi limite. Occorre quindi che, nella realtà:

- si possano effettivamente formare le cerniere plastiche e che queste possiedano adeguata capacità rotazionale (duttilità in curvatura);
- la formazione delle cerniere plastiche in un elemento preceda la sua rottura di tipo fragile (gerarchia delle resistenze);

e in questo modo risultano verificate le ipotesi alla base dell'analisi limite, cioè quella di cerniere plastiche con infinita capacità rotazionale e rottura globale della struttura con meccanismi di tipo duttile.

La norma prescrive questi concetti imponendo, per CD "A" e CD "B":

- i dettagli costruttivi nelle zone dissipative o, alternativamente, l'esecuzione delle verifiche di duttilità;
- il rispetto della gerarchia delle resistenze;

2.2. Conclusioni

Si può concludere che l'analisi lineare dinamica con spettro di risposta risulta sempre possibile perché determina un moltiplicatore staticamente ammissibile ψ , minore o uguale del moltiplicatore di collasso λ_p della struttura, e che pertanto mette il progettista in una condizione di sicurezza.

Una rottura di tipo fragile non è, di per sé, qualcosa di scorretto: è semplicemente una tipologia di rottura in **disaccordo con le ipotesi alla base del metodo di analisi**. Quest'affermazione trova conferma nell'assenza delle prescrizioni viste sopra per il caso di progettazione di strutture non dissipative: la normativa prescrive che in esse la struttura debba rimanere in campo elastico, e lo fa imponendo l'esecuzione delle verifiche di sicurezza con i legami costitutivi dei materiali in campo sostanzialmente elastico. Non si formano quindi le cerniere plastiche e non serve quindi garantire un'adeguata duttilità, né il rispetto della gerarchia delle resistenze.



BeEngineered s.r.l.

BeEngineered s.r.l. fornisce strumenti informatici di alto livello alle aziende e agli studi professionali, con l'obiettivo di qualificarne il lavoro e aumentarne l'efficienza.

Sviluppo software

Recepire ogni giorno la crescente digitalizzazione, l'evoluzione tecnologica e i frequenti aggiornamenti normativi comporta un grande sforzo per qualsiasi ufficio tecnico. In tal senso, BeEngineered non vuole sostituirsi al progettista, ma assisterlo, con i seguenti servizi:

- **sviluppo di software "ad hoc" per il cliente**, che avrà così a disposizione un ambiente di lavoro costantemente aggiornato, che rispecchi le sue esigenze e le sue aspettative;
- **sviluppo di software commerciali**, nati dall'esperienza di un professionista del settore: rispecchiano le reali esigenze del progettista, essendo strumenti a sua piena disposizione e non dei calcolatori che pongono vincoli al suo percorso progettuale;
- **aggiornamento di fogli Excel esistenti**, con macro in VBA e qualsiasi funzionalità consentita dal foglio elettronico.

Sarà sempre disponibile un servizio di assistenza tecnica al cliente, che potrà contattare i tecnici di BeEngineered per chiarimenti sui prodotti, sulle procedure di calcolo, o per un semplice confronto.

Servizi di progettazione in ambito civile

BeEngineered, grazie ai tecnici con cui collabora, è in grado di fornire servizi di progettazione in ambito civile: calcoli strutturali, progettazione architettonica, consulenze in ambito strutturale, etc.

BeEngineered s.r.l. è "*Ingegneria a misura d'uomo*", perché offre i suoi servizi tramite tecnici che conoscono in profondità le esigenze, le difficoltà e la prassi lavorativa dei suoi clienti: non è una semplice software house, ma una realtà dove gli obiettivi dei suoi componenti sono esattamente le stesse dei suoi clienti. Figure professionali a cui fornire strumenti eccezionali, per qualificare e valorizzare il loro lavoro.

Per maggiori informazioni, visita il nostro sito www.beengineered.it, o contattaci all'indirizzo info@beengineered.it.

