

DOCUMENTO redatto da AEDES Software (31.03.2020)

a cura di: Ing. Francesco Pugi

COMBINAZIONE DIREZIONALE IN ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE

Quesito.

Buongiorno,

scrivo per chiedere un confronto sulla combinazione delle direzioni di analisi che è possibile adottare nella scheda Pushover 1.

Le NTC18 al paragrafo 7.3.5 superano le NTC08 affermando che la risposta alle azioni sismiche nelle analisi statiche e dinamiche modali, lineari o non lineari, è calcolata considerando gli effetti più gravosi ottenuti permutando i coefficienti moltiplicativi dell'espressione: $1,0E_x + 0,3E_y + 0,3E_z$.

Parallelamente la circolare riallinea le due normative affermando al C7.3.5 che "nel caso delle analisi statiche non lineari è possibile applicare separatamente ciascuna delle componenti orizzontali principali insieme a quella verticale (se necessario) riconducendo quindi la valutazione unitaria degli effetti massimi ai valori più sfavorevoli così ottenuti."

Un articolo reperito su Ingenio.it (<https://www.ingenio-web.it/22479-la-modifica-della-circolare-sul-calcolo-della-risposta-sismica-mediante-analisi-pushover>) afferma che, pur lasciando la normativa il carattere di possibilità sulla scelta, in analisi statica non lineare non si deve tenere conto del 30% degli effetti dell'azione ortogonale a quella principale considerata. Tale considerazione è supportata da due assunzioni che riassumo brevemente:

1. le analisi statiche non lineari nascono con l'idea di fornire al Progettista un approccio semplificato. Trattandosi quindi di un approccio semplificato, si accetta l'approssimazione di valutare la risposta separatamente in quelle che dovrebbero essere le due direzioni principali della struttura, immaginando che l'azione sismica agente in direzione X non coinvolga le risorse strutturali lungo Y. Appare quindi in controtendenza la richiesta di combinare le azioni nelle diverse direzioni, in quanto appesantisce notevolmente il calcolo.
2. adottare la formula " $1.00 \times E_x + 0.30 \times E_y + 0.30 \times E_z$ " implica di fatto applicare il Principio di Sovrapposizione degli Effetti. Nel momento in cui viene persa la linearità del sistema risolvete, la soluzione comincia a dipendere dalla storia di carico, cioè dalla sequenza di applicazione dei carichi. Questo significa che i risultati ottenuti a valle della seguente combinazione lineare di azioni: " $1.00 \times E_x + 0.30 \times E_y + 0.30 \times E_z$ " non coincidono con la somma dei risultati ottenuti a valle delle seguenti tre analisi: " $1.00 \times E_x$ ", " $0.30 \times E_y$ " e " $0.30 \times E_z$ ".

Ora, dal momento che PCM lascia al progettista la possibilità di scegliere se considerare o meno la bi-direzionalità delle azioni mi chiedo, **come ci si pone in generale di fronte alla scelta iniziale di considerarla o meno? E' possibile avere una vostra opinione in merito a quanto riportato in precedenza?**

Fin'ora ho sempre tenuto conto di tutte le possibili combinazioni che il programma consente di adottare, effettuando eventualmente una sintesi dei risultati a posteriori. Credo però che poter decidere se considerare o meno la bi-direzionalità così come gli effetti delle eccentricità accidentali prima di procedere con le analisi, è molto importante, per cercare di limitare i tempi di analisi e lo spazio di archiviazione, confinando al tempo stesso il campo dei numeri in cui ci si muove.

Risposta.

L'articolo citato, che fornisce un contributo al dibattito sulle corrette modalità di esecuzione delle analisi sismiche statiche non lineari ed in quanto tale è sicuramente interessante, richiede qualche considerazione.

Accogliendo ciò che la Circolare 2019 specifica, l'analisi pushover **può** ancora essere condotta lungo direzioni separate. Ciò però non autorizza l'affermazione per cui "in analisi statica non lineare non si deve prevedere la combinazione delle azioni sismiche al 30%". Le argomentazioni addotte allo scopo infatti sono discutibili; vediamo perchè.

Punto 1. Il fatto che le analisi statiche non lineari costituiscano semplificazioni, si immagina rispetto alle dinamiche non lineari, è ben noto ma ciò non implica affatto che "l'azione sismica agente in direzione X non coinvolga le risorse strutturali lungo Y".

Questa è un'argomentazione poco consistente: un organismo resistente spaziale mobilita tutte le proprie risorse sotto le sollecitazioni applicate; anche se le forze sono monodirezionali, la risposta coinvolge tutte le proprietà degli elementi strutturali. Ogni analisi non lineare se fosse condotta trascurando parte dei comportamenti strutturali comporterebbe inevitabilmente una modifica in senso irrealistico delle fessurazioni e plasticizzazioni progressive.

Inoltre, non si può ignorare un problema perchè altrimenti il calcolo si "appesantisce". Siamo sicuri che il Progettista non vorrà alterare un'analisi solo per svolgerla in tempi di calcolo ridotti.

Punto 2. La sovrapposizione degli effetti è certamente inapplicabile ad un'analisi non lineare, ma non è affatto l'unico approccio che può essere seguito per un'analisi multidirezionale. Si veda quanto riportato nel seguito, tratto dalla documentazione di PCM (Manuale di Aggiornamento 2018). Nell'analisi pushover di PCM non viene seguita la combinazione lineare degli effetti, né per la bidirezionalità né per la componente sismica verticale [per quest'ultima, per approfondimenti, si rimanda ai lavori di Mariani e Pugi pubblicati su Ingenio].

Ulteriori considerazioni.

Il fenomeno sismico dal punto di vista fisico consiste in un moto del terreno che genera nelle strutture sovrastanti effetti inerziali dovute alle masse. Il moto è caotico e induce forze nelle 3 direzioni, agenti contemporaneamente. Una buona analisi deve sempre porsi l'obiettivo di rappresentare nel miglior modo possibile il fenomeno fisico.

La pushover è certamente una semplificazione del comportamento reale (ma tutte le analisi lo sono, in una certa misura; anche la dinamica non lineare; questo, senza contare che per le murature la dinamica non lineare permette solo il calcolo della domanda ma per la capacità occorre comunque una statica non lineare); tuttavia, la pushover è uno strumento tanto più idoneo quanto più tiene conto nel modo migliore possibile dei vari aspetti: azioni in input (multidirezionali, verticale inclusa) e capacità delle strutture (spaziale, quindi p.es. per i muri reazioni nel piano e fuori piano). Non si può quindi che accogliere positivamente tutte le Ricerche che introducano nell'analisi elementi di maggiore rappresentatività del fenomeno fisico. Si noti anche che la combinazione direzionale è prevista anche dall'EuroCodice 8 - Parte 1 (p. 4.3.3.5.1.(6) UNI EN 1998-1: 2005).

Dal punto di vista delle decisioni del Progettista, ciascuno è ovviamente responsabile delle proprie scelte, che si suppone saranno adeguatamente motivate. Il software Aedes.PCM lascia dunque libertà di applicazione sia della combinazione direzionale, sia della componente sismica verticale.

Nel seguito, riportiamo il paragrafo che alla combinazione direzionale in PCM viene dedicato nel Manuale di

Aggiornamento 2018 di PCM.

Dal Manuale di Aggiornamento di PCM 2018:

In analisi Pushover sarà possibile eseguire l'analisi bidirezionale elaborando delle curve che tengano conto della combinazione direzionale secondo la regola del 30%, conformemente a quanto richiesto in §7.3.5.

Se è stata scelta la distribuzione A e la direzione +X, saranno elaborate le curve $A+X+0.3Y$ e $A+X-0.3Y$.

L'elaborazione della curva pushover registra comunque il taglio alla base e lo spostamento in direzione X ma alla struttura viene applicato un campo di forze anche in direzione Y secondo la distribuzione scelta.

L'evoluzione della teoria dell'analisi pushover per le strutture spaziali è oggetto di numerosi studi. Data la non linearità dell'analisi, non è praticabile una via di sovrapposizione degli effetti considerando due analisi separate, seppure una con contributo ridotto al 30%. In particolare, l'analisi pushover per gli edifici in muratura richiede l'esecuzione delle verifiche di sicurezza nel corso del processo incrementale, diversamente dalle strutture in cemento armato per le quali i controlli di resistenza vengono effettuati a posteriori ed in tal caso è possibile, come proposto anche nell'EuroCodice, combinare le domande nelle due direzioni.

Per gli edifici in muratura si deve seguire un'analisi pushover bidirezionale a tutti gli effetti: e non è neppure sufficiente applicare alle masse in direzione ortogonale alla principale forze ridotte al 30% in quanto questa è a tutti gli effetti un'analisi in direzione obliqua in pianta (rispetto agli assi globali di riferimento XY) ma non un'analisi di simultaneità delle componenti lungo gli assi principale e ortogonale.

L'analisi bidirezionale può efficacemente fondarsi sull'ipotesi di distribuzioni coerenti nelle due direzioni e applicate contemporaneamente, seppur con riduzione delle forze al 30% nel caso della direzione ortogonale a quella principale lungo cui viene effettuata l'analisi di spinta.

Ad esempio, supponiamo per fissare le idee che la direzione principale di spinta sia la X. Nel caso di distribuzione con forze proporzionali alla forma modale del modo principale, le forze nella direzione X, generate dalla ripartizione dell'incremento di taglio fra le masse attive, sono conformi al modo principale X, mentre le forze dirette secondo Y, contemporaneamente agenti nelle masse, sono conformi al modo principale Y e vengono calcolate ripartendo un taglio incrementale ridotto al 30%.

Le procedure sviluppate per Aedes.PCM seguono quanto illustrato nell'articolo scientifico:

G. P. Cimellaro, A.M.ASCE; T. Giovine; and D. Lopez-Garcia: "Bidirectional Pushover Analysis of Irregular Structures", Journal of Structural Engineering, Vol. 140, Issue 9 (September 2014),

da cui è tratta la figura seguente.

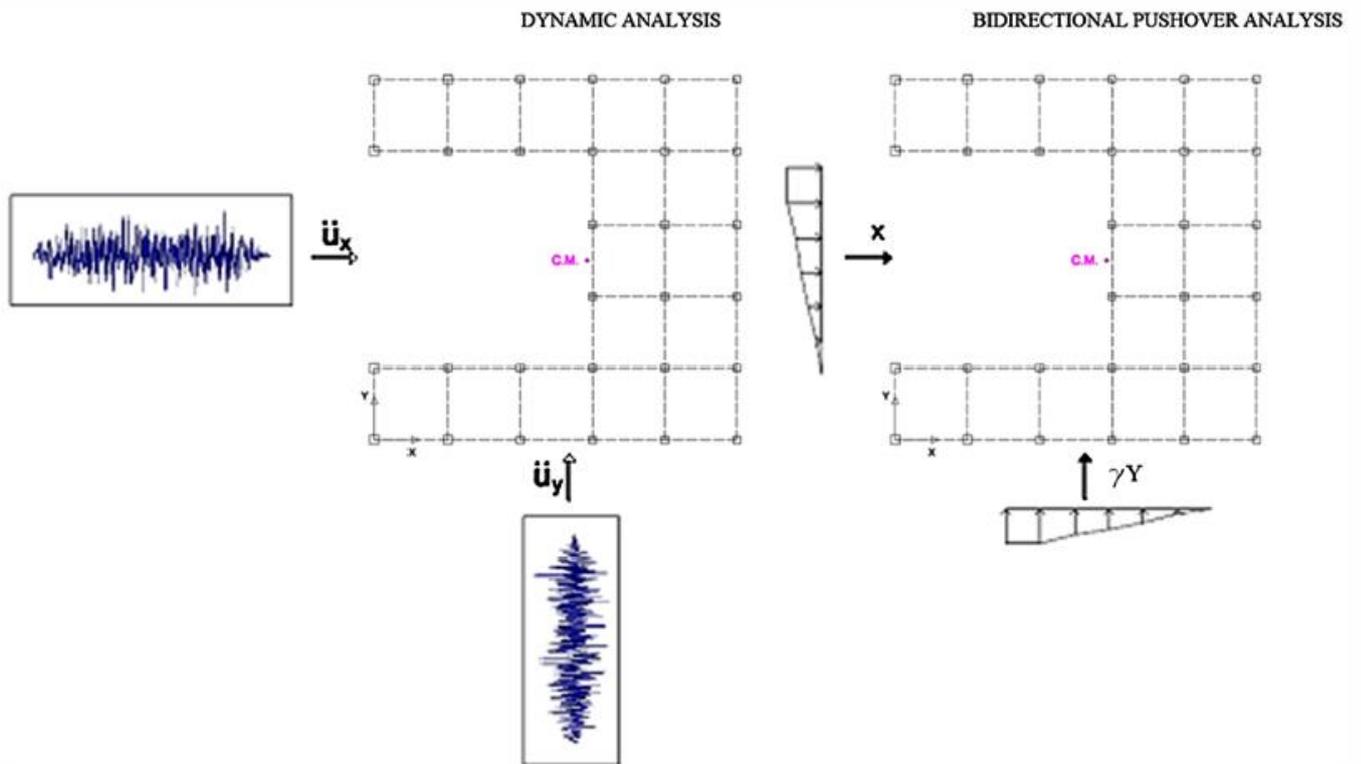


Fig. 1. Bidirectional excitation adopted for bidirectional nonlinear response history analysis (NRHA) and for bidirectional pushover analysis (BPA)

Nell'articolo viene esaminata l'opportunità della scelta di un particolare valore del coefficiente γ applicato alla direzione ortogonale a quella principale di spinta. Si ipotizza la correttezza di valori che possono essere diversi dallo 0.30 (30%) attualmente proposto dall'EuroCodice (ripreso dal D.M. 17.1.2018); in ogni caso, per operare conformemente alla Normativa vigente, in Aedes.PCM 2018 si applica il valore $\gamma=0.3$.

Per mantenere il completo controllo sull'analisi di spinta, Aedes.PCM consente la selezione o meno delle curve con combinazione direzionale.
