

Efficacia delle eccentricità correttive nel progetto di edifici multipiano planimetricamente irregolari: metodologia ed applicazione ad un caso reale.

B. Calderoni

Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale, Università di Napoli "Federico II", Italy

A. Ghersi

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Catania, Italy

Z. Rinaldi

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Roma Tor Vergata, Italy

SOMMARIO: L'uso dell'analisi modale nella progettazione di edifici asimmetrici risulta efficace per limitare sia gli spostamenti conseguenti a terremoti di lieve entità che la richiesta di duttilità nel caso di terremoti violenti. L'analisi statica può essere sufficientemente valida solo se sviluppata utilizzando appropriati valori di eccentricità aggiuntive. Per superare l'inadeguatezza delle formulazioni di normativa, in questa memoria si propone una semplice procedura in grado di fornire i valori esatti di tali eccentricità e si discute l'influenza dei principali parametri che governano il comportamento strutturale di edifici irregolari. Si evidenzia, inoltre, la difficoltà nella valutazione di alcune di tali caratteristiche (raggio di inerzia delle rigidezze, eccentricità delle rigidezze) nel caso di edifici multipiano e si discute la validità delle formulazioni semplificate proposte per risolvere il problema della loro determinazione. Si verifica infine la possibilità di estendere al caso di edifici multipiano i risultati ricavati da schemi monopiano, con riferimento sia a schemi regolarmente asimmetrici che ad una struttura reale.

ABSTRACT: The use of modal analysis in designing asymmetrical buildings appears necessary in order to reduce both the displacement demand under weak seismic events and the ductility demand under strong earthquakes. The static analysis can be effective only if it used together with proper values of additional eccentricities. To overcome the inaccuracy of the code formulations, the authors propose a simple procedure that gives exact values of these eccentricities and discuss the influence of the main parameters which rule the structural behaviour. The difficulty in evaluating some of them (radius of gyration of stiffness, stiffness eccentricity) in the case of multi-storey buildings is examined and the validity of simplified formulations proposed to overcome this problem is discussed. The effectiveness of using static analysis in the design of multi-storey buildings, together with the exact eccentricities evaluated for single-storey systems, is analysed with reference both to regularly asymmetric multi-storey schemes and to an actual structure.

1 INTRODUZIONE

Gli edifici irregolari in pianta hanno quasi sempre manifestato un comportamento sismico non soddisfacente, evidenziando nel caso di terremoti di lieve entità grandi spostamenti laterali e danni agli elementi non strutturali e, nel caso di eventi sismici violenti, collassi inaspettati per prematura crisi delle membrature resistenti più esterne. Tali situazioni sono dovute principalmente alla rotazione torsionale provocata dalla mancanza di simmetria strutturale, sebbene anche altri aspetti possano contribuire a tale fenomeno (ad esempio l'influenza di elementi non strutturali e la difficoltà nel modellare il loro contributo o l'effetto negativo delle concentrazioni di tensione in alcuni elementi dei telai e degli impalcati).

Il comportamento elastico (che la struttura deve esibire in caso di sismi di lieve entità) è colto in modo adeguato dall'analisi modale. La risposta inelastica, invece, è più difficilmente preve-

dibile, poiché la sua valutazione richiede sia l'uso di strumenti di analisi più sofisticati e difficili da utilizzare, sia l'analisi degli effetti dovuti ad un numero elevato di registrazioni accelerometriche. Per questo motivo l'ingegnere progettista ha necessità di riferirsi a indicazioni specifiche mediante le quali si possa ottenere, con procedure comunque semplici, un buon comportamento sismico per edifici irregolari (Gheresi e Rossi 1999 a).

In ogni caso è stato provato che il solo uso dell'analisi modale, invece di quella statica, già di per sé consente di ottenere strutture che presentano una bassa richiesta di duttilità senza d'altronde incrementare in maniera significativa le resistenze strutturali e quindi i costi, particolarmente nel caso di schemi torsionalmente flessibili (Gheresi et al. 1999). Nonostante ciò, tutti i codici di normativa consentono l'uso dell'analisi statica anche per le strutture asimmetriche, prescrivendo l'adozione di eccentricità addizionali, denominate anche eccentricità dinamiche o correttive, per superare i limiti di tale tipo di analisi e garantire risultati equivalenti a quelli forniti dall'uso dell'analisi modale.

In effetti, però, nessuna delle semplici formulazioni fornite dalle differenti norme sismiche sembra essere realmente efficace. (Calderoni et al. 1994, 1995, 1996). In un recente studio su tale argomento (Anastassiadis et al. 1998) è inclusa una serie di formule che consentono di valutare in modo esatto, per uno schema monopiano, le eccentricità addizionali necessarie per ottenere, con l'analisi statica, gli stessi spostamenti massimi degli estremi dell'impalcato e la stessa rotazione di piano, forniti dall'analisi modale. La necessità di alcune semplificazioni analitiche comporta che le espressioni proposte dagli autori siano valide solo se i periodi di vibrazione dello schema appartengono allo stesso ramo dello spettro di risposta (costante o iperbolico), sebbene formulazioni più complesse possano essere usate nel caso più generale di spettro costituito da rami differenti. Un approccio alternativo è stato proposto da alcuni degli autori in una precedente memoria (Calderoni et al. 1994): esso prevede l'uso di una procedura, cioè una serie di semplici operazioni sequenziali strettamente connesse al significato delle analisi statiche e modali, piuttosto che di una singola formula notevolmente complessa. Tale metodologia è più dettagliatamente illustrata e discussa nel successivo paragrafo, nel quale sono inoltre diagrammati i valori delle eccentricità aggiuntive in funzione dei principali parametri (eccentricità tra baricentro delle rigidezze e centro di massa e_s e rapporto tra le frequenze laterali e torsionali disaccoppiate $\Omega_\theta = r_k/r_m$), al fine di evidenziare alcune differenze legate alla forma dello spettro di risposta e ad altri parametri caratteristici (raggio di inerzia delle masse, posizione del baricentro delle masse).

2 PROCEDURA PER LA VALUTAZIONE DELLE ECCENTRICITÀ CORRETTIVE

Nello studio di edifici asimmetrici, il primo passo da compiere è l'analisi di uno schema monopiano, in quanto solo questo modello semplificato permette di cogliere gli aspetti di base del comportamento torsionale dinamico degli edifici reali. Il sistema monopiano è una struttura ideale caratterizzata da un numero di elementi resistenti alle azioni orizzontali collegati da un impalcato rigido, la cui deformata è completamente descritta da tre soli gradi di libertà. La maggior parte degli studiosi ha basato i propri lavori su un modello ulteriormente semplificato, in cui si trascura il moto trasversale (Tso e Dempsey 1980), anche se la simultanea presenza di due componenti sismiche ortogonali o la contemporanea eccentricità in due direzioni ortogonali può avere una certa importanza, soprattutto in campo inelastico (Gheresi e Rossi 1998, 1999b). Mentre il comportamento inelastico dipende dalla rigidezza, dalla resistenza e dalla posizione di tutti gli elementi resistenti, la risposta elastica del sistema monopiano è definita da pochi parametri globali (eccentricità tra baricentri delle masse e delle rigidezze e_s , raggio di inerzia delle masse r_m e delle rigidezze r_k). Sia l'analisi statica che quella modale, quindi, si possono riassumere ed eseguire con semplici espressioni analitiche.

Per valutare le eccentricità aggiuntive è necessario prima di tutto definire il criterio di equivalenza tra i due tipi di analisi. In generale si possono considerare tre eccentricità aggiuntive Δe_θ , Δe_r , Δe_l , che permettono di uguagliare rispettivamente la massima rotazione, il massimo spostamento del lato destro dell'impalcato e quello del lato sinistro dello stesso. La prima è considerata importante da alcuni (Anastassiadis et al. 1998), mentre altri, inclusi gli autori, la giudicano poco significativa basandosi sulla considerazione che le massime azioni interne negli elementi di un telaio sono legate ai massimi spostamenti orizzontali, indipendentemente dalla

rotazione dell'impalcato che li provoca. La determinazione delle altre eccentricità correttive Δe_r , Δe_l può essere ottenuta seguendo i passi della procedura riportata di seguito, nella quale, per semplicità, si utilizzano valori normalizzati (Appendice A – Legenda):

1. Valutazione della frequenza laterale disaccoppiata ω_y e delle frequenze naturali normalizzate Ω_j ($j = 1-2$):

$$\omega_y = \sqrt{\frac{K_y}{m}}$$

$$\Omega_j = \frac{R_m^2 + R_k^2 + E_s^2 \pm \sqrt{(R_m^2 + R_k^2 + E_s^2)^2 - 4 R_m^2 R_k^2}}{2 R_m^2}$$

2. Valutazione dell'accelerazione spettrale normalizzata $S_{a,j}$ corrispondente alle frequenze naturali del sistema ω_j ($j = 1-2$). Si noti che le eccentricità correttive dipendono solo dalla forma dello spettro di risposta, e non dai suoi valori; è quindi del tutto equivalente l'uso di una accelerazione spettrale $s_{a,j}$ o di qualsiasi altro coefficiente proporzionale;
3. Valutazione del contributo di ciascun modo (spostamenti normalizzati del baricentro delle masse V_j e rotazioni normalizzate dell'impalcato θ_j , $j = 1-2$):

$$V_j = S_{a,j} \frac{E_s}{\Omega_j^2 [E_s^2 + R_m^2 (\Omega_j^2 - 1)^2]} E_s$$

$$\theta_j = S_{a,j} \frac{E_s}{\Omega_j^2 [E_s^2 + R_m^2 (\Omega_j^2 - 1)^2]} (\Omega_j^2 - 1)$$

4. Valutazione degli spostamenti normalizzati di entrambi i lati dell'impalcato, per ciascun modo:

$$V_{r,j} = V_j + \alpha \theta_j$$

$$V_{l,j} = V_j + (\alpha - 1) \theta_j$$

5. Valutazione degli spostamenti normalizzati di entrambi i lati dell'impalcato V_r e V_l valutati con la combinazione modale (secondo la regola CQC):

$$r_{1,2} = \frac{\Omega_2}{\Omega_1}$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{8 \zeta^2 (1 + r_{1,2}) r_{1,2}^{3/2}}{(1 - r_{1,2}^2)^2 + 4 \zeta^2 r_{1,2} (1 + r_{1,2})^2}$$

$$V_p = \sqrt{V_{p,1}^2 + V_{p,2}^2 + 2 \varepsilon_{1,2} V_{p,1} V_{p,2}}, \quad \text{con } p = r, l$$

6. Valutazione dell'accelerazione spettrale normalizzata $S_{a,y}$ corrispondente alla frequenza laterale disaccoppiata ω_y (vedere nota al passo 2);
7. Valutazione dello spostamento normalizzato ad entrambi i lato dell'impalcato prodotto da una forza unitaria ($V_{r,F}$, $V_{l,F}$) applicata in C_M e da un momento unitario ($V_{r,M}$, $V_{l,M}$)

$$V_{r,F} = 1 + \frac{E_s^2}{R_k^2} - \alpha \frac{E_s}{R_k^2} \quad V_{l,F} = 1 + \frac{E_s^2}{R_k^2} - (\alpha - 1) \frac{E_s}{R_k^2}$$

$$V_{r,M} = -\frac{E_s}{R_k^2} + \alpha \frac{1}{R_k^2} \quad V_{l,M} = -\frac{E_s}{R_k^2} + (\alpha - 1) \frac{1}{R_k^2}$$

8. Valutazione delle eccentricità correttive $\Delta E_r, \Delta E_l$:

$$\Delta E_r = \frac{V_r / S_{a,y} - V_{r,F}}{V_{r,M}}$$

$$\Delta E_l = \frac{V_l / S_{a,y} - V_{l,F}}{V_{l,M}}$$

La procedura è valida per eccentricità sia positive che negative, ossia indipendentemente da quale sia il lato rigido o flessibile dell'impalcato. Secondo la convenzione dei segni adottata, le eccentricità correttive $\Delta E_r, \Delta E_l$ incrementano lo spostamento laterale solo se $\Delta E_r > 0$ e $\Delta E_l < 0$ rispettivamente, indipendentemente dal segno della eccentricità delle rigidezze, e quindi devono essere prese in considerazione solo in questi casi.

3 DISCUSSIONE SUI VALORI DELLE ECCENTRICITÀ CORRETTIVE

La procedura descritta nel precedente paragrafo è stata utilizzata in un'ampia analisi numerica, nella quale si sono esaminati schemi caratterizzati da differenti valori di R_m (0.30, 0.35, 0.40) e da varie posizioni del baricentro delle masse ($\alpha = 0.40, 0.50, 0.60$) e si sono utilizzati differenti spettri di progetto (costante, iperbolico, costante-iperbolico con esponente del ramo non lineare pari a -1 e $-2/3$); in ciascun caso il rapporto $\Omega_0 = R_k/R_m$ è stato fatto variare tra 0.4 e 1.8, mentre l'eccentricità adimensionalizzata E_s , tra 0 e 0.20. L'influenza della forma dello spettro di progetto è risultata significativa soprattutto per il lato flessibile (Fig. 1). La posizione del baricentro delle masse condiziona il comportamento sia del lato flessibile (quando $\alpha=0.40$), sia di quello rigido (quando $\alpha=0.60$); meno rilevante risulta l'influenza di R_m (Fig. 2).

Le formulazioni semplificate già proposte (Calderoni et al. 1994) risultano sostanzialmente confermate, sebbene la procedura illustrata in questo lavoro sembra essere sempre raccomandabile, fornendo risultati più affidabili a fronte di un minimo sforzo computazionale.

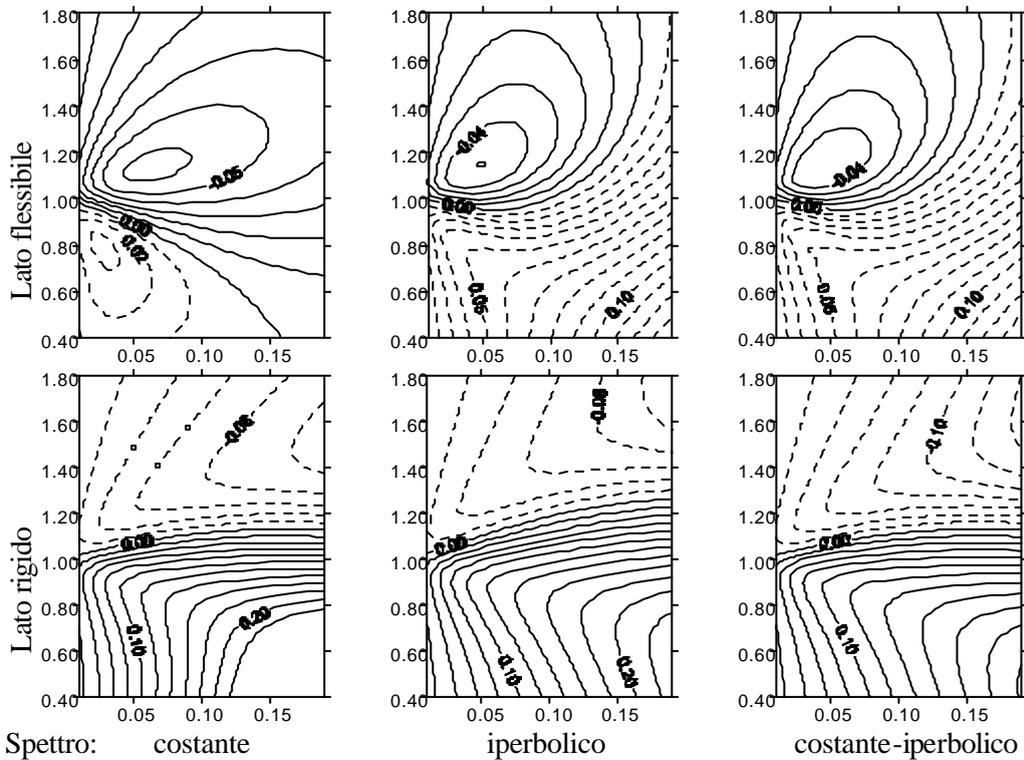


Figura 1. Eccentricità correttive per lato flessibile e rigido, nel caso di spettri costante, iperbolico e costante-iperbolico (con $\alpha=0.50, R_m=0.30$)

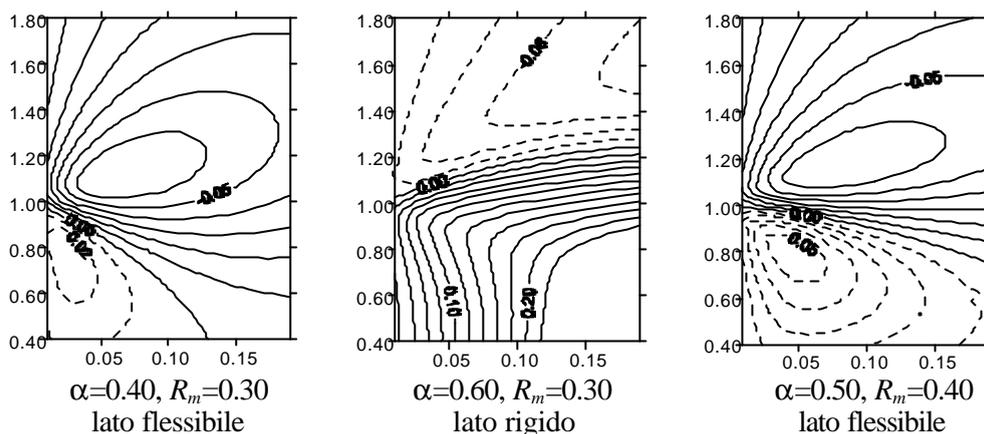


Figura 2. Eccentricità correttive per differenti posizioni del baricentro delle masse e raggio d'inerzia delle masse (con spettro costante)

4 EDIFICI MULTIPIANO REGOLARMENTE ASIMMETRICI

Sebbene lo studio di sistemi monopiano dia utili informazioni sul comportamento torsionale, resta da analizzare se ed in che modo sia possibile estenderne i risultati a schemi multipiano. Infatti, quando si affronta il problema del multipiano (multi-storey, MS) le stesse definizioni fondamentali relative al modello monopiano (single-storey, SS) non sono direttamente utilizzabili: nello schema SS la rigidezza di ciascun elemento è facilmente definibile ed è quindi individuabile con esattezza il baricentro delle rigidezze, mentre nello schema MS il singolo elemento resistente è un telaio caratterizzato da una matrice di rigidezza ed a rigore non si potrebbe proprio parlare di baricentro delle rigidezze del sistema.

Un possibile approccio per superare tale problema consiste nel definire come *rigidezza laterale di un telaio piano ad un certo livello* il rapporto tra il taglio totale al livello analizzato e lo spostamento di interpiano; tale valore dipende, oltre che dalle caratteristiche geometriche ed elastiche dello schema, anche dalla distribuzione di forze lungo l'altezza del telaio stesso (dai rapporti relativi e non dai valori delle singole forze). Partendo da questa definizione, per una assegnata distribuzione di forze è possibile valutare sia la posizione di C_R sia il valore di R_k . Se tali parametri, unitamente alla posizione del baricentro delle masse C_M , sono uguali ad ogni piano, l'edificio può essere denominato *regolarmente asimmetrico*. Una condizione sufficiente (ma non necessaria) affinché la struttura sia regolarmente asimmetrica è che presenti la stessa distribuzione di masse ad ogni livello e sia costituita da telai piani uguali, oppure da telai aventi lo stesso schema geometrico e sezioni diverse ma variabili con la stessa legge lungo l'altezza.

Una semplice procedura per valutare i parametri fondamentali R_k ed E_s (cioè C_R) e quindi per verificare se la struttura è regolarmente asimmetrica, è la seguente:

1. Valutazione delle forze statiche F nel rispetto della norma sismica;
2. Valutazione dello spostamento normalizzato del baricentro delle masse V_F e della rotazione di impalcato θ_F a ciascun piano prodotti da queste forze applicate in C_M ;
3. Valutazione dello spostamento normalizzato del baricentro delle masse V_M e della rotazione di impalcato θ_M a ciascun piano prodotti da momenti torsionali pari a $F E_1$ (essendo E_1 una eccentricità arbitraria, ad esempio quella accidentale);
4. Valutazione di R_k ed E_s a ciascun piano, utilizzando le seguenti espressioni:

$$R_k = E_1 \sqrt{\frac{V_F}{\theta_M E_1} - \left(\frac{\theta_F}{\theta_M}\right)^2}$$

$$E_s = -E_1 \frac{\theta_F}{\theta_M}$$

Le formule citate, ottenute da Calderoni et al. (1994) per sistemi monopiano, sono valide rigorosamente anche per schemi multipiano solo se regolarmente asimmetrici. Formulazioni sostanzialmente equivalenti sono state proposte da Tso e Moghadam (1998), in funzione degli spostamenti alle estremità dell'impalcato, ricavati per analoghe condizioni di carico (forza applicata nel baricentro delle masse e forza traslata di una eccentricità accidentale).

Se si ottengono gli stessi valori di R_k ed E_s a ciascun livello, lo schema è regolarmente asimmetrico. L'effetto dell'accoppiamento latero-torsionale può in tal caso essere ben approssimato dal prodotto della risposta normalizzata di un sistema monopiano eccentrico e del corrispondente sistema multipiano torsionalmente bilanciato (Hejal e Chopra 1987). Tali strutture possono quindi essere progettate mediante l'analisi statica utilizzando le eccentricità correttive valutate secondo la procedura illustrata nel paragrafo 2. Le caratteristiche della sollecitazione per il progetto degli elementi saranno le massime tra quelle relative alle tre condizioni di carico corrispondenti alle forze orizzontali applicate rispettivamente in C_M , C_M+DE_r e C_M+DE_l .

Al fine di confermare l'efficacia della metodologia proposta, sono stati analizzati i quattro edifici in c.a. di sette piani, riportati nel lavoro di Tso e Moghadam (1998). Tali edifici presentano tutti pianta rettangolare (24×17 m), altezza di interpiano costante (3 m) e tre telai resistenti uguali tra loro, disposti secondo la direzione dell'azione sismica (trasversale). I telai sono a tre campate (di 6, 5 e 6 m), con travi di dimensioni 30×50 cm, e pilastri quadrati con lato di 50 cm. Un telaio è posizionato proprio al centro dell'impalcato, mentre gli altri sono disposti simmetricamente rispetto ad esso: quindi il baricentro delle rigidezze coincide con il centro geometrico dell'impalcato. Un quarto telaio è presente lungo la direzione longitudinale, passante per il centro dell'impalcato, in modo da non fornire alcun contributo alla rigidezza torsionale dello schema. La massa a ciascun piano è pari a 400 t ed il corrispondente periodo traslazionale T_y è 1.45 s. Si suppone inoltre che le masse siano distribuite in modo tale che il loro baricentro C_M si trovi a destra di C_R , ad una distanza di 2.4 m.

Tabella 1. Parametri fondamentali ed eccentricità correttive per gli schemi regolarmente asimmetrici

	E	R_k	R_m	$\Omega_{\theta}=R_k/R_m$	DE_l	DE_r
B3	-0.10	0.102	0.354	0.288	-0.1826	-0.0169
B6	-0.10	0.204	0.354	0.577	-0.1778	-0.0380
B9	-0.10	0.306	0.354	0.865	-0.1770	-0.0296
B12	-0.10	0.408	0.354	1.153	0.0037	0.0271

Tabella 2. Spostamenti [mm] forniti dall'analisi modale (MA), dall'analisi statica standard (SA) e dall'analisi statica corretta (CSA)

piano	B3						B6					
	Lato sinistro (rig.)			Lato destro (flex.)			Lato sinistro (rig.)			Lato destro (flex.)		
	MA	SA	CSA	MA	SA	CSA	MA	SA	CSA	MA	SA	CSA
7	167.4	136.1	177.6	167.5	207.7	-	65.6	7.2	68.5	58.7	78.7	-
6	157.3	127.5	166.4	157.6	194.6	-	61.7	6.7	64.2	55.2	73.7	-
5	140.1	113.1	147.7	140.6	172.7	-	55.0	6.0	57.0	49.2	65.4	-
4	115.9	93.3	121.8	116.7	142.5	-	45.6	4.9	47.0	40.9	54.0	-
3	86.2	69.2	90.3	87.0	105.6	-	34.0	3.6	34.8	30.5	40.0	-
2	52.7	42.3	55.2	53.3	64.5	-	21.0	2.2	21.3	18.8	24.4	-
1	19.5	15.7	20.4	19.8	23.9	-	7.7	0.8	7.9	7.01	9.1	-

piano	B9						B12					
	Lato sinistro (rig.)			Lato destro (flex.)			Lato sinistro (rig.)			Lato destro (flex.)		
	MA	SA	CSA	MA	SA	CSA	MA	SA	CSA	MA	SA	CSA
7	48.2	16.7	50.3	46.3	54.8	-	23.6	25.2	-	47.4	46.9	49.8
6	45.3	15.6	47.1	43.5	51.4	-	22.2	23.7	-	44.5	43.9	46.7
5	40.3	13.9	41.8	38.8	45.6	-	19.8	21.0	-	39.7	39.0	41.4
4	33.5	11.4	34.5	32.2	37.6	-	16.4	17.3	-	33.0	32.2	34.2
3	25.1	8.5	25.6	24.1	27.9	-	12.3	12.8	-	24.7	23.8	25.3
2	15.4	5.2	15.6	14.8	17.0	-	7.6	7.8	-	15.2	14.6	15.5
1	5.7	1.9	5.8	5.5	6.3	-	2.8	2.9	-	5.7	5.4	5.7

Gli edifici sono quindi asimmetrici, con $E_s = -0.10$, ed essendo l'eccentricità negativa il lato flessibile è quello destro. La sola differenza tra i quattro edifici è la posizione dei telai laterali rispetto a quello centrale: la loro distanza, infatti, assume rispettivamente i valori di 3 m (edificio B3), 6 m (B6), 9 m (B9) e 12 m (B12). In funzione di tali diverse posizioni degli elementi resistenti, il comportamento torsionale dei quattro edifici è diverso, variando da torsionalmente flessibile (B3, $\Omega_\theta=0.29$) a torsionalmente rigido (B12, $\Omega_\theta=1.15$). Tutti gli edifici si considerano progettati secondo lo spettro di progetto dell'EC8 per suolo tipo A, con $\alpha=0.25$ e $q=5$.

La procedura proposta per la valutazione delle eccentricità correttive è stata applicata a tutti gli schemi, tenendo conto della forma esatta dello spettro dell'EC8. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 1. Si può notare che per il sistema B12 (torsionalmente rigido) sono necessarie correzioni solo al lato flessibile (in questo caso il lato destro), mentre per gli altri, torsionalmente flessibili è richiesta una eccentricità aggiuntiva solo per il lato rigido. Per ciascuno schema, sono stati valutati ad ogni piano gli spostamenti alle estremità degli impalcati, sia con l'analisi modale (MA) che con l'analisi statica standard (SA) e con l'analisi statica corretta (CSA). Si noti che gli spostamenti ottenuti con entrambe le analisi statiche sono stati poi moltiplicati per il rapporto tra i tagli alla base ottenuti con MA e SA, valutati su uno schema traslazionale. Infatti, come ben noto, per schemi multipiano l'analisi modale e quella statica forniscono tagli alla base diversi (generalmente maggiore nell'analisi statica) per cui, per un corretto confronto dei risultati, è necessario equiparare le forze agenti.

Il buon accordo tra i risultati della analisi modale e di quella statica corretta, riportati in Tabella 2, conferma la correttezza della metodologia proposta in tutti i casi analizzati, indipendentemente dalla loro rigidità torsionale.

5 UN CASO DI EDIFICIO MULTIPIANO IRREGOLARMENTE ASIMMETRICO

La procedura descritta nei paragrafi precedenti può essere utilizzata per ottenere indicazioni utili anche nel caso di edifici irregolarmente asimmetrici. A titolo di esempio si è considerato un edificio di sei piani fortemente irregolare che costituisce il corpo principale della Facoltà di Ingegneria di Catania (Fig. 3). Gli impalcati ai vari livelli presentano dimensioni differenti; le rigidità degli elementi resistenti nelle due direzioni ortogonali sono notevolmente diverse tra loro, così che la struttura risulta piuttosto rigida alla traslazione, ma flessibile torsionalmente, lungo la direzione y , e molto deformabile alla traslazione, ma rigida torsionalmente, lungo la direzione x . Sebbene la struttura reale non sia stata concepita per sopportare le azioni sismiche, in questo esempio si è fatto comunque riferimento ad azioni valutate in accordo allo spettro di progetto dell'EC8 per suolo tipo A, con $\alpha=0.25$ e $q=3$.



Figura 3. Facoltà di Ingegneria di Catania

Tabella 3. Parametri fondamentali ed eccentricità correttive per l'edificio esaminato

Direzione x $T_x=0.609$ s							
Piano	L [m]	L_r [m]	r_m [m]	r_k [m]	e_s [m]	Δe_l [m]	Δe_r [m]
6	9	3.90	9.70	43.39	-0.64	0.07	0.00
5	9	3.76	9.31	34.46	-0.69	0.10	0.01
4	9	3.75	9.28	29.18	-0.72	0.14	0.02
3	9	3.93	8.77	24.79	-0.65	0.14	0.04
2	9	4.50	5.88	21.33	-0.52	0.07	0.02
1	18	9.00	6.62	19.12	-1.88	0.50	0.07

Direzione y $T_y=1.731$ s							
Piano	L [m]	L_r [m]	r_m [m]	r_k [m]	e_s [m]	Δe_l [m]	Δe_r [m]
6	27	15.33	9.70	6.17	0.16	0.24	0.26
5	27	15.12	9.31	6.25	0.32	0.52	0.59
4	27	14.92	9.28	6.19	0.78	1.04	1.48
3	27	14.09	8.77	6.03	1.47	1.11	2.80
2	18	9.00	5.88	6.06	2.55	-0.76	0.86
1	9	5.25	6.62	6.35	3.27	0.47	-4.50

Tabella 4. Spostamento [mm] al lato destro dell'edificio forniti dall'analisi modale (MA), dall'analisi statica standard (SA) e dall'analisi statica corretta (CSA)

Piano	MA	SA	CSA
6	28.9	20.4	31.8
5	25.9	18.0	28.3
4	21.0	14.4	22.8
3	15.1	10.0	16.2
2	8.9	5.8	9.4
1	3.3	2.2	3.6

I valori di R_k e E_s , sono stati valutati secondo la procedura definita nel paragrafo 4 con riferimento a spostamenti e rotazioni relative, e risultano sensibilmente diversi ai vari livelli (Tab. 3). L'edificio quindi, è irregolarmente asimmetrico e ad esso dovrebbe essere a rigore applicata l'analisi modale. Sono state valutate comunque le eccentricità correttive ad ogni piano, come se l'edificio fosse regolarmente asimmetrico, riferendosi ai corrispondenti valori di R_k ed E_s . Si è quindi svolta l'analisi statica per l'azione sismica agente in direzione y, utilizzando a tutti i piani la stessa eccentricità correttiva, pari alla massima tra quelle valutate ai diversi livelli. I risultati ottenuti in termini di spostamento degli estremi dell'impalcato (corretti come già evidenziato nel paragrafo precedente) sono riportati in Tabella 4, unitamente a quelli ricavati dall'analisi modale. Si può notare come i valori ottenuti con la CSA sono anche in questo caso molto simili a quelli ottenuti con la MA, e comunque a vantaggio di sicurezza.

Sembra quindi che, pur restando indubbiamente l'analisi modale il metodo più idoneo per la progettazione di strutture irregolarmente asimmetriche, si possano ottenere utili indicazioni progettuali anche per tale tipologia mediante l'utilizzo della procedura semplificata per la correzione dell'analisi statica, nonostante essa sia valida a rigore solo per gli edifici regolarmente asimmetrici.

6 CONCLUSIONI

Il comportamento sismico di strutture monopiano irregolari in pianta può essere correttamente valutato mediante l'analisi modale, i cui risultati garantiscono in un gran numero di casi anche una buona risposta in campo inelastico nel caso di terremoti violenti. Risultati analoghi possono però essere raggiunti anche con la più semplice analisi statica, purché si adottino appropriate eccentricità correttive. Queste possono essere determinate con semplicità mediante la procedura proposta in dettaglio nel presente lavoro, che supera i limiti delle formulazioni semplificate contenute nelle attuali norme sismiche.

Lo studio degli edifici multipiano può essere affrontato in maniera analoga, purché si definisca in che modo valutare i parametri elastici fondamentali che governano il problema (posizione del centro di rigidità, raggio d'inerzia delle rigidità). Le indicazioni proposte nel lavoro forniscono una risposta semplice e valida a tale problema e consentono di valutare se un edificio può rientrare nella categoria di schemi multipiano definiti "regolarmente asimmetrici".

L'uso delle eccentricità correttive valutate mediante la metodologia proposta per schemi monopiano consente di ottenere, nel caso di strutture regolarmente asimmetriche, risultati sostanzialmente coincidenti con quelli relativi all'analisi modale svolta in maniera rigorosa. La stessa metodologia sembra fornire valide indicazioni di massima anche per edifici irregolarmente asimmetrici, a patto però di utilizzare per tutti i piani il valore massimo tra le eccentricità correttive valutate a ciascun livello.

APPENDICE A – LEGENDA

Parametri fondamentali	Valori normalizzati
C_M baricentro delle masse	
C_R baricentro delle rigidità	
e_s eccentricità delle rigidità, cioè distanza tra C_R e C_M (positiva se C_R è alla destra di C_M)	$E_s = \frac{e_s}{L}$
K_y rigidità laterale totale degli elementi paralleli all'asse y (cioè paralleli all'azione sismica)	
K_θ rigidità torsionale totale intorno a C_R	
L dimensione dell'impalcato lungo la direzione x (ortogonale all'azione sismica)	
L_r distanza del lato destro dell'impalcato dal baricentro delle masse	$\alpha = \frac{L_r}{L}$
ζ smorzamento (%)	
m massa dell'impalcato	
r_k raggio di inerzia delle rigidità intorno a C_R $r_k = \sqrt{K_\theta / K_y}$	$R_k = \frac{r_k}{L}$
r_m raggio di inerzia delle masse intorno al baricentro delle masse	$R_m = \frac{r_m}{L}$
s_a accelerazione spettrale (i pedici 1 e 2 indicano l'accelerazione spettrale delle forme modali; il pedice y indica l'accelerazione spettrale del moto traslazionale lungo la direzione y)	$S_a = \frac{s_a m}{K_y L}$
T_y periodo traslazionale disaccoppiato lungo la direzione y	$T_y = 2\pi \sqrt{m / K_y}$
v spostamento del baricentro delle masse lungo la direzione y	$V = \frac{v}{L}$
v_r, v_l spostamento del lato destro e sinistro dell'impalcato lungo la direzione y	$V_r = \frac{v_r}{L}, \quad V_l = \frac{v_l}{L}$
$\Delta e_r, \Delta e_l$ eccentricità correttive, necessarie ad ottenere per mezzo di analisi statiche gli stessi spostamenti forniti dall'analisi modale, al lato destro e sinistro, (positive se il punto in cui deve essere applicata la forza è alla destra di C_M)	$\Delta E_r = \frac{\Delta e_r}{L}$ $\Delta E_l = \frac{\Delta e_l}{L}$
θ rotazione dell'impalcato	
ω_1, ω_2 frequenze naturali del sistema	$\Omega_j = \frac{\omega_j}{\omega_y}, \quad j = 1, 2$
ω_y frequenza traslazionale disaccoppiata lungo la direzione y	$\omega_y = \sqrt{K_y / m}$

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Anastassiadis, K., Athanatopoulos, A. & Makarios, T. 1998. Equivalent static eccentricities in the simplified methods of seismic analysis of buildings. *Earthquake Spectra* 14(1): 1-34.
- Calderoni, B., Gherzi, A. & Mazzolani, F.M. 1994. A new approach to the problem of in-plan regularity in seismic design of buildings. *Proceedings of 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, 2: 843-848.
- Calderoni, B., Gherzi, A. & Mazzolani, F.M. 1995. Critical analysis of torsional provisions in seismic codes. *Proceedings of Seventh Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Montreal, Canada.
- Calderoni, B., Gherzi, A. & Mazzolani, F.M. 1996. Critical analysis of EC8 approach to face the problem of structural regularity. *European Workshop on the Seismic Behaviour of Asymmetric and Set-back Structures*, Capri, Italy.
- Fajfar, P., Jiang, Y. & Fischinger, M. 1988. Comparison of modal analysis and equivalent lateral force procedure for seismic analysis of buildings. *European Earthquake Engineering*, 2: 3-14.
- Gherzi, A., Marino, E. & Rossi, P.P. 1999. Un confronto tra analisi statica e modale quali strumenti di progetto di edifici multipiano planimetricamente irregolari soggetti ad azioni sismiche. *Atti del IX Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. Torino, Italy.
- Gherzi A. & Rossi P.P. 1998. Behavior of in plan irregular buildings subjected to bi-directional ground motions. *Proceedings of 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, France. Balkema.
- Gherzi A. & Rossi P.P. 1999 a. Formulation of design eccentricity to reduce ductility demand in asymmetric buildings. *Engineering Structures*, (accepted).
- Gherzi A. & Rossi P.P. 1999 b. Seismic response of mono and bi-eccentric in-plan irregular systems. *European Workshop on the Seismic Behaviour of Asymmetric and Set-back Structures*, Istanbul, Turkey (accepted).
- Hejal, R. & Chopra, A. K. 1987. *Earthquake response of torsionally coupled buildings*. Report no. UCB/EERC-87/20, University of California, Berkeley.
- Tso, W. K. & Dempsey K. M. 1980. Seismic Torsional Provision for Dynamic Eccentricity. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 8: 275-289.
- Tso, W. K. & Moghadam A. S. 1998. Application of Eurocode 8 torsional provision to multi-storey buildings. *Proceedings of 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, France. Balkema.