

## Aspectes del disseny conceptual dels edificis de formigó armat

Àlex H. Barbat  
Juan Carlos Vielma  
Sergio Oller

### 1. Introducció

En els primers anys del segle passat es van començar a construir edificis cada cop més alts, amb formes arquitectòniques atrevides i amb tipologies estructurals innovadores que utilitzaven els nous materials d'aquell temps: l'acer i el formigó. Poc després, en els anys 20 i 30 del segle, arran d'algunes catàstrofes sísmiques ocorregudes en diferents zones urbanes del món, ha esdevingut necessari considerar en els projectes d'edificis l'acció dels terratrèmols. Com a conseqüència, es van incorporar per primera vegada en les normes requisits de disseny sismoresistent. En no disposar encara de prou mesuraments fiables de les característiques cinemàtiques del moviment sísmic del terreny en les zones sísmiques on es construïa, ni de coneixements sobre el càlcul de la resposta dinàmica de les estructures, aquestes normes avaluaven les forces sísmiques de disseny d'una manera molt simplificada. Habitualment, s'adoptaven per a l'acció sísmica forces horitzontals estàtiques de l'ordre del 10% del pes total de l'edifici. Atès que el càlcul estàtic elàstic previst es realitzava amb base en el criteri de tensió admissible, les estructures construïdes tenien major resistència a les forces horitzontals que la calculada.

En el període transcorregut des dels anys 40 fins als anys 60 es van desenvolupar mètodes de càlcul dinàmic cada vegada més sofisticats, i per tant es van poder realitzar estudis molt més rigorosos de la resposta sísmica de les estructures. El criteri de disseny que s'emprava en les normes d'aquell temps requeria que no se superés la capacitat resistent de l'estructura. Tanmateix, es va poder comprovar que dissenyar les estructures utilitzant aquest criteri no assegurava la seva resistència en el camp elàstic durant alguns terratrèmols forts. I, malgrat això, es va poder observar que aquesta falta de resistència no sempre portava al col·lapse de l'estructura, i moltes vegades ni tan sols a danys sísmics severos. La conclusió va ser que les estructures aconseguïen sobreviure als terratrèmols si s'aconseguia mantenir la degradació de la seva resistència en certs límits i que, en tal cas, fins i tot era possible la reparació amb uns costos raonables. En comprovar-se que la resistència excessiva no era necessària, l'objectiu del disseny sismoresistent va patir un canvi: en comptes d'assegurar la resistència de les estructures a grans

forces laterals, s'havia d'evitar l'efecte destructiu d'aquestes forces sobre les estructures.

Ja més cap aquí s'arribà a la conclusió que el disseny sismoresistent s'havia d'orientar cap a l'ús de sistemes estructurals amb alta capacitat per deformar-se en el camp inelàstic, és a dir, que els edificis tinguessin una adequada capacitat de desenvolupar *ductilitat estructural*. Els especialistes van admetre que la clau del disseny sismoresistent dels edificis és l'equilibri entre la resistència, la rigidesa i la ductilitat de les estructures.

A partir de l'any 1995 s'han assentat les bases del *performance based design*, que es pot traduir per "disseny per prestacions" i que requereix no solament evitar les pèrdues de vides sinó també reduir les pèrdues econòmiques i assegurar el funcionament de les estructures essencials després d'un sisme.

Les normes existents de disseny sismoresistent d'edificis fan recomanacions sobre les accions sísmiques que s'han de considerar en el projecte, sobre els mètodes simplificats de càlcul d'estructures que es poden aplicar, sobre els detalls d'armat que s'han d'usar, i, en menor mesura, sobre els criteris que s'han d'aplicar en el disseny conceptual de les estructures. Tanmateix, en la fase de disseny conceptual es prenen decisions importants que condicionen fins a tal punt el comportament sísmic de les estructures que accions que es prenen posteriorment –ja sigui càlculs sísmics, detalls d'armat dels elements o altres detalls constructius–, poden no tenir l'efecte esperat. Per exemple, en aquesta fase es decideix la tipologia, la forma en planta de l'estructura, la distribució en altura de la massa i de la rigidesa, s'especifica l'organització del sistema resistent, etc.

Cal esmentar que les normes sísmiques, en utilitzar un criteri de disseny basat en la ductilitat i en el control del dany, admeten implícitament que es poden produir danys estructurals i no estructurals durant els terratrèmols forts, és a dir, admeten un cert grau de vulnerabilitat sísmica de les estructures (Cardona i Barbat 2000).

### 2. Comportament sísmic dels edificis de formigó armat

Les forces d'inèrcia degudes als terratrèmols induïxen en els edificis forces horitzontals importants. El dany sísmic sever més freqüent es concentra en

els pilars, on es poden produir esquerdes diagonals causades pel tallant i/o la torsió, esquerdes verticals causades per l'esclafament, vinclament i despreniment del recobriment. El dany a les bigues pot consistir en esquerdes diagonals i en la ruptura d'estreps per tallant i/o torsió, però també en esquerdes verticals seguides, de vegades, per la ruptura del reforç longitudinal a causa de la flexió produïda per càrregues alternatives. Les connexions entre elements estructurals són, en general, els punts més crítics. En les unions biga-pilar es poden produir esquerdes diagonals per tallant i fallades per adherència i ancoratge insuficients del reforç longitudinal de les bigues com a conseqüència de moments flectors excessius. En les connexions llosa-pilar es poden produir esquerdes per punxonament al voltant dels pilars i esquerdes longitudinals al llarg de la llosa per l'excessiva demanda de flexió imposada pel sisme. S'ha d'evitar la ruptura dels nusos, que, al contrari del que se suposa en els càlculs estructurals que es realitzen, són deformables, de dimensió finita i estan sotmesos a l'acció de forces de compressió i tracció transmeses pels elements estructurals que hi concorren. A la foto 1 es pot veure la fallada sísmica d'un nus biga-pilar.



Foto 1. Esgotament d'un nus de connexió biga-pilar.

És important evitar, mitjançant l'aplicació de tècniques de disseny sismoresistents, que les ròtules plàstiques que es formen durant l'acció dels terratrèmols donin lloc a un mecanisme de col·lapse en els edificis. Per aquesta raó és imprescindible incrementar la resistència de la zona del pilar propera al nus per impedir l'aparició de ròtules plàstiques en aquestes zones. Això s'aconsegueix amb el confinament del formigó.



A la foto 2 es pot veure un pilar amb insuficients marcs de confinament a la zona del nus, la qual cosa produeix el vinclament local de l'armadura longitudinal.

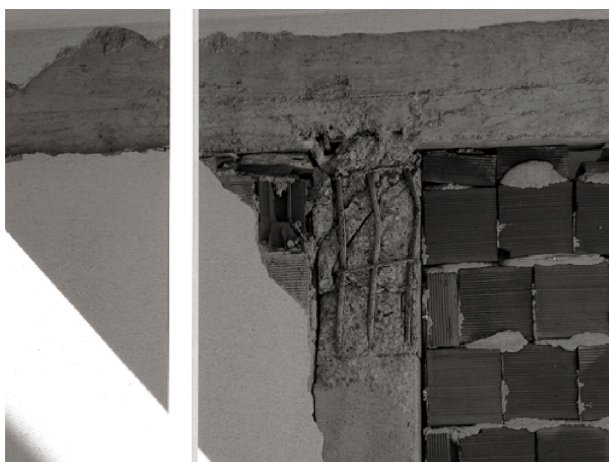


Foto 2. Vinclament de les barres longitudinals per falta d'armadura transversal.

Un altre aspecte a tenir en compte és la possible pèrdua d'ancoratge de les barres, tant pel deteriorament d'adherència sota l'acció sísmica com per la magnitud de l'esforç tallant. A més d'això, en algunes zones sísmiques en el món se segueixen utilitzant armadures llises (vegeu fotos 3 i 4), fet que contribueix a danys sísmics molt severos per falta d'adherència. A la foto 3 es mostra una patologia per la disposició inadequada de l'armadura que està inadequadament ancorada en el nus. A la foto 4 es pot veure una armadura ancorada a la zona del nus.



Foto 3. Armadures sense connexió en el nus, amb recobriment insuficient.

Els danys no estructurals poden produir enormes pèrdues encara que els elements estructurals romanguin en el camp elàstic. Això passa quan la flexibilitat del sistema estructural és excessiva, el que genera deformacions dels elements no estructurals que els danyen. Una altra causa possible d'aquests danys és la connexió inadequada entre l'estructura i els murs divisoris o les instal·lacions; és a dir, la vulnerabilitat mecànica d'un edifici condiona, en molts casos, la seva vulnerabilitat funcional, que és fonamental en el cas d'aquells edificis el funcionament dels quals és vital després d'un terratrèmol, com els hospitals, els quaters de bombers, etc.



Foto 4. Armadura longitudinal ancorada en la zona del nus.

Les estructures ben dissenyades i construïdes han de ser capaces d'absorbir i dissipar l'energia induïda pel sísmic per minimitzar els danys que es produeixen durant els terratrèmols moderats i limitar els danys causats pels terratrèmols forts (Barbat i Oller 1998). L'energia induïda pels terratrèmols en estructures es dissipa, en part, per l'efecte de l'amortiment i, en part, per l'efecte de les deformacions no elàstiques en els elements estructurals. Òbviament, els edificis tenen un comportament no lineal durant els sísmics forts. Tots els fenòmens no lineals relacionats amb la rigidesa es poden incloure d'una manera simplificada dins del concepte de ductilitat estructural que es pot definir com la capacitat de l'estructura de deformar-se en el rang no lineal sense pèrdua significativa de resistència, i és desitjable un comportament estructural d'aquest tipus. La ductilitat permet que un edifici resisteixi l'acció sísmica sense ruptures fràgils o col·lapses pre-

turs, però condueix a grans increments en els desplaçaments, amb increments petits, nuls o fins i tot negatius de les forces, és a dir, al dany estructural (BARBAT *et al.*, 2005). En conseqüència, per una banda interessa que l'estructura tingui una gran capacitat de ductilitat per evitar una possible fallada fràgil i, per l'altra, convé limitar aquesta ductilitat per tal de reduir el dany per sísmic. Per contra, un comportament fràgil d'un edifici no és recomanat per les normes sísmoresistents, ja que pot portar al col·lapse brusc de l'edifici seguit de grans pèrdues humanes i econòmiques. Per aquesta raó, en els projectes d'edificis es busquen solucions estructurals que assegurin un equilibri entre *la rigidesa, la resistència i la ductilitat* global de l'estructura.

### 3. Criteris de disseny conceptual i possibles defectes estructurals

L'Eurocodi 8 considera indispensable que, des d'un principi, en el projecte d'edificis es considerin els efectes de l'amenaça sísmica, i planteja criteris de projecte, alguns dels quals es resumeixen a continuació:

- Els sistemes estructurals han de ser senzills i assegurar una clara transmissió de les forces sísmiques des del sistema de forjats fins als fonaments.
- Les estructures han de mantenir una uniformitat general (en planta i en alçat, de rigidesa i de masses) que eviti la concentració d'esforços o d'altres demandes de ductilitat. Els edificis que es projecten d'acord amb patrons de simetria tendeixen a mantenir els criteris anteriors d'uniformitat.
- Els edificis amb no-uniformitats en planta s'han de subdividir en sistemes estructurals dinàmicament independents a través de la disposició de juntes, però, al mateix temps s'ha d'evitar el colpejament.
- La distribució de masses en les plantes d'un edifici ha de garantir que no es generin grans excentricitats, per tal de reduir l'efecte de la torsió global de l'estructura.
- Quan els efectes torsionals siguin inevitables, es recomana preveure elements resistents addicionals en la perifèria de la planta dels edificis o incrementar la resistència dels elements existents.

- Es recomana incorporar en les estructures elements que els proporcionin un alt grau d'hiperestaticisme (o de redundància) per assegurar la seva capacitat de redistribució de moments sense pèrdua d'estabilitat.
- El sistema estructural ha de resistir les càrregues sísmiques en dues direccions ortogonals entre si en les quals l'edifici tingui característiques similars de resistència, rigidesa i ductilitat.
- Els forjats s'han de comportar com diafragmes de gran rigidesa per garantir la uniformitat de la transmissió de les forces sísmiques cap als elements resistents verticals.
- S'ha d'evitar la col·locació de forjats a diferents nivells per no donar origen a línies de pilars curts.
- Una biga primària sobre la qual recolzi un pilar que no continua sota de la biga ha d'estar recolzada com a mínim sobre dos pilars o murs.

Són molts i de diferent naturalesa els errors conceptuals que es poden cometre en la fase de projecte. Per exemple, la resposta dinàmica dels edificis es pot alterar quan s'incrementa la massa amb l'altura (foto 5). En els nivells de major massa s'incrementen les forces de pis, la qual cosa té com a conseqüència l'increment dels efectes torsionals sobre els pilars.



Foto 5. Irregularitat en planta: creixement de les plantes amb l'altura.

Un altre error de projecte consisteix en l'ús de pilars curts. En tal cas es produeix un mecanisme de fallada per tallant: els tallants en els extrems del pilar superen els del projecte, corresponents a la resta dels pilars del mateix nivell, que tenen una longitud normal. En la foto 6 s'observa una sèrie de pilars curts en tota l'altura d'un edifici a causa de la col·locació de forjats a diferents nivells.





Foto 6. Pilars curts en tots els pisos d'un edifici.

És molt freqüent trobar danys per l'efecte de pilar curt en edificis que han estat dissenyats de forma adequada, no sols pel que fa a la seva configuració global, sinó també en els detalls d'armat. Tanmateix, la no-aplicació de criteris de disseny adequats dels tancaments, així com les seves possibles modificacions realitzades durant la vida útil de l'edifici, han pogut conduir al comportament de pilar curt mostrat a la foto 7, en la qual es pot observar com l'efecte de pilar curt es



Foto 7. Fallada per tallant d'un pilar.

produeix a causa del tancament excessivament rígid. També s'hi pot observar que els marcs existents (col·locats a una distància inadequada i en nombre insuficient) van fallar sota l'acció del tallant, i es va produir el consegüent vinclament de l'armadura longitudinal.

En el cas particular dels edificis amb forjats reticulars, l'efecte de pilar curt es pot produir pels canvis de nivell dels forjats contigus, on es pot arribar a la situació extrema de la foto 8, en què el pilar està sotmès a tall directe sota l'acció de les forces sísmiques.

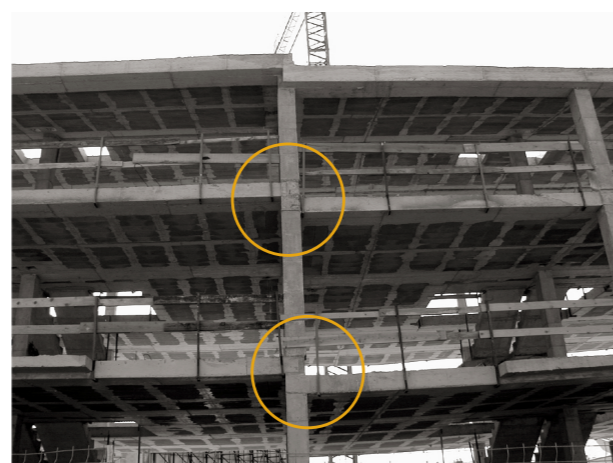


Foto 8. Juntes pilar-forjat amb comportament de tall directe.

En la foto 9 es pot veure un forjat que no garanteix la uniformitat de la transmissió de les forces sísmiques cap als elements resistents verticals. Això es deu a la falta de trava lateral del pilar en una de les direccions on la biga va ser suprimida per requisits arquitectònics.



Foto 9. Falta de trava del pilar al nivell de forjat.

Un defecte greu consisteix a no preveure un sistema senzill de transmissió de càrregues. Per exemple, en la foto 10 es mostra un pilar que no té continuïtat en el nivell inferior, el que podria arribar a crear problemes si la biga plana que el sosté arribés a danyar-se, i originaria un mecanisme que podria desencadenar el col·lapse de l'estructura sencera.



Foto 10. Discontinuitat de pilar en les plantes inferiors de l'edifici.

Sovint es projecten edificis amb pilars dimensionats per controlar els desploms en una de les dues direccions ortogonals. Tanmateix, cal projectar els elements resistents verticals amb suficient rigidesa entre les dues direccions. En la foto 11 es mostra un edifici amb pilars que tenen una gran diferència de rigidesa entre les dues direccions. El mateix edifici té un altre defecte: no es respecta la continuïtat dels eixos resistents de l'edifici. Es pot observar com un dels pilars està col·locat sota d'una bigueta i no sota del "nus" format per la intersecció de dues bigues planes.



Foto 11. Deficient distribució de rigidesa en els pilars.

En zones sísmiques, la influència de les forces horitzontals en el càlcul de les armadures és important, però en l'edifici de la foto 12 es pot veure, examinant les esperes, que en el càlcul de la quantia d'armadura longitudinal s'ha considerat solament la superfície de forjat que correspon al pilar: s'ha disposat menys armadura longitudinal en el pilar de cantonada i un major nombre en els centrals. És a dir, no s'ha considerat la influència de les forces horitzontals i, especialment, de la torsió, que és major en els pilars de cantonada.



Foto 12. Edifici amb el pilar de cantonada insuficientment armat davant d'accions sísmiques.

#### 4. Edificis amb ductilitat limitada

En el cas dels edificis de formigó armat amb forjats reticulars, els nervis orientats segons les línies que uneixen els extrems dels pilars no formen, habitualment, eixos rectes, ja que alguns pilars es troben desplaçats. D'aquesta manera els edificis tenen línies resistents no alineades i no ortogonals entre si, tal com es pot veure en la figura 1. En aquest cas concret, el cantell total dels forjats és de 30 cm. L'edifici té tres nivells, el primer dels quals té una altura de 4,5 m i la resta de 3,0 m i quatre llums en una direcció i tres en l'altra. En la figura 2 es mostra un pòrtic equivalent de l'edifici.

S'ha realitzat una anàlisi no lineal per avaluar de forma més realista el comportament d'aquest edifici, que ha estat projectat d'acord amb el mètode de càlcul lineal elàstic previst en la norma sismoresistent espanyola NCSE-02, i ha adoptat un model similar al de *pòrtic equivalent* suggerit en la Norma ACI-318 de l'any 2005. Aquest tipus d'estructures es projecta per a un nivell de ductilitat molt baix en comparació amb el permès per altres sistemes estructurals, com per exemple



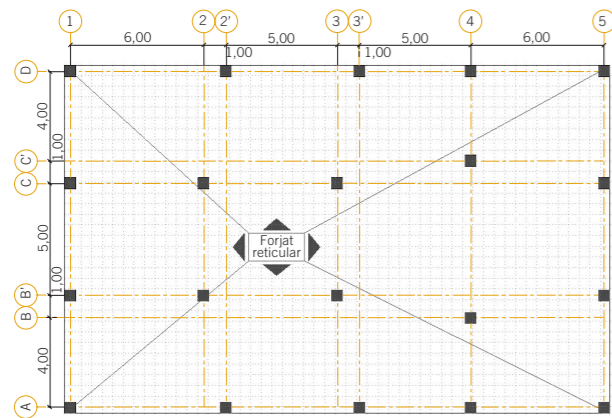


Figura 1. Planta típica de l'edifici amb forjats reticulars (igual en tots els nivells).

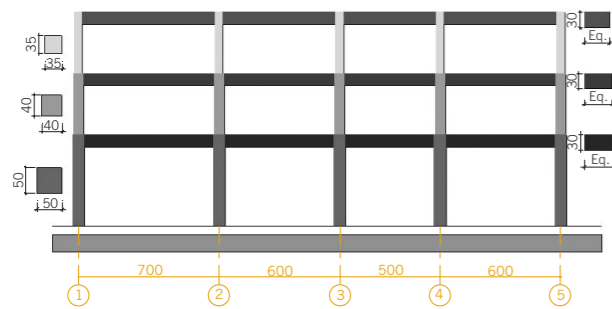


Figura 2. Pòrtic equivalent de l'edifici amb forjats reticulars.

el pòrtic. En la figura 3 es mostra la corba de capacitat calculada per a l'edifici, junt amb la seva forma idealitzada bilineal. El coeficient de ductilitat obtingut és molt baix, d'1,57, fins i tot inferior al previst en la norma NCSE-02 per a aquest tipus d'estructures, que és de 2.

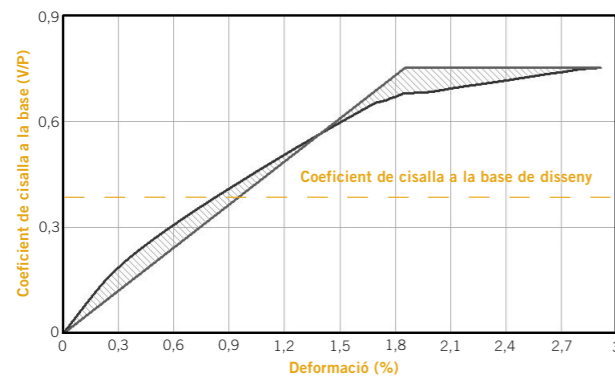


Figura 3. Corba de capacitat del pòrtic exterior de l'edifici amb forjats reticulars i la seva idealització bilineal.

La resposta poc dúctil de l'edifici es pot atribuir a l'aparició de ròtules plàstiques en els punts de transició entre els àbacs i els nervis del forjat del primer nivell. També és important destacar que és complicat portar a terme un confinament ef-

cient de la zona central dels forjats, la qual cosa explica, en certa manera, el possible mecanisme de fallada en el cas sísmic i el baix nivell de ductilitat de l'estructura.

També s'ha analitzat un edifici porticat format per pilars i bigues planes, amb un sistema de forjats unidireccionals que recolzen sobre aquestes darreres. Les bigues planes s'empren en l'edifici tant en la direcció que rep les biguetes del forjat unidireccional com en la direcció de trava. L'edifici té dimensions en planta similars a les de l'edifici amb forjats reticulars, però els pilars estan alineats i es defineixen línies resistents de pòrtics ortogonals entre si. La ductilitat que s'obté per l'edifici amb bigues planes és d'1,55, la qual cosa crida l'atenció, atès que el valor utilitzat com a factor de reducció de resposta, d'acord amb la norma NCSE-02, és de 2.

Amb finalitats comparatives s'ha analitzat també un edifici porticat amb bigues de cantell de característiques geomètriques similars a les dels de ductilitat limitada. Els càlculs no lineals han proporcionat un valor del coeficient de ductilitat de 5,5, davant del factor de reducció de 4 previst en la norma NCSE-02. En la Figura 4 es comparen les corbes de capacitat dels tres edificis calculats. Es pot observar que tots tres assoleixen un tallant en la base superior al de disseny, el que indica que tots tres satisfan aquest objectiu del projecte. També es pot observar que l'edifici porticat amb bigues de cantell és el que disposa de més capacitat dúctil i que aquesta és diverses vegades superior a la de l'edifici amb bigues planes o amb forjats reticulars. En resum, els edificis porticats amb bigues de cantell són els únics capaços de garantir un comportament dúctil i de tenir, al mateix temps, una reserva de resistència satisfactòria.

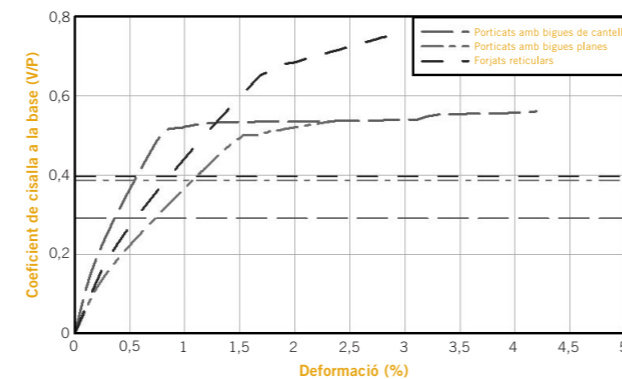


Figura 4. Comparació de la resposta no lineal dels tres edificis analitzats.

## 5. Conclusions

Una ductilitat estructural alta, tan necessària en el cas dels edificis ubicats en zones sísmiques, que és un requisit previst en les normes de disseny, s'aconsegueix usant tipologies estructurals adequades per ser emprades en zones sísmiques, un acer de reforç dúctil i detalls d'armat correctes. Des del punt de vista del comportament dinàmic no lineal d'un edifici, la ductilitat incrementa l'absorció de l'energia induïda pels terratrèmols en permetre una alta deformació inelàstica d'aquest. Des del punt de vista de la seguretat de l'edifici, la ductilitat permet predefinir eficaçment les zones de l'estructura on s'admet un comportament no lineal (ròtules plàstiques), i d'aquesta manera s'evita un comportament estructural amb fallades fràgils, o pèrdues excessives de resistència. Sens dubte, en utilitzar-se els elements dúctils com una línia de defensa d'un edifici contra l'efecte del sísmic, aquest pateix danys que poden ser importants, fins al punt que la seva reparació pot ser, de vegades, problemàtica.

En aquest treball també s'han pogut corroborar alguns aspectes del projecte sísmoresistent d'edificis de formigó armat analitzant-ne la resposta obtinguda mitjançant una anàlisi estàtica no lineal:

- Els edificis amb ductilitat limitada no assoleixen els valors de ductilitat per als quals es projecten, el que significa que el projecte per a estats límit pot conduir a resultats poc segurs.
- Els edificis porticats amb bigues de cantell disposen de prou ductilitat i reserva de resistència per garantir un comportament estable, fins i tot per a ductilitats superiors a les de projecte.
- Els edificis de ductilitat limitada tenen altes reserves de resistència sempre que, en ser sotmesos a un terratrèmol, siguin capaços de mantenir la resposta en el rang elàstic.

## Referències

- ACI Comitee 318. (2005). Building code requirements for structural concrete ACI 318-05. Farmington Hills, Michigan.
- BARBAT, A. H. i OLLER, S. (1998). *Conceptos de cálculo de estructuras en las normativas de diseño sísmorresistente*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), monografía IS-24, Barcelona.
- BARBAT, A. H., OLLER, S. i VIELMA, J. C. (2005). *Cálculo y diseño sísmorresistente de edificios*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), monografía IS-56, Barcelona.
- CARDONA, O. D. i BARBAT, A.H. (2000). *El riesgo sísmico y su prevención*, Calidad Siderúrgica, Madrid.
- Comité Européen de Normalisation (CEN). (2003). Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Brussels.
- NCSE-2002. *Norma de construcción sísmorresistente*. BOE Núm. 244. 2002. Madrid.

Àlex H. Barbat

Juan Carlos Vielma

Sergio Oller

Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Campus Nord UPC, C/ Jordi Girona 1-3, Edifici C1, 08034 Barcelona, Espanya.