

EFFECTO DE LA LOSA EN LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y EL DESEMPEÑO SÍSMICO DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO

Gilberto Rangel Torres^a, Amador Terán Gilmore^b

RESUMEN

En las últimas décadas se ha señalado la importancia de tomar en cuenta la interacción que tiene la losa con las vigas durante el diseño sísmico de marcos dúctiles de concreto reforzado. A partir del enfoque de diseño por capacidad, puede tomarse en cuenta explícitamente el efecto que tiene la losa en la resistencia a flexión de las vigas para evitar fallas indeseables a nivel local, producto de cortante excesivo en las vigas, mecanismo de viga fuerte/columna débil, y cortante en nudos o conexiones. Sin embargo, esto no es suficiente ya que a través de su interacción con las vigas, la losa incrementa la resistencia y rigidez lateral de una estructura, a la vez que disminuye sus capacidades de deformación lateral y disipación de energía. Por tanto, es necesario estudiar cómo deben modelarse las losas de entrepiso durante el análisis de las estructuras sismorresistentes. Este artículo estudia el efecto de la losa en las propiedades estructurales y el desempeño sísmico de marcos dúctiles de concreto reforzado ubicados en la zona del lago del Distrito Federal. El efecto de la losa depende de manera importante de las dimensiones y armado de las vigas de los marcos. En particular, dicho efecto es fundamental en estructuras con vigas pequeñas que exhiben armado ligero.

Palabras clave: Losa de entrepiso, marco dúctil, análisis estático no lineal, desempeño estructural, índice de daño.

ABSTRACT

During recent decades the importance of considering the interaction between the slab and the beams during the seismic design of ductile reinforced concrete frames has been identified. The use of a capacity design approach allows for an explicit consideration of the effect that the slab has on the flexural strength of the beams, in order to avoid undesirable failure modes due to excessive shear in the beams, strong beam-weak column mechanisms, and shear in beam-column connections. Nevertheless, this is not sufficient, because through its interaction with the beams, the slabs increase the lateral strength and lateral stiffness of a structure, while reducing its lateral deformation and energy dissipating capacities. Therefore, it is necessary to study how the story slabs should be modeled during the analysis of earthquake-resistant structures. This paper studies the influence of the slabs on the structural properties and seismic performance of ductile reinforced concrete frames located in the Lake Zone of Mexico City. The effect of the slabs significantly depends on the sizes and longitudinal reinforcement of the beams of the frames. Particularly, this effect is significant for structures that have small beams with light longitudinal reinforcement.

Keywords: Slabs, ductile frame, nonlinear static analysis, structural performance, damage index.

RESUMO

Nas últimas décadas se tem identificada a importância de levar em consideração a interação que tem a laje com as vigas para o desenho sísmico de molduras dúcteis de concreto armado. Desde o ponto de vista do desenho por capacidade, pode-se levar em conta explicitamente o efeito que a laje tem na resistência à flexão das vigas para evitar falhas indesejáveis no âmbito local, resultante do excessivo cisalhamento em vigas, um mecanismo de cruzamento viga forte/columna fraca, e ao cisalhamento em nós ou conexões. Mas isso não é suficiente porque, através de sua interação com as vigas,

^a Maestro en Ingeniería, Coordinador de Diseño en el Área de Proyectos del Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa. C. Vito Alessio Robles 380 Col. Florida. México, D.F.

^b Doctor en Ingeniería, Departamento de Materiales. Universidad Autónoma Metropolitana, Avenida San Pablo # 180, Col. Reynosa Tamaulipas. México, DF.

a laja acrescenta a resistência e a rigidez lateral de uma estrutura, reduzindo a sua capacidade de deformação lateral e dissipação da energia. Por isso, é necessário estudar como as lajes da sobreloja devem modelar-se durante a análise de estruturas resistentes a sismos. Este artigo estuda o efeito da laje nas propriedades estruturais e o desempenho sísmico de estruturas de molduras dúcteis de concreto armado, localizados na Zona do Lago do DF. O efeito da laje depende principalmente do tamanho e da montagem das vigas das molduras. Em particular, esse efeito é importante em estruturas com vigas de tamanho reduzido que apresentam armado leve.

Palavras-chave: Laje de sobreloja, moldura dúctil, análise estática não-linear, desempenho estrutural, índice de dano.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los procedimientos basados en desplazamientos para la evaluación sísmica de estructuras existentes y el diseño preliminar de estructuras nuevas han crecido en popularidad. El objetivo práctico de un procedimiento basado en desplazamientos es predecir el desempeño esperado de una estructura ante una excitación sísmica futura. Con este propósito, los formatos de diseño por desempeño caracterizan el desempeño en términos de daño a los elementos estructurales y a los no estructurales. Dado que el daño estructural implica comportamiento inelástico, los procedimientos de evaluación requieren técnicas de análisis no lineal para estimar la magnitud de las demandas de deformación plástica. Posteriormente, estas demandas son utilizadas para determinar el desempeño con base en criterios de aceptación previamente establecidos. La aplicación del diseño y evaluación por desempeño sólo puede resultar exitosa en la reducción del riesgo sísmico si son aplicadas extensivamente las técnicas de análisis no lineal a estructuras existentes y nuevas. En este sentido, los procedimientos modernos de evaluación sísmica basada en desplazamientos están basados en dos aspectos:

- a) La evaluación de la capacidad de deformación lateral de la estructura.
- b) La estimación de la demanda de desplazamiento lateral en la estructura.

Varias propuestas se han hecho en cuanto al uso práctico de metodologías basadas en desplazamientos. Entre ellas están los procedimientos estáticos de análisis lineal y no lineal discutidos en los documentos *FEMA 273* (Federal Emergency Management Agency, 1997); *FEMA 356* (Federal Emergency Management Agency 2000), y *FEMA 440* (Applied Technology Council 2005). Sin embargo, uno de los aspectos que todavía causa polémica en torno al modelado no lineal de los marcos momento-resistentes de concreto reforzado es la consideración que se hace de la losa para estimar las propiedades estructurales de las vigas. Por un lado, la losa puede tener efectos benéficos para una estructura, ya que su presencia se traduce en un incremento en la resistencia lateral y rigidez lateral que la estructura posee a nivel global. A pesar de esto, la existencia de una losa de entrepiso no necesariamente implica un mejor desempeño estructural, ya que su presencia puede llegar a reducir sustancialmente la capacidad de rotación negativa –tensión en lecho superior– de las vigas de un edificio y, por tanto, su capacidad de deformación última. Por esta razón, recomendaciones como las hechas por la FEMA establecen que el modelo de las vigas de la estructura debe contemplar explícitamente la contribución que un ancho equivalente de losa tiene en sus propiedades estructurales. Sin embargo, existe una discusión importante en cuanto al ancho que debe utilizarse para esto, y una respuesta razonable a lo anterior implica plantear una serie ambiciosa de estudios experimentales y de campo. Un aspecto relevante de la polémica debe centrarse no sólo en el ancho tributario de la losa, sino en el impacto real que dicho ancho tiene en las evaluaciones que se hagan del comportamiento y desempeño de marco momento-resistentes de concreto reforzado. Así, para contribuir a la discusión anterior, este artículo estudia el impacto que la losa tiene en las demandas y capacidades de tres marcos dúctiles de concreto reforzado diseñados conforme al *Reglamento de Construcciones del Distrito Federal*. Cabe decir que se considera que los marcos se ubican en la zona el lago de dicha entidad.

ESTUDIOS PREVIOS

En los últimos quince años la comunidad de ingeniería estructural ha invertido esfuerzos importantes para entender el efecto que las losas de entrepiso tienen en el comportamiento dinámico de edificios de concreto reforzado. Muchos de estos estudios –llevados a cabo principalmente en Estados Unidos, Nueva Zelanda, Canadá y Japón– han hecho énfasis en la respuesta de sistemas estructurales ante sismos de gran intensidad. Se ha concluido que un porcentaje considerable de la sobrerresistencia lateral de edificios típicos se debe a la presencia de la losa de entrepiso, de tal manera que no considerarla en los modelos de análisis y diseño de una estructura puede conducir a una falta de entendimiento de la capacidad y comportamiento real de la estructura, y por tanto, de los niveles de daño esperado en ella durante sismos de diferente intensidad.

Recientemente, algunos códigos han hecho un esfuerzo especial para considerar explícitamente la presencia de la losa durante el diseño de los elementos y conexiones estructurales de marcos dúctiles de concreto reforzado (Pantazopoulou y French, 2001). A partir de resultados experimentales (Pantazopoulou *et al.*, 1988; French y Boroojerdi, 1989; French y Moehle, 1991) se ha desarrollado una serie de conceptos básicos y modelos para tomar en cuenta el efecto de la losa dentro de un contexto de diseño por capacidad. Esto con el fin de evitar a nivel local fallas de corte en las vigas y conexiones viga-columna, y para evitar fomentar mecanismos del tipo columna débil-viga fuerte.

Aspectos generales de comportamiento

Considere un sistema sismorresistente estructurado con base en marcos momento-resistentes. Las vigas, que tienden a deformarse en doble curvatura cuando se sujeta el marco a carga lateral, suelen inducir tensiones y compresiones en la losa. En el extremo de la viga sujeto a momento negativo (tensión en lecho superior), las tensiones que la viga induce a la losa se maximizan en el eje longitudinal de la viga, y tienden a decrecer conforme la porción de la losa en estudio se aleja del mismo. Si bien algunos experimentos indican una variación de los esfuerzos a través del ancho de la losa, esta variación puede considerarse pequeña con fines de diseño, en la zona de losa adyacente a la viga.

El estudio experimental detallado de la distribución de esfuerzos en la losa sugiere que inicialmente ésta actúa como una membrana que trabaja a tensión, y que no contribuye apreciablemente al momento flexionante que desarrolla la viga. Sin embargo, los esfuerzos de tensión en el acero del lecho superior de la viga generalmente aumentan conforme crece su demanda de deformación angular, lo que ocurre al incrementarse el desplazamiento lateral de la estructura. Una vez que el esfuerzo a tensión excede el de fluencia del acero longitudinal, la porción de la losa que contribuye a la resistencia a flexión negativa de la viga empieza a incrementarse paulatinamente con un incremento de desplazamiento lateral, de tal manera que en un instante dado, todo el ancho de la losa puede llegar a participar en el mecanismo resistente a flexión (Miranda y Bertero, 1989).

Los esfuerzos de tensión inducidos en la porción de la losa adyacente a la viga tienen un impacto significativo en la resistencia y rigidez a flexión negativa de esta última; impacto que depende principalmente del ancho de losa que trabaje conjuntamente con la viga. La fuerza de tensión total que da a la viga su capacidad a flexión negativa se desarrolla tanto en el área del refuerzo longitudinal negativo, como en el área de acero incluida en la porción de losa que trabaja con la viga (Fig. 1a). Cabe decir que la participación de la losa como elemento a tensión de la viga ha sido observada continuamente en los patrones de grietas de los especímenes probados en laboratorio (French y Moehle, 1991).

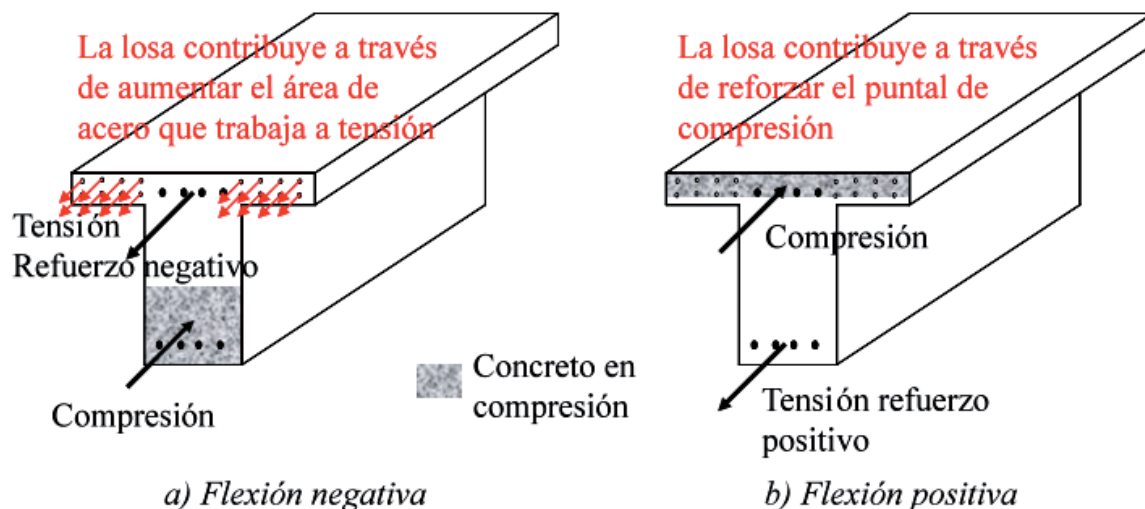


Fig. 1. Contribución de la losa a las características mecánicas de las vigas, flexión.

En cuanto a momento positivo (Fig. 1b), la contribución de la losa es menor, ya que su presencia resulta en un pequeño incremento del brazo de palanca del acero a tensión, y por tanto, en un pequeño incremento en el momento

positivo de la viga. Curiosamente, y a pesar de que la contribución de la losa es mucho mayor a momento negativo que a momento positivo, los códigos de diseño de estructuras de concreto tradicionalmente se han limitado a dar recomendaciones en cuanto a la porción de la losa que trabaja a momento positivo para el diseño de vigas T o L. Por ejemplo, la última versión de las *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto* (NTCDCEC, Gobierno del Distrito Federal, 2004) establecen que para estimar la resistencia y rigidez a flexión positiva de una viga, es necesario considerar que una porción de losa forma parte del patín a compresión de la viga. El ancho del patín que debe considerarse trabajando a compresión a cada lado del alma debe ser el menor de: la octava parte del claro menos la mitad del ancho del alma, la mitad de la distancia al paño del alma del miembro más cercano, y ocho veces el espesor de la losa.

Recientemente han tenido lugar notables esfuerzos por promover que el diseño de las estructuras sismorresistentes de concreto reforzado considere que una porción de la losa también contribuya a la resistencia y rigidez a flexión negativa de las vigas (French y Moehle, 1991; Pantazopoulou y French, 2001). De hecho, a partir de los estudios citados se ha propuesto que la porción de losa que se considera trabajando a flexión negativa debe tener exactamente la misma dimensión que la porción que se supone trabaja a compresión para momento positivo. Sin embargo, y como ya se comentó, la porción de la losa que contribuye a la resistencia a flexión negativa de una viga depende de la magnitud del desplazamiento lateral, de tal manera que French y Moehle (1991), observan que esta recomendación para momento negativo sólo es válida para estructuras que sufran distorsiones de entrepiso cercanas a 0.02. Tomando en consideración que la capacidad última de deformación de un marco dúctil de concreto reforzado oscila entre 0.03 y 0.04, es razonable pensar que su distorsión máxima permisible durante una excitación sísmica severa esté dentro del orden de 0.02, por lo que la recomendación de French y Moehle parece razonable para el análisis y diseño de marcos de concreto reforzado sujetos a excitaciones sísmicas severas.

Efecto de la losa a la resistencia lateral de un marco

Aunque es valioso discutir el efecto que la losa tiene a nivel local, también lo es plantear su contribución en términos de las propiedades estructurales globales de una estructura de concreto reforzado. En este sentido, Pantazopoulou y French (2001) brindan un excelente ejemplo para ilustrar el incremento de resistencia global lateral que se observa en un marco de concreto reforzado como consecuencia de la presencia de la losa de entrepiso. Baste decir que por medio de técnicas de análisis plástico, es posible demostrar que la fuerza lateral máxima que puede desarrollar un marco momento-resistente dúctil depende fuertemente de los momentos máximos que puedan desarrollar sus vigas. Un incremento en estos momentos resulta, en caso de que se evite un mecanismo viga fuerte-columna débil, en un incremento en el cortante basal último del marco. Por tanto, un incremento sustancial en la capacidad a flexión negativa de las vigas como consecuencia de la presencia de las losas resulta en incrementos importantes en la resistencia lateral de las estructuras de concreto. En varias pruebas experimentales (Shahrooz y Moehle, 1987; US Members of JTCC, 1988) se ha encontrado que la contribución de la losa de entrepiso a la resistencia lateral última de marcos momento-resistentes puede llegar a ser de hasta 40%

Efecto de la losa a la rigidez lateral de un marco

Aunque la rigidez lateral de las estructuras es una característica mecánica tan relevante como su resistencia lateral, los estudios hechos hasta la fecha en cuanto a la contribución de la losa no la han abordado en detalle. La rigidez lateral de un marco depende de manera importante de la rigidez a flexión de sus vigas. Dado que la rigidez a flexión de las mismas es proporcional a su momento de inercia, puede decirse que la rigidez lateral de un marco se incrementa conforme es incrementado el momento de inercia de las vigas. En cuanto a flexión positiva, la losa trabaja como patín a compresión, lo que resulta en incrementos importantes de su rigidez angular. En cuanto a momento negativo y conforme lo ilustra la Fig. 1a, la losa está en tensión y su acero de refuerzo contribuye a las características mecánicas de la viga. Priestley (1993), hace notar que la rigidez angular de elementos agrietados de concreto reforzado resulta proporcional a su área de refuerzo longitudinal, de tal manera que el área del acero de la losa tiene el potencial de incrementar sustancialmente la rigidez angular a flexión negativa de las vigas.

Efecto de la losa en la ductilidad local y global de un marco

Pantazopoulou y French (2001), ilustran de manera idónea el impacto de la losa de entrepiso en la capacidad de deformación local y global de un marco de concreto reforzado. Baste decir aquí que el valor de la ductilidad global de un marco depende directamente de la ductilidad que a nivel local puedan desarrollar sus elementos estructurales. Esto es: cuanto mayor sea la rotación que puedan acomodar las vigas del marco, mayor será su capacidad de deformación lateral.

El efecto que tenga la losa en la capacidad de rotación de las vigas, se verá reflejado de manera directa en la ductilidad última que puede alcanzar una estructura.

En general, un elemento de concreto reforzado alcanza su rotación última a flexión cuando se da una de las siguientes condiciones:

- a) Cuando se aplasta el concreto a compresión.
- b) Cuando se fractura el acero longitudinal a tensión.

Incrementar la capacidad de rotación de una viga implica retrasar la ocurrencia de estas dos condiciones, lo que normalmente se logra a través del buen detallado del acero longitudinal y transversal. Por ejemplo, el aplastamiento del concreto puede retrasarse por medio de confinarlo con refuerzo transversal, al limitar la cuantía del acero longitudinal a tensión, y de balancear adecuadamente el refuerzo longitudinal ubicado en los lechos positivo y negativo. Proteger el acero a tensión contra una posible fractura implica colocar una cuantía mínima de acero, y proporcionar suficiente resistencia lateral a la estructura para evitar acumulación inadecuada de deformaciones plásticas. Para ilustrar el efecto de la losa en la capacidad de deformación de una estructura, considere el extremo de una viga que trabaje a flexión negativa cuando el marco se deforma lateralmente. En este extremo, el acero negativo de la viga, y el acero de la porción de losa que trabaja con ella, desarrollarán tensión. Dado que, como consecuencia de la presencia de losa, hay un incremento en la fuerza de tensión que se desarrolla en la viga, hay un incremento en la dimensión del bloque de compresión en el concreto ubicado en la parte inferior de la misma. Esto resulta en un aplastamiento del concreto a niveles menores de curvatura, y en una mayor probabilidad de que se observe pandeo en las varillas en la zona de compresión. La presencia de la losa implica una reducción en la capacidad de rotación negativa de las vigas. Con base en los mismos argumentos, puede demostrarse que esto se da simultáneamente con un incremento en la capacidad de rotación positiva de las vigas. Estos dos hechos no se cancelan entre sí, de tal manera que la disminución en la capacidad de rotación negativa de las vigas resulta en una disminución en la capacidad de deformación global de las estructuras.

ESTUDIOS DEL EFECTO DE LA LOSA EN LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y RESPUESTA SÍSMICA DE MARCOS DÚCTILES

Pantazopoulou y French (2001), comentan las consideraciones que deben hacerse para un diseño por capacidad que contemple el efecto de la losa. Estas investigadoras describen los requerimientos que a nivel local deben hacerse durante el diseño sísmico de los diferentes componentes de un marco dúctil. Sin embargo, es importante recalcar que el enfoque de diseño por capacidad no se ha planteado para establecer el valor de las características mecánicas globales de la estructura con fines de control, sino que consiste en un planteamiento que, a través de la correcta distribución de los suministros locales de resistencia, busca fomentar una respuesta estable de la estructura en el rango de comportamiento plástico. Aunque esta filosofía aporta un adelanto conceptual dentro del contexto de la ingeniería sísmica, no brinda los elementos suficientes para plantear un control adecuado de las demandas sísmicas en las estructuras sismorresistentes (Terán, 2002). Dado lo anterior, en este artículo se enfoca el efecto de la losa desde un punto de vista global. Se estudia cómo es que los cambios en las propiedades estructurales de marcos dúctiles de concreto reforzado debido a la presencia de la losa, afectan su respuesta dinámica, y por tanto su desempeño sísmico. Dentro de este contexto, debe considerarse que mientras la resistencia lateral y la rigidez lateral de una estructura son propiedades estructurales que le permiten controlar su respuesta sísmica; su capacidad de deformación última incrementa sustancialmente su habilidad para sobrevivir excitaciones sísmicas extremas. Por un lado, la presencia de la losa se ve reflejada en un incremento de la resistencia y rigidez lateral de las estructuras, y como consecuencia, en un mejor control de sus demandas máxima y acumulada de deformación plástica. Por otro lado, la presencia de la losa resulta en un decremento en la capacidad última de deformación de las estructuras. Por tanto, la losa, por lo general, genera una estructura con menos capacidad de deformación que exhibe menores demandas de deformación.

Edificios considerados

Fueron considerados tres edificios resueltos con base en marcos momento-resistentes de concreto reforzado, y diseñados conforme a la versión 2004 del *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Cabe decir que el detallado del acero correspondió al de marcos dúctiles. Los tres edificios, con cuatro, doce y veinte pisos, tienen la planta y elevación mostrada en la Fig. 2. Las dimensiones de las vigas y columnas varían en elevación cada determinado número de pisos. El sistema de piso, constituido en los tres edificios por una losa de 15 cm de espesor colada monolíticamente con las vigas, puede considerarse rígido en su plano. Los esfuerzos nominales de diseño fueron $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ para

los edificios con cuatro y doce pisos y $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$ para el de veinte pisos. En los tres edificios se utilizó un f_y de 4200 kg/cm^2 para el acero.

Los tres edificios pueden considerarse regulares en planta. En cuanto a elevación, el edificio de veinte niveles es irregular, ya que su relación altura/base excede 2.5. En particular, el factor de reducción de resistencia correspondiente a este edificio se multiplicó por 0.8. Los edificios se clasificaron conforme a su ocupación como "B". Las distorsiones máximas de entrepiso producidas por las fuerzas laterales de diseño se limitaron a 0.006. Para estimar las fuerzas laterales y los elementos mecánicos producidos por sismo, se llevó a cabo un análisis modal espectral que consideró el espectro de diseño correspondiente a la Zona de Lago (sub-zona IIIb) y un factor de comportamiento sísmico (Q) de 4. El detallado de los elementos estructurales se hizo conforme a los requerimientos asociados a tal valor de Q . Se diseñaron dos marcos diferentes, uno interno y otro externo. La Tabla 1, y la Fig. 3 muestran algunas de las propiedades estructurales de las vigas de los diferentes edificios. Mientras que los letreros "Ext" e "Int", denotan propiedades de los marcos internos y externos, respectivamente, los signos positivo y negativo indican flexión positiva y negativa, respectivamente. Dado que la planta de los tres edificios es la misma, el armado de sus losas es el mismo. El acero negativo de todos los tableros de losa, que es el que contribuye a las propiedades estructurales de las vigas de los edificios, está formado por barras del #3 @ 15 cm.

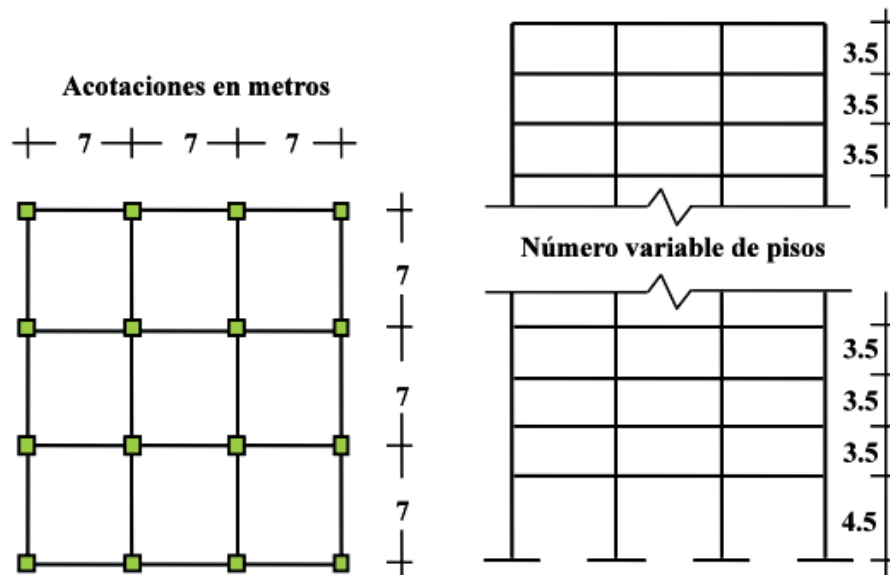


Fig. 2. Configuración estructural de los edificios considerados.

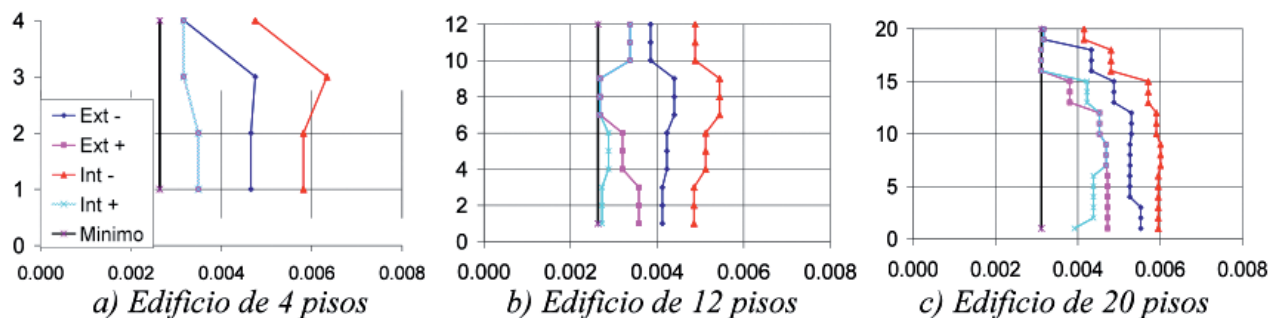


Fig. 3. Cuantías de acero en las vigas de los edificios.

Modelado de los edificios

Los edificios se analizaron con el programa DRAIN 2DX (Prakash *et. al.*, 1993). Esta sección discute brevemente las consideraciones hechas para su modelado.

Materiales estructurales: El entendimiento de comportamiento global de una estructura sujeta a cargas laterales implica la consideración del comportamiento de los materiales estructurales que la conforman. Al respecto, el modelado de los edificios utilizados consideró el modelo modificado de Kent y Park para el concreto. Para el modelado del acero, se consideraron las propiedades mecánicas reales del acero conforme a los resultados presentados por Rodríguez y Botero (1997).

Tabla 1. Dimensiones de los elementos estructurales.

	cuatro pisos		doce pisos		veinte pisos	
Tipo	Pisos	Vigas	Pisos	Vigas	Pisos	Vigas
1	1-2	35 x 70	1-6	55 x 95	1-6	75 x 110
2	3-4	30 x 60	7-9	50 x 90	7-9	70 x 110
3			10-12	45 x 80	10-12	70 x 105
4					13-15	65 x 105
5					16-18	60 x 100
6					19-20	50 x 90

Elementos estructurales: Las propiedades estructurales de vigas y columnas se derivaron a partir de los diagramas momento-curvatura correspondientes a las secciones transversales ubicadas en sus extremos. Para ello, se hizo una idealización bilineal de dichos diagramas. Mientras que la curvatura de fluencia corresponde a la primera cedencia del acero de refuerzo; la curvatura última corresponde a la menor curvatura asociada a la fractura del acero longitudinal a tensión o al aplastamiento del concreto. La capacidad de rotación última se obtuvo al integrar la curvatura a lo largo de la longitud asociada a la articulación plástica, que en este caso se consideró igual al peralte efectivo dividido entre dos. Como se ilustra en la Fig. 4, a partir de la pendiente asociada a la rama elástica de los diagramas momento-curvatura se determinaron los momentos de inercia agrietados de las secciones ubicadas en los extremos de los elementos de concreto reforzado (En la Fig. 4, E denota el módulo de elasticidad, I_g e I_{agr} , los momentos de inercia bruto y agrietado de la sección transversal de concreto reforzado). En el caso de las vigas, el momento de inercia se estimó como el promedio de aquellos que corresponden a sus extremos bajo la consideración de que las vigas se deforman en doble curvatura.

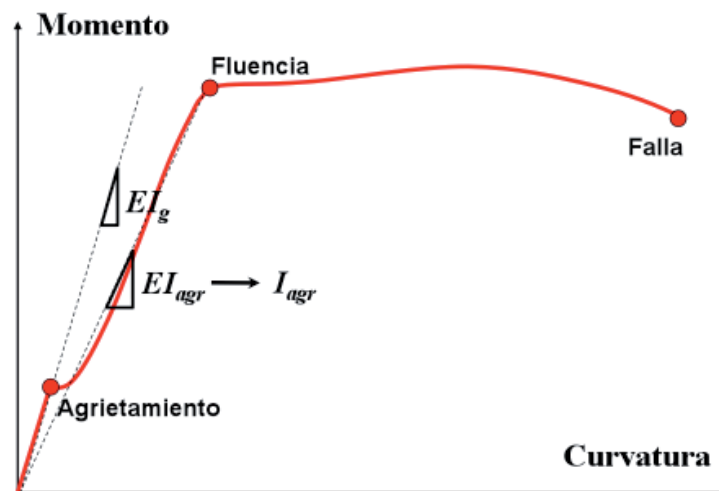


Fig. 4. Definición de momento de inercia agrietado para una sección transversal de concreto reforzado.

Modelos de análisis: Se formularon dos modelos de análisis para cada edificio, uno que tuviera en cuenta la losa para estimar las propiedades estructurales de las vigas, y un segundo que ignorara su contribución. En cuanto a los modelos que contemplan la losa, se consideró un ancho tributario de acuerdo a las recomendaciones que hacen French y Moehle, (1991) para una distorsión de 0.02. Se consideraron los efectos $P-\Delta$ y que la base de las columnas de la planta baja esta empotrada. Dadas las limitaciones del programa utilizado, se consideró que la rigidez de los elementos estructurales permanece constante durante el análisis. Cabe mencionar que la rigidez de las columnas de concreto reforzado varía de manera importante en función de la carga axial a la cual se les somete. Sin embargo, algunos investigadores han observado que esta dependencia no afecta de manera importante la predicción que se hace de la respuesta global de los marcos momento-resistentes (Kang-Ning, 1989). Quizá la mayor limitante radique en el hecho de que se asumió comportamiento elasto-plástico para los elementos estructurales, de manera que fueron ignorados algunos aspectos notables del comportamiento de los elementos de concreto reforzado (tal como la degradación de rigidez y el adelgazamiento del ciclo histerético). Se modelaron 2 marcos conectados entre sí por un diafragma rígido.

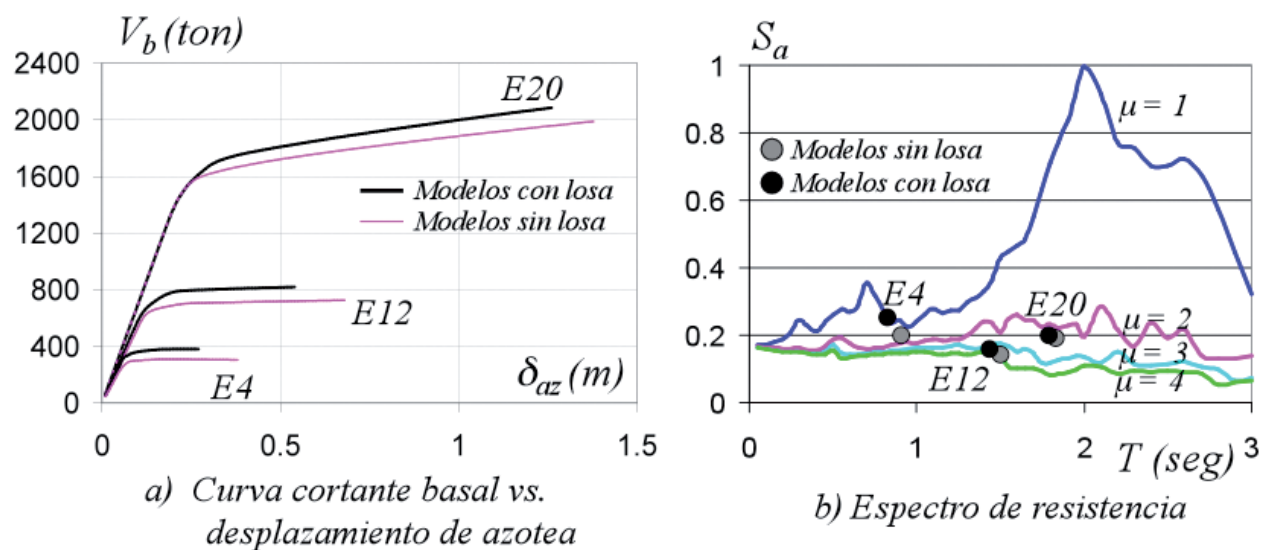


Fig. 5. Efecto de la losa en las propiedades estructurales de los edificios.

Propiedades estructurales

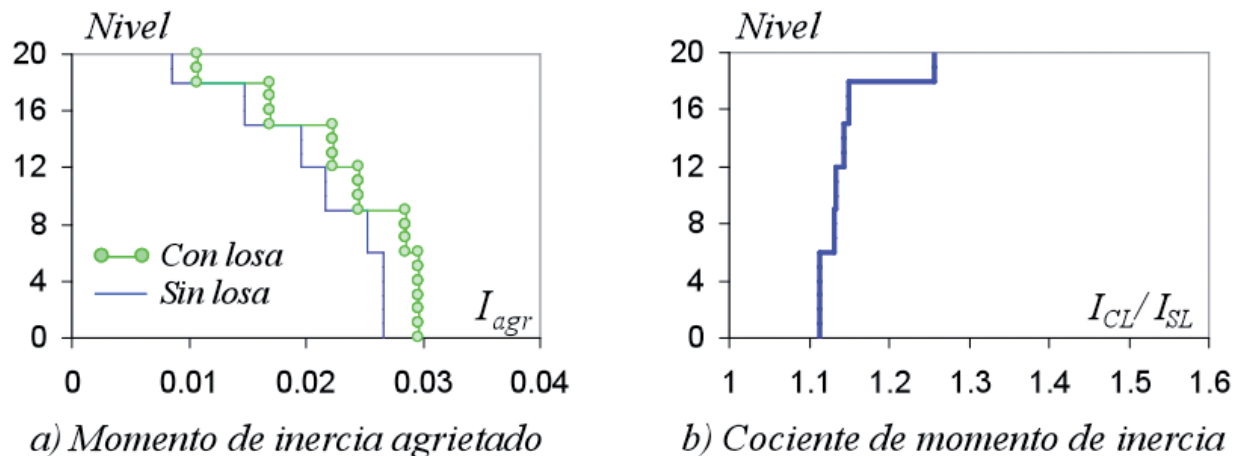
Para definir las propiedades estructurales de los edificios a nivel global, se llevaron a cabo una serie de análisis estáticos no lineales, que implican la aplicación de estados de deformación lateral monótonamente crecientes. En este tipo de análisis, el valor relativo que guardan entre sí las cargas laterales de entrepiso se mantiene constante. La distribución en altura de las cargas laterales se definió de manera que fuera proporcional a la que se obtuvo durante el análisis modal espectral llevado a cabo durante el diseño de los edificios. La Fig. 5 muestra las curvas de cortante basal (V_b) contra desplazamiento de azotea (δ_{az}) de los tres edificios. Mientras que las líneas delgadas corresponden a los modelos que no consideraron la contribución de la losa; las líneas gruesas corresponden a los modelos que sí la consideraron.

Rigidez lateral: A partir del estudio de la información incluida en la Tabla 2, es posible discutir la contribución de la losa al periodo fundamental de vibración (T) y por tanto, a la rigidez lateral (K), de un marco dúctil (recuerde que el periodo es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la rigidez lateral). En esta misma Tabla 2, el subíndice CL denota modelos de los edificios que incluyen la losa, y el subíndice SL, modelos sin losa. La contribución de la losa a K y T decrece conforme crece el número de pisos. Esto se explica dado que, tal como lo muestran la Tabla 1 y la Fig. 3, las vigas tienden a ser más robustas y a tener mayor armado longitudinal conforme se incrementa el número de pisos de los edificios. Bajo estas circunstancias, conforme aumenta el número de pisos del edificio, menor es el impacto de la losa. En el caso de los edificios bajo consideración, despreciar la contribución de la losa resulta en sobrestimar en menos del

Tabla 2. Efecto de la losa en la rigidez lateral de los edificios.

Edificio	T_{CL} (seg)	T_{SL} (seg)	T_{CL}/T_{SL}	K_{CL}/K_{SL}
Cuatro pisos	0.829	0.913	0.91	1.21
Doce pisos	1.442	1.506	0.96	1.09
Veinte pisos	1.799	1.838	0.98	1.04

10% el periodo fundamental de vibración. Si se pone en contexto esta afirmación con la ayuda de espectros de pseudo-aceleración, como se hace en la Fig. 5b, puede concluirse que dada la incertidumbre involucrada en la determinación de T , y el poco impacto que tendría un pequeño cambio de T en las demandas sísmicas de una estructura diseñada para desarrollar comportamiento plástico, no es relevante considerar la presencia de la losa durante la determinación de las características dinámicas de un edificio de concreto reforzado. A nivel local, la losa no afecta en la misma proporción la rigidez lateral de las vigas ubicadas en los diferentes pisos. Mientras que la losa es la misma en todos los entrepisos, las dimensiones de las vigas y su armado longitudinal tienden a reducirse en los pisos superiores. Conforme a lo mostrado en la Fig. 6 para el edificio de veinte pisos, el impacto de la losa en la rigidez de las vigas tiende a ser más importante en los pisos superiores. I_{agr} denota el momento de inercia agrietado de una viga, y I_{CL}/I_{SL} el cociente de momentos de inercia agrietados correspondientes a las vigas con y sin losa. En la Fig. 6a, la línea simple continua, corresponde a las vigas sin losa, y la línea con círculos, a las mismas vigas pero con losa. Es interesante hacer notar que en la Fig. 6b se muestran varios valores de I_{CL}/I_{SL} cercanos a 1.1, lo que implica que en algunos casos la losa contribuye tan solo el 10% del momento de inercia de las vigas.

**Fig. 6.** Efecto de la losa en el momento de inercia agrietado de las vigas de los marcos internos del edificio de veinte pisos.

Resulta interesante comparar el momento de inercia agrietado de las vigas con losa con el que corresponde a sus secciones rectangulares brutas. En particular, interesa establecer si es posible modelar los marcos momento-resistentes de concreto reforzado bajo la consideración de que las secciones de las vigas son rectangulares; y si fuera así, establecer el porcentaje del momento de inercia de la sección rectangular bruta que debería utilizarse para representar la condición agrietada de las vigas. La Sección 1.4 de la versión actual de las NTCDCEC indica que cuando se calculen las rigideces a flexión de los miembros estructurales de concreto reforzado, debe tomarse en cuenta el efecto del agrietamiento.

Tabla 3. Efecto de la losa en la resistencia lateral de los edificios.

Edificio	V_b de diseño (ton)	Modelo con losa		Modelo sin losa		V_{bSL} / V_{bCL}
		V_{bCL}	SR_{CL}	V_{bSL}	SR_{SL}	
Cuatro pisos	133.4	382	2.86	305	2.29	0.80
Doce pisos	423.3	820	1.94	726	1.72	0.88
Veinte pisos	1063.1	2085	1.96	1990	1.87	0.95

Además, especifica que este requisito se considera cumplido para las vigas si sus rigideces agrietadas se calculan con la mitad del momento de inercia de la sección bruta de concreto ($0.5I_g$). Se ha llegado a sugerir que los modelos de análisis debieran considerar en el caso particular de las vigas el momento de inercia de su sección rectangular bruta, bajo la consideración de que el 50% de reducción del momento de inercia que requieren las NTCDEEC se compensa con el incremento producto de la contribución de la losa.

En cuanto a las vigas del marco interno del edificio de cuatro pisos, el cociente entre el momento de inercia agrietado que considera la contribución de la losa –estimado conforme a los que se discutió con anterioridad– y el correspondiente a la sección rectangular bruta, oscila entre 0.48 y 0.54. Los valores de este cociente para el caso de las vigas del marco interno del edificio de veinte pisos oscilan entre 0.27 y 0.37. Los cocientes estimados sugieren que la práctica de utilizar el momento de inercia de la sección rectangular bruta de las vigas resulta en una sobrestimación importante de su momento de inercia agrietado, que va desde 100% para el caso de edificios de baja altura hasta el 200% para edificios de mayor altura. No sólo esto, sino que en el caso del edificio de veinte pisos, el uso del 50% del momento de inercia de la sección rectangular bruta resulta en una sobrestimación de aproximadamente 50%. Lo anterior apunta hacia la conveniencia de revisar cuidadosamente los requerimientos de las NTCDEEC en cuanto al cálculo de las rigideces agrietadas de elementos estructurales de concreto reforzado.

Resistencia lateral: La Tabla 3 resume el efecto de la losa en el cortante basal (V_b) y la sobrerresistencia (SR) de los edificios. SR se define como el cociente entre el cortante basal último estimado a partir de un análisis estático no lineal y el cortante basal de diseño. El subíndice CL denota modelos que incluyen la losa, y el subíndice SL, modelos sin losa. La losa aporta desde el 20% del cortante basal para el edificio de cuatro pisos, hasta el 5%

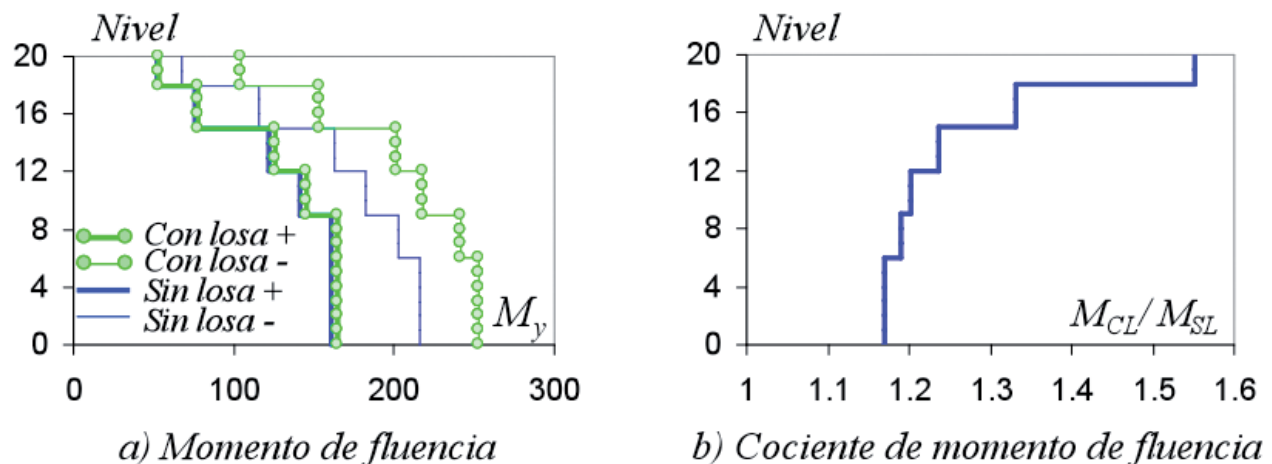


Fig. 7. Efecto de la losa en el momento de fluencia de las vigas de los marcos internos del edificio de veinte pisos.

del cortante basal para el edificio de veinte pisos. Como en el caso de la rigidez lateral, la contribución de la losa a la resistencia de los edificios decrece conforme crece el número de pisos. Cabe decir que un pequeño cambio en la resistencia lateral de una estructura puede dar por resultado transformaciones significativas en sus demandas, máxima y acumulada de deformación plástica. Para ilustrar lo anterior la Fig. 5b muestra cómo el establecer el incremento de resistencia lateral de 20% en el edificio de cuatro pisos da por resultado que su demanda de ductilidad se reduzca de aproximadamente 1.5 a 1. Para entender esta afirmación, observe en la figura que el círculo negro correspondiente al edificio E4 (que representa al modelo del edificio con losa) cae prácticamente sobre el espectro elástico ($\mu=1$). Lo anterior implica que el modelo con losa exhibiría un comportamiento cercano a elástico si se le sujetará a la excitación sísmica utilizada para obtener el espectro. Observe además que el círculo gris correspondiente al mismo edificio (modelo sin losa) cae entre los espectros con ductilidades de 1 y 2, lo que implica que su demanda de ductilidad debe estar cercana a 1.5. Dada la sensibilidad de la demanda de ductilidad del edificio E4 a su resistencia lateral, se sugiere considerar la existencia de la losa durante la determinación de la resistencia lateral de edificios de concreto reforzado de baja altura. La Fig. 7 muestra cómo a nivel local la losa afecta de manera diferente la capacidad resistente de las vigas. Conforme a lo mostrado para el edificio de veinte pisos, el impacto de la losa en la capacidad resistente a flexión negativa de las vigas tiende a ser más importante en los pisos superiores, lo que resulta en que haya una mayor sobrerresistencia en los pisos superiores con relación a los pisos inferiores. M_y denota el momento de fluencia de una viga, y M_{CL}/M_{SL} el cociente de momentos de fluencia negativos correspondientes a las vigas con y sin losa. En la Fig. 7a, las líneas simples continuas corresponden a las vigas sin losa, y las líneas con círculos, a las mismas vigas pero con losa; las líneas gruesas corresponden a flexión positiva y las líneas delgadas a flexión negativa.

Tabla 4. Efecto de la losa en la capacidad última de deformación de los edificios.

Edificio	Modelo con losa			Modelo sin losa			$\delta_{uCL} / \delta_{uSL}$
	δ_{yCL}	δ_{uCL}	μ_{uCL}	δ_{ySL}	δ_{uSL}	μ_{uSL}	
Cuatro pisos	7	27	3.9	7	38	5.4	0.71
Doce pisos	14	55	3.9	14	69	4.9	0.80
Veinte pisos	25	126	5.0	25	139	5.6	0.91

Capacidad última de deformación: La Tabla 4 resume el efecto de la losa en la capacidad última de deformación de los edificios. Esta capacidad se caracteriza por medio del desplazamiento último de azotea (δ_u), y la ductilidad última global (μ_u), definida como δ_u/δ_y (donde δ_y es el desplazamiento de fluencia de azotea). El subíndice CL denota modelos que incluyen losa, y el subíndice SL, modelos sin losa. La presencia de losa da por resultado reducciones que van desde el 29% del desplazamiento último para el edificio de cuatro pisos hasta el 9% para el edificio de veinte pisos. Como en el caso de la rigidez y resistencia laterales, la influencia de la losa en la capacidad última de deformación de un edificio disminuye conforme crece su número de pisos. La Fig. 8 muestra el efecto de la losa en la capacidad de rotación última de las vigas. Las curvas continuas simples corresponden a los modelos sin losa, mientras que las que tienen círculos corresponden a los modelos con losa. La línea gruesa corresponde a la capacidad rotacional última negativa (θ_u^-) y las líneas delgadas a la capacidad última positiva (θ_u^+). Observe que θ_u^- es menor que θ_u^+ en los modelos sin losa, y que la presencia de la losa tiende a exacerbar esta diferencia. Además, puede notarse que la influencia de la losa en los valores de θ_u^- y θ_u^+ tiende a ser mayor en los edificios con pocos niveles, y en los pisos superiores de los edificios. Despreciar la contribución de la losa resulta en sobrestimar de manera importante la capacidad de deformación última de los edificios. A pesar de la incertidumbre involucrada en estimar esta característica mecánica en las estructuras de concreto reforzado, los resultados resumidos en la Tabla 4 sugieren que es relevante considerar la presencia de la losa durante la determinación de la capacidad de deformación de edificios de concreto reforzado de baja altura.

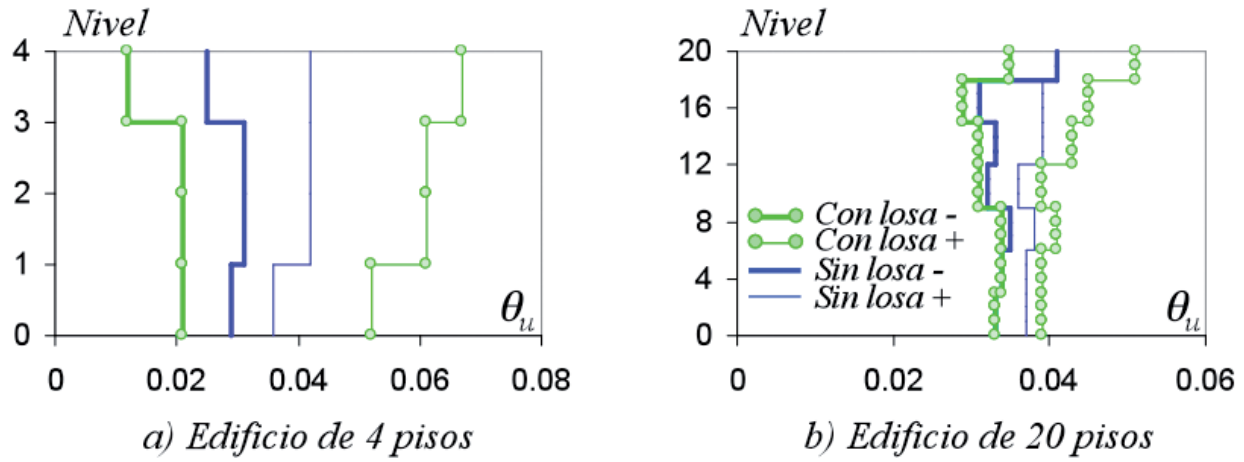


Fig. 8. Efecto de la losa en la capacidad de rotación última de las vigas de los marcos internos de los edificios de cuatro y veinte pisos.

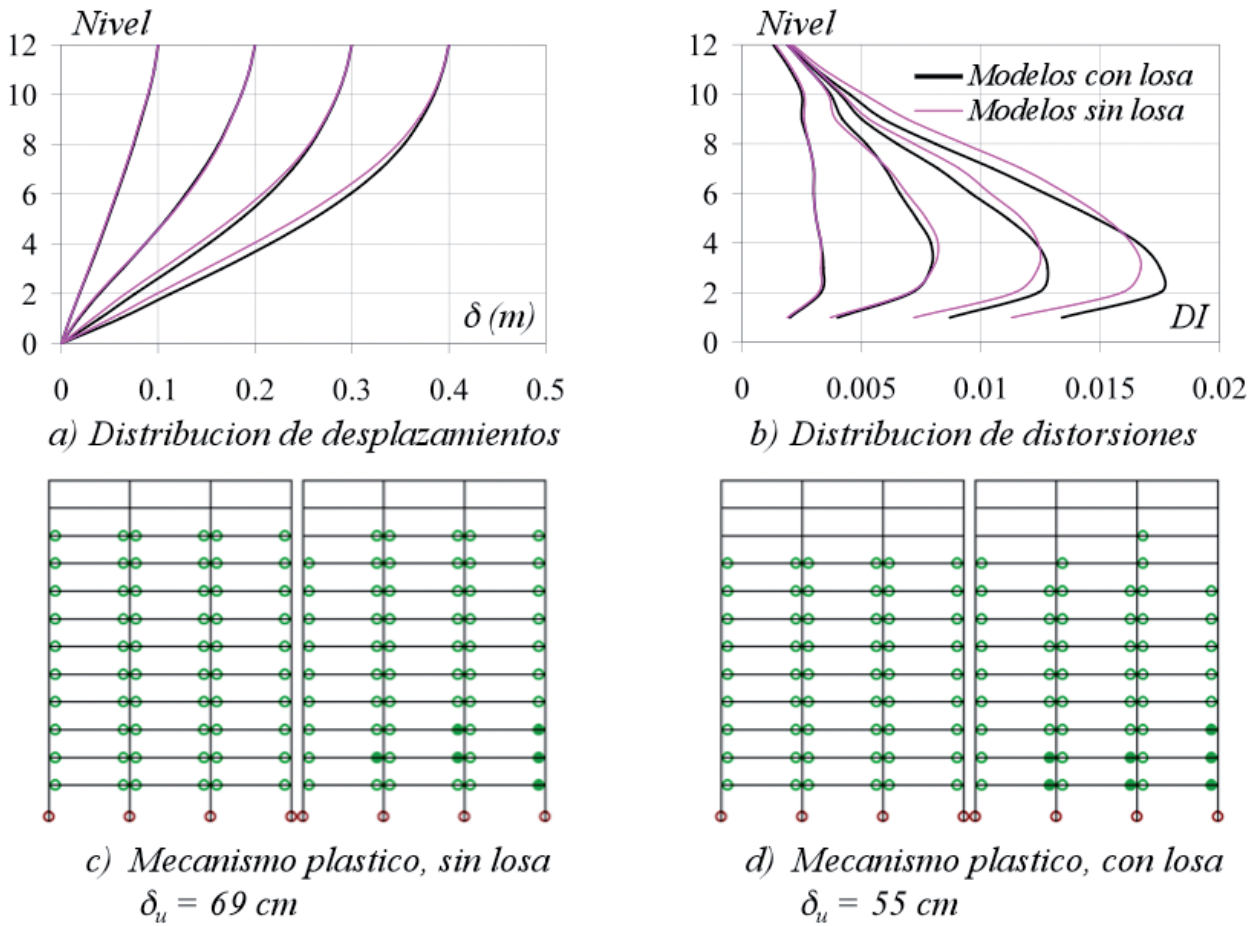


Fig. 9. Distribución de deformaciones laterales en altura y mecanismos plásticos para el edificio de doce pisos.

Distribución de deformaciones en altura y mecanismo plástico: La Fig. 9a y la Fig. 9b, muestran la evolución las distribuciones en altura de desplazamientos de piso y distorsiones de entrepiso, respectivamente, para los dos modelos de doce niveles. Para cada modelo se presentan curvas correspondientes a desplazamientos de azotea de 10, 20, 30 y 40 cm. Mientras que las líneas delgadas corresponden al modelo sin losa, las líneas gruesas corresponden al modelo con losa. Para un desplazamiento de azotea dado, el modelo con losa tiende a acomodar un porcentaje mayor de su deformación lateral en los pisos inferiores. Esta tendencia tiende a hacerse más notoria conforme el edificio acomoda una mayor deformación. Para el mismo desplazamiento de azotea, los pisos inferiores del edificio con losa tienden a distorsionarse más y, por tanto, a dañarse más. Esto puede explicarse por el hecho de que, como muestran la Fig. 6b y la Fig. 7b, la losa tiende a aportar mayor sobrerrigidez y sobrerresistencia a los pisos superiores en relación con los pisos inferiores.

En cuanto al mecanismo plástico que desarrollan los edificios, la presencia de la losa tiene un impacto relativamente pequeño (Fig. 9c y Fig. 9d). Si acaso, y como consecuencia de la mayor aportación de la losa a las propiedades estructurales de los pisos superiores, puede decirse que los pisos superiores en los modelos que consideran la losa tienden a exhibir menos articulaciones plásticas que en los modelos que no la consideran.

Desempeño sísmico

Una vez concluidos los análisis estáticos no lineales, fueron llevados a cabo una serie de análisis dinámicos no lineales (paso a paso). A partir de las demandas de rotación plástica máxima y acumulada en los extremos de las vigas de los edificios, se estimó el nivel de daño en las vigas. Para ello, se utilizó una versión del índice de Park y Ang planteada por Terán (1998), y experimentalmente validada por Silva y López (2001):

Tabla 5. Valor del índice de daño asociado a los modelos de los edificios.

Piso	Edificio cuatro pisos		Edificio doce pisos		Edificio veinte pisos	
	Con Losa	Sin Losa	Con Losa	Sin Losa	Con Losa	Sin Losa
1	0.0030	0.0811	1.31	1.66	0.45	0.42
2	0.0027	0.0749	1.50	1.91	0.77	0.76
3	0.0000	0.0701	1.36	1.82	0.93	0.95
4	0.0000	0.0000	1.07	1.56	0.94	1.00
5			0.71	1.12	0.84	0.93
6			0.41	0.72	0.68	0.80
7			0.21	0.43	0.49	0.61
8			0.07	0.20	0.31	0.42
9			0.06	0.11	0.21	0.29
10			0.06	0.15	0.21	0.26
11			0.00	0.05	0.21	0.21
12			0.00	0.00	0.20	0.20
13					0.26	0.32
14					0.15	0.22
15					0.07	0.11
16					0.10	0.15
17					0.05	0.07
18					0.02	0.02
19					0.00	0.02
20					0.00	0.00
Máximo	0.0030	0.0811	1.50	1.91	0.94	1.00

$$DMI_{PA} = \max \left(\frac{\theta_m^+}{\theta_u^+}, \frac{\theta_m^-}{\theta_u^-} \right) + \beta \left(\frac{\theta_a^+}{\theta_u^+} + \frac{\theta_a^-}{\theta_u^-} \right) \quad (1)$$

donde θ_u^+ y θ_u^- son las rotaciones últimas positiva y negativa, respectivamente; θ_m^+ y θ_m^- , las demandas máximas de rotación plástica positiva y negativa, respectivamente; y θ_a^+ y θ_a^- , las demandas acumuladas de rotación plástica positiva y negativa, respectivamente. Se consideró un β igual a 0.15. El valor de DMI_{PA} asignado a un entrepiso se estimó como el valor medio de DMI_{PA} en las vigas de ese piso. El posible daño en las columnas no se contempló en la estimación del valor de DMI_{PA} .

El sismo que sirvió de ejemplo para llevar a cabo los análisis dinámicos no lineales fue el SCT-EO, movimiento registrado en la zona del lago de Ciudad de México durante el 19 de septiembre de 1985. En la Fig. 5b se presentan espectros de resistencia asociados a este acelerograma, el cual exhibe una aceleración máxima de 169 cm/seg² y un periodo dominante de dos segundos. La Tabla 5 resume los valores de DMI_{PA} estimados para los diferentes entrepisos de los modelos con y sin losa. De manera general, puede decirse que el daño estructural tiende a ser más severo en los pisos inferiores de los edificios, y que la presencia de la losa tiende a ser benéfica para el desempeño estructural. La losa incrementa la rigidez lateral de los edificios y como consecuencia de esto, su periodo es menor respecto al que tendrían de no existir la losa. Lo anterior resulta en que las propiedades dinámicas de los edificios se alejen del periodo dominante del movimiento del terreno (2 segundos). Un segundo efecto de la losa es el incremento en la resistencia lateral de los edificios, lo que resulta en menores demandas de rotación plástica en las vigas. Los efectos benéficos derivados de la presencia de la losa son mayores que el efecto negativo derivado de la reducción de la capacidad de deformación lateral, de tal manera que el nivel de daño tiende a reducirse en los modelos donde se consideró la contribución de la losa.

Con anterioridad se comentó que el efecto de la losa tiende a ser mayor conforme decrece el número de pisos de los edificios. Esto se ve claramente reflejado en los resultados resumidos en la Tabla 5. No deja de ser interesante notar que la presencia de la losa en el edificio de veinte pisos resulta en que el daño en sus dos pisos inferiores se incrementa. Para el caso particular de estos dos pisos, los efectos benéficos de la losa no son suficientes para contrarrestar sus efectos negativos: la reducción en la capacidad de deformación de las vigas y la tendencia de los pisos inferiores a acomodar mayores deformaciones plásticas.

CONCLUSIONES

La presencia de la losa en un sistema de marcos de concreto reforzado se ve reflejada en:

- a) Un incremento de la resistencia y rigidez laterales, y como consecuencia, en un mejor control de las demandas máxima y acumulada de deformación plástica en la estructura.
- b) Un decremento en la capacidad de deformación de la estructura.

Puede decirse entonces que la presencia de la losa da lugar a una estructura con menos capacidad de deformación que exhibe menores demandas de deformación.

La losa resultó en un mejor desempeño sísmico de los marcos dúctiles que se estudiaron, ya que los efectos benéficos derivados de los incrementos en la resistencia y rigidez lateral fueron mayores que los efectos perjudiciales derivados de una reducción en la capacidad de deformación lateral y de la concentración de daño estructural en los pisos inferiores.

El efecto de la losa en las propiedades estructurales y desempeño sísmico de un edificio depende de manera importante de las dimensiones y armado de sus vigas. En particular, dicho efecto es muy importante en estructuras con vigas pequeñas que exhiben armado ligero, y tiende a ser poco importante en el caso de estructuras con vigas robustas y armado importante. Conforme a esto, se sugiere considerar la contribución de la losa durante la estimación de las propiedades estructurales y el desempeño sísmico de marcos dúctiles de concreto reforzado de baja altura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Universidad Autónoma Metropolitana.

REFERENCIAS

Applied Technology Council (2005), "Improvement of nonlinear static Seismic analysis procedures", en *Reporte FEMA 440*.

Federal Emergency Management Agency, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," en *Reporte FEMA*, 273, 1997.

Federal Emergency Management Agency, "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings," en *Reporte FEMA* 356, 2000.

French, CW; Boroojerdi, A., "Contribution of R/C floor slabs in resisting lateral loads", en *ASCE Journal Structural Engineering*, 115(1), 1-18, 1989.

French CW; Moehle, JP., "Effect of floor slabs on behavior of slab-beam-column connection", en *American Concrete Institute SP-123*, 225-258, 1991.

Gobierno del Distrito Federal, "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, décimo cuarta época, I (103-Bis), 2004.

Kang-Ning, L; Otani, S; Aoyama, H., "Nonlinear earthquake response of reinforced concrete space frames with varying axial force", en *Transaction of the Japan Concrete Institute*, 11, 247-254, 1989.

Miranda, E; Bertero, VV., "The Mexico Earthquake of September 19, 1985-Performance of low-rise buildings in Mexico City", en *Earthquake Spectra*, 5 (1), 121-143, 1989.

Pantazopoulou, SJ; Moehle, JP; Shahrooz, BM., "Simple analytical model for T-beams in flexure", en *ASCE Journal of Structural Engineering*, 114 (7), 1507-1523, 1988.

Pantazopoulou, SJ; French, CW., "Slab participation in practical earthquake design of reinforced concrete frames", en *ACI Structural Journal*, 98 (4), 479-489, 2001.

Prakash, V; Powell, GH; Campbell, S., "DRAIN-2DX Base program description and user guide", en *Reporte UCB/SEMM-93/17*, Universidad de California, 1993.

Priestley, MJN., "Myths and fallacies in earthquake engineering—conflicts between design and reality", *American Concrete Institute SP-157*, 231-254, 1993.

Rodríguez, ME; Botero, JC., "Evaluación del comportamiento de barras de acero de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles incluyendo pandeo", en *Revista de Ingeniería Sísmica*, 56, 1997.

Shahrooz, BM; Moehle, JP., "Experimental study of seismic response of RC setback building", en *Reporte UCB/EERC-87/16*, Universidad de California, 1987.

Silva-Olivera, H; López-Bátiz, O., "Estudio experimental sobre índices de daño en estructuras de concreto reforzado sujetas a cargas laterales", en *Memorias Treceavo Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Guadalajara, (CD), 2001.

Terán-Gilmore, Amador, "Características mecánicas y desempeño sísmico de marcos dúctiles de concreto reforzado", en *Memorias XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, 1, 564-573, Monterrey, 1998.

Terán-Gilmore, Amador, "Diseño por desempeño: antecedentes, conceptos generales y perspectivas", en *Memorias Séptimo Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, Cuernavaca, (CD), 2002.

US Members of JTCC, "US-Japan Research: Seismic design implication", en *ASCE Journal of Structural Engineering*, 114(9), 2000-2016, 1988.