

## CONTROL DE DESPLAZAMIENTOS EN LOSAS SIN VIGAS MEDIANTE ESPESORES MINIMOS

Bertero, Santiago; Bertero, Raul  
Ingeniero Civil  
Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería  
sbertero@fi.uba.ar

### RESUMEN

En los últimos años se han informado casos de desplazamientos excesivos en losas sin vigas utilizando los espesores mínimos del Capítulo 8 del Reglamento ACI 318. Por otro lado, el reglamento no define cuál es la luz  $\ell$  que se debe utilizar para verificar la flecha obtenida por cálculo contra los valores admisibles que surgen de la tabla del Capítulo 24. Algunos profesionales usan el lado largo, otros el lado corto y otros la diagonal de la losa sin que el Reglamento defina qué longitud debería ser utilizada.

Este trabajo analiza la justificación y se define la luz  $\ell$  que debería ser utilizada para verificar el desplazamiento admisible en losas en dos dimensiones con y sin vigas. Por otro lado, se justifica un procedimiento simplificado para paneles regulares basado en la extensión de la definición de  $\ell$  para vigas y losas unidireccionales. Luego, se muestran los resultados de una serie de análisis no-lineales considerando la fisuración de losas en dos direcciones con el fin de proponer límites a las variables relevantes (cargas, longitudes, fluencia lenta) para la utilización de los espesores mínimos de la Tabla 8.3.1.1.

### ABSTRACT

*In recent years there have been reports of excessive deflections in two-way flat slabs designed using the minimum thickness provisions in Chapter 8 of ACI 318. In addition, the span  $\ell$  that shall be used for an explicit deflection check following the provisions in Chapter 24 is not properly defined for two-way slabs, with the long span, short span and diagonal all adopted by different engineers.*

*This paper provides a definition of the span  $\ell$  to be used for deflection control in two-ways slabs with and without interior beams. A simplified procedure is also proposed and justified for regular panels based on the definition of  $\ell$  for beams and one-way slabs. Then, the results of a series of nonlinear analysis are presented in order to propose applicability limits (in terms of loads, spans, long-term effects) to the minimum thickness provisions in Table 8.3.1.1.*

Organiza:

## INTRODUCCIÓN

El reglamento ACI 318 [1] (así como su análogo en Argentina el CIRSOC 201 [2]) admite dos métodos distintos para el control de desplazamientos de losas. La primera opción es hacer una verificación explícita de los mismos obtenidos mediante análisis no-lineales, comparando contra los límites de la Tabla ACI 318 24.2.2. Alternativamente, es posible adoptar un espesor mayor a los valores mínimos indicados en las Tablas ACI 318 8.3.1.1 (Espesores mínimos de losas sin vigas interiores) y ACI 318 8.3.1.2 (Espesores mínimos de losas con vigas entre apoyos en todos sus lados) para losas en dos direcciones, eliminando la necesidad de calcular desplazamientos. Las disposiciones del artículo 8.3.1 son, sin embargo, relativamente ambiguas. Por ejemplo, mientras que para losas en una dirección y vigas el Reglamento claramente indica que los espesores mínimos aplican únicamente cuando no hay elementos no estructurales que puedan sufrir daños por grandes flechas ( $l/240$ ), lo mismo no ocurre para losas en dos direcciones. Es razonable asumir, en consecuencia, que los espesores mínimos son aplicables aun cuando tales elementos no estructurales se encuentran presentes ( $l/480$ ). A su vez, aunque el Reglamento aclara que el uso de espesores mínimos no es adecuado para cargas permanentes adicionales al peso propio “inusualmente grandes”, no ofrece ninguna definición certera de qué constituye una carga grande. Como, además, no existe ningún límite a la luz mayor de la losa, se requiere de un considerable criterio ingenieril para determinar si adoptar un espesor mínimo será suficiente para controlar desplazamientos en servicio.

En base a lo comentado arriba, trabajos previos han mostrado tanto en forma analítica [3] como experimental [4] que los desplazamientos en losas que cumplen con los espesores mínimos pueden sin embargo exceder los límites reglamentarios de la Tabla ACI 318 24.2.2. Es decir, actualmente el reglamento es inconsistente en el mejor de los casos, por no decir inseguro (en el sentido de que ofrece una falsa seguridad de que los desplazamientos serán adecuados). Un trabajo estadístico muestra que aproximadamente el 80% de losas diseñadas en Estados Unidos mediante espesores mínimos superarían los límites más estrictos de desplazamientos ( $l/480$ ), comparado un 10% a 20% si se toma  $l/240$  como límite [3]. Estas últimas losas suelen presentar bajas relaciones de aspecto (tienden a ser cuadradas) y luces mayores a 8 m (26 ft), aunque los resultados eran dependientes del valor de sobrecarga.

Otra dificultad es que los límites del artículo 24.2.2 no están inequívocamente definidos para losas en dos direcciones. Los mismos fueron definidos para elementos lineales, donde  $l$  es claramente la luz. El Reglamento no ofrece una definición para losas en dos direcciones por lo que diferentes interpretaciones para  $l$  son posibles: (a) la luz mayor, (b) la luz menor, (c), la diagonal en paneles rectangulares. Todas las interpretaciones tienen su justificación según la geometría de la losa y la presencia de vigas interiores. Sin embargo, la definición que puede ser conservadora en un caso puede no serlo para otro. Si se imponen límites a la aplicabilidad de espesores

Organiza:

mínimos y más losas comienzan a ser verificadas mediante análisis no-lineales, va a ser necesario más claridad desde el lado Reglamentario sobre cómo definir valores admisibles de desplazamientos.

Este trabajo tiene como objetivo presentar una definición para  $\ell$  que elimine dudas en cómo aplicar la Tabla 24.2.2 en losas en dos direcciones, basado en el concepto de distorsión a lo largo de una línea. A su vez, se proponen límites razonables a las variables de diseño para que los espesores mínimos de la Tabla 8.3.1.1 sean consistentes con los resultados de análisis no-lineales en losas sin vigas.

## DESPLAZAMIENTOS LÍMITES

### Elementos lineales

Los desplazamientos límites del Reglamento ACI 318 tienen su origen hace al menos 200 años, cuando el límite  $\ell/480$  fue propuesto para vigas de madera, con el objetivo de evitar la aparición de fisuras en techos, así como vibraciones excesivas. El límite estaba escrito originalmente como “1/40 pulgadas por cada pie de luz” [5]. Trabajos subsiguientes siguieron estando basados en el análisis de vigas, ya sea por apariencia visual ( $\ell/250$ ), daño a particiones poco sensibles ( $\ell/240$ ), etc [6]. Atrás de los límites propuestos en forma proporcional a la luz está el razonamiento de que el daño en elementos no estructurales viene dado por la distorsión angular. Del mismo modo, los límites visuales están asociados a la capacidad de apreciar la pendiente en la viga y no su desplazamiento absoluto. Es decir, los desplazamientos admisibles están definidos para limitar la inclinación de las vigas. Para un elemento apoyado en ambos extremos, la pendiente en la viga sería el desplazamiento máximo dividido por la mitad de la luz. En la mayoría de los Reglamentos, directamente se definen los límites en función de la luz.

Esta interpretación de los desplazamientos admisibles como pendientes, la cual era evidente en la definición original, puede encontrarse en el *International Building Code* (reglamento norteamericano para edificios) [7]. Allí se especifica que, en elementos en voladizo, el valor de  $\ell$  debe tomarse como el doble de la longitud del voladizo, lo cual es una consecuencia directa de aplicar el concepto de distorsión a una ménsula, donde entra en juego su longitud total en vez de la mitad de la luz.

### Extensión a losas en dos direcciones

Está fuera del alcance del presente trabajo discutir los méritos de los criterios para el control de desplazamientos y si estos son adecuados para construcciones modernas. Se hará foco, en cambio, en cómo estos límites que fueron creados para elementos lineales pueden extenderse sin ambigüedades a losas en dos direcciones.

Es posible reconocer que una viga de luz  $L$  con su máximo desplazamiento en el centro de tramo tiene las mismas distorsiones que una ménsula de longitud  $L/2$  con

Organiza:

ese mismo desplazamiento en su extremo. Por lo tanto, si se define a  $l$  (la longitud a considerar para determinación de los desplazamientos admisibles) como *el doble de la distancia entre el punto de control y el apoyo más cercano*, una única definición cubre ambos casos, entendiendo como punto de control la ubicación en la cual el desplazamiento quiere ser comparado contra los límites.

Esta definición es extensible a losas en dos direcciones, ya que lo que está haciendo es definir una línea en la cual se calculan distorsiones. Para losas sin vigas, los apoyos más cercanos a cualquier punto de la losa son las columnas. Por lo tanto, para una losa rectangular se tendría que para los desplazamientos en el centro de losa  $l$  se transforma en la diagonal, y que para los desplazamientos en las fajas de columnas  $l$  es la distancia entre columnas (luz mayor o luz menor según el caso). Esto coincide con la propuesta original de Scanlon [8], y con lo estipulado por el Código Modelo del Fib [9].

La definición permite a su vez definir  $l$  para losas con vigas. Tomando las vigas como rígidas, el apoyo más cercano es la viga. Por lo tanto, en losas rectangulares con vigas este análisis se simplifica a tomar  $l$  como la luz menor para el desplazamiento del centro del panel, lo cual es consistente con lo que se adopta para losas unidireccionales. Esta metodología para la determinación de  $l$  es aplicable a cualquier losa independientemente de su forma, ya sea losas circulares u oblicuas. El principal punto de conflicto es que no define estrictamente un único punto de control, aunque el número de puntos a analizar puede ser estimado razonablemente. En general, estos serían el máximo desplazamiento en el interior del panel, así como los desplazamientos entre líneas de columnas.

Otro detalle a tener en cuenta que diferencia las losas de las vigas es que estas últimas se encuentran entre apoyos que son, a fines prácticos, rígidos. Esto hace que el desplazamiento calculado genere distorsiones. En el caso de una losa con vigas, parte del desplazamiento del centro de la losa es compartido por el desplazamiento de las vigas. Esa componente de cuerpo rígido no tiene incidencia en el potencial de daño en particiones. Por lo tanto, sería más preciso comparar los límites reglamentarios contra el desplazamiento *relativo* del punto de análisis respecto a sus apoyos. Esto puede tenerse en cuenta con una aclaración en la definición del “desplazamiento calculado” en el artículo 24.2.2. Los autores proponen considerar el efecto de los desplazamientos en las vigas en las cuales apoya la losa de la siguiente forma: “El desplazamiento a considerar es el máximo desplazamiento menos el desplazamiento en los apoyos. Alternativamente, está permitido usar el desplazamiento total”. La segunda opción es indicada ya que siempre resulta en un análisis conservador, y es la práctica habitual para losas con vigas.

## Simplificación en losas rectangulares

La gran mayoría de los entresijos siguen una grilla de forma tal que es razonable tratar los paneles de losas como rectangulares. Si bien la definición de  $l$  anterior es aplicable a cualquier configuración de entresijo, vale la pena simplificar la solución más abstracta y general para simplificar el proceso.

Organiza:

Tomemos una losa rectangular. Una forma habitual de explicar su comportamiento es diferenciar entre fajas de columna y fajas centrales, las cuales pueden ser consideradas como elementos lineales siguiendo una analogía de emparrillado (Figura 1). Es razonable asumir que el máximo desplazamiento en cada faja ocurre aproximadamente en su centro de tramo. El desplazamiento en centro de tramo de las franjas de columna es  $\Delta_{cs}$  (En particular,  $\Delta_{cs,y}$  para la franja de columnas en dirección  $y$ ). El máximo desplazamiento de la losa es  $\Delta_{tot}$ , el cual es la suma del desplazamiento entre  $\Delta_{cs}$  y el desplazamiento de la franja central  $\Delta_{ms}$ , el cual es relativo al desplazamiento de la franja entre columnas. Si uno quisiera analizar las pendientes de cada una de estas líneas producto de modelo de emparrillado se encuentra con 2 tipos (6 en total) de potenciales distorsiones a verificar: (a) la pendiente en la franja entre columnas ( $\Delta_{cs,y} < L_y/240$ ), y (b) la pendiente en la franja central ( $\Delta_{ms,x} < L_x/240$ ). Noten que en ninguna de las verificaciones entra en juego el desplazamiento total de la losa ya que parte de él es un movimiento de cuerpo rígido. Para losas con vigas rígidas, sería razonable considerar  $\Delta_{cs} \approx 0$  y verificar directamente  $\Delta_{tot} < L_x/240$ , lo cual es habitual para losas con vigas (y se encuentra explicitado para losas en una dirección en el Reglamento).

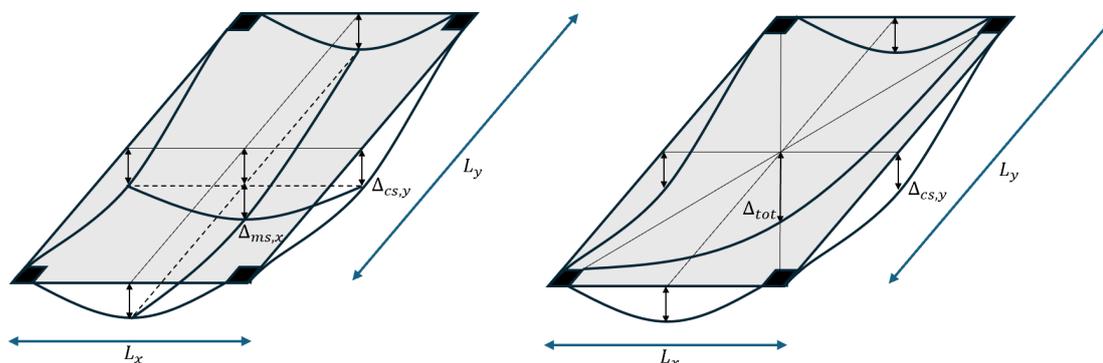


Figura 1. Desplazamientos a considerar en losas rectangulares.

Al análisis anterior se le debe agregar el análisis de la diagonal. Tomando los desplazamientos de la losa como cables que cuelgan de las columnas, puede verse que otra potencial distorsión a verificar (2 en total) es  $\Delta_{tot} < L_d/240$ , donde  $L_d$  es la longitud diagonal. En resumen, la losa más sencilla tiene en términos generales 5 puntos de control en los cuales verificar desplazamientos y 8 verificaciones para cubrir razonablemente las distorsiones más relevantes, con o sin vigas interiores.

La principal dificultad aquí ya no es la definición, sino el aumento considerable de la complejidad de la verificación de desplazamientos en una losa respecto a vigas, y también la diferencia con la tradición y usos y costumbres de los ingenieros estructurales. Por lo tanto, se vuelve importante ofrecer una alternativa que reduzca el número de puntos de control.

Organiza:

Para losas con vigas, por ejemplo, la verificación a lo largo de las franjas de columna queda cubierta por el control de desplazamientos en vigas del Capítulo 6 del ACI 318. Luego, si las vigas son suficientemente rígidas es razonable asumir que  $\Delta_{ms} \approx \Delta_{tot}$  y por lo tanto la verificación de la losa se convierte en un único chequeo: comparar el desplazamiento total utilizando la luz menor.

Para losas sin vigas,  $\Delta_{ms} \approx \Delta_{cs}$  y por lo tanto no es necesario verificar la franja intermedia. Quedan entonces dos chequeos, una para las franjas de columna (como si fueran vigas), y otras para el interior del panel con la diagonal. De aquí se desprende que la propuesta de Scanlon coincide con la metodología de este trabajo.

A su vez, estas definiciones convergen a aquellas para losas unidireccionales a medida que la relación de luces aumenta, porque las losas con vigas trabajan en su lado corto y las losas sin vigas en su lado largo.

Lo ideal para mantener la forma de análisis actual sería poder condensar la verificación de desplazamientos a una sola evaluación. A fines de comprender las consecuencias, tomemos una losa sin vigas cuadrada. Por simetría,  $\Delta_{tot} \approx 2\Delta_{cs}$ , y  $L_d \approx 1.4L_{cs}$ . Por lo tanto, si la distorsión a lo largo de la diagonal verifica, automáticamente se puede asegurar que la distorsión en la faja entre columnas verifica.

Sin embargo, si la relación de lados es 2 de forma tal que la losa trabaja en forma unidireccional, entonces  $\Delta_{tot} \approx \Delta_{cs}$ , y  $L_d \approx 1.12L_{cs}$ , por lo que en este caso es la distorsión en la faja entre columnas la que controla el diseño. Como se puede ver, el criterio adoptado para verificar desplazamientos puede ser conservador en una losa, pero no para otra. Una opción sería adoptar a la luz mayor como  $\ell$  independientemente del punto a analizar. Esto sería siempre conservador, llevando en el peor de los casos (la losa cuadrada) a reducir un 28% el desplazamiento admisible. En todos los casos, utilizar la luz menor sería excesivamente restrictivo con reducciones de entre el 28% y el 50% del desplazamiento admisible en losas sin vigas. Además, sería conceptualmente erróneo ya que no responde al comportamiento de la losa.

El análisis racional resumido más arriba muestra claras diferencias entre el comportamiento de losas sin vigas y losas con vigas rígidas. Sin embargo, no queda claro cuándo ocurre esa transición, la cual depende entre otras cosas de la relación de aspecto y la rigidez de la viga relativa a la rigidez de la losa. Es importante, entonces, segregar primero entre “losas sin vigas” y “losas con vigas” para la definición de  $\ell$ .

## **EFFECTO DE LA RIGIDEZ DE LAS VIGAS EN LA DISTORSION**

El objetivo de esta sección es discernir la transición entre el comportamiento entre losas con vigas (que tienden a trabajar con la luz menor) y el de losas sin vigas (que tienden a trabajar con la luz mayor), a fines de poder proponer una forma simplificada para la verificación de desplazamientos a partir de un único punto de control, tal como se hace actualmente.

Para poder identificar esa transición, se realizaron una serie de análisis no-lineales en

Organiza:

losas con vigas interiores, modificando su geometría (relación de lados  $\beta$ ) y la rigidez relativa entre las vigas y la losa, controlado mediante el parámetro  $\alpha_m$ . En cada caso se calcularon las distorsiones a lo largo de las 8 potenciales líneas de interés (Figura 2). Qué distorsión controla es una medida objetiva de si la losa puede ser considerada una losa sin vigas a los fines de determinar desplazamientos admisibles o no.

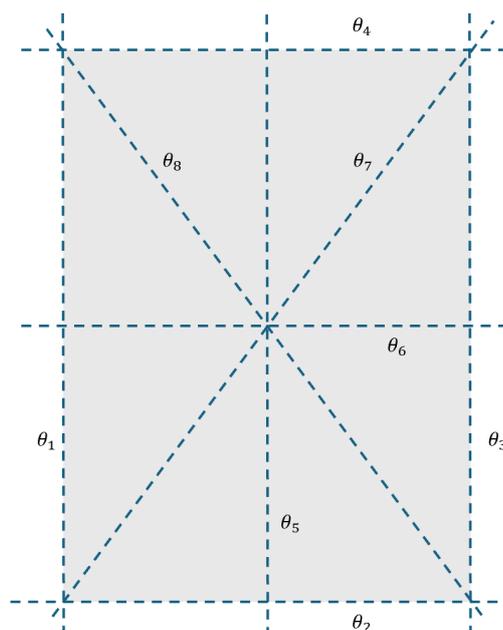


Figura 2. Líneas de control en una losa rectangular.

## Modelación de losas y validación

Las losas fueron modeladas utilizando el software CSI SAFE v21.1.0, un programa desarrollado por CSI Structures específicamente para el análisis y diseño de entrepisos. El mismo es ampliamente utilizado por diseñadores. Todos los entrepisos modelados consistían en grillas de 3x3 vanos ortogonales, adoptando un espesor constante que respete el mínimo requerido por el Reglamento ACI 318. Se consideró hormigón de densidad normal y resistencia típica (4000 psi o 28 MPa), así como armadura típica de 60 ksi o 420 MPa). Para considerar el aumento de la fisuración producto de la contracción por secado y la restricción volumétrica en losas, se utilizó un módulo de rotura reducido de  $4\sqrt{4000}$  psi según lo recomendado por el documento ACI 435R-95 [10]. Debe tenerse en cuenta que este valor es el resultado de reducir a la mitad el módulo de rotura indicado en el Reglamento ACI 318.

Vale la pena hacer un pequeño comentario respecto al módulo de rotura y su uso con ecuaciones simplificadas para cálculos manuales. Las ecuaciones simplificadas de

Bischoff para el cálculo no-lineal (las cuales reemplazaron a las desarrolladas por Branson en ediciones recientes del ACI 318) incluyen un factor de 2/3 para considerar la fisuración por restricción que es incompatible con la modificación utilizada en este trabajo (que fue pensada para su utilización con la ecuación de Branson). Es decir, en losas en dos direcciones el momento crítico de fisuración  $M_{cr}$  debiera calcularse con un módulo de rotura de  $6\sqrt{f'_c}$  para su incorporación en la fórmula de Bischoff (comparado a  $8\sqrt{f'_c}$  en vigas), y el Reglamento debiera comentar respecto de estas diferencias dado que es habitual usar los valores recomendados por el ACI 435R-95 en el cálculo de losas. En modelos de elementos finitos resulta correcto aplicar el valor recomendado en forma directa, aunque es curioso que esta situación no se encuentra adecuadamente explicada en el reglamento o sus comentarios.

La experiencia de los autores es que los resultados del software CSI SAFE varían considerablemente entre sus distintas versiones (en particular, la versión 18 y la 21). Por ello, antes de realizar el estudio paramétrico se decidió validar los resultados con los desplazamientos obtenidos de un modelo no-lineal de diferencias finitas desarrollado por los autores en MATLAB. Este programa adopta la metodología de Ghali [11] para identificar el momento de inercia fisurado (similar a la fórmula de Bischoff pero aplicable a cada punto de la losa), y la formulación de losa ortótropa por fisuración de Scanlon [12] basado en las inercias fisuradas en cada punto. El análisis a largo plazo se llevó a cabo por el método del módulo de elasticidad ajustado por la edad, incluyendo los efectos de contracción por secado con el modelo de Hobbs [13], extendido a un modelo de placas.

A fines de este trabajo se presenta la comparación para el panel central de cinco losas con distinta geometría y configuraciones de carga. Las propiedades de las losas pueden verse en la Tabla 1.

Losa	Luz mayor	Luz menor	Espesor	Carga permanente	Sobrecarga	Factor de Creep	Deformación por contracción
	$L_x$ [ft (m)]	$L_y$ [ft (m)]	$h$ [in (cm)]	$q_d$ [psf (kPa)]	$q_l$ [psf (kPa)]	$\lambda$	$\epsilon_{sh}$
1	25 (7.6)	25 (7.6)	9.0 (23)	20 (1)	50 (2.4)	1.5	0.0005
2	20 (6.1)	20 (6.1)	8.2 (21)	20 (1)	80 (3.8)	1.5	0.0005
3	25 (7.6)	25 (7.6)	9.0 (23)	30 (1)	80 (3.8)	1.5	0.0005
4	27 (8.2)	27 (8.2)	9.72 (25)	30 (1.4)	80 (3.8)	2.0	0.0005
5	25 (7.6)	12.5 (3.8)	9.0 (23)	30 (1.4)	80 (3.8)	2.0	0.0005

Tabla 1. Parámetros de las losas estudiadas.

La comparación entre los resultados de utilizar el Software CSI SAFE y el modelo de diferencias finitas puede verse en la Tabla 2, en la cual se muestra el desplazamiento del centro de la losa central para distintos estados de carga (D: peso propio, L: sobrecarga, D+L: combinación) tanto en régimen lineal como no-lineal (NL), instantáneo y a largo plazo (LP). En **negrita** se indican los estados de carga que son

Organiza:

de interés para la verificación de desplazamientos. De la comparación entre ambos se destaca que los resultados de la nueva versión de SAFE son consistentes con las obtenidas con el programa de diferencias finitas desarrollado, con diferencias del orden de 10% en el peor de los casos. Para lo que sigue en el trabajo se harán las corridas en CSI SAFE debido a su mayor velocidad de cálculo y para poder incorporar efectos no considerados en el modelo de los autores (ábacos y vigas de borde).

Losa	Programa	D	D-NL	D+L-NL	D-NL-LP	L	L-NL	D+L-NL-LP
1	SAFE	0.14	0.20	0.59	0.58	0.05	<b>0.38</b>	<b>0.96</b>
1	Dif. Fin	0.14	0.24	0.66	0.56	0.05	<b>0.43</b>	<b>0.99</b>
2	SAFE	0.09	0.12	0.54	0.35	0.07	<b>0.42</b>	<b>0.77</b>
2	Dif. Fin	0.10	0.13	0.59	0.30	0.07	<b>0.46</b>	<b>0.77</b>
3	SAFE	0.15	0.22	0.86	0.62	0.09	<b>0.64</b>	<b>1.26</b>
3	Dif. Fin	0.16	0.27	0.93	0.63	0.09	<b>0.67</b>	<b>1.30</b>
4	SAFE	0.18	0.28	0.98	0.77	0.09	<b>0.70</b>	<b>1.46</b>
4	Dif. Fin	0.19	0.38	1.14	0.84	0.10	<b>0.75</b>	<b>1.60</b>
5	SAFE	0.08	0.12	0.47	0.38	0.05	<b>0.36</b>	<b>0.74</b>
5	Dif. Fin	0.08	0.14	0.50	0.37	0.05	<b>0.35</b>	<b>0.73</b>

*Tabla 2. Comparación de resultados entre software comercial y modelo de diferencias finitas. Resultados en pulgadas (1 in = 2.54 cm).*

### Distorsión principal en función de la rigidez de las vigas

Para el análisis, para que cada línea de análisis  $\theta_1$  a  $\theta_8$  sea comparable entre sí, se decidió definir primero una variable que sea la relación entre el desplazamiento máximo en cada línea y su desplazamiento admisible

$$\theta_i = \frac{w_i}{w_{adm}} = 240 \frac{w_i}{\ell_i} \quad (1)$$

donde  $\ell_i$  es la longitud de cada línea de análisis (luz mayor, menor o diagonal según el caso). Luego, como lo que se quiere es determinar si el punto que controla se corresponde a una losa con vigas ( $\theta_5$  o  $\theta_6$ ) o sin vigas (el resto), se analizó en cada caso la relación entre cada distorsión con la distorsión máxima. De esa forma, un valor de 1 indica que la misma es la mayor encontrada en la losa, todas las demás siendo menores.

A modo de ejemplo se muestra los resultados para una losa 25 ft (7.6 m) para distintos valores de relación de aspecto  $\beta$  entre 1 (losa cuadrada) y 2 (losa tendiendo a unidireccional). Para modificar la rigidez relativa de las vigas, las mismas fueron diseñadas con una altura  $h_v = L/X$ , donde L es la longitud de la viga según la dirección, y un espesor igual a un tercio de la altura. X fue adoptado igual para todas

Organiza:

las vigas (diferenciando entre interiores y exteriores) de forma tal que el valor de  $a_m$  alcance el valor deseado para el análisis. De esta forma se consigue representar que las vigas en los lados largos suelen ser más rígidas y su valor de  $\alpha$  significativamente mayor al de lado corto, lo que ayuda también a inducir el comportamiento como losa con vigas.

En la Figura 3 se resumen los resultados para las losas de esquina y las centrales. Aunque no se muestran por una cuestión de espacio, las losas laterales con lado largo libre y lado corto libre se comportan similar a cada una de las anteriores, respectivamente, debido a la mayor influencia de la viga de borde. Para dar orden de magnitud, el área sombreada representa valores típicos de  $a_m$  para un diseño tradicional de losas con vigas ( $X \approx 10$ ). De la Figura se desprende que, a medida que aumenta la relación de aspecto, las vigas necesitan ser cada vez más rígidas para que la distorsión en el lado corto gobierne, desde un valor  $a_m = 4$  para losas cuadradas a un valor de 10 para losas rectangulares. Es notable como, si bien para losas de esquina esto es relativamente fácil de lograr, no es así para las losas centrales. Es decir, generar un verdadero comportamiento como losa unidireccional a fines del cálculo de desplazamientos es mucho más difícil de lo que se suele pensar, y por lo tanto sus verificaciones suelen ser muy conservadoras. En ese sentido es razonable que las deflexiones en losas con vigas no suelen ser un problema, como sí lo son en losas sin vigas.

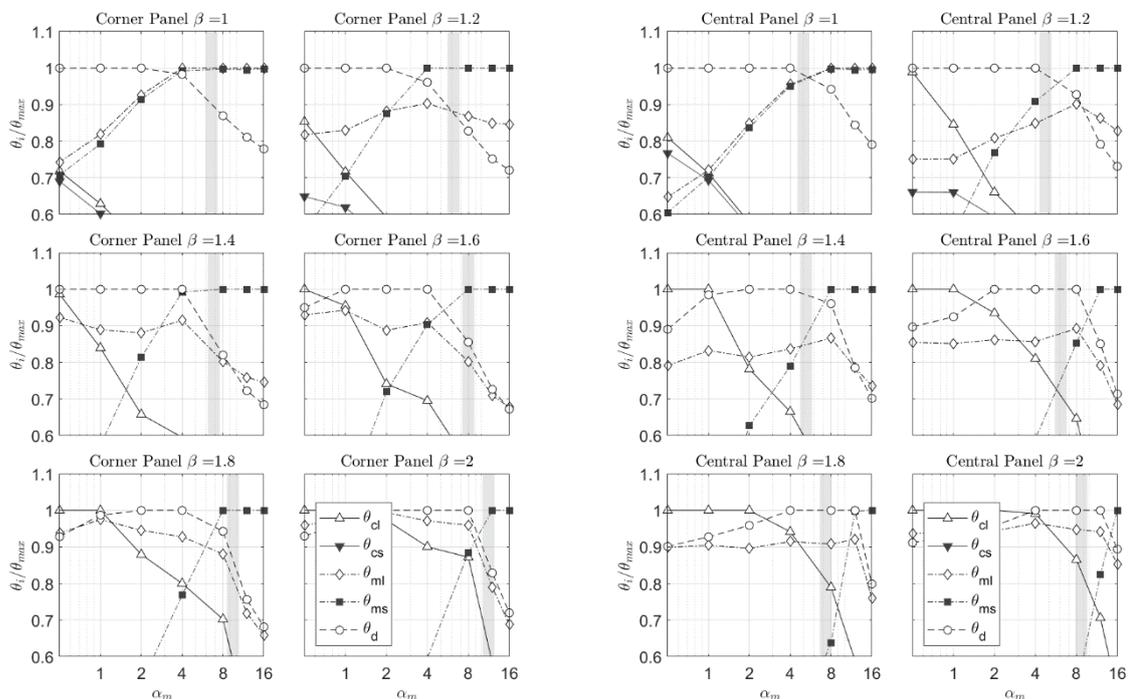


Figura 3. Relación de distorsiones en losas con vigas de 7.6 m.

Si se repite el análisis para una losa de menor tamaño (15 ft o 4.6 m) el efecto es aún más notorio, en el sentido que para mayores valores de  $\beta$  se vuelve prácticamente

imposible diseñar vigas suficientemente rígidas para generar un comportamiento unidireccional en el lado corto (Figura 3).

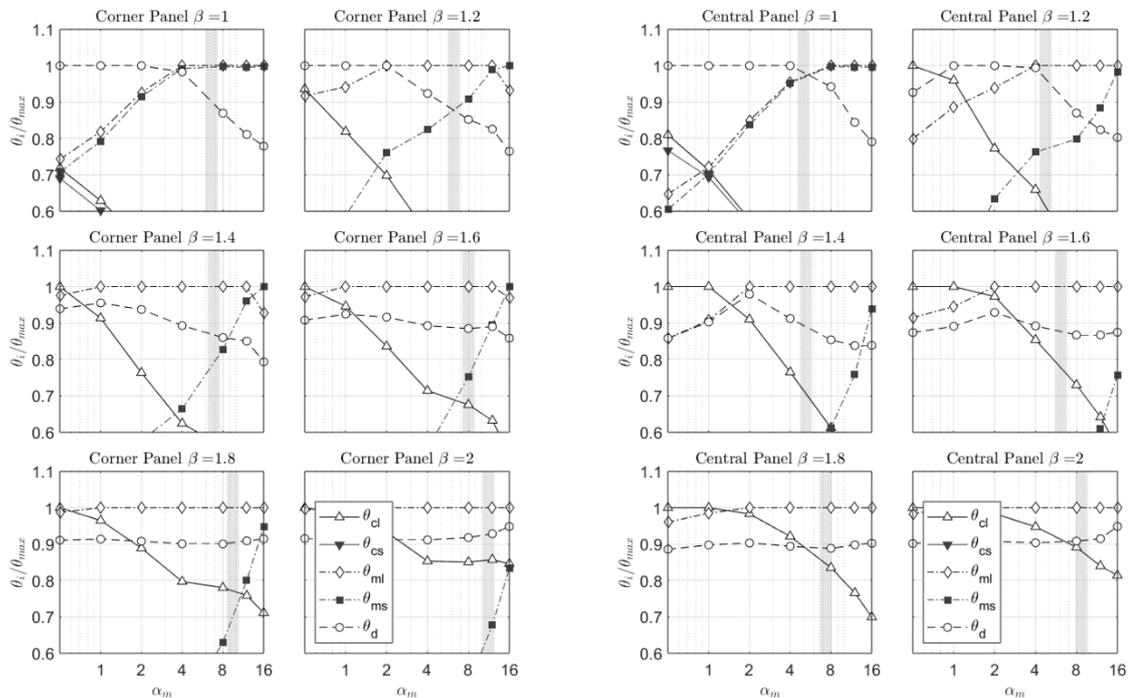


Figura 4. Relación de distorsiones en losas con vigas de 4.6 m.

En resumen, entonces, no existe un único valor de  $\alpha$  que asegure en sí mismo un comportamiento como losa con vigas. Más allá de eso, como la definición de  $\ell$  para losas con vigas (la luz menor) comúnmente adoptada es la opción más restrictiva de todas las propuestas, los autores creen que lo mejor es restringir el análisis como “losa sin vigas” al menor número de losas posibles para las cuales se pueda garantizar que trabajan como tal. A su vez, en trabajos previos se demostró que las losas más críticas cuando son diseñadas por espesores mínimos son aquellas que tienden a ser cuadradas. Con esto, más la observación de que la relación de aspecto no entra en juego en ningún artículo del Reglamento a la hora de caracterizar a las vigas (ya sea para la definición de vigas de borde, o los espesores de losas con vigas), se considera apropiado definir un límite único de  $\alpha_m$  para realizar la separación, en forma similar a lo que se hace en la Tabla ACI 318 8.3.1.2. Basado en las Figuras, se puede asegurar que cualquier losa con  $\alpha_m < 4$  va a ser controlada por su distorsión en la línea entre columnas o la diagonal, que es el comportamiento como losa sin vigas esperado. Para mantener consistencia interna del reglamento, los autores recomiendan reducir este valor a  $\alpha_m < 2$ , con lo cual coincidiría con los valores de la Tabla 8.3.1.2 a partir del cual las vigas son “rígidas” a fines de definir el espesor mínimo. Todos los demás casos pueden ser tratados como losas con vigas con  $\ell$  siendo la luz menor y verificando el máximo desplazamiento, que es la práctica habitual.

Habiendo caracterizado el grupo de losas a tratar como “sin vigas” para el análisis de Organiza:

desplazamientos, las figuras anteriores muestran que según el caso puede gobernar la distorsión en la diagonal, y en otros la distorsión entre columnas (lado largo). El objetivo sería encontrar una definición que permita evitar la verificación en todas las potenciales líneas (5 en total), de forma tal de mantener la forma habitual de trabajo de la industria y reducir la complejidad del proceso. Tener un único punto de control para la losa es más intuitivo y más fácil de transmitir que cinco verificaciones distintas de distorsiones, o tener 5 valores admisibles distintos en una misma losa. Para ello, tomando el máximo desplazamiento como punto de control, las potenciales definiciones de  $\ell$  para losas sin vigas eran: (a) la luz mayor, (b) la luz menor, (c) la diagonal. La Figura 4 muestra como la distorsión calculada con cada una de estas definiciones se compara con la verdadera distorsión máxima. Se ve claramente que la definición (c) puede no ser conservadora, llegando a predecir una distorsión 20% menor a la real. Solo en casos muy particulares (losa perfectamente cuadrada) son los resultados aceptables. Caso opuesto, la opción (b) es demasiado conservadora y llevaría a diseños poco económicos, especialmente para grandes relaciones de aspecto. Además, a esa altura el cálculo perdería todo sentido porque el comportamiento unidireccional es en el sentido opuesto. Entonces, la mejor opción para un único análisis simplificado es la opción (c), donde la sobre predicción (40% en la distorsión, que es un 28% de reducción del desplazamiento admisible) es limitada, y rápidamente converge para relaciones de aspecto mayores.

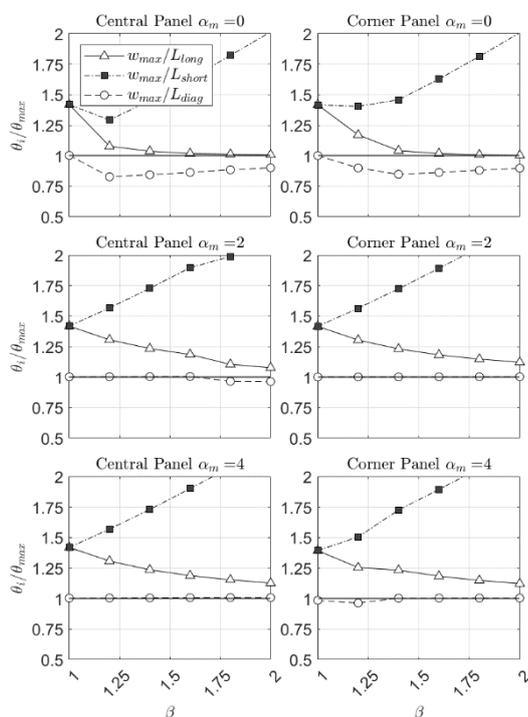


Figura 5. Análisis de distintas formas simplificadas de calcular la distorsión.

Organiza:

## Resumen de propuestas de cambios

Basado en el análisis anterior, se proponen los siguientes cambios reglamentarios. El artículo 24.2.2 debiera indicar que para losas en dos direcciones los desplazamientos pueden considerarse aceptables si el máximo desplazamiento es verificado contra los valores de la Tabla 24.2.2, tomando  $l$  como la luz mayor en losas sin vigas interiores o losas con vigas interiores siempre y cuando  $\alpha_m < 2$ , y como la luz menor en caso contrario.

Nótese que el cambio no está escrito como requerimiento, ya que los diseñadores debieren mantener la potestad de hacer un análisis más exhaustivo de las distorsiones mediante puntos de control, como se ha mostrado aquí o como fue propuesto por Scanlon. En ese caso, los comentarios al Reglamento podrían proveer más información al respecto. Sin embargo, se espera que la mayoría de los profesionales usen este procedimiento simplificado, ya que sigue la misma metodología habitual. Simplemente aclara un punto de conflicto entre ingenieros.

## LÍMITES DE APLICACIÓN A LOS ESPESORES MÍNIMOS PARA LOSAS SIN VIGAS

En la sección anterior se definió una forma específica para verificar desplazamientos en losas en dos direcciones, y se propuso una definición simplificada que permite realizar una verificación conservadora (particularmente, en losas sin vigas). El siguiente paso sería evaluar la Tabla 8.3.1 y ver cuándo la misma cumple con los criterios de desplazamientos, con el fin de definir límites de aplicación que aseguren el desempeño de las losas, y reduzca inconsistencias entre la verificación por espesores mínimos y el cálculo explícito de desplazamientos.

Para tal fin, se realizaron un conjunto de análisis no-lineales para ver la combinación de variables de diseño que permiten asegurar que las losas que cumplen con los espesores mínimos verifican desplazamientos. Esto se hará con el análisis completo y no con el procedimiento simplificado de verificación. Primero debe definirse para qué límite de desplazamientos estarán definidos los espesores mínimos. Basado en trabajos previos (y los resultados que se verán a continuación), es evidente que sólo debieran aplicar a entresijos que no contengan elementos no estructurales sensibles a grandes flechas ( $l/240$ ), debiendo modificarse el artículo 8.3.1 adecuadamente. Esto pondría a los espesores mínimos de losas en dos direcciones en igualdad de condiciones con los criterios para losas unidireccionales y vigas.

## Estudio paramétrico de los desplazamientos en losas sin vigas

La evaluación del desempeño de la Tabla 8.3.1 se hizo mediante un estudio paramétrico. Para la estimación de los efectos a largo plazo, se asumió que la sobrecarga produce únicamente deformación instantánea. A su vez, se consideraron dos casos. Uno en el que se miden desplazamientos luego de la instalación de

Organiza:

particiones ( $\lambda = 1.5$ ), el cual sería apropiado para cuando las mismas son sensibles a grandes desplazamientos, y otro que considera todos los desplazamientos ( $\lambda = 2.0$ ). Téngase en cuenta que estos valores para el coeficiente de creep son una estimación. Para los autores, esto es suficiente para una tabla general que intenta cubrir gran parte de la población de losas. Los ingenieros debieran tener conocimiento de los métodos de construcción y cuál es el coeficiente de creep aplicable a su caso particular, que puede llegar a ser de 2.5 [14].

Las variables seleccionadas fueron:

- La luz mayor: 16 ft, 20 ft, 25 ft, 27 ft (4.9 m, 6.1 m, 7.6 m, 8.2 m)
- La relación de aspecto: 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0
- La carga permanente adicional: 20 psf, 30 psf (1 kPa, 1.4 kPa)
- La sobrecarga: 50 psf, 80 psf, 100 psf (2.4 kPa, 3.8 kPa, 4.8 kPa)

Considerando los distintos valores de coeficiente de creep y las configuraciones de losa (presencia de vigas de borde y/o ábacos), se analizaron a priori 1152 sistemas de losas. Como, en realidad, en los modelos sin vigas de borde el espesor necesario en paneles centrales es menor que en los exteriores, pero los modelos de losas eran de espesor constante (típico en la práctica), para poder cubrir todos los casos de estudios de losas sin vigas de borde estos se repitieron con los dos espesores, llevando el total a 1728 análisis no lineales. A una velocidad de aproximadamente 4.5 min por corrida, todo el proceso llevó unas 130 hr (5 días).

La Figura 7 y Figura 8 muestran los resultados en función de la luz menor para todas las losas analizadas, en paneles centrales y de esquina respectivamente. A la izquierda se presenta el mayor valor de  $\theta_i$ , definido de forma tal que un valor mayor a 1 implica el mismo supera la distorsión máxima admisible (1/240). A la derecha, se presentan los histogramas con la diferencia de las distintas tipologías de losa respecto a una losa sin viga de borde ni ábacos. De esta forma, se puede ver si los espesores mínimos definidos para cada tipología llevan a resultados similares.

A simple vista se desprende que hay un mayor número de losas de esquina que superan la distorsión límite que losas centrales. A su vez, puede verse que los paneles de esquina con vigas de borde y ábacos (espesor mínimo L/36) pueden tener desplazamientos significativamente superiores (en promedio 30%) a una losa con la misma geometría y cargas, pero sin vigas de borde (L/30) o sin ábacos (espesor mínimo L/33). Esto implicaría que el espesor mínimo no lleva a resultados consistentes entre tipologías de losa. En particular, lo que ocurre es que el efecto de la viga de borde se ve disminuido cuando hay ábacos presentes. Esto es porque una losa con ábacos y sin viga de borde tiene ábacos en todas las columnas, mientras que al agregar la viga de borde los ábacos en las columnas externas se eliminan, reduciendo el beneficio en la rigidez.

Organiza:

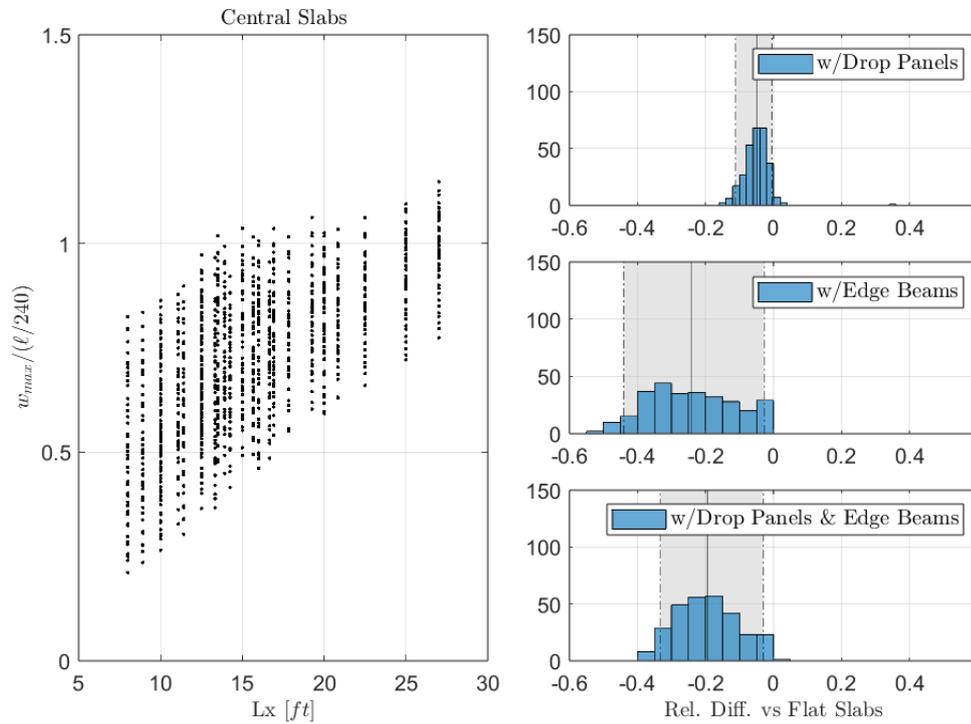


Figura 6. Resultados para paneles centrales.

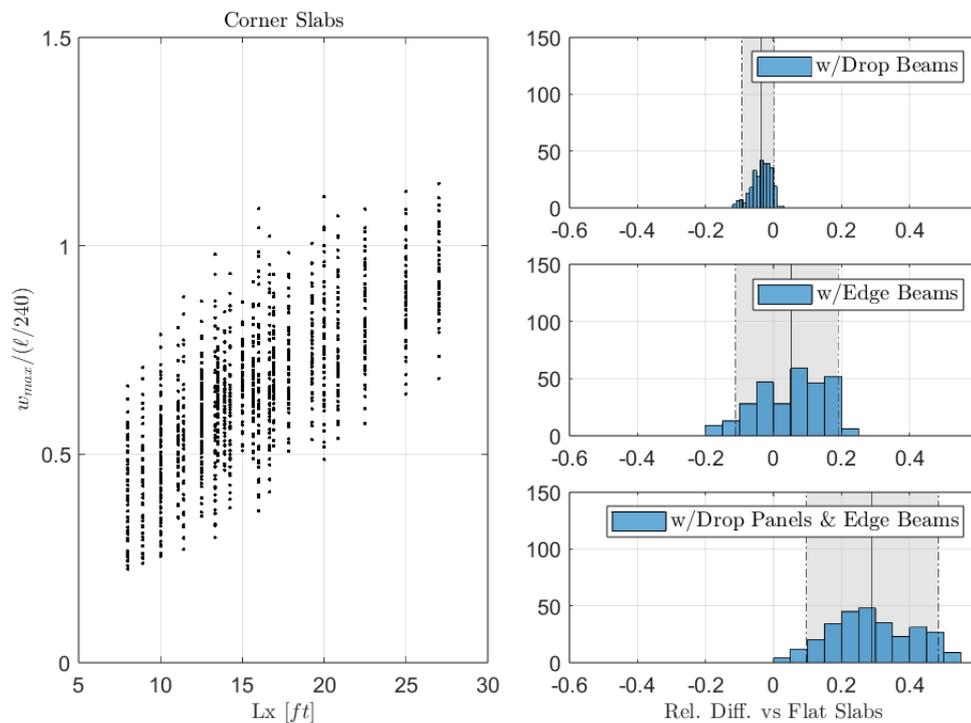


Figura 7. Resultados para paneles de esquina.

Organiza:

Como comparación, de las 1152 losas analizadas, 4 losas con vigas de borde no verificaron mientras que 29 losas con vigas de borde y ábacos presentaron desplazamientos mayores a los admisibles. La diferencia puede verse en la Figura 8, donde es claro que los resultados en las esquinas son significativamente superiores.

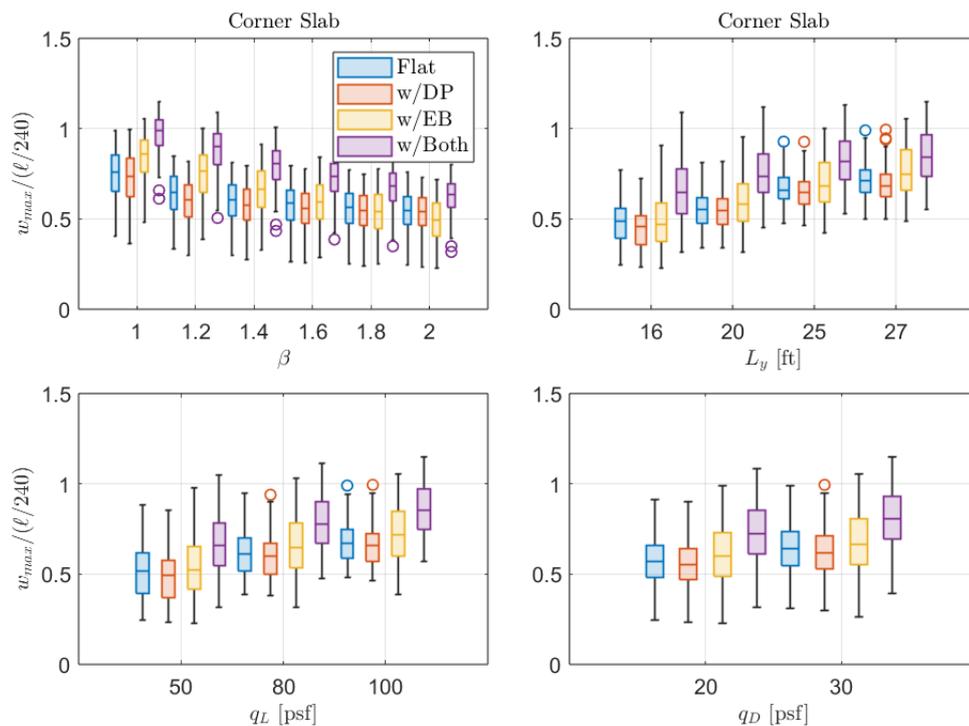


Figura 8. Efecto de las variables en los paneles de esquina.

En función de lo anterior, se propone simplificar la tabla eliminando la reducción de espesor para paneles de borde en losas con vigas de borde y ábacos. Repitiendo las corridas, en la Figura 8 puede verse que utilizar  $L/33$  como espesor mínimo lleva a resultados similares a las otras tipologías de losas, especialmente para losas cuadradas que son las más críticas para la verificación de desplazamientos.

Habiendo dicho esto, es necesario ahora identificar las variables críticas que hacen que las distorsiones superen los valores admisibles. La Tabla 3 presenta el listado de losas en los cuales alguno de sus paneles no verificaba desplazamientos. De los resultados se pueden proponer infinitas combinaciones de límites de forma tal que todas las losas dentro de los límites tengan desplazamientos admisibles. La propuesta de los autores se basó en discusiones con otros ingenieros y miembros del ACI con el fin de que la aplicación de los mismos sea sencilla de utilizar, y cubra la mayoría de los casos "habituales".

Organiza:

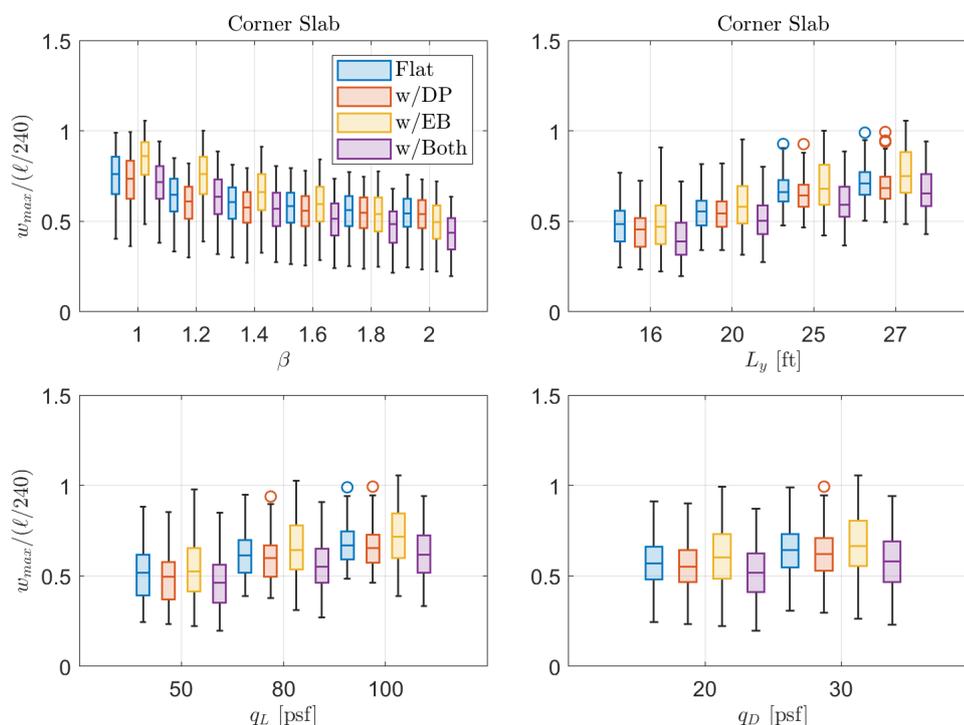


Figura 9. Efecto de las variables en los paneles de esquina.

En base a lo comentado, se proponen los siguientes límites para la utilización de los espesores mínimos de la Tabla 8.3.1, resultando en valores de desplazamientos máximos que quedan dentro del 1% en exceso de valor admisible como máximo:

1. Condiciones generales
  - Luz mayor no mayor a 27 ft (8.2 m)
  - Carga permanente adicional no mayor a 20 psf (1 kPa)
  - Sobrecarga no mayor a 80 psf (4.8 kPa)
  - El coeficiente de creep no puede superar 2.0
2. Se puede permitir una carga permanente de hasta 30 psf (1.4 kPa) si la sobrecarga es menor a 50 psf (2.4 kPa) o la luz no supera los 20 ft (6.1 m), siempre y cuando el resto de los límites se cumplan.
3. Del mismo modo, la sobrecarga puede ser de hasta 100 psf (4.8 kPa) siempre y cuando la luz no supere los 25 ft (7.6 m) y se cumplan el resto de las condiciones estipuladas.

El objetivo de los agregados 2 y 3, si bien dificultan un poco la redacción, permiten cubrir un mayor número de losas que utilizando únicamente las condiciones generales, y debiera cubrir un importante porcentaje de losas habituales en la práctica profesional. La opinión de los autores es que, para casos que caen fuera de los límites, los espesores mínimos debieran ser **requeridos** (es decir, actuar efectivamente como espesores mínimos), como salvaguarda ante hipótesis inadecuadas o poco razonables, aún si el análisis de desplazamientos justificaría un espesor menor.

Organiza:



Luz mayor	Relación de aspecto	Carga permanente	Sobrecarga	Factor de Creep	$\frac{w_i}{w_{adm}}$
$L_x$ [ft]		$q_d$ [psf]	$q_l$ [psf]		
20	1	30	100	2	1.02
25	1	20	100	2	1.01
25	1	30	80	2	1.03
25	1	30	100	1.5	1.05
25	1	30	100	2	1.09
25	1.2	30	100	2	1.03
25	1.4	30	100	2	1.02
25	1.6	30	100	2	1.02
27	1	20	80	2	1.01
27	1	20	100	1.5	1.01
27	1	20	100	2	1.06
27	1	30	50	2	1.01
27	1	30	80	1.5	1.03
27	1	30	80	2	1.09
27	1	30	100	1.5	1.09
27	1	30	100	2	1.15
27	1.2	30	80	2	1.02
27	1.2	30	100	1.5	1.01
27	1.2	30	100	2	1.06
27	1.4	30	80	2	1.02
27	1.4	30	100	1.5	1.02
27	1.4	30	100	2	1.06
27	1.6	30	100	2	1.04
27	1.8	30	100	2	1.04
27	2	30	100	2	1.02

Tabla 3. Listado de losas que no verifican desplazamientos.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un conjunto de análisis no-lineales de losas en dos direcciones. En base a los mismos, se propusieron cambios en el Reglamento ACI 318 con el objetivo de clarificar procedimientos ambiguos para la verificación de desplazamientos, y definir límites de aplicación al método de los espesores mínimos. Los resultados salientes son:

- La distinción entre losas sin vigas ( $\alpha_m < 2$ ) y losas con vigas a fines del cálculo de desplazamientos. Las primeras se pueden verificar tomando  $l$  como la luz mayor, y las segundas como la luz menor, considerando el máximo desplazamiento como punto de control
- La definición de límites de aplicación a la Tabla 8.3.1 para asegurar que las

Organiza:

losas diseñadas mediante espesores mínimos cumplan los criterios de desplazamientos.

- Modificación a la Tabla 8.3.1 para remover la reducción de espesor en paneles de esquina ante la presencia de vigas de borde y ábacos, que no parece justificarse en base a los resultados.

La Tabla 8.3.1 quedaría entonces de la siguiente forma:

Acero	Paneles exteriores		Paneles interiores	
	Con Ábacos o Vigas de Borde	Otro Caso	Con Ábacos	Sin Capiteles
280 MPa	L/36	L/33	L/40	L/36
420 MPa	L/33	L/30	L/36	L/33
550 MPa	L30	L/27	L/33	L/30

*Tabla 4. Tabla 8.3.1 modificada.*

## REFERENCIAS

1. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)
2. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (CIRSOC 201-2005)
3. Bertero, R., & Bertero, A. (2018). Statistical evaluation of minimum thickness provisions for slab deflection control. *ACI Structural Journal*, 115(6), 1659-1670.
4. Bondy, K.B. (2005). *ACI Code deflection requirements – Time for a change?* ACI Special Publication SP 225.
5. Warwaruk, J. (1979). *Deflection Requirements - History and Background Related to Vibrations.* ACI Special Publication SP 60.
6. Wight, J.K. (2021). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, Pearson.
7. 2021 International Building Code (IBC)
8. Scanlon, A., & Thompson, D. P. (1990). Evaluation of ACI 318 Requirements for control of two-way slab deflections. *Structural Journal*, 87(6), 657-661.
9. *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*
10. *Control of Deflection in Concrete Structures (ACI 435R-95)*
11. Ghali, A., Favre, R., & Elbadry, M. (2018). *Concrete structures: Stresses and deformations: Analysis and design for serviceability.* CRC Press.
12. Tam, K. S., & Scanlon, A. (1986, September). Deflection of two-way slabs subjected to restrained volume change and transverse loads. In *Journal Proceedings (Vol. 83, No. 5, pp. 737-744).*
13. Hobbs, D. W. (1979). *Shrinkage-induced curvature of reinforced concrete members.* Cement and Concrete Association.
14. Graham, C. J., & Scanlon, A. (1986, November). Long-Time Multipliers for Estimating Two-Way Slab Deflections. In *Journal Proceedings (Vol. 83, No. 6, pp. 899-908).*

Organiza: