

PROPOSAL OF A SIMPLIFIED METHOD FOR FLEXURAL DESIGN OF RIBS IN WAFFLE SLABS

Gelacio Juárez Luna⁽¹⁾, Galet Vinat Díaz Lugo⁽²⁾

⁽¹⁾Profesor-Investigador, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, 02200 México, CDMX; gjl@correo.azc.uam.mx

⁽²⁾Estudiante-Maestría, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, San Pablo No. 180, Col. Azcapotzalco, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, 02200 México, CDMX; gandalf_zero@hotmail.com

Received: August 2017. Accepted: February 2018

ABSTRACT

In this paper, an approximate method with coefficients to compute the design moment of ribs in waffle slabs is proposed. These coefficients are useful for the design of the ribs in waffle slabs in seven different kinds of panels and different ratio of sides, short span and long span, which were computed from the numerical modelling. The meshing to discretize the waffle slabs models was performed based on the strain energy. A waffle slab modelling was compared with a solid slab of equivalent thickness model, the last model may provide flexural moments with an overdesign of the ribs; in fact, the moment distribution of the waffle model is completely different to the equivalent thickness model, so this last model is not recommended for the analysis of waffle slabs. Finally, the coefficients table proposed in this paper is validated with the moments of the ribs of a waffle slab, which were numerically computed, and then these coefficients are recommended for the flexural design of the ribs.

Keywords: Rib, waffle slab; flexural design; steel reinforcement; numerical validation.

PROPUESTA DE UN MÉTODO SIMPLIFICADO PARA EL DISEÑO A FLEXIÓN DE NERVADURAS EN LOSAS ENCASETONADAS

RESUMEN

En este artículo se propone un método aproximado mediante coeficientes para determinar los momentos de diseño en las nervaduras de losas encasetonadas. Estos coeficientes son útiles para el diseño de nervaduras de losas encasetonadas para siete distintos tipos de tableros de losas con distintas relaciones de lados, lado corto entre lado largo, las cuales se obtuvieron del modelado numérico. El mallado para discretizar los modelos de losas encasetonadas se realizó con base en la energía de deformación. El modelado de una losa encasetonada se compara con el modelado de una losa maciza con espesor equivalente, del cual se obtuvo que el segundo proporciona momentos que

sobredimensionarían las nervaduras de losas encasetonadas, además se observó que la distribución de momentos en losas encasetonadas presenta una distribución de momentos distinta a la de modelos de losa maciza con espesor equivalente, por lo que no es recomendable el método de losa maciza con espesor equivalente para el análisis de estructuras de losas encasetonadas. Por último, las tablas de coeficientes propuestas en este trabajo se validan con los momentos de las nervaduras de una losa encasetonada obtenidos numéricamente, por lo que estos coeficientes se recomiendan para el diseño a flexión de las nervaduras.

Palabras clave: Nervadura; losa encasetonada; diseño a flexión; acero de refuerzo y validación numérica.

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los sistemas de piso más utilizado es el de la losa maciza, que es aquel que cubre tableros generalmente con geometrías rectangulares o cuadrados, cuyos bordes se apoyan sobre vigas o muros a las cuales les transmiten su carga, y éstas a su vez a las columnas. Para el análisis de losas macizas, las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras de Concreto (NTCC-04) recomiendan un método válido, incluyendo el método de los coeficientes, el cual proporciona una tabla que incluye siete tipos de tableros (interior, borde con un lado corto discontinuo, borde con un lado largo discontinuo, esquina, extremo con un lado largo continuo, extremo con un lado corto continuo y aislado); con estos coeficientes se determinan los momentos de diseño. El ACI-11, acrónimo de su nombre en el idioma Inglés, American Concrete Institute recomienda el uso de un método válido, incluyendo el método directo y el método del marco equivalente. El Eurocódigo 2 (EC-2) recomienda un método válido para el análisis de losas; sin embargo, el ISTRUC (2011), acrónimo de su nombre en el idioma Inglés, The Institution of Structural Engineers proporciona coeficientes para determinar los momentos de diseño. En el método de los coeficientes para diseño de losas macizas de concreto, el momento de diseño, M , se determina con la expresión siguiente:

$$M = \alpha w a_1^2 \quad (1)$$

donde w es la carga uniformemente distribuida actuante sobre la losa, α es el coeficiente de diseño que depende del tipo de tablero y de la relación de longitudes del tablero $m = a_1/a_2$, del lado corto, a_1 , entre la del lado largo, a_2 .

La necesidad de espacios con claros grades es un aspecto primordial en la construcción, donde el sistema de losa maciza no es aplicable, pues su diseño requeriría de espesores que proporcionaría una estructura pesada por su carga muerta. Por lo que debe utilizarse otro sistema de piso como el de losas aligeradas o nervadas, el cual tienen vacíos en un arreglo rectilíneo llamado nervaduras que aligeran la carga muerta debido al peso propio. Selot (1966) demostró que se obtiene un ahorro de hasta un 34% en concreto y un 18 % en acero al utilizar un sistema de losa encasetonada en comparación con el de losa maciza. Sin embargo, el uso de losas encasetonadas puede verse seriamente afectada por los requisitos del cortante por penetración en columnas de borde (Whittle 1981), por lo que debe determinarse la profundidad mínima total de la losa en la zona de capitel para que cumpla con el requisito de penetración por cortante.

En México se construyen estructuras con losa aligerada o nervada a pesar de la escasa información para su diseño por parte del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF-04) y sus Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de estructuras de Concreto Reforzado (NTCC-04). En el capítulo 6.3.6 de las NTCC-04 sólo se indica lo siguiente: "las losas encasetonadas, sean planas o perimetralmente apoyadas, en que la distancia centro a centro entre nervaduras *no sea mayor* que un sexto del claro de la losa paralela a la dirección en la que se mide la separación de las nervaduras, se puede analizar como una losa maciza equivalente. En cada caso, de acuerdo con la naturaleza y magnitud de carga viva que actúa, se revisará la resistencia a carga concentrada de las zonas comprendidas entre nervaduras". Por otra parte, el código ACI-318-11 en sus requerimientos para concreto estructural: sección 13, recomienda el uso de una losa plana con espesor equivalente. El espesor de la losa debe cumplir los requisitos de la sección 9.5.3, que se refiere a los requisitos para el cálculo de espesores mínimos de losas apoyadas en dos direcciones, además debe cumplir con los criterios de diseño a cortante y torsión del capítulo 11.

Abdul-Wahab y Khalil (2000) determinaron la resistencia y rigidez ortotrópica de concreto reforzado en losas encasetonadas, presentan las pruebas experimentales que se realizaron en ocho modelos en los que las nervaduras tienen separación y profundidad variable. La validez del concepto de losa maciza con "espesor equivalente" también fue examinado por dos tipos de pruebas en losas macizas y encasetonadas. Ellos reportan que el modelo de losa maciza con espesor equivalente subestima la flexión y sobrestima la rigidez torsionante. Los resultados experimentales de las rigideces en los intervalos elásticos sin fisuras y agrietadas en la parte elástica se compararon con valores obtenidos a partir de: 1) análisis teórico convencional de placa ortotrópica con la cual se obtuvieron resultados cercanos a los experimentales. Sin embargo, para el cálculo de la rigidez torsional se requieren cálculos más elaborados; 2) losa maciza con espesor equivalente sobrestima la rigidez torsional en el intervalo elástico y subestima la deflexión de la losa encasetonada, por lo que proponen una reducción del 20% del espesor equivalente en la zona elástica no agrietada; y 3) un método aproximado basado en el módulo de elasticidad efectivo para los intervalos elástico-no agrietado y elástico-agrietado, con estos valores se puede calcular para cada intervalo la rigidez a flexión efectiva.

Prasad *et al.* (2005) determinaron un diseño óptimo de losas encasetonadas de tamaño medio, 6m x 6m, a partir de un estudio analítico realizado a un sistema de losas nervadas con el fin de determinar las dimensiones óptimas de separación entre nervaduras, su profundidad y anchura. Abdel Rahman (2005) realizó un estudio numérico del comportamiento estructural en losas encasetonadas con y sin aberturas, para obtener coeficientes de diseño para la columna y las franjas centrales del método directo. También determinó los efectos del tamaño y ubicación de las aberturas y el impacto que generan en los coeficientes. Realizó modelos en el programa de elementos finitos no lineal COSMOS, de los que concluyen que los coeficientes de diseño para losas encasetonadas son mayores desde un 12 % y hasta un 50% en algunos casos, a los utilizados en el código Egipcio ECP-203 para losas planas.

Ibrahim *et al.* (2011) determinaron coeficientes de momento para el diseño de losas nervadas con y sin aberturas. El método directo de diseño recomendado por

la ACI es comúnmente usado para el diseño de losas planas; sin embargo, también se utiliza en el análisis de losas nervadas como losas macizas con espesor equivalente. Además, debido a las pocas recomendaciones de diseño de losas encasetonadas, estos autores modifican los coeficientes de momento para losas encasetonadas mediante el modelado numérico de losa nervada con y sin aberturas en el programa ANSYS. Se realizaron 90 modelos para el análisis lineal y no lineal, para observar el comportamiento de la losa encasetonada bajo la acción de carga uniformemente distribuida. El modelo de elementos finitos no lineales fue calibrado con resultados experimentales de dos losas encasetonadas. Los coeficientes obtenidos se utilizan para modificar los coeficientes de diseño para losas planas recomendados por el ACI y adaptarse al análisis de losas encasetonadas.

Arellano y González (2012) determinaron mediante pruebas experimentales la resistencia de fuerza cortante por penetración, de conexiones interiores losa-columna de un sistema estructurado por losas postensadas y encasetonadas, las cuales tienen diferentes tipos de refuerzo transversal y distintos valores de fuerza cortante V_u , normalizados con el cortante resistente V_{cr} . Además, se determinan los desplazamientos laterales relativos que los especímenes pueden resistir con diferentes relaciones de (V_u/V_{cr}) con el fin de establecer la ductilidad cuando la estructura se diseña a cortante por penetración. Se seleccionó una conexión interior de losa postensada-columna para que no se tuvieran momentos de desequilibrio ante cargas verticales, sino que sólo este efecto fuera por carga sísmica. Se ensayaron 5 especímenes con estribos y 4 reforzados con pernos conectores de cortante. Éstos se sometieron a carga cíclica reversible, que simula el comportamiento sísmico, la cual se controló por desplazamientos. Se observó que cuatro especímenes fallaron a cortante por penetración y uno por flexión. La falla se definió como el ciclo en que la fuerza lateral requerida disminuyó en un 20% respecto a la fuerza máxima aplicada.

Juárez y Gutiérrez (2016) obtienen coeficientes de diseño para el cálculo de momentos para losas macizas de concreto perimetralmente apoyadas, los cuales determinaron de modelos de elementos finitos de paneles de losas. La distribución de coeficientes se calculó en la franja central de las losas. Los coeficientes numéricos calculados fueron comparados con los propuestos por el IStructE-06 y por las NTCC-04, encontrándose diferencias importantes entre los coeficientes propuestos y los numéricos, en los que los propuestos por el IStructE-06 fueron mayores en todos los casos y para el caso de las NTCC-04 resultaron menores los coeficientes calculados.

Las losas encasetonadas se modelan fácilmente en el programa SAFE (CSI-08), dibujando un objeto de área que representa la losa y asignando sus propiedades. Además, las losas encasetonadas suelen utilizar ábaco y capitel apoyada sobre las columnas. Las nervaduras se definen especificando el ancho, peralte y espaciamiento. SAFE utiliza propiedades de la losa equivalentes para el análisis, lo que representa el comportamiento de una viga T; sin embargo, se mantiene su geometría y detalles para el diseño de la losa y de las nervaduras.

Aunque existen programas comerciales para el modelado de losas, el realizar el mallado adecuado requiere de un gasto computacional excesivo, que si bien puede realizarse con los procesadores actuales, el tener un método práctico es de utilidad en el diseño de losas encasetonadas. Además, se posee poca información sobre el diseño del sistema de piso estructurado con losas nervadas, por lo que este

trabajo tiene como objetivo desarrollar un método aproximado para el diseño a flexión de losas encasetonadas en el que mediante coeficientes se obtengan los momentos de diseño para las nervaduras de losas encasetonadas, el cual es análogo al método de los coeficientes para losas macizas.

El contenido de este artículo se describe a continuación. En la sección 2 se determina un criterio de mallado con base en la energía de deformación, en el que se determina el número de elementos en el que se divide cada caseton para tener resultados adecuados. En la sección 3 se compara el modelar una losa encasetonada con un modelo encasetonado y como una losa maciza con espesor equivalente. En la sección 4 se modelan siete tipos de tableros de losas encasetonadas, de los cuales se determinan los momentos en las nervaduras. En la sección 5 se determinan los coeficientes de diseño a flexión para nervaduras de losas encasetonadas, los cuales se enlistan en una tabla. En la sección 6 se presenta un ejemplo para validar los coeficientes propuestos en este trabajo. Finalmente, las conclusiones derivadas de este estudio se presentan en la sección 7.

2 CRITERIO DE MALLADO

2.1 Energía de deformación

Se utilizó la energía de deformación interna de la estructura, como criterio para garantizar un mallado adecuado de las losas encasetonadas. Esta energía la utiliza una estructura deformada para recuperar su configuración original en el intervalo elástico. En cada punto donde actúan las cargas externas ocurren desplazamientos en dirección de la carga, donde se obtiene el trabajo externo, que es igual a la energía de deformación interna U , i.e.,

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n P_i \delta_i \quad (2)$$

donde P_i y δ_i son respectivamente la carga y el desplazamiento en el nodo i .

Se calculó la energía de deformación del modelado de una losa encasetonada estudiada por Prasad *et al.* (2005), la losa tiene 5.1 m de longitud por lado con un espesor de 0.065 m y las nervaduras tienen un ancho de 0.1 m con peralte de 0.13 m, como se muestra en la Figura 1. La losa se discretizó con elementos lámina y las nervaduras se discretizaron con elementos viga-columna, llamados respectivamente elementos shell y frame en el idioma Inglés. Esta losa aislada se modeló en el programa de análisis con elementos finitos SAP2000 (CSI-13). Los casetones se dividieron en: 1, 2, 4, 8 y 16 elementos por borde, como se muestran en la Figura 2. La losa se modeló como simplemente apoyada en todo su perímetro, a la que se le aplicó una carga vertical uniformemente distribuida de 10 kPa² (1,019.716 kg/m²) con un factor de carga de 1.4. Las propiedades mecánicas del concreto son: resistencia a la compresión de $f'c=250$ kg/cm², relación de Poisson $\nu=0.2$ y el módulo de elasticidad se determinó como $E=14000(f'c)^{0.5}$ con base en las NTCC-04.

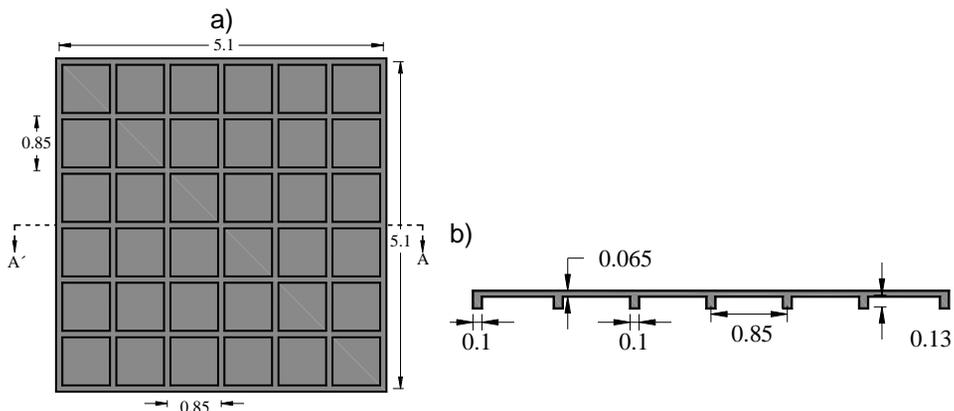
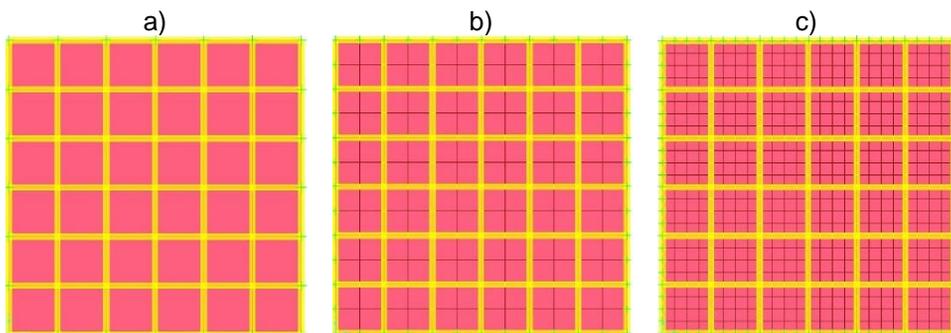


Figura 1 Losa encasetonada: a) vista superior y b) corte A-A' (adaptado de Prasad *et al.* 2005)

La energía de deformación de los cinco modelos de la losa encasetonada se calculó con la ec. (2), la cual se muestra en la Figura 3, donde se observa que ésta tiende a estabilizarse cuando se tienen 4 divisiones en el borde del casetón, pues en la Tabla 1, el error relativo porcentual partir de 4 casetones es del 0.8%. Las curvas en la nervadura central del desplazamiento contra la longitud y del momento contra la longitud se muestran respectivamente en las Figuras 4a y b, donde se observa que las curvas de 4, 8 y 16 divisiones por casetón se encuentran sobrepuestas. El error relativo porcentual del desplazamiento vertical y del momento se determinó en dos puntos de la nervadura central, en 1.70 m y 2.55 m, los cuales se enlistan respectivamente en las Tablas 2 y 3, donde se observa que a partir de 4 divisiones por casetón los errores son del 0.08% en desplazamientos y del 0.87% en momentos. En consecuencia, el tener un modelo con más de 4 elementos por borde de casetón sólo produciría un costo computacional innecesario, por lo que se utilizó este número de elementos por borde en los modelos estudiados en este trabajo.



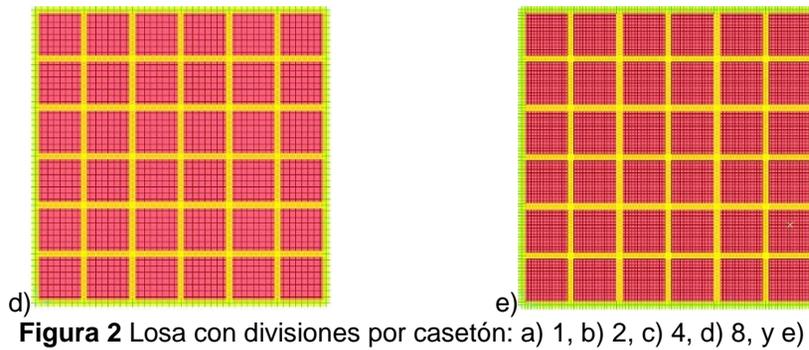


Figura 2 Losa con divisiones por casetón: a) 1, b) 2, c) 4, d) 8, y e) 16

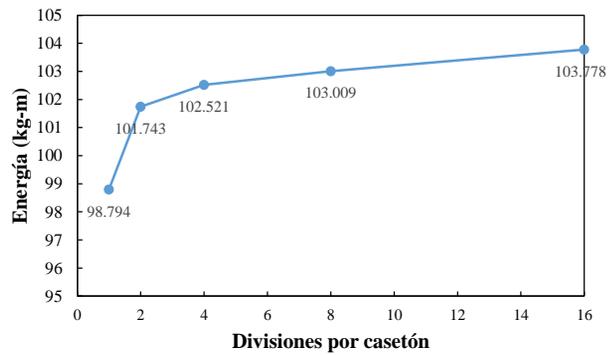


Figura 3 Energía de deformación contra divisiones por casetón

Tabla 1 Error en energía de deformación

Divisiones	Energía kg-m	Error %
1	98.794	--
2	101.743	3.0
4	102.521	0.8
8	103.009	0.5
16	103.778	0.7

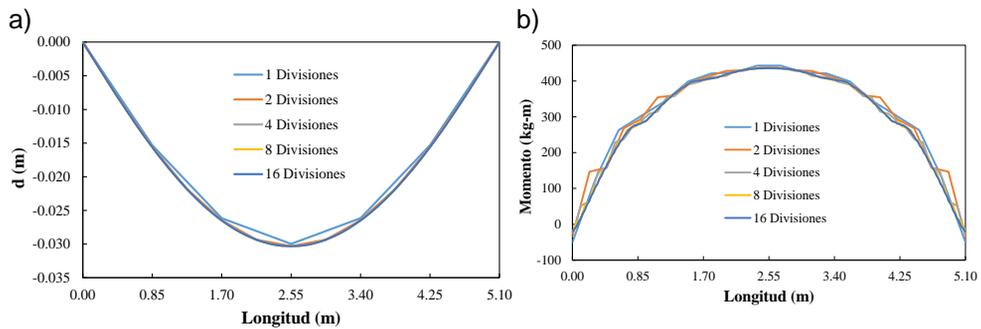


Figura 4 Curvas en nervadura central de: a) desplazamiento contra longitud y b) momento contra longitud

Tabla 2 Error en desplazamiento vertical en nervadura central

Divisiones por borde	Error %	
	$x = 1.70 \text{ m}$	$x = 2.55 \text{ m}$
2	1.22	1.11
4	0.08	0.06
8	0.01	0.01
16	0.03	0.03

Tabla 3 Error en momentos en nervadura central

Divisiones por borde	Error %	
	$x = 1.70 \text{ m}$	$x = 2.55 \text{ m}$
2	2.29	1.24
4	0.87	0.34
8	0.33	0.08
16	0.09	0.03

3 LOSAS CON ESPESOR EQUIVALENTE

Reglamentos como el ACI-318-02 y las NTCC-04 recomiendan el análisis de losas encasetonadas como una losa plana maciza con espesor equivalente, lo cual puede resultar en distribuciones de momentos distintas. Por lo anterior, se realiza el modelado de una losa encasetonada discretizada como un modelo tipo encasetonado, el cual se compara con un modelo de losa maciza con espesor equivalente. En el modelo encasetonado, la losa se discretiza con elementos lámina y las nervaduras se discretizan con elementos viga-columna. Por otra parte, el modelo de losa maciza con espesor equivalente se discretiza sólo con elementos lámina, pues la nervadura con la losa se idealiza sólo como una losa equivalente.

Al modelar una losa encasetonada como una losa maciza con espesor equivalente se conserva la inercia de la sección, pero no se conserva su área (Abdul-Wahab *et al.* 2000), por lo que se tiene que estimar previamente el peso propio de las vigas y losa para posteriormente distribuirlo como carga muerta en el modelo de losa maciza con espesor equivalente, pues la carga muerta calculada

con el área del espesor equivalente es mayor al modelo tipo encasetonado. En la Figura 5 se muestra la sección de un casetón que tiene una longitud l medida de centro a centro entre nervaduras, del que se determina el espesor de una losa maciza equivalente, el cual se calcula como:

$$h_e = \left(\frac{12I}{l} \right)^{1/3} \quad (3)$$

donde I es la inercia de la sección transversal sombreada respecto al eje centroidal c , que incluye la nervadura y la losa.

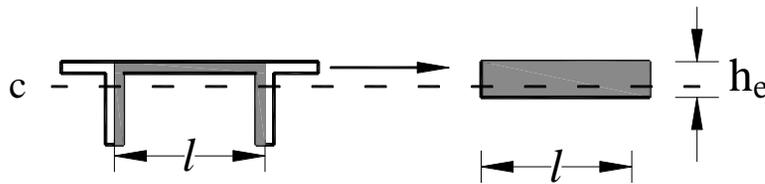


Figura 5 Espesor equivalente

Para definir los modelos a estudiar de losa encasetonada, se utilizaron las dimensiones de casetones del catálogo de la empresa OPTIMOLDE, del cual se consideraron sólo las dimensiones de los moldes de fibra de vidrio de sección cuadrada para conservar la relación de lados igual a uno en los modelos, las dimensiones de los moldes se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Características de casetones comerciales (adoptado de OPTIMOLDE)

Medida exterior (cm)	Medida interior (cm)	Peralte (cm)	Volumen desalojado (m ³)
87 x 87	75 x 75	20	0.105
87 x 43.5	75 x 31.5	20	0.042
87 x 87	75 x 75	25	0.129
87 x 43.5	75 x 31.5	25	0.051
87 x 87	75 x 75	30	0.153
87 x 43.5	75 x 31.5	30	0.603
87 x 87	75 x 75	35	0.177
87 x 43.5	75 x 31.5	35	0.069
87 x 87	75 x 75	40	0.199
87 x 43.5	75 x 31.5	40	0.077
87 x 87	75 x 75	45	0.222
87 x 43.5	75 x 31.5	45	0.084

Para determinar el peralte del casetón, se estudió el modelo de una de losa encasetonada cuadrada de 9.1 m de longitud en sus lados, la cual está perimetralmente apoyada sobre vigas. La losa tiene un espesor de 5 cm, la cual se apoya sobre nervaduras y vigas principales perimetrales. Los espesores de las

nervaduras y de las vigas principales son 15 cm y 25 cm respectivamente, ambas tienen el mismo peralte d , que se varió de 25 cm hasta 45 cm en incrementos de 5 cm, como el que se muestra en la Figura 6. Las vigas perimetrales de la losa se apoyan sobre capiteles en la parte superior de columnas cuadradas de 50 x 50 cm de sección transversal y 2.50 m de altura. El tablero de losa aislada se modeló en el programa de análisis con elementos finitos SAP2000 (CSI-13). Se considera que los modelos de la losa encasetonada se cuelean en sitio monolíticamente con sus nervaduras y vigas principales de apoyo, por lo que se acopla los seis grados de libertad de los nodos de los elementos que discretizan la losa con los nodos que discretizan las nervaduras. Las propiedades mecánicas de los materiales son: resistencia a la compresión del concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ y un coeficiente de Poisson $\nu=0.2$. En el análisis sólo se consideraron acciones verticales de carga, que incluyen una carga viva máxima de 250 kg/m^2 , además por reglamento se le agregaron 20 kg/m^2 y el peso propio de la estructura.

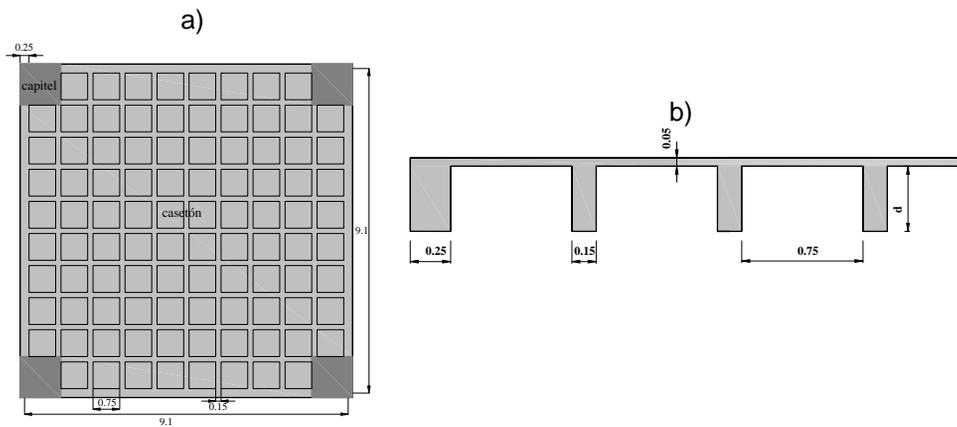


Figura 6 Losa encasetonada: a) vista en planta y b) detalle sección (cotas en m)

El modelo de la losa encasetonada deben cumplir los estados límites de servicio, en este caso se utilizaron las recomendaciones del capítulo de Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones las Normas Técnicas Complementarias (NTCA-04), que recomiendan que las estructuras que están sobre la acción de cargas permanentes y variables deben cumplir con un desplazamiento máximo igual al claro L entre 240 más 5 mm, tal que:

$$\delta_{\max} = \frac{L}{240} + 5\text{mm} \quad (4)$$

Es importante mencionar, que para losas en una o dos direcciones, L es la longitud del lado corto. En la Figura 7 se muestran los desplazamientos verticales calculados en la nervadura central del tablero, que es donde se presentan los desplazamientos verticales máximos, los cuales se compara con el desplazamiento permisible de las NTCA-04. Las nervaduras, N , con peralte de 40 y 45 cm satisfacen la condición de estado límite de servicio por deflexión, por lo que para los modelos estudiados se utilizaron nervaduras de 40 cm x 15 cm con casetones de 75 cm x 75

cm. En ambas direcciones, los desplazamientos son los mismos debido a las simetrías del modelo y de las cargas.

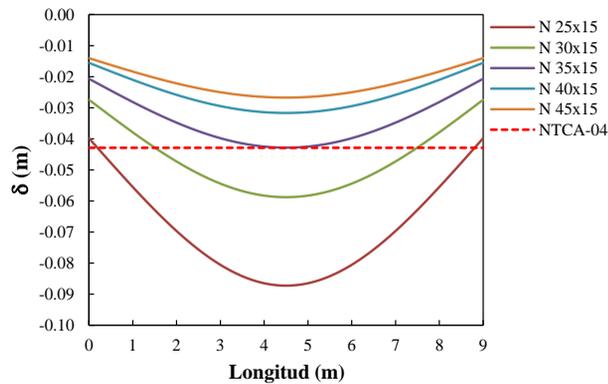


Figura 7 Desplazamiento en la nervadura central

Al modelo con casetón de 75 cm x 75 cm con peralte de 40 cm se le denomina M1 tipo encasetonado. Del modelo encasetonado se realizó un modelo de losa maciza con espesor equivalente, denominado modelo M2, cuyo espesor se determinó con la ec. (3), como el que se muestra en la Figura 8. La discretización del modelo tipo encasetonado y de losa maciza con espesor equivalente se muestran respectivamente en las Figuras 9a y b. Al modelo M2 se le asignaron las mismas propiedades mecánicas, carga viva y sobrecarga del modelo M1. Sin embargo, las geometrías del modelo M1 y M2 son distintas, por lo que tienen cargas muertas diferentes. Para mantener la carga del modelo M1 se calculó su peso propio, el cual se distribuyó como una carga muerta de 440 kg/m² al modelo M2. Note que se cumple lo que recomiendan las NTCC-04, en que si la distancia centro a centro entre nervaduras, 0.90 m, no es mayor que un sexto del claro de la losa, 1.52 m, por lo que se puede analizar como una losa maciza con espesor equivalente.

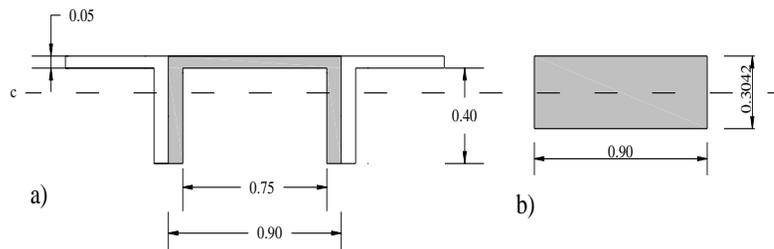
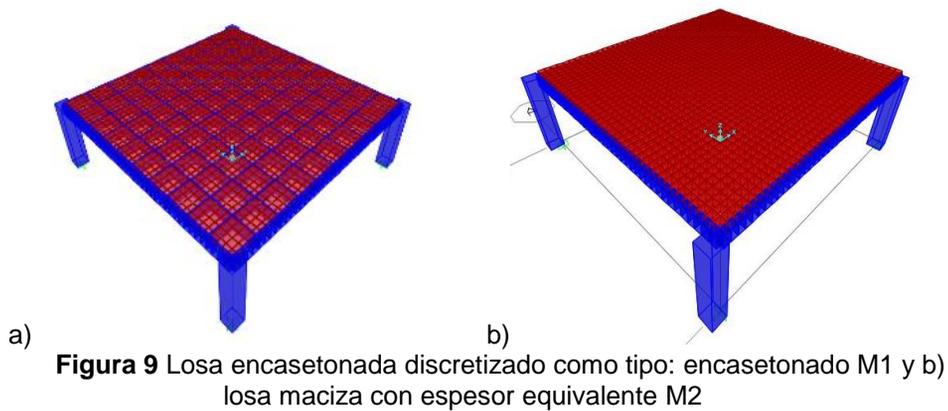
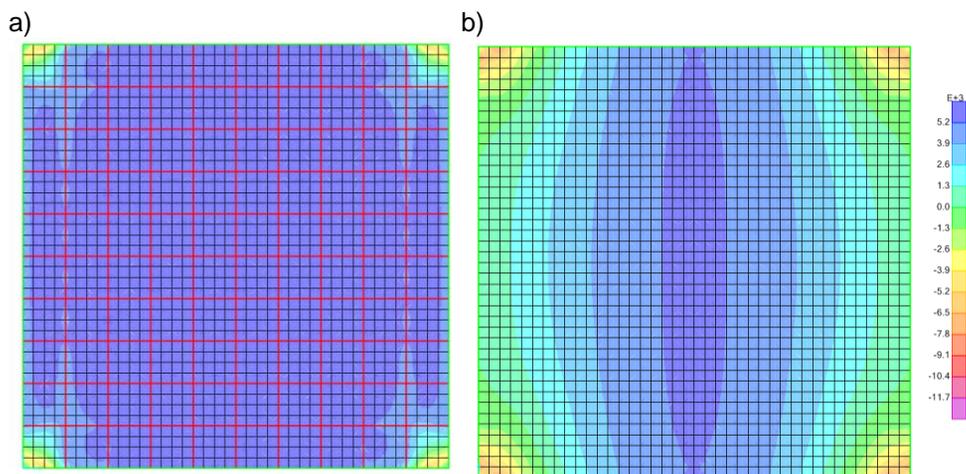


Figura 8 Sección del modelo tipo: a) encasetonado y b) espesor equivalente



En la Figura 10 se muestran respectivamente la distribución de momentos de los elementos lámina, en el modelo de losa encasetonada y en el modelo de losa maciza con espesor equivalente, donde se observa una distribución de momentos distinta entre ambos modelos, pues en el primero sólo se muestran momentos con signo negativo en la losa, mientras que en el último se tienen momentos positivos al centro y negativos en los bordes. Este efecto se debe a que en el modelo M1, las nervaduras son las que soportan la mayor sollicitación de momentos. Es importante mencionar que en el modelo M1 la distribución de momentos de las nervaduras es mayor en las nervaduras de extremo y disminuye gradualmente en las nervaduras centrales; mientras que en un modelo con losa de espesor equivalente, los momentos son mayores en la franja central y disminuyen en las franjas cercanas a los extremos. Estos momentos se grafican sólo en la dirección horizontal, pues son los mismos que los de la dirección vertical por ser cuadrada. Además se observó que al sumar la participación de momento en la losa de los casetones con las nervaduras se obtiene un incremento del 0.7% por lo que la contribución de los momentos de la losa es despreciable para el cálculo de los coeficientes en las nervaduras, por tal motivo para el estudio presentado sólo se calcularon la distribución de momentos en las nervaduras.



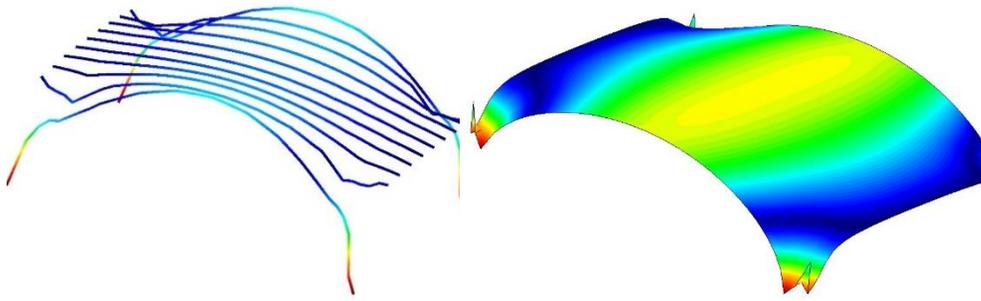


Figura 10 Distribución de momentos en losa encasetonada en modelo tipo: a) encasetonado M1 y b) espesor equivalente M2

En la Figura 11a se muestran las curvas de momento sólo en la franja central del claro, donde se observa que la magnitud de los momentos en el modelo M2 son mayores a los momentos de la nervadura central del modelo M1, de lo que se concluye que se sobreestima la magnitud de los momentos con el modelo de losa maciza con espesor equivalente. Por otra parte, en la Figura 11b se muestran los desplazamientos δ en la franja central, donde el modelo de espesor equivalente es más rígido, pues sus desplazamientos son menores a los del modelo tipo encasetonado. De estas curvas se observa que el modelo de espesor equivalente sobrestima los momentos un 43%, por lo que proporciona secciones sobrediseñadas en las nervaduras centrales, pero secciones subdiseñadas en las nervaduras de los extremos; además, este modelo subestima los desplazamientos hasta un 42%, esto se atribuye al efecto de membrana en el modelo M2. Es de interés comentar que el código Brasileño NBR 6118 (ABNT, 2003), en los requerimientos necesarios para el diseño de estructuras de concreto simple, reforzado y presforzado, excepto cuando se utilizan concretos ligeros, pesado o concretos especiales, se pueden diseñar losas encasetonadas estáticamente como una losa plana con espesor equivalente; sin embargo, Stramandinoli (2003) y Donin (2007) demostraron que esta simplificación no toma en cuenta la rigidez torsional de las nervaduras, por lo que no se debe utilizar este método de losa maciza con espesor equivalente.

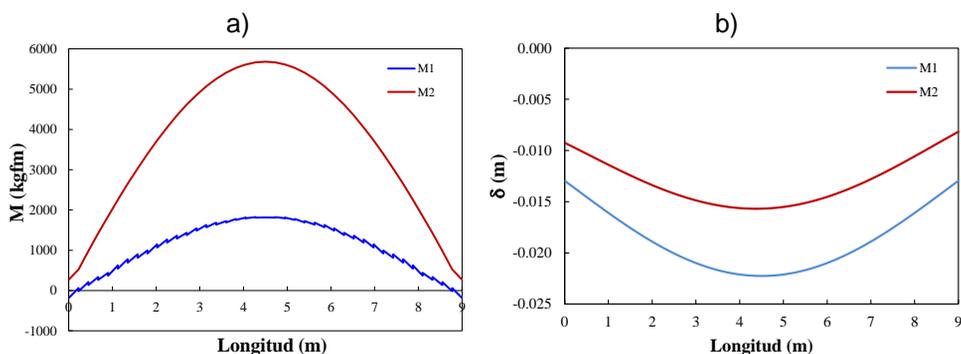


Figura 11 Curvas al centro del claro de: a) momento contra longitud y b) desplazamiento contra longitud

4 DETERMINACIÓN DE MOMENTOS

Los siete tipos de tableros de losas encasetonadas que se estudiaron fueron aquellos que consideran las NTCC-04 para losas macizas de concreto, los cuales se muestran en la Figura 12. En estos tableros de losas encasetonadas se determinó una tabla de coeficientes de diseño α con las que se pueden calcular los momentos de diseño en las nervaduras, utilizando la misma ecu. (1) para losas macizas. En los modelos numéricos se obtuvo la distribución de momentos en las nervaduras en dirección de lado corto, a_1 , y lado largo, a_2 , de la losa, con la que se determinó la distribución de coeficientes numéricos. En los modelos se consideró que las losas encasetonadas se encuentran coladas monolíticamente con sus apoyos.

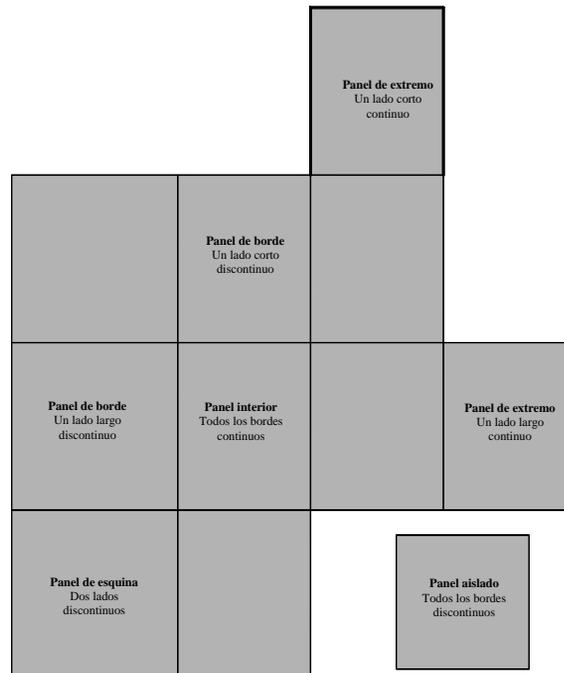


Figura 12 Tipos de tableros

La losa tiene un espesor constante de 0.05 m en la zona de los casetones y un espesor de 0.45 m en la zona de capiteles. La sección transversal de las vigas perimetrales es de 0.25 m x 0.45 m, la de las nervaduras de 0.15 m x 0.45 m y la de las columnas de 0.50 m x 0.50 m como muestra la Figura 13. Las columnas tienen una altura de 3 m y se consideraron empotradas en la base. La losa se discretizó con elementos lámina delgada, la zona de capiteles con lámina gruesa y las vigas perimetrales, nervaduras y columnas se discretizaron con elementos tipo viga-columna. Se consideró un material homogéneo e isotrópico correspondiente a un concreto con resistencia a la compresión de $f'c=250$ kg/cm², módulo de elasticidad $E=221,359$ kg/cm² y relación de Poisson $\nu=0.2$. Sólo se consideraron acciones verticales de carga que incluyen: carga viva máxima de 250 kg/m², sobrecarga de 75 kg/m², carga de 20 kg/m² por reglamento y el peso propio de la estructura; en los análisis se consideró un factor de carga de 1.4.

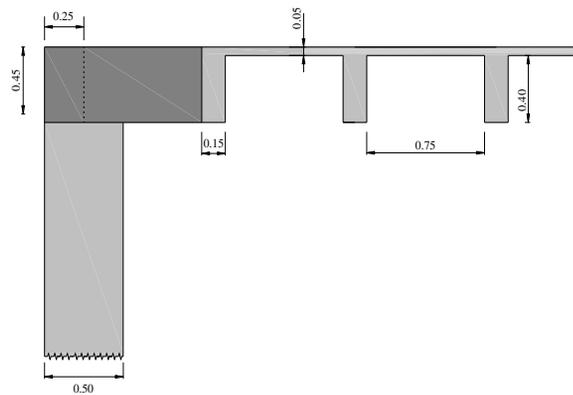


Figura 13 Sección transversal de tableros (m)

4.1.1 **Determinación del número de tableros**

En esta sección se determina el número de tableros que deben tener los modelos con base en la distribución de momentos. Se estudian los modelos con 3 y 5 tableros, como las que se muestran respectivamente en la Figura 14, que contienen tableros del tipo: borde, interior y de esquina. Por otra parte, el tablero de extremo se estudia con los modelos de 3 y 5 tableros que se muestran en la Figura 15. Todos estos modelos tienen relación de lados $m=1$.

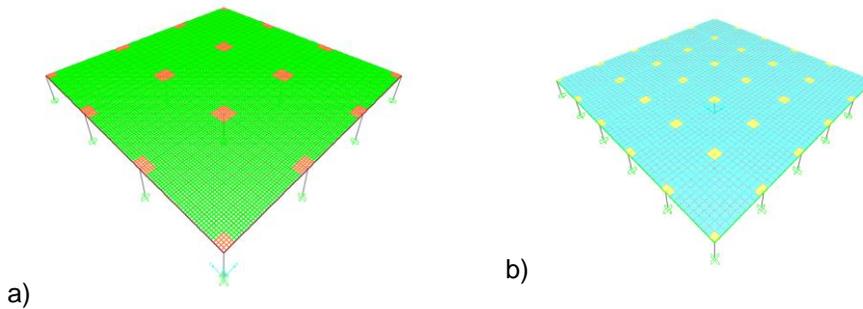


Figura 14 Estructura de losa encajonada con tableros por borde: a) tres y b) cinco

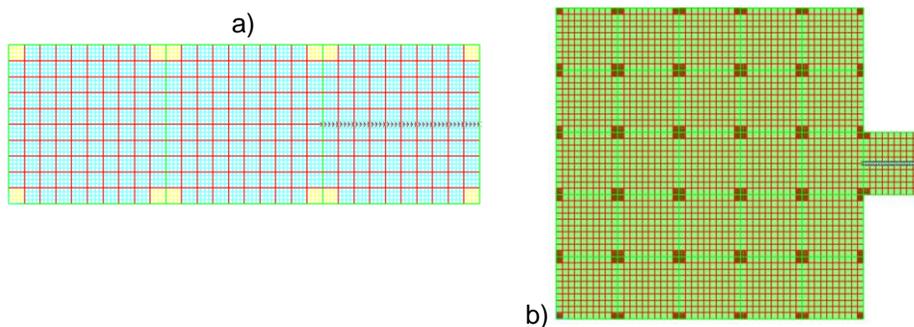


Figura 15 Tablero de extremo de losa encajonada con tableros por borde: a) tres y b) cinco

En la Figura 16 se muestra la distribución de momentos de la nervadura central de los tableros, donde se observa que en el tablero interior el modelo con 5 paneles presenta una magnitud mayor de momentos de hasta el 30% respecto al modelo con 3 paneles. En los tableros de borde y de esquina, las distribuciones de momentos son casi iguales para 5 y 3 tableros. Por otra parte, el tablero de extremo presenta momentos mayores hasta del 13 % en la estructura de 3 tableros respecto a la de 5 tableros. De lo anterior se decidió utilizar la configuración de 5 tableros por borde en los tableros modelados, pues éstos proporcionan distribuciones de momento mayores hasta del 30% respecto del modelo de tres tableros. Es importante hacer notar en estos resultados que: 1) en el centro de las nervaduras, la magnitud de los momentos es mayor en las nervaduras de los extremos y disminuye gradualmente en las nervaduras centrales; y 2) se observa un incremento abrupto de la magnitud del momento en los extremos de las vigas perimetrales, lo cual se atribuye a la concentración de esfuerzos en el capitel. Lo anterior se observa en la Figura 19 para una losa encasetonada con 5 paneles por borde, donde en las vigas perimetrales se observan los momentos positivos mayores al centro del claro y los momentos negativos mayores en la zona del capitel.

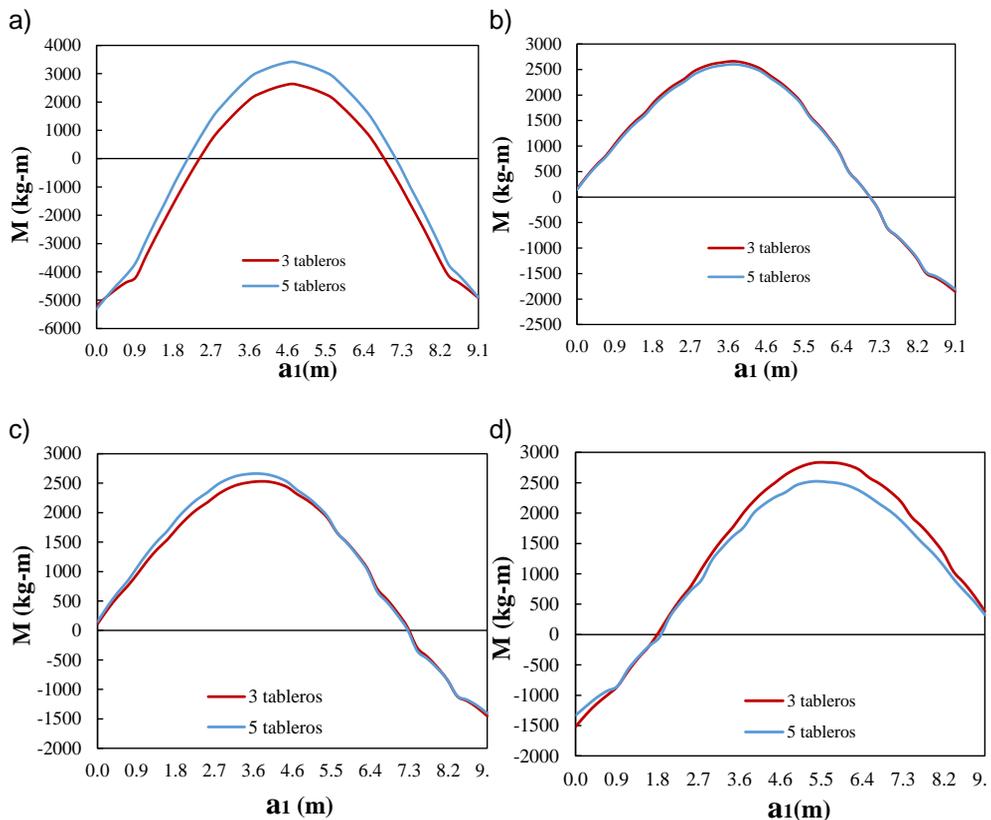


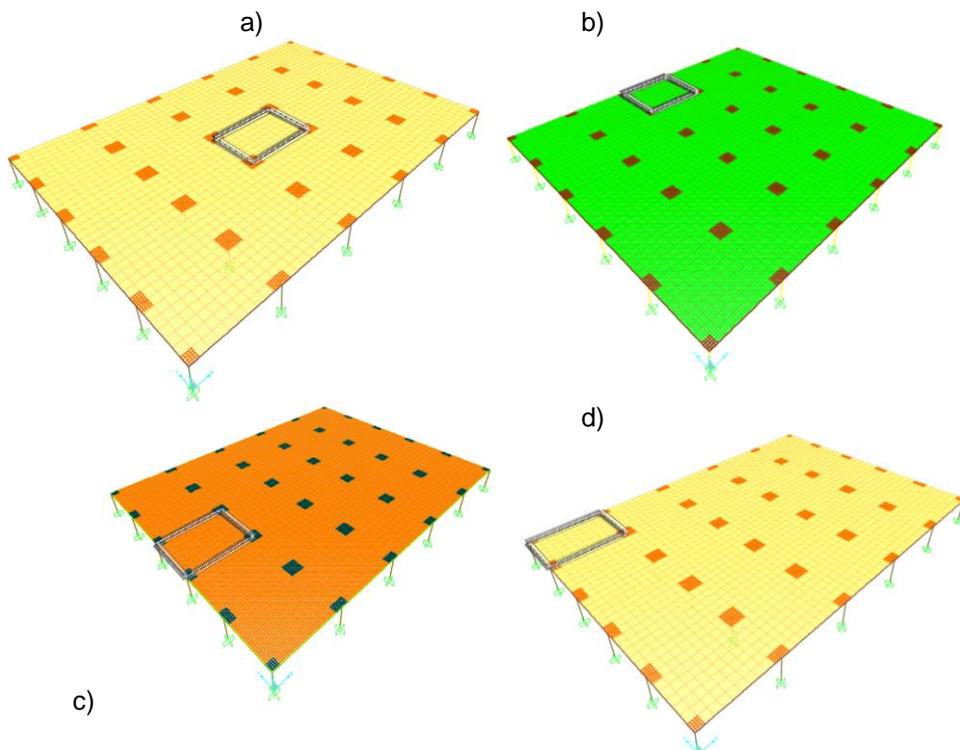
Figura 16 Distribución de momentos de nervaduras centrales en tablero: a) interior, b) de borde, c) de esquina y d) de extremo

4.2 Descripción de los modelos

Para el estudio presentado se utilizaron las relaciones de lado propuestas por las NTCC-02 de lado corto entre lado largo, $m=a_1/a_2$, de 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, y 1.0. En los modelos se consideró que el tablero en estudio tienen 10 casetones en

ambos lados, del cual se fue eliminando una línea de casetones del lado corto para obtener las relaciones m menores a 1, por lo que el lado largo quedó constante con una dimensión de 9.10 m al centro de los ejes extremos y el lado corto varió de 9.10 m a 4.55 m de longitud, la altura de las columnas fue de 3 m.

En la Figura 17 se muestran los modelos de losas encasetonadas con los tipos de tableros siguientes: a) interior, b) borde con lado largo discontinuo, c) borde con lado corto discontinuo, d) esquina, e) extremo con lado largo continuo, f) extremo con lado corto continuo y g) aislado. Aunque se realizaron 42 modelos para los 7 tipos de tableros con las 6 relaciones m de 0.5 a 1.0 en incrementos de 0.1, sólo se muestran los 7 modelos de la relación $m=0.8$ por ser una relación intermedia. En la Figura 18 se muestran los diagramas de momentos de todas las nervaduras paralelas al lado corto, a_1 , y al lado largo, a_2 , donde se observa que en el centro de las nervaduras, la magnitud de los momentos es mayor en las nervaduras de los extremos y disminuye gradualmente en las nervaduras centrales; además se observa un incremento de la magnitud del momento en los extremos de las vigas perimetrales, esto se debe a la concentración de esfuerzos en el capitel. El criptograma utilizado para cada tablero de estudio es el siguiente: cada modelo esta descrito por sus siglas T "tablero", A "aislado", I "interior", E "esquina", BCD "de borde lado corto discontinuo", BLD "de borde lado largo discontinuo", EX-LLC "extremo con un lado largo continuo", EX-LCC "extremo con un lado corto continuo", LVP "línea de vigas perimetrales", LN "línea de nervaduras" y R "relación de aspecto" para cada tablero descrito anteriormente.



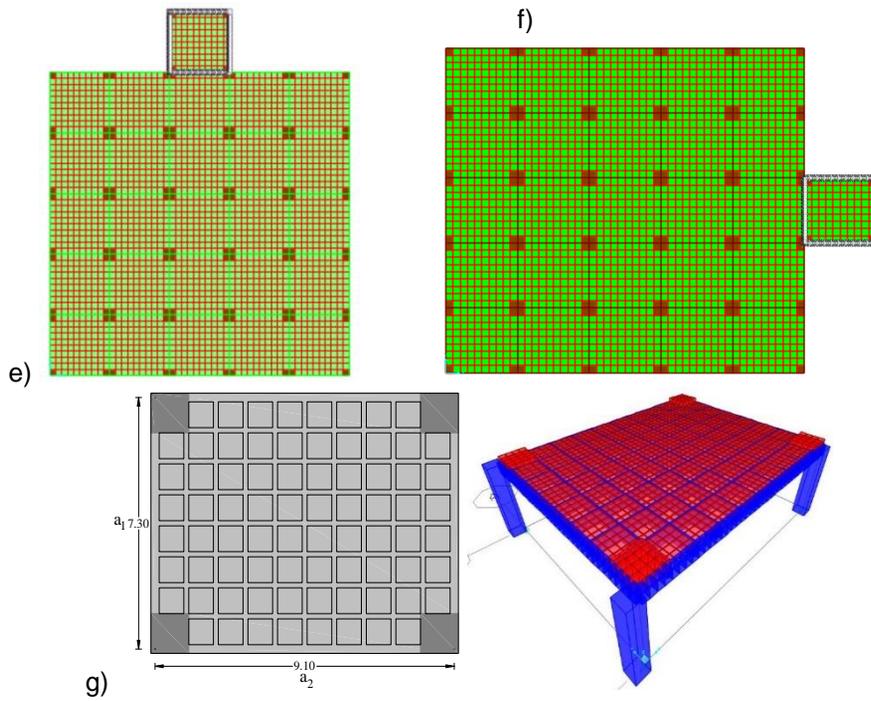
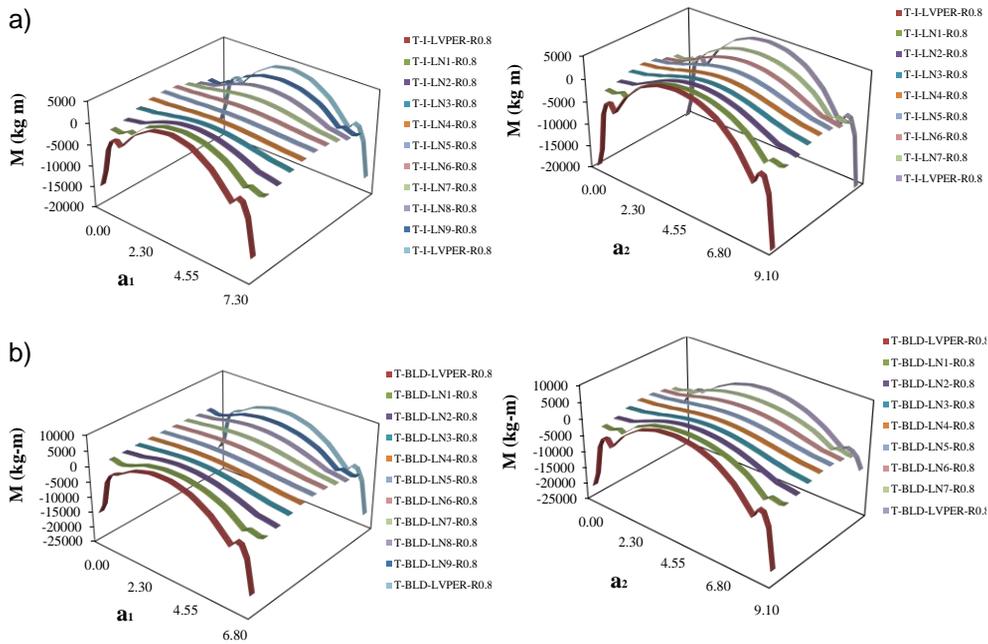
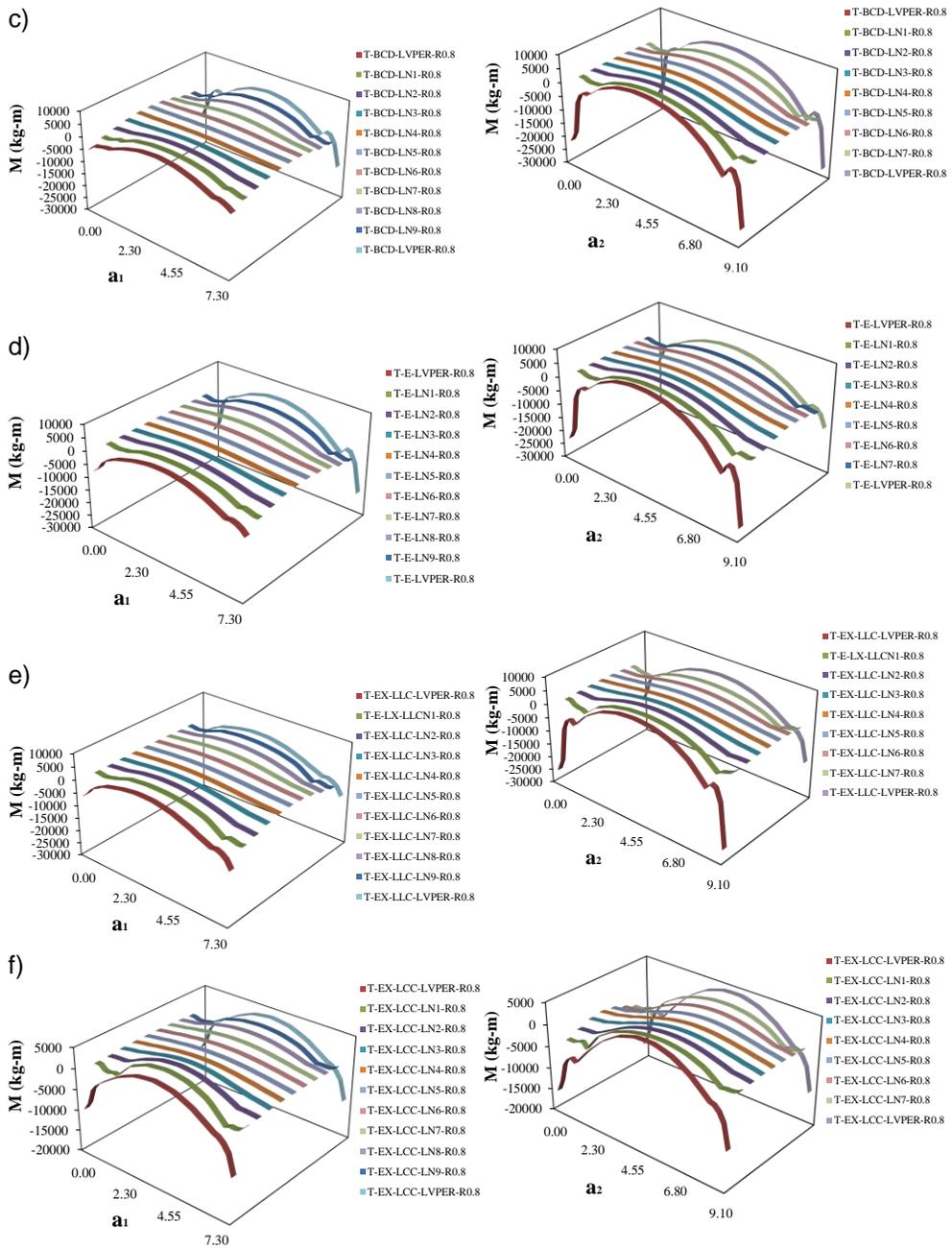


Figura 17 Losa encasetonada con relación $m=0.8$, tablero: a) interior, b) borde con lado largo discontinuo, c) borde con lado corto discontinuo, d) esquina, e) extremo con lado largo continuo, f) extremo con lado corto continuo y g) aislado





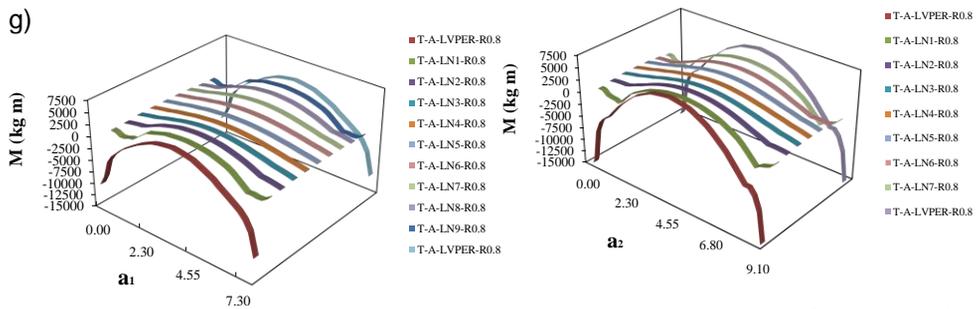


Figura 18 Distribución de momentos en tableros con relación $m=0.8$: a) interior, b) borde lado largo discontinuo, c) borde lado corto discontinuo, d) esquina, e) extremo con lado largo continuo, f) extremo con lado corto continuo y g) aislado

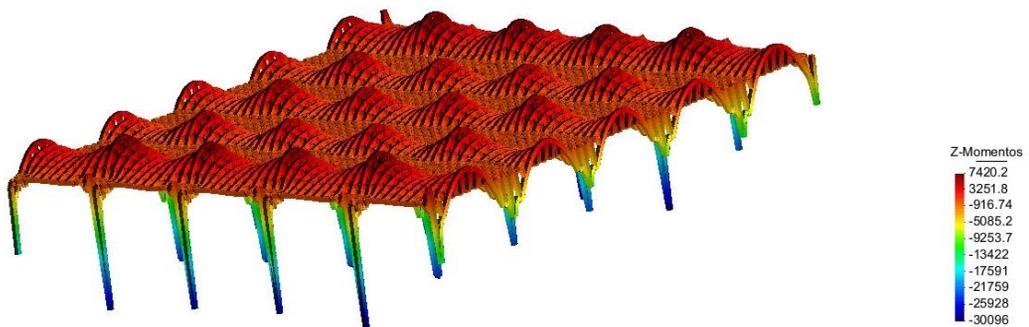


Figura 19 Distribución de momentos (kg-m) para una losa con 5 tableros por borde con $m=1$

5 COEFICIENTES DE DISEÑO

Con los valores de los momentos M calculados en los modelos descritos en la sección 4, se determinaron coeficientes de diseño α , sustituyendo M en la ec. (1), tal que:

$$\alpha = \frac{M}{wa_1^2} \quad (5)$$

Los valores de los coeficientes para las nervaduras localizadas en la franja central se proporcionan en la Tabla 5. Para calcular el momento de diseño en las nervaduras de borde, se multiplica el momento de la nervadura central por el factor correspondiente de la Tabla 6, si se requiere el momento de diseño en alguna nervadura intermedia se tendría que hacer una interpolación lineal. Note que el valor de coeficiente α en la Tabla 5 se debe de afectar por un valor de 10^{-4} para el cálculo del momento de diseño.

En este trabajo no se presentan los coeficientes en la zona del capitel debido a que éste se diseña por fuerza cortante para evitar el fenómeno de penetración por

cortante. Sin embargo, se pueden determinar los momentos en la zona del capitel al multiplicar el valor del coeficiente obtenido en el extremo de las nervaduras de borde por 10.

Tabla 5 Coeficientes α para nervaduras centrales en losas encasetonadas

Tablero	Momento	Dirección	Relación de lados corto a largo, $m = a_1/a_2$					
			0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Interior todos los bordes continuos	En bordes interiores	corto	-76	-84	-103	-136	-178	-211
		largo	-1866	-1250	-855	-539	-367	-211
	Centro	corto	23	32	73	108	116	142
		largo	1469	947	648	412	277	142
De borde un lado corto discontinuo	En bordes interiores	corto	-31	-66	-134	-134	-173	-203
		largo	-2231	-1541	-1088	-703	-489	-285
	En bordes discontinuos	largo	-107	228	206	183	149	130
		Centro	corto	23	41	48	63	111
	Centro	largo	1996	1370	990	702	522	380
		largo	1996	1370	990	702	522	380
De borde un lado largo discontinuo	En bordes interiores	corto	68	-21	-104	-176	-245	-285
		largo	-1791	-1123	-715	-493	-370	-203
	En bordes discontinuos	corto	25	80	117	141	157	206
		Centro	corto	229	234	267	293	334
	Centro	largo	1353	818	505	355	219	131
		largo	1353	818	505	355	219	131
De esquina dos lados adyacentes discontinuos	En bordes interiores	corto	165	123	114	-126	-199	-243
		largo	-1854	-1352	-872	-613	-459	-243
	En bordes discontinuos	corto	143	126	114	105	95	94
		largo	-118	136	124	121	104	94
	Centro	corto	280	286	328	332	341	382
		largo	1655	1198	885	956	651	382
De extremo Tres bordes discontinuos un lado largo continuo	En borde continuo	corto	95	20	-57	-94	-200	-239
		largo	95	20	-57	-94	-200	-239
	En bordes discontinuos	corto	33	89	124	144	156	213
		largo	-203	-73	20	55	52	108
	Centro	corto	328	337	349	352	360	414
		largo	2026	1460	1183	878	675	620
De extremo Tres bordes discontinuos un lado corto continuo	En borde continuo	largo	-2067	-1392	-966	-622	-428	-239
		largo	-2067	-1392	-966	-622	-428	-239
	En bordes discontinuos	corto	40	99	138	147	166	174
		largo	-82	76	73	61	48	23
	Centro	corto	411	429	483	508	538	620
		largo	1367	959	729	553	450	408
Aislado cuatro lados discontinuos	En bordes discontinuos	corto	46	105	150	172	183	211
		largo	-151	84	106	117	147	160
	Centro	corto	472	482	554	572	587	586
		largo	1881	1374	1103	876	722	586

Los coeficientes multiplicados por $10^{-4}wa_1^2$, dan momentos flexionantes por unidad de ancho; si w esta en kN/m^2 (en kg/m^2) y a_1 en m, el momento da en kN-m/m (en kg-m/m)

Tabla 6 Factores para cálculo de momentos en nervaduras de borde en losas encasetonadas

Tablero	Momento	Dirección	Relación de lados corto a largo, $m = a_1/a_2$					
			0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Interior todos los bordes continuos	En bordes interiores	corto	15.2	15.2	13.0	10.0	4.5	9.1
		largo	1.2	1.4	1.6	2.1	2.6	9.1
	Centro	corto	-29.6	-30.3	12.9	9.1	7.9	7.4
		largo	1.5	1.7	2.1	2.8	3.6	7.4
De borde un lado corto discontinuo	En bordes interiores	corto	12.7	8.8	5.5	5.9	4.9	10.3
		largo	2.2	2.3	2.7	3.4	2.7	8.5
	En bordes discontinuos	corto	12.2	7.7	4.6	6.3	5.1	6.2
		Centro	corto	31.0	24.3	20.4	16.8	9.0
De borde un lado largo discontinuo	En bordes interiores	corto	-10.1	41.6	14.4	9.3	5.0	4.1
		largo	1.7	2.1	2.0	2.4	2.7	10.3
	En bordes discontinuos	largo	1.5	1.8	2.3	2.7	3.3	6.2
		Centro	corto	5.4	5.3	4.4	4.1	3.3
De esquina dos lados adyacentes discontinuos	En bordes interiores	corto	-6.3	-7.6	-14.1	13.8	6.1	10.7
		largo	2.7	1.8	2.7	4.2	4.8	10.7
	En bordes discontinuos	corto	-6.2	-6.1	-7.7	-10.1	-11.6	-16.6
		largo	29.2	-22.7	-16.8	-13.8	-7.5	-16.6
De extremo Tres bordes discontinuos un lado largo continuo	En borde continuo	largo	10.1	24.5	-69.9	-21.3	-35.5	-20.3
		En bordes discontinuos	corto	-9.5	-64.9	23.7	14.6	6.9
	Centro	largo	17.1	25.7	-72.7	-22.0	-28.1	-17.4
		corto	1.0	1.4	1.5	1.8	1.9	2.2
De extremo Tres bordes discontinuos un lado corto continuo	En borde continuo	largo	1.3	1.5	1.5	1.7	2.0	2.2
		En bordes discontinuos	corto	-26.8	-12.9	-10.2	-4.9	-4.8
	En bordes discontinuos	corto	-17.8	-8.8	-7.2	-7.4	-7.1	0.7
		largo	1.7	1.9	2.2	2.8	3.2	7.0
Aislado cuatro lados discontinuos	Centro	corto	2.8	3.1	2.7	2.2	2.3	2.2
		largo	1.4	1.6	1.7	1.9	2.0	2.2
	En bordes discontinuos	corto	-7.7	-4.8	-4.4	-4.5	-6.9	-6.4
		largo	17.5	-34.5	-22.0	-11.5	-10.9	-8.5
Centro	corto	1.8	1.8	1.6	1.7	1.6	1.7	
	largo	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	

Si se requiere el momento de diseño en alguna nervadura intermedia se debe realizar una interpolación lineal.

6 VALIDACIÓN DE COEFICIENTES

En esta sección se comparan los momentos de diseño, obtenidos en una estructura modelada con el programa de análisis estructural SAP2000 (CSI-13) contra los momentos calculados con los coeficientes de momento para las nervaduras de losas encasetonadas propuestos en la Tabla 6. La estructura fue diseñada para un estacionamiento como se muestra en la Figura 20, la cual consiste de un sistema de losa encasetonada, apoyada perimetralmente por vigas principales de 0.49 m x 40 m, 0.48 m x 40 m y 0.25 m x 40 m. Los tableros son de sección variable: tablero Tipo 1 de 8.20 m x 5.70 m de dimensiones y casetones de 0.90 m x 0.75 m, Tablero Tipo 2 con dimensiones de 8.20 m x 8.75 m por lado y casetones de 0.9 m x 0.85 m, con un espesor de 5 cm de losa. Las vigas perimetrales de la losa están apoyadas en sus extremos mediante capiteles, los cuales tienen un espesor de 0.40 m colocados sobre columnas circulares de 60 cm de diámetro y columnas cuadradas de 0.30 m x 0.30 m; las nervaduras tienen una sección transversal de 0.10 m x 0.40 m y 0.09 m x 0.40 m. La ubicación de las vigas y de la losa se muestra en la Figura 20; mientras que las secciones transversales de las vigas y nervaduras se muestran en la Tabla 8. Las propiedades de los materiales son: resistencia a la compresión del concreto $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ y un coeficiente de Poisson $\nu=0.2$. En el análisis se consideró solo, la acción de cargas verticales, una carga viva máxima de 250 kg/m^2 , una sobrecarga de 168 kg/m^2 como se muestra en la Tabla 7 y el peso propio de la estructura. Se consideró un factor de carga de 1.4 por tratarse de una estructura tipo B.

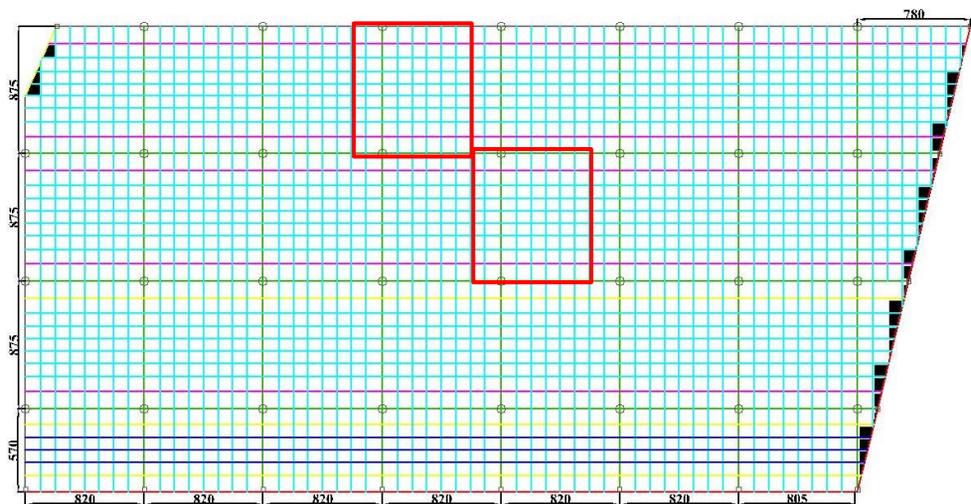


Figura 20 Planta de losa encasetonada con la ubicación de vigas principales y nervaduras (cotas en cm)

Tabla 7 Carga muerta adicional

<i>Carga</i>	<i>Unidad (kg/m²)</i>
Bloques de mortero	63
Carpeta asfáltica de 5cm de espesor	65
Carga adicional RCDF	40
Total de carga muerta adicional:	168

Tabla 8 Dimensión de vigas y columnas

Sección	Descripción	Dimensiones (m)	Color
V1	Viga principal	0.49x0.40	Gris
V2	Viga principal	0.48x0.40	Verde
V3	Viga secundaria	0.25x0.40	Rojo
V4	Viga secundaria	0.20x0.40	Amarillo
V5	Viga secundaria	0.19x0.40	Magenta
V6	Nervadura	0.10x0.40	Azul marino
V7	Nervadura	0.09x0.40	Cyan
C1	Columna	0.30x0.30	Negro
C2	Columna	0.30 de radio	Negro

Los tableros que se estudiaron fueron interior y de borde con un lado corto discontinuo, los cuales se muestran en la Figura 20. Los momentos calculados numéricamente en todas las nervaduras de estos tableros en dirección del lado corto y dirección del lado largo de la losa se muestran respectivamente en las Figuras 21 y 22.

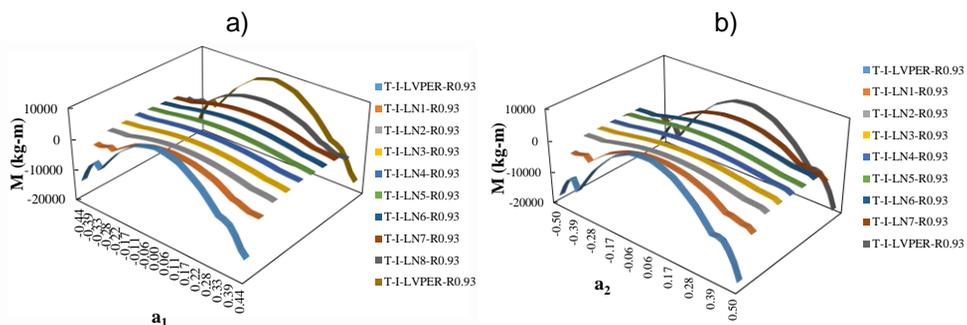


Figura 21 Distribución de momentos para tablero interior: a) lado corto y b) lado largo

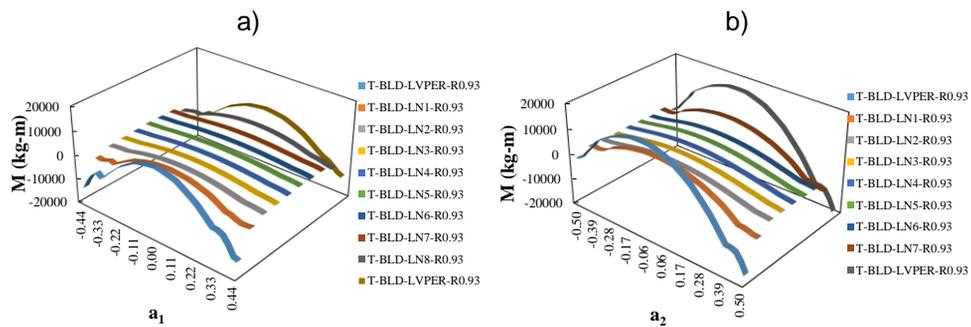


Figura 22 Distribución de momentos para tablero de borde un lado corto discontinuo: a) lado corto y b) lado largo

La distribución de momentos en las nervaduras centrales obtenida del análisis numérico, se comparó con la propuesta de coeficientes de momentos de la Tabla 5. Para este modelo se tiene una relación $m=0.93$, por lo que se realizó una interpolación lineal entre los valores de 0.9 y 1.0 para calcular los coeficientes de momento adecuados para el tablero de estudio. La Figura 23 muestra los momentos obtenidos numéricamente y los momentos obtenidos con los coeficientes de la Tabla 5 en las nervaduras centrales en dirección del lado largo del tablero interior, donde se observa que el momento calculado con los coeficientes al centro de la nervadura es mayor al numérico en un 190%. En los extremos de la misma franja se observa que el momento calculado con los coeficientes es un 15 % menor que el numérico. Por otra parte, en el lado corto del tablero interior se observa que al centro de la nervadura el momento calculado con los coeficientes es un 19% mayor que el numérico y, en los extremos, éste es un 20% menor que el numérico.

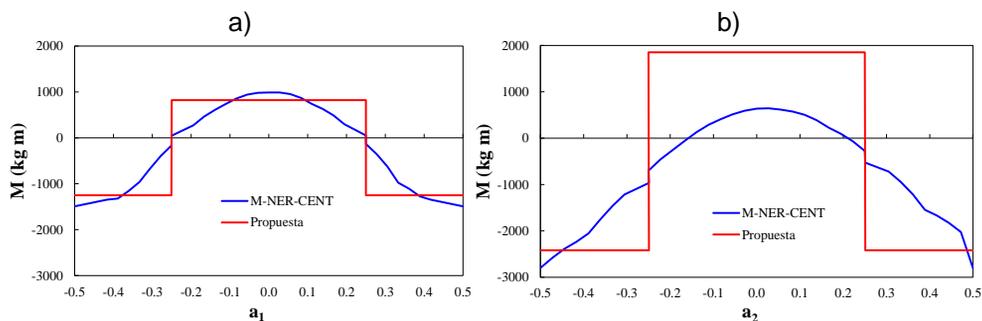


Figura 23 Distribución de momentos tablero interior en dirección: a) corta y b) larga

La Figura 24 muestra los momentos calculados numéricamente y los obtenidos con los coeficientes de la Tabla 5 de las nervaduras centrales en dirección del lado largo del tablero de borde con un lado corto discontinuo, donde se observar que el momento calculado con los coeficientes es mayor el 2% que el numérico. En extremos de la misma franja, el momento calculado con los coeficientes es el 32 % mayor que el numérico. Por otro lado, en el lado corto se observa que al centro de la nervadura el momento calculado con los coeficientes es el 10% menor al numérico, en los extremos éste es el 11% menor al numérico. Con base en lo anterior, se puede concluir que la tabla de coeficientes propuesta en este trabajo

proporciona una buena aproximación de los momentos de diseño para las nervaduras de la losa encasetonada.

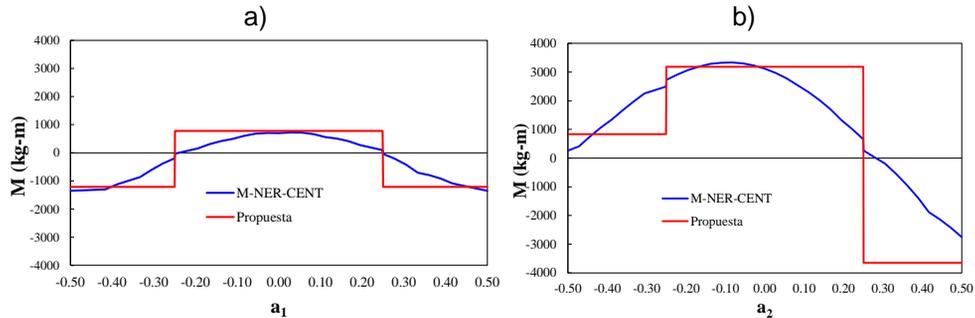


Figura 24 Distribución de momentos tablero de borde en dirección: a) corta y b) larga

7 CONCLUSIONES

El dividir el casetón con 4 elementos por borde proporciona resultados adecuados, pues el tener más divisiones sólo produciría un costo computación innecesarios, lo cual se fundamenta en la energía de deformación de la estructura.

Al modelar la losa encasetonada como un modelo encasetonado con nervaduras y como una losa maciza con espesor equivalente, manteniendo el momento de inercia de la sección pero no el área de la sección, por lo que se tiene un incremento en la carga muerta de la estructura, generando una distribución de momentos mayores, lo que provocaría un sobredimensionamiento de las nervaduras, además se observó que la distribución de momentos en la losa maciza equivalente, es mayor al centro de la franja de análisis y en los extremos es menor. Sin embargo, para la distribución de momentos en las nervaduras se observó un efecto de distribución de momentos inverso al de la losa maciza con espesor equivalente.

El modelo de losa con espesor equivalente presenta desplazamientos menores en la franja central del tablero estudiado en comparación con el modelo tipo parilla, lo cual se debe a que en el modelo equivalente se sobrestima la rigidez a flexión y al efecto de membrana.

Se descarta la recomendación de las NTCC-04 sobre que las losas encasetonadas se puede analizar como una losa maciza equivalente, aún y cuando la distancia centro a centro entre nervaduras no sea mayor que un sexto del claro de la losa paralela a la dirección en la que se mide la separación de las nervaduras, pues como se demostró, el modelo equivalente sobrestima los momentos y subestima los desplazamientos.

Del modelado numérico de los siete tableros distintos se obtuvo la distribución de coeficientes a partir de la distribución de momentos, destacando que la distribución de momentos obtenida en la Tabla 5 es para las nervaduras centrales

de cada tablero, por lo que en este trabajo se presenta la distribución de coeficientes de momento para las nervaduras de extremo, por lo que se multiplica el coeficiente de la franja central por el factor correspondiente de la Tabla 6. Si se requiere el momento de diseño en alguna nervadura intermedia, se debe realizar una interpolación lineal.

También se mostró que para el estudio de todos los tableros en la zona del capitel presenta una distribución mayor de momentos generando una alta concentración de esfuerzos, debido a que en esta zona se debe diseñar el capitel para que no se genere el efecto de cortante por penetración en la columna, por lo que en las tablas propuestas de coeficientes de momento, no se contempla la zona de capitel en las nervaduras de extremo. Sin embargo, al multiplicar el valor del coeficiente obtenido en el extremo de las nervaduras de borde por 10, se obtienen momentos de diseño seguros en la zona del capitel.

De la comparación de resultados de momentos calculados con los coeficientes propuestos contra los numéricos en las nervaduras centrales, se concluye que la tabla de coeficientes propuesta proporciona momentos de diseño seguros debido a que al centro de las nervaduras los momentos calculados con los coeficientes son mayores a los numéricos y en los extremos, donde los momentos son negativos, se tiene una aproximación de hasta el 90 % del numérico, por lo que se recomienda adoptar la tabla de coeficientes propuesta como un método válido para el diseño de nervaduras de sistemas estructurados con losa encasetonada.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al proyecto “182736 Análisis y diseño de losas de concreto” auspiciado por la Secretaría de Educación Pública y el CONACyT. El segundo autor agradece la beca de estudios de maestría al CONACYT. Ambos autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana por las facilidades proporcionadas a la realización de este y por el patrocinio al proyecto titulado “Análisis de losas de concreto e implantación de elementos finitos con discontinuidades embebidas”.

REFERENCIAS

1. Abdel Rahman Abdel Maksoud, A. (2005), “Analysis of waffle slabs with openings”, Tesis de Maestría, Universidad de Zagazig, Egipto.
2. Abdul Wahab, H.M.S. y Khalil, M.H. (2000), “Rigidity and strength of orthotropic reinforced concrete waffle slab”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, pp. 219-227.
3. ABNT (2003), “NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto: procedimentos”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Río de Janeiro, Brazil. (En Portugués)
4. ACI 318-11 (2011), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute.
5. Arellano, E. y González, O.M. (2012), “Estudio experimental de conexiones columna-losa postensadas aligerada”, *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.*, Vol. 3, No. 2, pp. 34-61.

6. CSI-08 (2008), "SAFE V12, Manual de usuario. Integrated design of slabs, mats and footings", Computers and Structures, inc.
7. CSI-13 (2013), "SAP 2000 Ultimate 16.0.0, Manual de usuario. Structural Analysis Program", Computers and Structures, inc.
8. Donin, C. (2007) "Análisis numérico de losas encasetonadas utilizando el método de elementos finitos", Tesis de Maestría, Universidad Federal de Santa María, Brasil.
9. EC-2 (2002), British Standards Institution BS EN 1992-2, Eurocode 2: Design of concrete structures. BSI.
10. ECP-203 (2001), Egyptian code for design and construction of reinforced concrete structures, ECPCS-203. Housing and Building National Research Center. Ministry of Housing, Utilities and Urban Planning, Cairo.
11. Ibrahim, A., Salim, H. y El-Din, H.S. (2011), "Moment coefficients for design of waffle and without openings", *Engineering Structures*, Vol.33, pp. 2644-2652.
12. IStructE-06 (2006), "Manual for the design of concrete building structures to Eurocode 2", The Institution of Structural Engineers/ The Institution of Civil Engineers.
13. Juárez-Luna, G. y Gutiérrez-Morgado, P. (2016) "Propuesta de actualización de los coeficientes de diseño de las NTCC-04 para losas rectangulares", *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.*, Vol. 7, No. 2, pp. 2-34.
14. NTCC-04 (2004), Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal.
15. NTCS-04 (2004), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal.
16. NTCA-04 (2004), Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones del Reglamento de Construcción para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal.
17. OPTIMOLDE, "catálogo de casetones", <http://www.optimoldes.com/casetonm.htm>.
18. Prasad, J., Chander, S. y Ahuja, A.K. (2005), "Optimum dimensions of waffle slab for medium size floors", *Asian Journal of Civil Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 183-197.
19. RCDF-04 (2004), Reglamento de Construcción del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal.
20. Selot, R.K. (1966), "A comparative study of reinforced concrete plain and waffle slabs", Tesis doctoral, Universidad de Strathclyde, Reino Unido.
21. Stramandinoli, J.S.B. (2003) "Las contribuciones al análisis de losas encasetonadas por analogía de malla", Tesis de maestría, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.
22. Whittle, R.T. (1981) "Design of reinforced concrete flat slabs to BS8110", CIRIA Report 110, 48 pp.