

**IDENTIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DE DIAFRAGMA RÍGIDO O FLEXIBLE A  
PARTIR DE INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA Y MODELACION DE LOSAS TIPO  
SHELL O MEMBRANA EN SISTEMAS DE RESISTENCIA LATERAL**

**DAVID JIMENEZ ORREGO**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2017**

**IDENTIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DE DIAFRAGMA RÍGIDO O FLEXIBLE A  
PARTIR DE INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA Y MODELACION DE LOSAS TIPO  
SHELL O MEMBRANA EN SISTEMAS DE RESISTENCIA LATERAL**

**DAVID JIMENEZ ORREGO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Magíster en Ingeniería**

**Asesores:**

**Juan Carlos Botero Palacio**

**Julio Garcés**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a los profesores Juan Carlos Botero Palacio y Julio Garcés por su constante colaboración, apoyo y consejo técnico durante el proceso de investigación llevado a cabo para elaborar esta tesis.

Agradezco a la Universidad EAFIT, especialmente al Departamento en Investigación por brindarme una beca para realizar mis estudios.

Finalmente, a mi familia por su apoyo incondicional.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b> .....	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>3. DEFINICIÓN DE ELEMENTOS TIPO SHELL Y MEMBRANA</b> .....	<b>14</b>
3.1 DEFINICIONES .....	14
3.2 MESH EN SHELL: DISCRETIZACIÓN DE ELEMENTOS.....	18
3.3 IMPLICACIONES DE MODELACIÓN AL USAR SHELL O MEMBRANA.....	21
<b>4. COMPORTAMIENTO DE MEMBRANAS Y SHELLS ANTE CARGAS LATERALES</b> .....	<b>27</b>
4.1 COMPORTAMIENTO DE LOSAS TIPO MEMBRANA .....	27
4.2 COMPORTAMIENTO DE LOSAS TIPO SHELL .....	28
<b>5. DISEÑO DE LOSAS DE CONCRETO REFORZADO MODELADAS COMO SHELL</b> .....	<b>29</b>
<b>6. DIFERENCIAS ENTRE DIAFRAGMA RÍDIGO Y FLEXIBLE</b> .....	<b>40</b>
<b>7. DISEÑO DEL DIAFRAGMA ANTE CARGAS LATERALES</b> .....	<b>59</b>
<b>8. LISTADO PARA LA INCLUSION DE LA LOSA EN EL SISTEMA DE RESISTENCIA LATERAL EN TERMINOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO</b> .....	<b>66</b>
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	<b>68</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>71</b>
<b>ANEXO A: COMPORTAMIENTO DE COLUMNA O MURO A PARTIR DE LA RIGIDEZ POR FUERA DEL PLANO DEL SISTEMA DE PISO EN LA MODELACION DE EDIFICACIONES</b> .....	<b>74</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Comparación de resultados entre Shell y Membrana .....	24
Tabla 2: Resultados entre Shell y Membrana y Diafragma rígido y flexible para una relación en planta de 1.....	46
Tabla 3: Resultados entre Shell y Membrana y Diafragma rígido y flexible para una relación en planta de 2.....	47
Tabla 4: Resultados entre Shell y Membrana y Diafragma rígido y flexible para una relación en planta de 4.....	48

## LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Desplazamiento, giros y fuerzas internas en elementos tipo membrana	15
Figura 2: Desplazamiento, giros y fuerzas internas en elementos tipo shell.....	16
Figura 3: Diagrama de momentos columna y muro, izquierda y derecha respectivamente.....	17
Figura 4: Discretización de un Shell en 49 elementos .....	19
Figura 5: Discretización de un Shell en 4 elementos .....	19
Figura 6: Comportamiento a flexión de un Shell discretizado en 49 elementos. La curvatura adoptada es como la de una viga a flexión. ....	20
Figura 7: Comportamiento a flexión de un Shell discretizado en 4 elementos. Nótese que la deformación es lineal entre nodo y nodo y el elemento gira como un cuerpo rígido. ....	20
Figura 8: Diagrama de cortantes-Membrana .....	22
Figura 9: Diagrama de momentos-Membrana .....	22
Figura 10: Diagrama de fuerzas axiales-Membrana .....	22
Figura 11: Diagrama de cortante-Shell .....	23
Figura 12: Diagrama de momentos-Shell .....	23
Figura 13: Diagrama de fuerzas axiales-Shell .....	23
Figura 14: Refuerzo a cortante en la losa con estribos cerrados convencionales.	31
Figura 15: Refuerzo a cortante en losa con miembros de acero .....	32
Figura 16: Distribución en planta de studrails. ....	33
Figura 17: Studrails.....	33
Figura 18: Studrails colocados en la conexión losa-columna .....	34
Figura 19: Shear Bands .....	35
Figura 20: Shear Bands colocadas en una conexión losa-columna.....	35
Figura 21: Gráfica de demanda sobre capacidad de cortante en una dirección vs deriva última.....	36

Figura 22: Curva capacidad-deformación para conexiones losa columna con y sin refuerzo a cortante .....	38
Figura 23: Nombramiento de columnas y pórticos para R=2. ....	44
Figura 24: Nombramiento de columnas y pórticos para R=4. ....	45
Figura 25: Deriva en columnas para R=1 .....	49
Figura 26: Deriva en columnas para R=2 .....	50
Figura 27: Distribución de cargas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=2 .....	50
Figura 28: Momentos internos debido a fuerzas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=2.....	51
Figura 29: Fuerzas axiales debido a cargas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=2.....	51
Figura 30: Fuerzas cortantes debido a cargas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=2 .....	52
Figura 31: Momentos debido a fuerzas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=2 .....	52
Figura 32: Fuerzas axiales debido a cargas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=2 .....	53
Figura 33: Deriva en columnas para R=4 .....	53
Figura 34: Distribución de cargas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=4 .....	54
Figura 35: Momentos internos debido a fuerzas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=4.....	54
Figura 36: Fuerzas axiales debido a cargas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=4.....	55
Figura 37: Fuerzas cortantes debido a cargas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=4 .....	55
Figura 38: Momentos debido a fuerzas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=4 .....	56
Figura 39: Fuerzas axiales debido a cargas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=4 .....	56

Figura 40: Idealización de fuerzas de compresión y tracción en los extremos de la losa con diafragma rígido .....	60
Figura 41: Idealización del diafragma apoyado en resortes.....	61
Figura 42: Carga trapezoidal para considerar los efectos torsionales .....	62
Figura 43: Barras colectoras en el diafragma .....	63
Figura 44: Barras colectoras y refuerzo a cortante en el diafragma.....	64
Figura 45: Diagrama de momentos flectores para un muro de cortante, a) losas sin rigidez por fuera de su plano, b) losas con rigidez por fuera de su plano .....	75



## INTRODUCCIÓN

En la práctica del diseño estructural en Colombia, los sistemas en concreto de pórticos resistentes a momentos y de muros estructurales, son los más usados en la construcción de edificaciones de vivienda. Para el primer sistema estructural mencionado, la disipación de la energía sísmica se lleva a cabo cerca a los apoyos de las vigas y, para el segundo, en los muros propiamente.

Los sistemas de piso, generalmente se han comprendido por losas nervadas en dos direcciones con espesores de losa que varían entre 5 cm y 8 cm y en losas macizas unidireccionales con espesores de 10 cm en promedio. En los últimos años este último sistema ha tenido una mayor acogida entre las compañías desarrolladoras de proyectos debido a su mayor agilidad constructiva. Adicionalmente existen las losas planas, generalmente con refuerzo de cables postensados, las cuales no son muy usadas debido a que requieren mayor tecnología y son desconocidas o poco comunes para el grueso de los constructores de estructuras diferentes a puentes.

Como se mencionó anteriormente, la losa se deja a un lado en términos del análisis, distribución y disipación de la energía sísmica que llega a la estructura. La inclusión o no de la losa en el análisis sísmico puede considerarse según el tipo de modelación que se disponga, los elementos tipo Shell aportan rigidez por fuera del plano y son capaces de distribuir fuerzas inerciales a través de dicha rigidez, por otro lado, los elementos tipo membrana son totalmente flexibles por fuera de su plano por lo que no participan sísmicamente en conjunto con el resto de la estructura.

Actualmente existen varios tipos de refuerzos a cortante para las losas que pueden permitir que dicho elemento estructural en realidad sea capaz de aportar a la respuesta sísmica, estos refuerzos cumplen en cuanto a criterios de la resistencia al cortante, pero más importante aún, en términos de ductilidad. Sin embargo, la

Norma de Construcción Sismoresistente colombiana del 2010 (NSR-10) no permite sistemas de resistencia donde la conexión losa-columna haga parte de éste. Lo mencionado anteriormente no implica que dichos sistemas no funcionen ni cumplan condiciones adecuadas para su uso, únicamente es una buena práctica incluir otros sistemas que aporten una mayor rigidez al sistema.

Por otro lado, el uso de la propiedad de diafragma rígido ha sido usado extensivamente, en muchos casos, sin saber si en realidad dicha suposición se puede dar en el comportamiento de la estructura ante cargas laterales. Debido a la tipología de muchas de las edificaciones actuales se pueden generar diafragmas flexibles, los cuales, en algunos casos, no son considerados dentro del comportamiento dinámico de la estructura ante cargas laterales, lo cual puede llevar a estructuras con fallas frágiles y súbitas que pongan en peligro la vida humana.

## 1. ANTECEDENTES

En la actualidad, múltiples programas computacionales son utilizados para el diseño estructural, los cuales cada día tienen algoritmos y solucionadores matemáticos más avanzados que permiten mayor velocidad en las labores de diseño, sin embargo, es responsabilidad del ingeniero estructural determinar qué parámetros de entrada se deben usar y qué datos de salida son válidos según los criterios asumidos, de modo que el resultado de diseño sea coherente con las hipótesis realizadas, pero más importante aún, seguro y estable ante las cargas a las que se verá impuesta. La inclusión de la losa en la modelación de la estructura y posteriormente su diseño y detallado del refuerzo es de suma importancia puesto que algunos diseñadores estructurales modelan la losa como un Shell el cual le brinda una gran rigidez a la estructura y así se controlan las derivas, manteniéndolas dentro del valor permisible, pero luego su diseño y detallado es únicamente para una losa que transmite cargas gravitacionales, generando una inconsistencia y un vacío en dicho diseño.

Por otro lado, generalmente, también se define el diafragma como rígido sin la verificación de las condiciones geométricas y de rigidez que generen un comportamiento que se asemeje a dicha suposición. Esto, para ciertos casos particulares, puede conllevar a estructuras inseguras, donde para algunos elementos que hacen parte del sistema de resistencia sísmica se subestiman las fuerzas laterales que se distribuyen, llevando a dichos miembros, en muchos de los casos, a la falla frente a las cargas de diseño y a tener demandas de ductilidad inferiores a su capacidad.

Es evidente que lo mencionado anteriormente es problemático, puesto que asumir la losa como un elemento Shell o membrana y como diafragma rígido o flexible, tiene implicaciones en la distribución de las fuerzas horizontales a los diferentes

elementos, entre otros, y por ende en su resistencia final cuando se vean sometidos a los eventos de diseño.

La motivación principal de este artículo radica en aclarar este tipo de problemáticas que se presentan en la práctica profesional y mostrar las posibilidades e implicaciones que existen para poder incluir efectivamente la losa dentro de la respuesta sísmica de la estructura, para que esta primera tenga un comportamiento adecuado y no presente una falla frágil y catastrófica cuando se vea sometida a las cargas laterales de diseño. Adicionalmente, en la práctica internacional se realiza un diseño del diafragma para garantizar la transmisión de fuerzas de la losa a los diferentes elementos verticales, existen ciertas metodologías de diseño que en opinión del autor de este escrito son desconocidas o evadidas para la mayoría de los diseños estructurales que se realizan en Colombia.

Bajo ninguna circunstancia se intenta imponer o establecer que cierto tipo de modelación es mejor que la otra. Ambas tienen sus ventajas y desventajas, sin embargo, se intenta crear conciencia sobre desarrollar análisis estructurales sanos, donde las hipótesis de diseño asumidas se usen para todos los elementos. Las losas tipo Shell pueden usarse para dar como resultado una estructura más favorable, claro está, que la losa debe detallarse para que este comportamiento se pueda dar.

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo primordial del presente escrito es comprender desde el punto de vista estructural el comportamiento de los elementos tipo Shell y membrana, así como de las suposiciones de diafragma rígido o flexible usadas para el diseño estructural. Se han encontrado en la práctica laboral inconsistencias con el uso de algunas de estas suposiciones y el posterior diseño de la losa generando, en algunos casos, diseños que no cumplen los estándares mínimos requeridos y por ende estructuras inseguras.

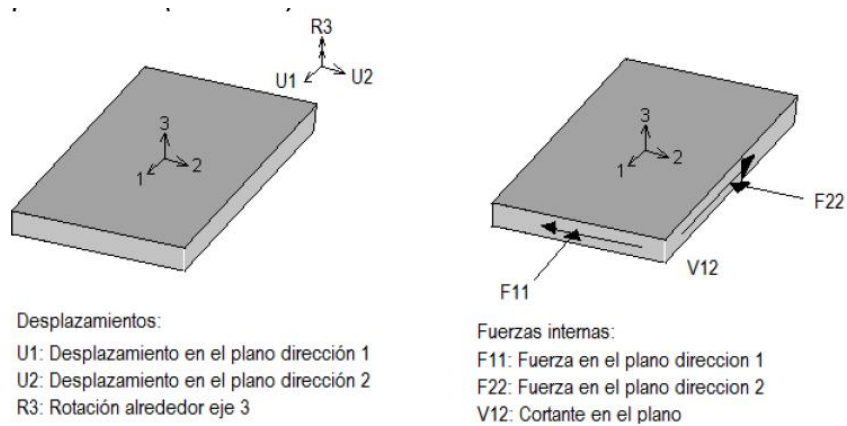
### **3. DEFINICIÓN DE ELEMENTOS TIPO SHELL Y MEMBRANA**

#### **3.1 DEFINICIONES**

Los elementos tipo Shell y membrana son concepciones matemáticas que por medio de sus diferentes grados de libertad sirven como herramientas para analizar el comportamiento de diferentes materiales ante diversos tipos de cargas, cómo varían sus esfuerzos y cómo se transmiten a su vecindad y a sus apoyos. Para este caso puntual se tratarán dichos elementos para las losas de concreto reforzado utilizadas en la construcción de edificios.

Los elementos membrana cuentan con 3 grados de libertad por nodo, dos de desplazamientos en su plano y otro de giro alrededor del mismo, esto conlleva a que no tengan ningún tipo de deformación por fuera de su plano y realicen la transmisión de cargas por áreas tributarias puesto que no tiene aporte a través de la flexión. Generalmente son usados para modelar losas que transfieren cargas laterales y verticales a los elementos de mayor rigidez como columnas, vigas y muros estructurales. Son elementos que deben estar apoyados en 4 lados para que realicen una correcta transmisión de cargas, ya que usan distribuciones trapezoidales o triangulares para transportar dicha carga. Se ha detectado que su comportamiento transmitiendo las cargas es adecuado para estructuras con plantas rectangulares y simétricas.

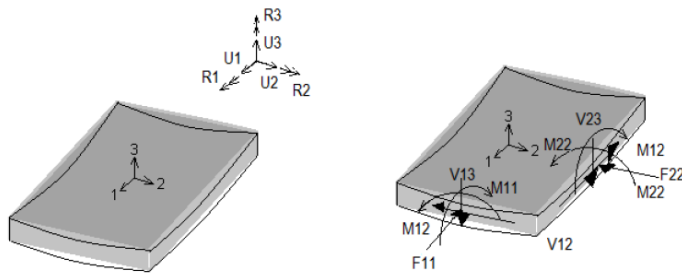
Figura 1: Desplazamiento, giros y fuerzas internas en elementos tipo membrana



Fuente: (Barbosa & Álvarez, 2017)

Por otro lado, los elementos tipo Shell tienen un comportamiento más complejo, debido a que incorporan grados de libertad adicionales respecto a la membrana, generando 6 grados de libertad por nodo, por lo que aportan rigidez, tanto por fuera como en su plano, para cualquier tipo de cargas aplicadas. Generalmente se usan para modelar losas y muros estructurales debido a que por sus diversos grados de libertad su comportamiento es adecuado para dichos elementos. Los muros estructurales aportan una gran rigidez en su dirección más larga, por lo que perpendicularmente su rigidez puede despreciarse liberando los grados de libertad correspondientes en el elemento tipo Shell. Estos elementos deben estar apoyados en mínimo 3 lados, por lo cual su uso es más eficiente para estructuras con plantas irregulares.

Figura 2: Desplazamiento, giros y fuerzas internas en elementos tipo shell



Fuente: (Barbosa & Álvarez, 2017)

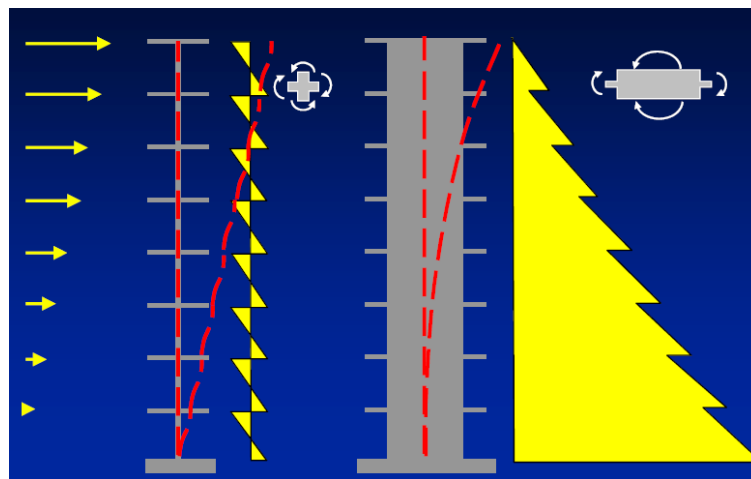
Es importante aclarar la diferencia entre un elemento vertical que tome cargas laterales al ser modelado como frame o Shell, al asimilarse a una columna o a un muro estructural, respectivamente. Un elemento frame se idealiza como una línea que tiene ciertas propiedades de geométricas y mecánicas en el que se puede conocer el resultado de fuerzas y desplazamientos en sus dos nodos extremos, mientras que los elementos Shell parten de una interacción con otros elementos y sus condiciones de frontera. Luego del análisis, los elementos frame presentan información sobre las fuerzas actuantes en los nodos, mientras que los elementos Shell muestran información en toda la extensión del elemento debido a la malla de elementos finitos que se usa.

Las diferencias, entre columnas y muros, recaen básicamente en 2 aspectos, el primero en términos de la cuantía mínima vertical del refuerzo de uno y otro que por norma se les deben colocar, para columnas el mínimo es 1%, mientras que para muros estructurales es del 0,25%, siguiendo esta lógica se podría decir que un muro con mucho refuerzo longitudinal es una columna. La segunda distinción, la cual tiene mayor fundamento estructural, se evidencia en el comportamiento que tiene el elemento frente a cargas laterales, una columna tiene un diagrama de momentos con un punto de inflexión cercano a la mitad de su altura, mientras que un muro estructural posee un diagrama de un elemento en voladizo con el mayor momento



en la base (García, 2016 y García, 2006). Es importante aclarar a la hora de la modelación el tipo de elemento que se usará para posteriormente realizar un adecuado detallado del acero de refuerzo. El diagrama de momento en forma de sierra para las columnas se logra a partir del arriostramiento que le proporcionan las vigas que tienen una importante rigidez a flexión, mientras que un muro idealizado tiene una inercia tan alta que los elementos horizontales no son capaces de arriostrarlo, adoptando un comportamiento similar al de una viga en voladizo.

Figura 3: Diagrama de momentos columna y muro, izquierda y derecha respectivamente



Fuente: (García, 2016)

Por otro lado, algunos diseñadores usan elementos shell con factores de fisuración de su rigidez por fuera del plano cercano a cero, por lo cual se estaría adoptando un comportamiento de un elemento tipo membrana. Algunas pruebas fueron realizadas en ETABS y comprueban lo dicho anteriormente, no existe variación en los periodos fundamentales de la estructura cuando se tienen modelos con membrana o con Shell fisurado fuera de su plano. Realizar dicha reducción de la rigidez por fuera del plano influye en un aumento de las derivas de la estructura y se evita un diseño controlado por flexo-compresión por fuera del plano que puede

llevar a altas cuantías del refuerzo longitudinal, especialmente en los pisos superiores donde la carga axial es baja (Barbosa & Álvarez, 2017).

### **3.2 MESH EN SHELL: DISCRETIZACIÓN DE ELEMENTOS**

Un Shell al tratarse de un elemento finito, el cual debe estar conformado por elementos de 4 o 3 lados y donde sus condiciones de frontera deben estar claramente definidas, es importante resaltar la discretización que debe poseer al momento de usarlo en un modelo matemático, puesto que elementos de tamaño muy pequeño conllevan a una visualización de resultados muy “exactos” pero a costo de un tiempo computacional muy grande, por otro lado, elementos de un gran tamaño reducen tiempo computacional pero el comportamiento de los esfuerzos y las deformaciones puede ser inexacto, para lo que en la mayoría de los casos se pretende con estos modelos, puesto que giran como cuerpos rígidos y la información al obtenerse en sus nodos, sería muy poca.

Un tamaño intermedio puede ser el punto de equilibrio con respecto al tiempo computacional y a la precisión en los resultados. Es de suma importancia que todos los elementos estén conectados en sus nodos a otro elemento, puesto que los elementos finitos hacen la transferencia de cargas a través de los nodos y de lo contrario se perdería carga durante su paso hacia los elementos verticales.

Para edificios con geometrías en planta muy irregulares modelar una losa como un Shell puede ser problemático en cuanto a que, en muchas ocasiones, el mesh que hacen los programas de diseño convencionales no es muy preciso y algunos nodos quedan desconectados de la malla, lo cual llevaría a realizar una división física de la losa lo que implica mayor tiempo y posibilidad de caer en errores difíciles de percibir.

Por otro lado, una membrana no tiene la necesidad de tener un mesh puesto que distribuye las cargas verticales por áreas aferentes y no por rigidez como lo hace el Shell, por lo cual su uso disminuye considerablemente el gasto computacional.

Figura 4: Discretización de un Shell en 49 elementos

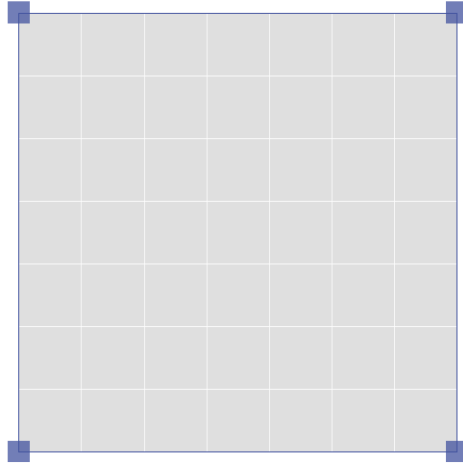


Figura 5: Discretización de un Shell en 4 elementos

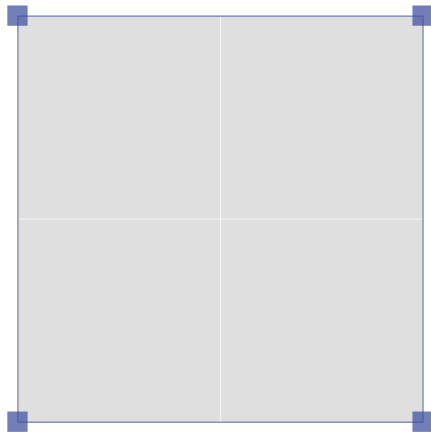


Figura 6: Comportamiento a flexión de un Shell discretizado en 49 elementos. La curvatura adoptada es como la de una viga a flexión.

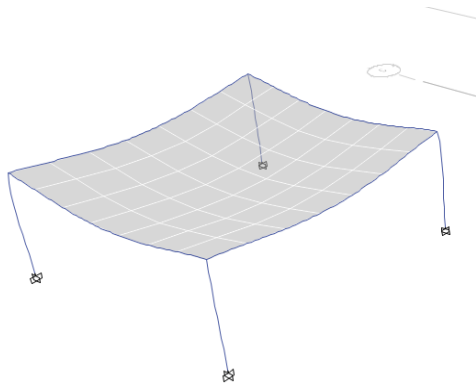
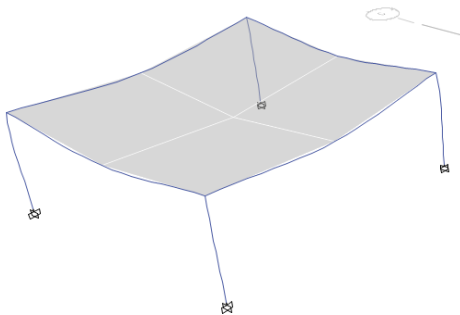


Figura 7: Comportamiento a flexión de un Shell discretizado en 4 elementos. Nótese que la deformación es lineal entre nodo y nodo y el elemento gira como un cuerpo rígido.



### **3.3 IMPLICACIONES DE MODELACIÓN AL USAR SHELL O MEMBRANA**

La decisión de modelar una losa como un Shell o una membrana tiene implicaciones desde el punto de vista del cortante basal, periodo fundamental de la estructura, rigidez y por ende desplazamientos laterales, distribuciones diferentes de las fuerzas sísmicas, entre otras. Para mostrar lo anterior se procedió a realizar unos modelos geoméricamente simples en ETABS para comprobar los cambios representativos al usar un tipo u otro de losa.

El modelo comparativo consiste básicamente en 4 columnas de 0.40m x 0.40m de 3.0m de altura, con vigas perimetrales de sección cuadrada de lado de 0.40m, con luces de 8.0m y una losa de 0.20m de espesor la cual se varió entre tipo membrana o Shell. La geometría se eligió debido a que representa secciones típicas utilizadas en la práctica colombiana para este tipo de luces y para edificios de vivienda.

Se aplicó una fuerza lateral a la estructura en dirección X a partir de un espectro de amenaza sísmica de la NSR-10, se debe tener en cuenta que la masa de la estructura nunca va a cambiar y que, al ser una estructura tan rígida, los cambios que se puedan producir en el periodo nunca van a sacar al edificio de la meseta del espectro, por lo que la aceleración siempre será igual y por ende también lo será el cortante basal. En términos de carga vertical, no se aplicó ningún tipo de carga superimpuesta, por lo que la totalidad de la masa proviene del peso propio de la estructura exclusivamente.

Figura 8: Diagrama de cortantes-Membrana

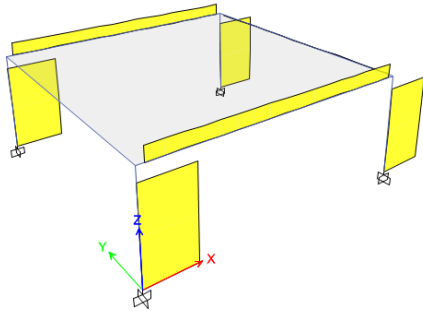


Figura 9: Diagrama de momentos-Membrana

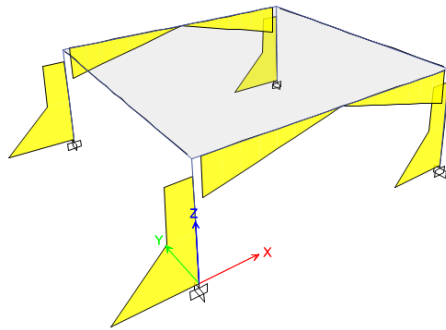


Figura 10: Diagrama de fuerzas axiales-Membrana

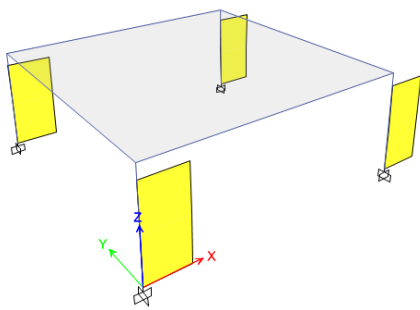


Figura 11: Diagrama de cortante-Shell

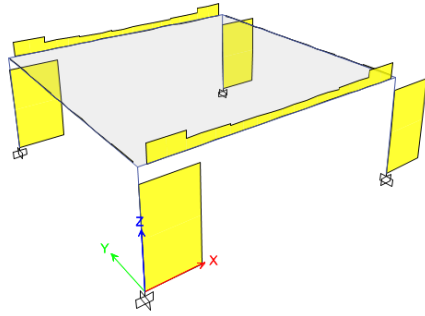


Figura 12: Diagrama de momentos-Shell

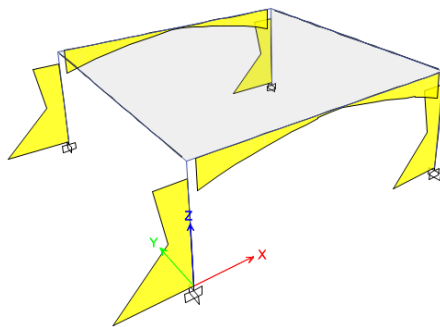


Figura 13: Diagrama de fuerzas axiales-Shell

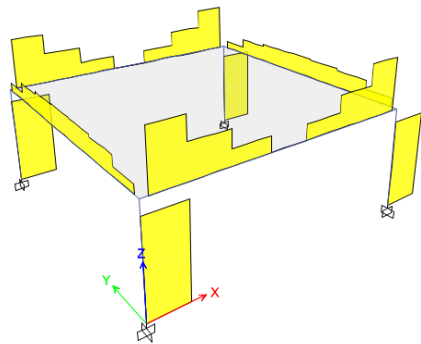


Tabla 1: Comparación de resultados entre Shell y Membrana

	<b>Membrana (I)</b>	<b>Shell (II)</b>	<b>Variación (I/II)</b>
Masa (t-s <sup>2</sup> /m)	46,146	46,146	1,000
Periodo fundamental (s)	0,193	0,178	1,084
Masa participante modo 1 (X)	0,791	0,994	0,795
Masa participante modo 2 (Y)	0,791	0,994	0,795
Masa participante modo 3 (Z)	1,000	1,000	1,000
Cortante basal (kN)	197,478	197,477	1,000
Deriva de piso en X (%)	0,138	0,118	1,173
Momento sísmico en vigas en la cara de la columna (kN-m)	48,569	38,027	1,277
Momento sísmico en columnas en la base (kN-m)	96,983	89,789	1,080
Cortante sísmico en vigas en la cara de la columna (kN)	12,781	19,975	0,640
Cortante sísmico en columnas (kN)	49,370	49,396	0,999
Axial sísmico en vigas (kN)	0,000	24,224	0,000
Axial sísmico en columnas (kN)	12,781	14,580	0,877

Como se mencionó en párrafos anteriores, la masa y el cortante basal de los modelos no sufrirían cambio alguno por las razones mencionadas. Por parte del análisis modal y de la rigidez, traducido en el periodo fundamental de la estructura, se encuentran diferencias puesto que para el modelo con membrana los modos superiores tienen mayor influencia en la respuesta de la estructura en comparación con el modelo Shell y, como era de esperarse, la modelación con membrana genera un periodo menor, conllevando a una estructura más flexible con desplazamientos mayores que una losa modelada con Shell.



En algunas situaciones en el que el periodo de la estructura se encuentre en la zona descendiente del espectro de amenaza sísmica, la decisión de usar un tipo de losa u otro puede ser fundamental en cuanto a que existiría una variación considerable en el periodo de la estructura y por ende en la aceleración espectral calculada ( $S_a$ ), generando cortantes basales, dependiendo de la elección, mayores o menores. El caso más crítico se daría en estructuras que se modelen como tipo membrana, que al propiciar estructuras más flexibles, el cortante basal sería menor (Fouad, Ali & Mustapha, 2012). Es importante aclarar que para la mayoría de las estructuras que se diseñan en Colombia en las que el cortante basal, producto de un periodo calculado a partir de un análisis dinámico, es menor que cierto porcentaje del cortante basal calculado por el método FHE, el efecto anterior quedaría eliminado por dicho ajuste al cortante. Adicionalmente, considerar la losa como rígida para obtener un mayor cortante basal no es más conservador puesto que la distribución de fuerzas en ciertos elementos puede ser mayor haciendo que la demanda de ductilidad incremente (Mortazavi, 2014).

Por otro lado, la influencia sobre los desplazamientos y por ende en las derivas es de suma importancia, debido a que el modelo con losas tipo Shell genera estructuras más rígidas que tienen menores desplazamientos ante las cargas sísmicas (Fouad, Ali & Mustapha, 2012). Refiriéndose a Barbosa & Álvarez (2017), *“Modelación de Losas para el Diseño Sísmico de Edificios”*, existen diferencias de las derivas, para una dirección dada y considerando losas tipo membrana y Shell, de más del 600%. Para el caso analizado la variación en el periodo fue del 8,4%, pero en estructuras de un considerable número de niveles donde existan una mayor cantidad de losas que puedan aportar a la rigidez lateral global, la variación podría ser de una mayor magnitud.

En cuanto a los valores reportados en las fuerzas, los momentos del modelo membrana son mayores alrededor de un 27% para las vigas puesto que la losa, al no poseer rigidez por fuera de su plano, no puede transmitir momentos sísmicos a

las columnas directamente a través de flexión, por otro lado, para un modelo tipo Shell la losa estaría entrando a trabajar dentro del sistema de resistencia lateral del edificio debido a que es capaz, analíticamente, de transferir fuerzas laterales. En cuanto a las fuerzas cortantes en las vigas para el modelo membrana, el diagrama da un valor constante para toda la luz de la viga, mientras que para el otro modelo genera un diagrama con su máximo valor en la cara de las columnas y que disminuye hacia el centro de la luz, lo cual hace que, en cierto modo, el cortante total se compense. Sin embargo, la distribución de este tipo de fuerzas pierde relevancia cuando se diseñan las vigas para que, cerca de las columnas, se generen rótulas plásticas que disipen la energía sísmica y la cantidad de refuerzo a cortante usado tenga como función principal darle capacidad de giro y de deformación a la sección y arriostamiento a las barras longitudinales de refuerzo sometidas a compresión durante el comportamiento en el rango inelástico de la estructura debido a los eventos sísmicos. Los resultados reportados en Barbosa & Álvarez (2017), muestran que las fuerzas en los elementos verticales, para modelos con losas tipo membrana, son mayores que en modelos con losas tipo Shell, por ello, el diseño de dichos elementos reporta una mayor cantidad de toneladas de acero de refuerzo en comparación con los del primer modelo.

Según lo explicado anteriormente, el modo de modelación usado repercute directamente sobre el diseño final de una estructura en términos de desplazamientos, fuerzas y cantidad de refuerzo en los diferentes elementos. Es lógico que una buena práctica profesional deba buscar coherencia entre las suposiciones realizadas durante la etapa de modelación y la metodología de diseño y despiece usada en la estructura. Una vez construida la estructura, ésta tendrá una respuesta sísmica coherente a la forma en la que fue construida y despiezada.

## **4. COMPORTAMIENTO DE MEMBRANAS Y SHELLS ANTE CARGAS LATERALES**

Es relevante resaltar que el diseño y la modelación matemática de los diferentes elementos que componen una estructura deben ser coherentes en términos de distribución de fuerzas, detallado del refuerzo, capacidad de disipación de energía, entre otros. Al usar una losa como tipo membrana se transmiten cargas laterales, como fuerzas axiales en la losa, a los demás elementos de la estructura, mientras que usar una losa tipo Shell conlleva a que ésta participe, a través de su rigidez por fuera del plano, dentro del sistema de resistencia sísmica. En los modelos realizados en ETABS, se evidenció una disminución de las fuerzas sísmicas, especialmente en los momentos, de las vigas y columnas cuando se modelaban las losas como Shell, lo cual implica que las losas deben estar en capacidad de resistir dichas fuerzas debido a que en la modelación se consideró de dicha manera y además porque tanto vigas y columnas no tendrán el suficiente refuerzo para resistir las solicitaciones que se les impondrían con una losa tipo membrana.

Por lo anterior, es de suma importancia que las losas se diseñen para resistir las fuerzas a las que estarán sometidas según los criterios adoptados a la hora de realizar la modelación matemática de la estructura.

### **4.1 COMPORTAMIENTO DE LOSAS TIPO MEMBRANA**

Las membranas, por su rigidez y los grados de libertad que presenta en sus nodos, distribuyen cargas gravitacionales por medio de áreas aferentes. En cuanto a las cargas sísmicas o laterales, en los programas de diseño convencionales, tienen una función de distribuidor de fuerzas a los elementos que si hacen parte del sistema de resistencia lateral, todo esto lo hace sin deformación axial ni flexión por fuera de su plano por lo que no toma fuerzas sísmicas ni participa directamente en el sistema de resistencia lateral.

## 4.2 COMPORTAMIENTO DE LOSAS TIPO SHELL

Los elementos tipo Shell participan sísmicamente en el comportamiento de la losa puesto que tienen rigidez fuera de su plano y son capaces de distribuir dichas fuerzas. Más aún, en una edificación de muros estructurales la deformada del edificio sería un voladizo perfecto, pero cuando las losas tienen rigidez considerable fuera de su plano dicha deformada comienza a parecerse a un sistema de pórticos donde las vigas arriostran lateralmente a las columnas, intentando generar cierto punto de inflexión en la mitad de la altura de cada piso (Barbosa & Álvarez, 2017). Dicho arriostramiento genera una disminución en los momentos flectores internos del muro por los puntos de inflexión, produciendo menores cuantías del refuerzo longitudinal.

Lo anterior conlleva al cuestionamiento sobre si la losa es capaz de disipar energía puesto que ahora contribuye al sistema de resistencia lateral cambiando la respuesta de la estructura, para lo cual se debe garantizar suficiente confinamiento en la losa para que ésta pueda tener rotaciones considerables para tener un comportamiento dúctil y así evitar una falla catastrófica y explosiva del concreto.

## 5. DISEÑO DE LOSAS DE CONCRETO REFORZADO MODELADAS COMO SHELL

Los reportes del comité del ACI 352.1R-11 y 421.2R-5 (American Concrete Institute, 2010, 2012), establecen que un sistema de columnas con losa plana se puede usar como sistema de resistencia lateral en zonas de amenaza sísmica baja e intermedia, mientras que para las zonas de amenaza sísmica alta se deben introducir elementos de mayor rigidez como lo son los muros estructurales o pórticos resistentes a momentos. Se reportan una gran cantidad de ensayos [4-10] realizados para verificar la capacidad a cortante y la ductilidad de diferentes refuerzos a cortante en dichas losas con ciertas limitaciones.

- Los ensayos realizados incluyen espesores de losa entre 5 in a 12 in (12.7 cm y 40.5 cm).
- La máxima resistencia del concreto a la compresión a los 28 días es de 6000 psi.
- La interacción entre las losas planas y los muros estructurales no entra dentro de las recomendaciones dadas, por lo que estudios a mayor detalle se deben realizar sobre dicha interacción. Aun así, los pocos ensayos existentes muestran que la capacidad a cortante de dichas conexiones si puede ser incrementada.
- Las aberturas en la losa con una distancia menor a 10 veces el espesor de la losa tienen consecuencias negativas en la distribución del esfuerzo cortante alrededor de la columna.

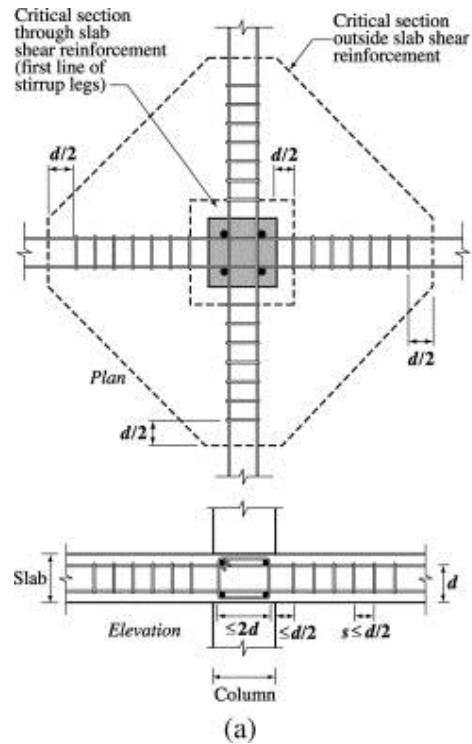
El diseño a flexión de la losa puede ser tomado, como convencionalmente se ha realizado, con barras de acero corrugadas o cables de acero postensados, considerando tanto los momentos producidos por las cargas sísmica y gravitacionales. En cambio, el diseño a cortante de las losas siempre se ha limitado a que la resistencia del concreto sea suficiente para soportar todas las sollicitaciones, pero para un diseño sísmico esta resistencia no es suficiente por las rotaciones inelásticas que deben o pueden sufrir las secciones, por ello para lograr una adecuada respuesta sísmica se deben buscar alternativas al diseño a cortante en las losas.

Los múltiples ensayos realizados respaldan que efectivamente existen diversos tipos de refuerzo a cortante en las losas que tienen alta resistencia a dicha fuerza, pero sobretodo una ductilidad adecuada frente a cargas sísmicas, lo cual es sumamente importante a la hora de incluir la losa al sistema de resistencia lateral. La demanda de ductilidad, los cortantes, las rotaciones y demás, generadas por el sismo de diseño pueden ser atendidas por estos sistemas de refuerzo a cortante.

Dichos refuerzos a cortante constituyen:

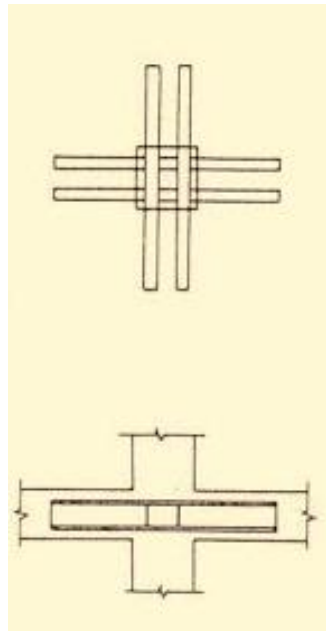
- Refuerzo a cortante con estribos convencionales: Tienen como desventaja que son difíciles de colocar en obra dado a los bajos espesores de las losas y que la losa en su conexión con la columna debe tener tanto barras superiores como inferiores para poder garantizar el anclaje adecuado del estribo. Además de los estribos cerrados, se pueden usar barras verticales individuales, con gancho superior e inferior.

Figura 14: Refuerzo a cortante en la losa con estribos cerrados convencionales.



- Perfiles de vigas metálicas embebidos en la losa: Nuevamente el espesor de la losa es un inconveniente, puesto que se necesitarían losas de un espesor considerable para garantizar un buen vaciado de la misma.

Figura 15: Refuerzo a cortante en losa con miembros de acero



- Studrails: Hace referencia a pernos de acero soldados a una platina inferior y con una cabeza de mayor diámetro que el perno en la parte superior, generalmente con un diámetro 10 veces mayor que el vástago. Pueden ser instalados en los menores espesores de losa especificados sin problema alguno, adicionalmente su instalación en obra es sencilla y rápida. Por las razones especificadas este tipo de refuerzo es ampliamente usado en países donde su construcción de losas es en su mayoría postensadas.



Figura 16: Distribución en planta de studrails.

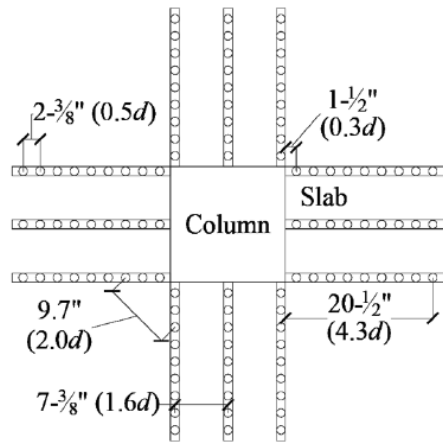


Figura 17: Studrails.



Figura 18: Studrails colocados en la conexión losa-columna



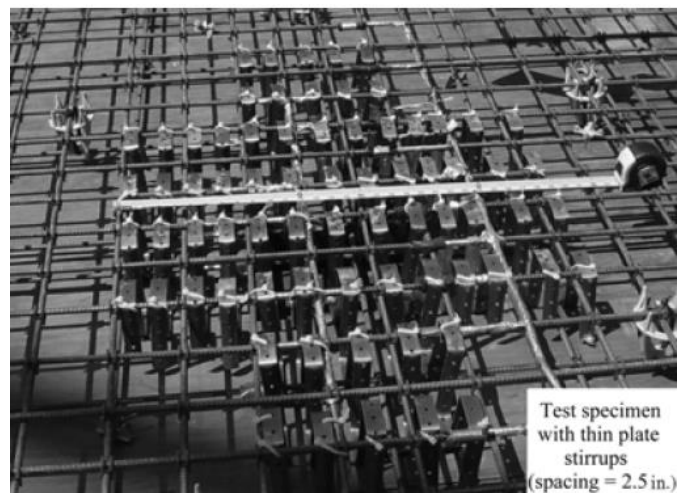
- Shear Bands: Como su nombre lo dice son bandas metálicas que se sitúan en la conexión losa columna. Su uso no es muy común en la práctica profesional pero los ensayos han mostrado excelentes resultados en términos de resistencia y ductilidad. Tienen la ventaja de que su instalación en obra es sencilla puesto que las ondulaciones se pueden acomodar a cada condición particular.

Figura 19: Shear Bands



Fuente: (Kang & Wallace, 2008)

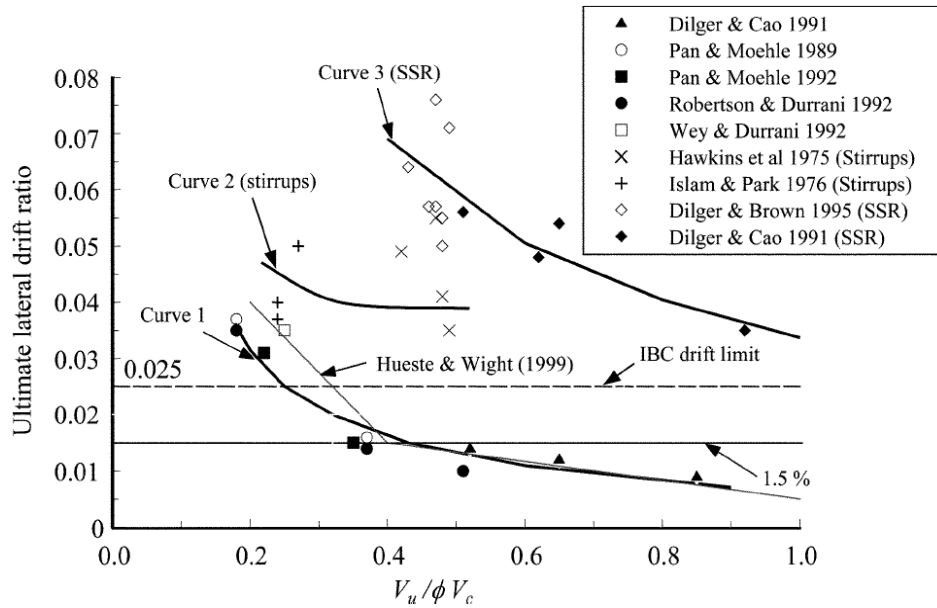
Figura 20: Shear Bands colocadas en una conexión losa-columna



Fuente: (Kang & Wallace, 2008)

El comité del ACI mencionado anteriormente desarrolló, a partir de los diferentes ensayos realizados, una gráfica que muestra el comportamiento de algunos refuerzos a cortante en la losa frente a cargas laterales.

Figura 21: Gráfica de demanda sobre capacidad de cortante en una dirección vs deriva última



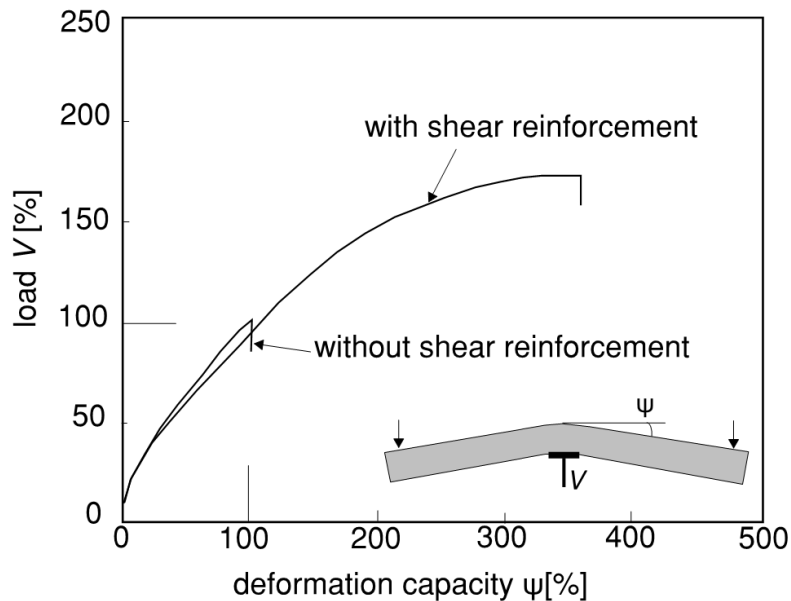
Fuente: (American Concrete Institute, 2010)

La gráfica anterior muestra en el eje X la relación entre el cortante bidireccional generado en la conexión losa-columna sobre la resistencia del concreto y en el eje Y la deriva del espécimen ensayado. Se puede concluir que las conexiones losa columna pueden resistir plenamente derivas superiores al 1% (valor de deriva usado según la NSR-10) con cualquier tipo de refuerzo a cortante para cualquier relación demanda capacidad de la conexión, es evidente que ante cargas laterales las conexiones losa-columna sufrirán mayores momentos no balanceados que a su vez se traducirá en mayores esfuerzos cortantes sobre la posible superficie de falla, pero aun así dichos sistemas de refuerzo a cortante son adecuados para resistir dicha situación, debido a que nunca existirá falla a cortante en dichas conexiones para los niveles de deriva de diseño especificados por los diversos códigos y normas.

El desempeño sísmico de ciertas tipologías de edificios durante el sismo de Chile en 2010, muestran que existe un acoplamiento de la losa y los diferentes elementos verticales de la estructura, por lo cual, esta primera aun sin haber sido considerada dentro del sistema lateral puede entrar a cambiar la respuesta sísmica de la estructura (Encina, 2011).

Para el caso de la práctica colombiana, los sistemas de losas suelen ser nervados, los cuales tienen espesores de losas entre 5 cm a 8 cm, los que son insuficientes según el rango de ensayos realizados para asumir que la losa pueda actuar sísmicamente. Otro de los sistemas son losas macizas unidireccionales con viguetas intermedias con espesores entre 10 cm a 12 cm, sin embargo, en este sistema se podrían usar losas de un mayor espesor para hacer que éstas participen sísmicamente y así poder “reducir” los momentos que llegan a las vigas y demás elementos verticales. Claro está que aumentar espesores de losa conlleva al problema de una mayor masa de la estructura y por ende mayor fuerza sísmica, sin embargo, se debe estudiar la posibilidad de modificar el factor de reducción sísmica  $R_o$  cuando las losas hagan parte del sistema de resistencia sísmica, dado que se están incluyendo más elementos disipadores de energía (además de las columnas y las vigas).

Figura 22: Curva capacidad-deformación para conexiones losa columna con y sin refuerzo a cortante



Fuente: (Lips, Fernández & Muttoni, 2012)

Algunos estudios han establecido que la cantidad de energía disipada por la losa no es considerable dentro de la ductilidad global de la estructura puesto que dicha conexión pierde rápidamente la rigidez cuando se ve sometida a cargas cíclicas, sin embargo, se deben realizar estudios con mayor profundidad que muestren en realidad la cantidad de energía disipada por dicho elemento puesto que el argumento principal por el establecen que no disipan una cantidad considerable de energía es el evidente agrietamiento y la reducción de rigidez, por otro lado, en los sistemas de pórticos resistentes a momento los nudos columna-viga son lugares donde hay una alta disipación de energía y la experiencia con los diversos sismos muestran que dicha unión se somete a grandes deformaciones inelásticas y por ende a grandes fisuras, pero aun así es capaz de disipar energía dentro del sistema ya que se encuentra confinada y debidamente reforzada. Otros ensayos ratifican que dichos sistemas sí poseen la capacidad de disipar energía siempre y cuando

exista un adecuado confinamiento a cortante [Mortazavi, 2014; Lips, Fernández & Muttoni, 2012; Carpenter, Kaar & Corley, 1973).

Adicionalmente, en muchos países del mundo el sistema de piso está evolucionado a losas postensadas por muchas de sus virtudes tanto estructurales como arquitectónicas. En estos sistemas la implementación de la losa dentro del sistema de resistencia lateral sería más sencillo en términos constructivos por los espesores mínimos que se contemplan.

Es importante recalcar que el decreto 945 del 5 de Junio del 2017 mediante el cual se modifica parcialmente el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10) en la sección A.3.6.8.3 establece que para edificaciones de muros de concreto y de mampostería, en los modelos analíticos los diafragmas no pueden contribuir con rigidez ni resistencia a la respuesta sísmica de dichas edificaciones (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010). Lo anterior ratifica la falencia que anteriormente se había comentado en el presente escrito del uso indebido del aporte de rigidez de la losa pero que su diseño no contemplaba dicho comportamiento.

Todas las consideraciones mencionadas anteriormente sobre la modelación del diafragma como rígido o flexible no están limitadas al diseño sísmico de estructuras de concreto, también aplica para edificaciones donde las cargas laterales son fuerzas de viento. Los diferentes programas comerciales de diseño estructural toman como suposición la aplicación de cargas laterales a la estructura, sin importar la naturaleza de la carga, se realizan suposiciones matemáticas para distribuir dichas fuerzas a los diferentes elementos verticales. Tiene poca importancia si las cargas provienen de eventos sísmicos o vientos de alta velocidad, puesto que la fuerza se distribuye considerando la interacción de los diferentes elementos estructurales en términos de su rigidez.

## 6. DIFERENCIAS ENTRE DIAFRAGMA RÍDIGO Y FLEXIBLE

Es bien sabido en el medio del diseño estructural las principales diferencias entre un diafragma rígido y uno flexible, sin embargo, en la mayoría de los casos en los software de diseño convencionales, se le asigna a la losa la propiedad de diafragma rígido, sin realidad saber si la estructura tendrá o no un comportamiento que se asemeje a las hipótesis que conllevan su uso, lo cual en el peor de los escenarios puede conllevar a diseños inseguros.

Un diafragma rígido tiene como fundamento la eliminación de 3 de los 6 grados de libertad de cada nodo de la estructura, generando desplazamientos en planta y un giro alrededor del eje Z, de manera similar a lo que ocurre con las losas tipo membrana. Al asignarle esta propiedad a los nodos de la estructura, se genera un nodo maestro que controla los desplazamientos en X y Y, además de los giros alrededor de Z para todos los otros “nodos esclavos”, esto se asemeja a suponer que existen elementos horizontales infinitamente rígidos axialmente que conectan a cada “nodo esclavo” con el nodo maestro, por lo que este último condensa todos los grados de libertad del piso. Lo anterior conlleva a que no existan acortamientos en el plano de la losa puesto que todos los nodos se desplazan la misma magnitud y por ende no existen fuerzas axiales dentro de la losa o las vigas. Adicionalmente, no existen desplazamientos por fuera del plano Z de la losa, debido a que los grados de libertad en dicha dirección se encuentran suprimidos.

Por otro lado, un diafragma flexible no genera dependencia de los nodos respecto a un nodo maestro, cada nodo puede tener un desplazamiento y un giro en cualquiera de los 6 grados de libertad que posee, algo similar a lo que ocurre con las losas tipo Shell. Por lo anterior, existen acortamientos axiales en el mismo plano de la losa, generando fuerzas dentro de la misma.



En el código “Minimum Loads for Buildings and Other Structures” de la “American Society of Civil Engineers”, en el capítulo 12.3.1.1 y 12.3.1.3 se establecen algunos criterios para que un diafragma pueda considerarse como flexible cuando se tengan las siguientes condiciones (ASCE, 2010).

- Diafragmas contruidos con decks metálicos o páneles de madera, cuyos elementos verticales son de concreto, acero o mampostería.
- Diafragmas contruidos con decks metálicos o páneles de madera para estructuras residenciales de uno o dos pisos.
- Construcción liviana con o sin acabados no estructurales de limitada rigidez.
- Diafragmas en los que la máxima deflexión en el plano ante cargas laterales sea al menos el doble del promedio de las deflexiones de piso de los elementos verticales.

En cuanto a los diafragmas rígidos se menciona en el capítulo 12.3.1.2, que se pueden considerar como tal cuando:

- Losas de concreto o metal deck con relaciones de aspecto en planta menores o iguales a 3 en estructuras que no tengan irregularidades horizontales, sin importar el tipo de sistema lateral que se tenga.

En la literatura existente, las diversas pruebas han mostrado que el valor de la relación en planta de 3 puede ser suficiente para determinar el límite para el comportamiento entre un diafragma rígido o flexible, sin importar el tipo de elementos verticales que se tengan (Tena, Chinchilla & Juárez, 2013; Barron & Hueste, 2014). Además, existen otros factores que determinan si un diafragma es

rígido o flexible como lo son la presencia de muros de cortante donde su alta rigidez es comparable con la del diafragma y donde se debe transportar una gran cantidad de cortante a dichos muros, generando posiblemente flexión en el plano de la losa; también la rigidez relativa de la losa respecto a los elementos verticales, que en cierto caso pueden ser muy rígidos, generando que las deformaciones en el plano horizontal puedan ser apreciables y que las distribuciones de fuerzas cortantes sean diferentes a las supuestas en el análisis elástico inicial (Fouad, Ali & Mustapha, 2013; Ju & Lin, 1999; Nakashima, Huang & Lu, 1981).

Las diferencias e implicaciones entre un diafragma rígido y uno flexible, entre otras, son (Tena, Chinchilla & Juárez, 2013):

- Los periodos de vibración de estructuras con diafragmas flexibles serán mayores, lo cual puede conllevar a los ya mencionados problemas en los espectros de diseño para la determinación del cortante basal de diseño.
- Los modos de vibración para la traslación lateral en edificaciones con diafragmas rígidos se encontrarán dominados por el desplazamiento de los diferentes elementos verticales, mientras que, para diafragmas flexibles, por las deformaciones en el plano de la losa, generando así una distribución no uniforme de las aceleraciones y desplazamientos de los elementos que hacen parte del sistema de resistencia sísmica. Dichas aceleraciones y desplazamientos tienen mayor magnitud en los centros de las luces y en los elementos verticales con una flexibilidad más alta por lo que poseen mayores demandas de cortante generadas por las cargas laterales. Para un diafragma rígido tanto las aceleraciones como los desplazamientos son iguales para todos los elementos, por lo que la distribución de fuerzas se hace respecto a la rigidez de cada elemento.

- Para estructuras con diafragmas flexibles, en la dirección perpendicular a la excitación sísmica, se imponen deformaciones por fuera del plano a las vigas de borde y a los miembros verticales en la dirección perpendicular, lo cual puede ocasionar la falla de dichos elementos o grandes agrietamientos según lo identificado en algunos eventos sísmicos como Umbria-Mache en Italia en 1977, Loma Prieta en 1989 y en Northridge en 1994.
- Para estructuras con diafragmas rígidos, existe un acoplamiento modal que genera una respuesta torsional significativa, mientras que un diafragma flexible reduce dichos efectos torsionales.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente y a partir de las descripciones geométricas dadas con anterioridad para los modelos de membrana y Shell, se procedió a realizar algunos modelos comparativos en ETABS. El modelo descrito anteriormente se definió como una unidad, por lo cual se realizaron 3 modelos de 1, 2 y 4 unidades, para así tener relaciones en planta de 1, 2 y 4, respectivamente. Con lo anterior se pretende tener estructuras con valores de relaciones en planta, tanto por encima como por debajo de 3.

Se analizó el periodo fundamental de la estructura, los porcentajes de masa participante en cada dirección, el cortante basal total, la deriva de piso del centro de masa, así como de cada uno de los nodos viga/columna y las diferentes fuerzas internas en los elementos tipo frame generadas a partir de la fuerza lateral aplicada.

A continuación, se muestra la numeración que se le dio a los diferentes elementos y una visualización global de la geometría usada. Para el modelo de relación en planta igual a 1 ( $R=1$ ), se usó la misma configuración presentada anteriormente. Para los otros dos casos ( $R=2$  y  $R=4$ ) se nombraron los pórticos y las columnas como se muestra a continuación, las fuerzas reportadas para los pórticos hacen

referencia a una de las dos columnas donde el otro valor correspondiente a la otra columna tiene la misma magnitud para todos los casos.

Figura 23: Nombramiento de columnas y pórticos para  $R=2$ .

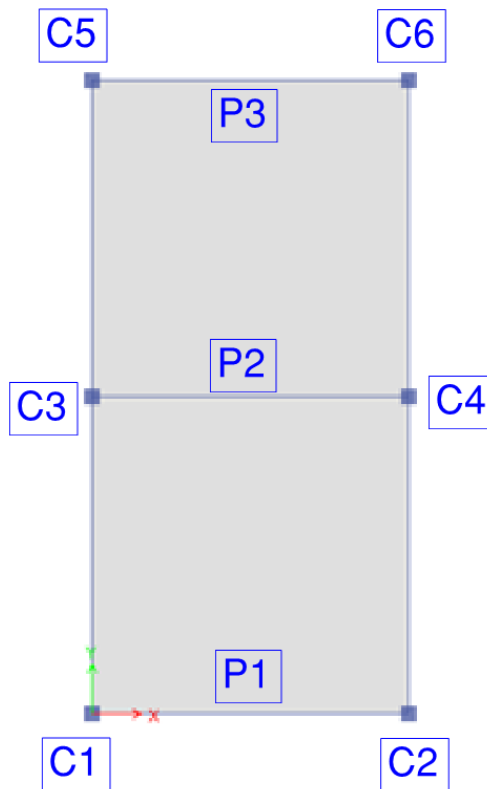
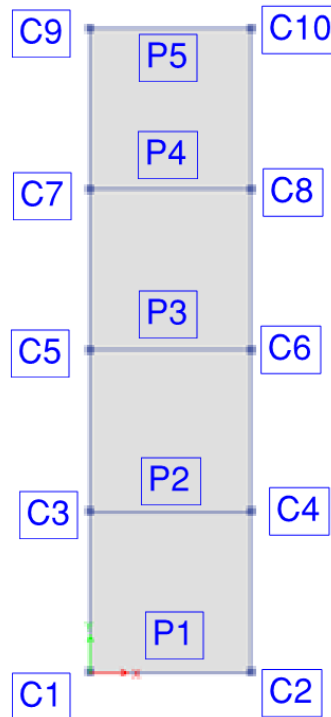


Figura 24: Nombramiento de columnas y pórticos para R=4.



Los resultados de los modelos se presentan en las siguientes tablas y algunas comparaciones relevantes se muestran en forma gráfica. Es evidente que los diferentes pórticos de las estructuras analizadas no presentan un incremento del cortante por efectos torsionales puesto que son edificaciones sin ninguna irregularidad en planta y donde el centro de masa y el centro de rigidez concuerdan, por lo que no existe excentricidad para que se genere un momento torsor en la estructura.

Tabla 2: Resultados entre Shell y Membrana y Diafragma rígido y flexible para una relación en planta de 1

	Relación en planta de 1			
	Diafragma rígido		Diafragma flexible	
	Membrana	Shell	Membrana	Shell
Masa (t-s <sup>2</sup> /m)	46,146	46,146	46,146	46,146
Periodo fundamental (s)	0,193	0,178	0,193	0,178
Masa participante modo 1 (X)	0,813	0,982	0,791	0,996
Masa participante modo 2 (Y)	0,813	0,982	0,791	0,996
Masa participante modo 3 (Z)	1,000	1,000	1,000	1,000
Cortante basal (kN)	197,478	197,478	197,478	197,478
Deriva de piso en X en CM (%)	0,138	0,118	0,138	0,118
Momento sísmico en vigas (kN-m)	48,569	37,523	48,569	37,516
Momento sísmico en columnas (kN-m)	96,983	89,792	96,983	89,789
Cortante sísmico en vigas (kN)	12,781	15,163	12,781	15,158
Cortante sísmico en columnas (kN)	49,370	49,370	49,370	49,396
Axial sísmico en vigas (kN)	0,000	0,000	0,000	18,851
Axial sísmico en columnas (kN)	12,781	14,579	12,781	14,580
Deriva en X en columna C1 (%)	0,138	0,118	0,138	0,118
Deriva en X en columna C2 (%)	0,138	0,118	0,138	0,118
Deriva en X en columna C3 (%)	0,138	0,118	0,138	0,118
Deriva en X en columna C4 (%)	0,138	0,118	0,138	0,118
Desplazamiento en Z en CM (cm)	0,000	0,0095	0,000	0,0095

Tabla 3: Resultados entre Shell y Membrana y Diafragma rígido y flexible para una relación en planta de 2.

	Relación en planta de 2			
	Diafragma rígido		Diafragma flexible	
	Membrana	Shell	Membrana	Shell
Masa (t-s <sup>2</sup> /m)	87,165	87,165	87,165	87,165
Periodo fundamental (s)	0,217	0,197	0,217	0,198
Masa participante modo 1 (X)	1,000	1,000	1,000	1,000
Masa participante modo 2 (Y)	1,000	1,000	1,000	1,000
Masa participante modo 3 (Z)	1,000	1,000	1,000	1,000
Cortante basal (kN)	376,974	376,974	376,962	376,968
Deriva de piso en X en CM (%)	0,1176	0,1450	0,1177	0,1457
Momento sísmico en vigas P1 (kN-m)	61,820	46,071	61,733	45,922
Momento sísmico en columnas P1 (kN-m)	123,423	110,456	123,240	110,135
Momento sísmico en vigas P2 (kN-m)	61,820	42,111	61,965	42,420
Momento sísmico en columnas P2 (kN-m)	123,423	116,479	123,788	117,076
Momento sísmico en vigas P3 (kN-m)	61,820	46,071	61,733	45,922
Momento sísmico en columnas P3 (kN-m)	123,423	110,456	123,240	110,135
Cortante sísmico en vigas P1 (kN-m)	16,266	18,660	16,246	18,591
Cortante sísmico en columnas P1 (kN-m)	62,829	60,769	62,731	60,594
Cortante sísmico en vigas P2 (kN-m)	16,266	21,436	16,306	21,543
Cortante sísmico en columnas P2 (kN-m)	62,829	66,950	63,024	67,296
Cortante sísmico en vigas P3 (kN-m)	16,266	18,660	16,246	18,591
Cortante sísmico en columnas P3 (kN-m)	62,829	60,769	62,731	60,594
Axial sísmico en vigas P1 (kN-m)	0,000	0,000	0,000	25,262
Axial sísmico en columnas P1 (kN-m)	16,266	17,328	16,262	17,322
Axial sísmico en vigas P2 (kN-m)	0,000	0,000	0,000	17,270
Axial sísmico en columnas P2 (kN-m)	16,266	17,328	16,275	22,383
Axial sísmico en vigas P3 (kN-m)	0,000	0,000	0,000	25,262
Axial sísmico en columnas P3 (kN-m)	16,266	17,328	16,262	17,322
Deriva en X en columna C1 (%)	0,1760	0,1450	0,1757	0,1445
Deriva en X en columna C2 (%)	0,1760	0,1450	0,1757	0,1445
Deriva en X en columna C3 (%)	0,1760	0,1450	0,1765	0,1457
Deriva en X en columna C4 (%)	0,1760	0,1450	0,1765	0,1457
Deriva en X en columna C5 (%)	0,1760	0,1450	0,1757	0,1445
Deriva en X en columna C6 (%)	0,1760	0,1450	0,1757	0,1445
Desplazamiento en Z en CM (cm)	0,0000	0,0196	0,0000	0,0197

Tabla 4: Resultados entre Shell y Membrana y Diafragma rígido y flexible para una relación en planta de 4.

	Relación en planta de 4			
	Diafragma rígido		Diafragma flexible	
	Membrana	Shell	Membrana	Shell
Masa (t-s <sup>2</sup> /m)	169,202	169,202	169,202	169,202
Periodo fundamental (s)	0,235	0,211	0,236	0,211
Masa participante modo 1 (X)	1,000	1,000	1,000	1,000
Masa participante modo 2 (Y)	1,000	1,000	1,000	1,000
Masa participante modo 3 (Z)	1,000	1,000	1,000	1,000
Cortante basal (kN)	735,965	735,965	735,850	735,822
Deriva de piso en X en CM (%)	0,2061	0,1654	0,2090	0,1683
Momento sísmico en vigas P1 (kN-m)	72,404	52,559	71,470	51,506
Momento sísmico en columnas P1 (kN-m)	144,575	126,001	145,543	123,588
Momento sísmico en vigas P2 (kN-m)	72,404	47,993	72,821	48,358
Momento sísmico en columnas P2 (kN-m)	144,575	132,928	145,505	133,971
Momento sísmico en vigas P3 (kN-m)	72,404	47,940	73,382	48,786
Momento sísmico en columnas P3 (kN-m)	144,575	132,980	146,667	135,351
Momento sísmico en vigas P4 (kN-m)	72,404	47,993	72,821	48,358
Momento sísmico en columnas P4 (kN-m)	144,575	132,928	145,505	133,971
Momento sísmico en vigas P5 (kN-m)	72,404	52,559	71,470	51,506
Momento sísmico en columnas P5 (kN-m)	144,575	126,001	145,543	123,588
Cortante sísmico en vigas P1 (kN-m)	19,054	21,291	18,808	20,835
Cortante sísmico en columnas P1 (kN-m)	73,597	69,320	72,535	67,998
Cortante sísmico en vigas P2 (kN-m)	19,054	24,453	19,163	24,638
Cortante sísmico en columnas P2 (kN-m)	73,597	76,429	74,086	77,032
Cortante sísmico en vigas P3 (kN-m)	19,054	24,439	19,311	24,871
Cortante sísmico en columnas P3 (kN-m)	73,597	76,483	74,684	77,850
Cortante sísmico en vigas P4 (kN-m)	19,054	24,453	19,163	24,638
Cortante sísmico en columnas P4 (kN-m)	73,597	76,429	74,086	77,032
Cortante sísmico en vigas P5 (kN-m)	19,054	21,291	18,808	20,835
Cortante sísmico en columnas P5 (kN-m)	73,597	69,320	72,535	67,998
Axial sísmico en vigas P1 (kN-m)	0,000	0,000	0,000	29,525
Axial sísmico en columnas P1 (kN-m)	19,054	19,819	18,949	19,636
Axial sísmico en vigas P2 (kN-m)	0,000	0,000	0,000	21,438
Axial sísmico en columnas P2 (kN-m)	19,054	24,822	19,074	24,861
Axial sísmico en vigas P3 (kN-m)	0,000	0,000	0,000	22,137
Axial sísmico en columnas P3 (kN-m)	19,054	23,997	19,223	24,323
Axial sísmico en vigas P4 (kN-m)	0,000	0,000	0,000	21,438



Axial sísmico en columnas P4 (kN-m)	19,054	24,822	19,074	24,861
Axial sísmico en vigas P5(kN-m)	0,000	0,000	0,000	29,525
Axial sísmico en columnas P5 (kN-m)	19,054	19,819	18,949	19,636
Deriva en X en columna C1 (%)	0,2061	0,1654	0,2033	0,1622
Deriva en X en columna C2 (%)	0,2061	0,1654	0,2033	0,1622
Deriva en X en columna C3 (%)	0,2061	0,1654	0,2074	0,1666
Deriva en X en columna C4 (%)	0,2061	0,1654	0,2074	0,1666
Deriva en X en columna C5 (%)	0,2061	0,1654	0,2090	0,1683
Deriva en X en columna C6 (%)	0,2061	0,1654	0,2090	0,1683
Deriva en X en columna C7 (%)	0,2061	0,1654	0,2074	0,1666
Deriva en X en columna C8 (%)	0,2061	0,1654	0,2074	0,1666
Deriva en X en columna C9 (%)	0,2061	0,1654	0,2033	0,1622
Deriva en X en columna C10 (%)	0,2061	0,1654	0,2033	0,1622
Desplazamiento en Z en CM (cm)	0,000	0,0223	0,0000	0,0226

La nomenclatura usada en las siguientes figuras es DR: Diafragma rígido, DF: Diafragma flexible, S: Shell y M: Membrana.

Figura 25: Deriva en columnas para R=1

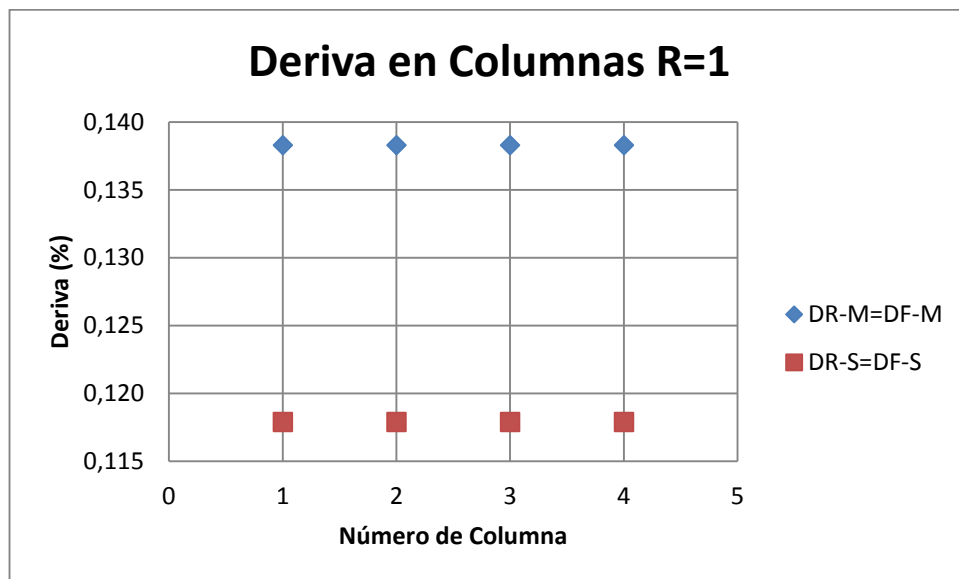


Figura 26: Deriva en columnas para R=2

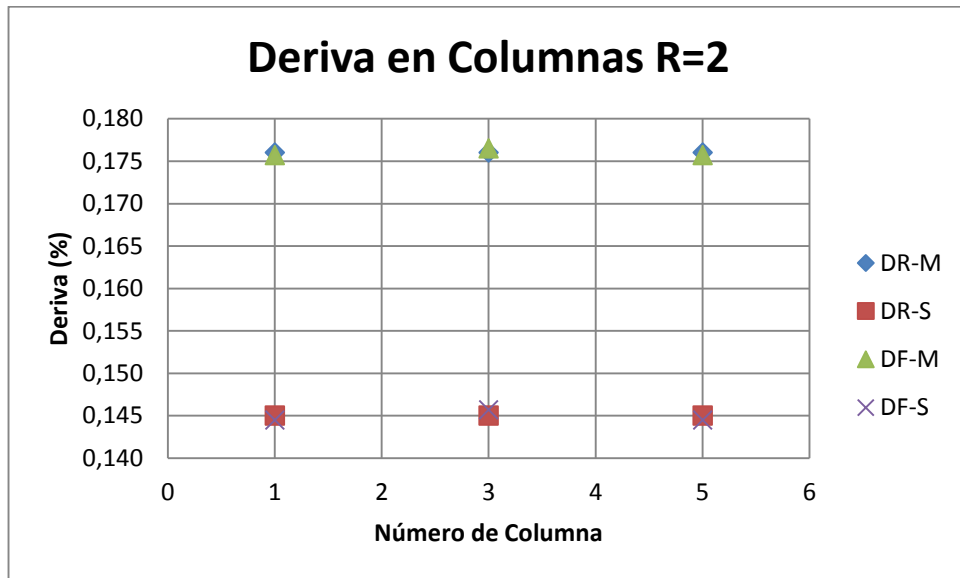


Figura 27: Distribución de cargas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=2

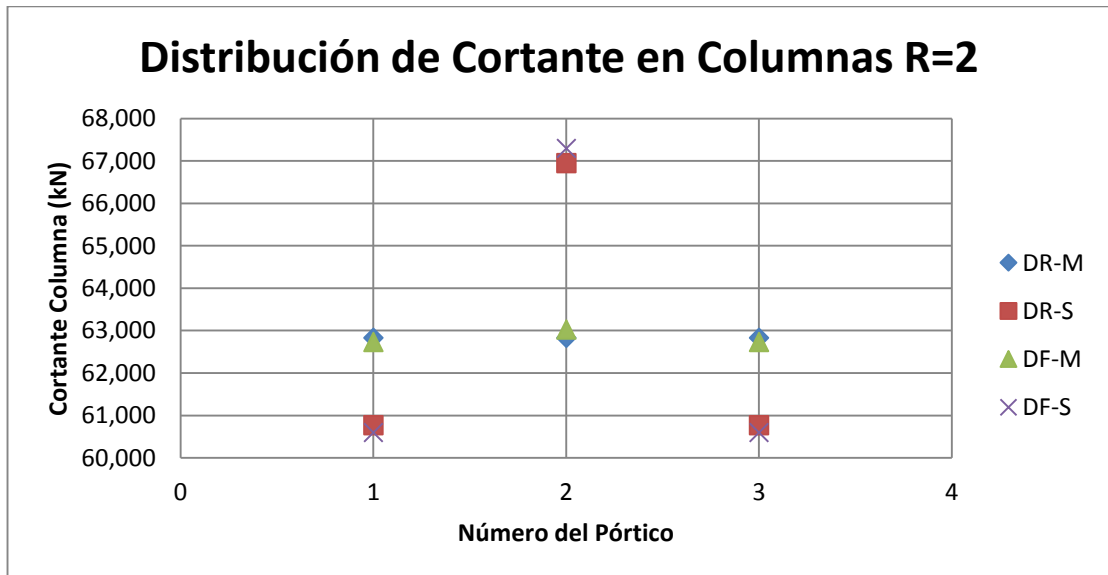


Figura 28: Momentos internos debido a fuerzas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=2

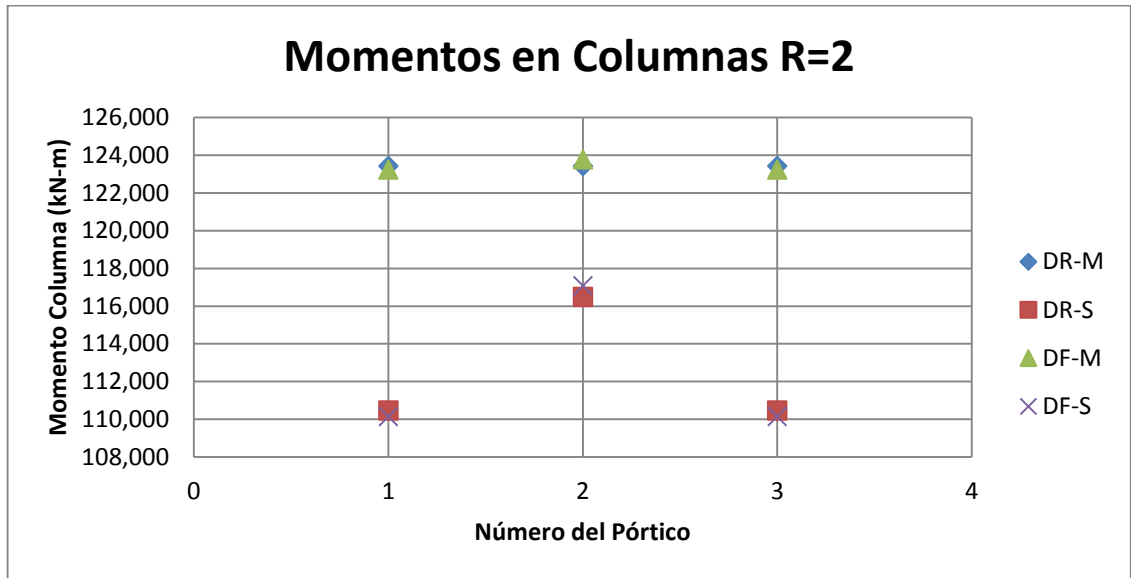


Figura 29: Fuerzas axiales debido a cargas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=2

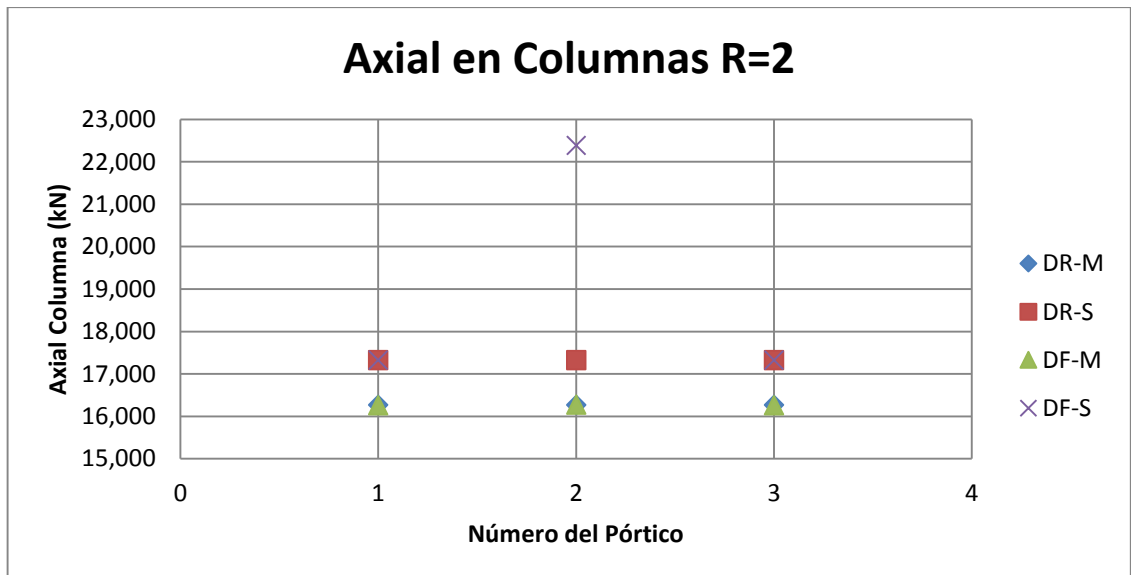


Figura 30: Fuerzas cortantes debido a cargas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=2

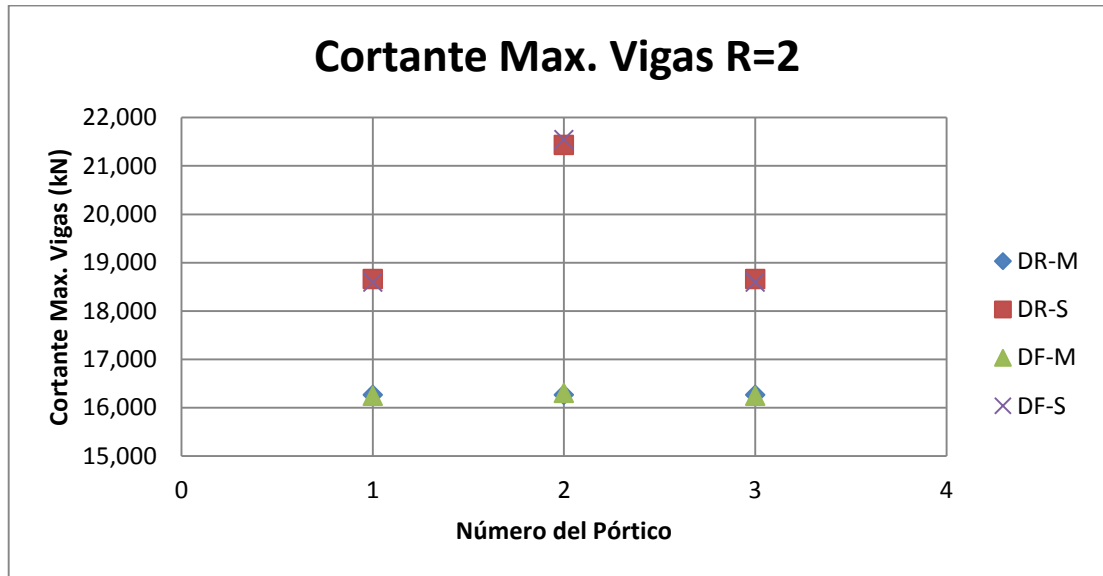


Figura 31: Momentos debido a fuerzas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=2

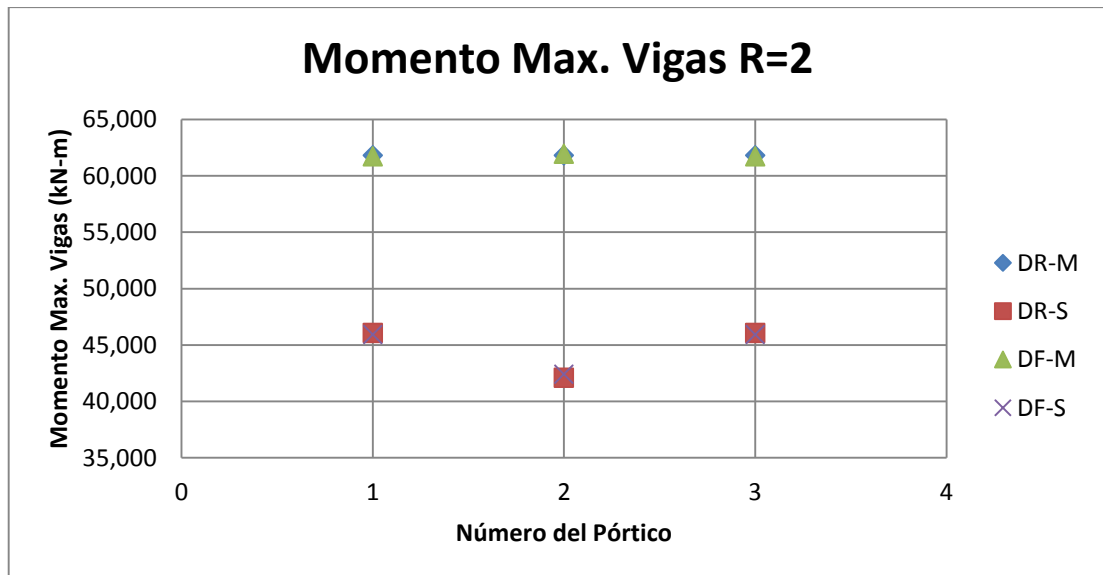


Figura 32: Fuerzas axiales debido a cargas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=2

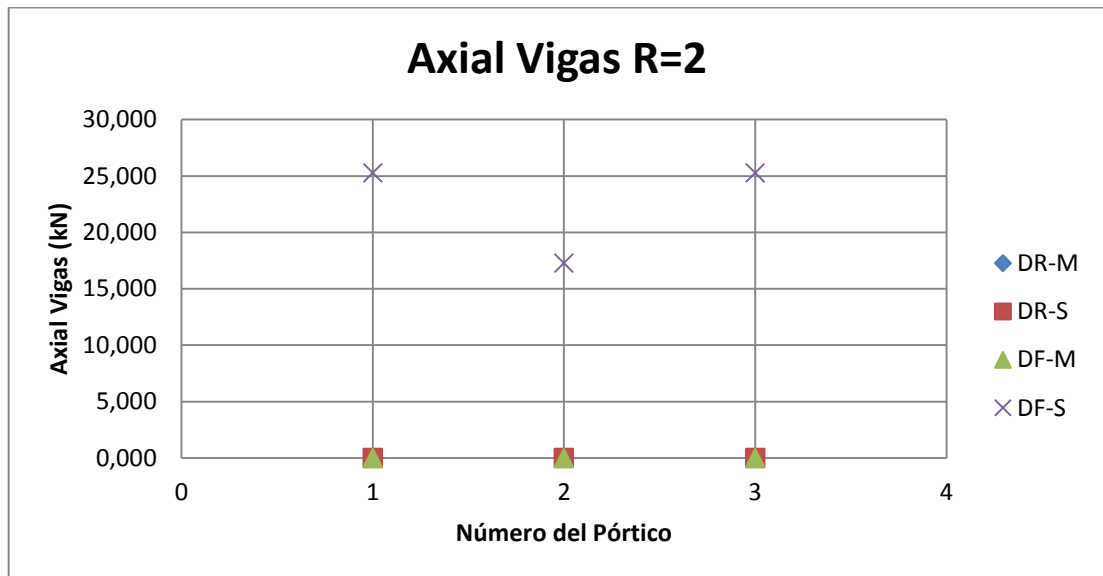


Figura 33: Deriva en columnas para R=4

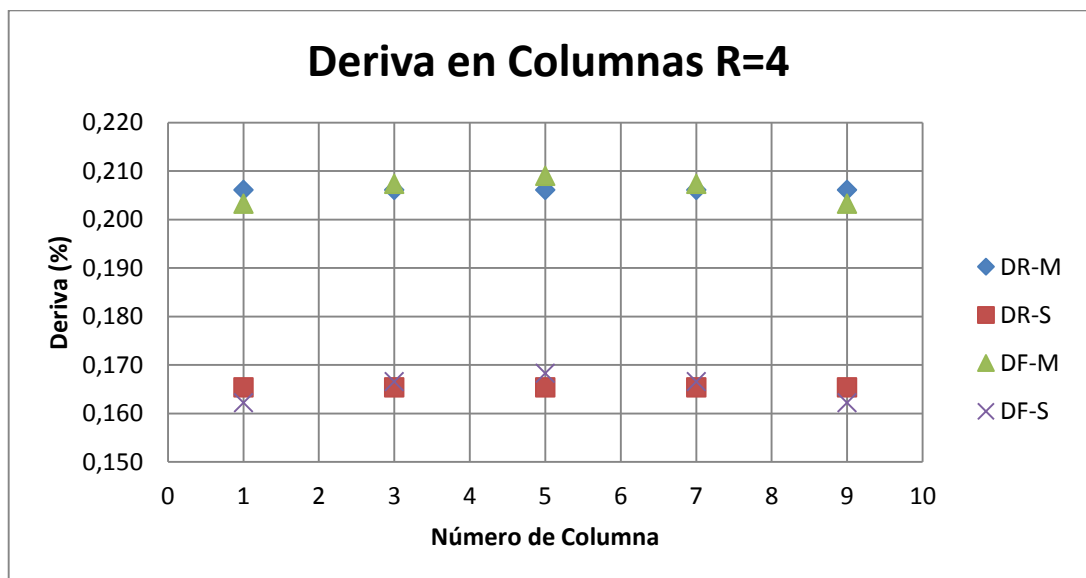


Figura 34: Distribución de cargas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=4

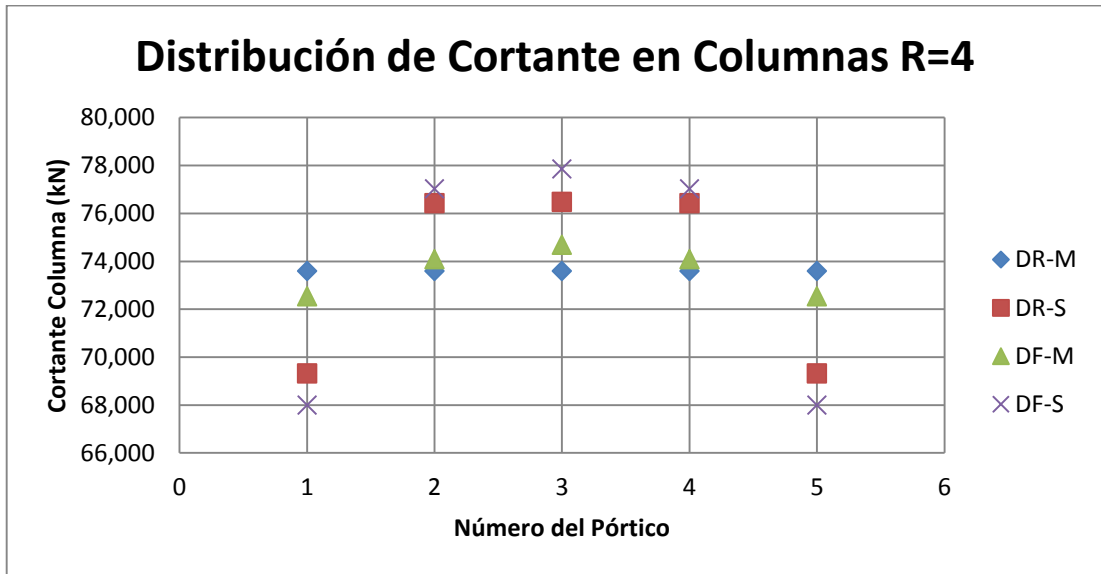


Figura 35: Momentos internos debido a fuerzas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=4

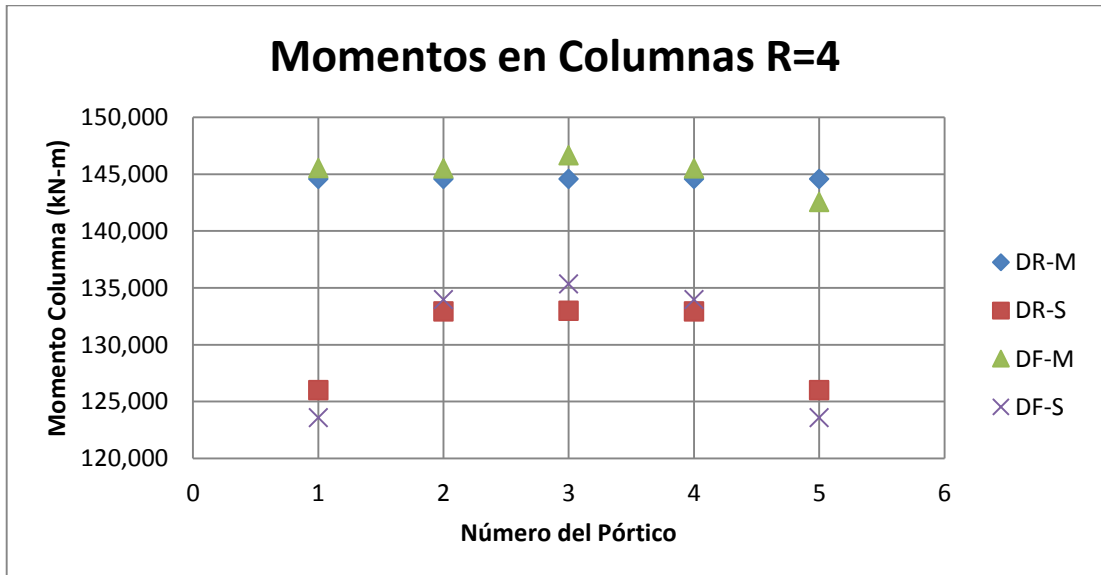


Figura 36: Fuerzas axiales debido a cargas laterales en una de las columnas perteneciente al Pórtico i, para R=4

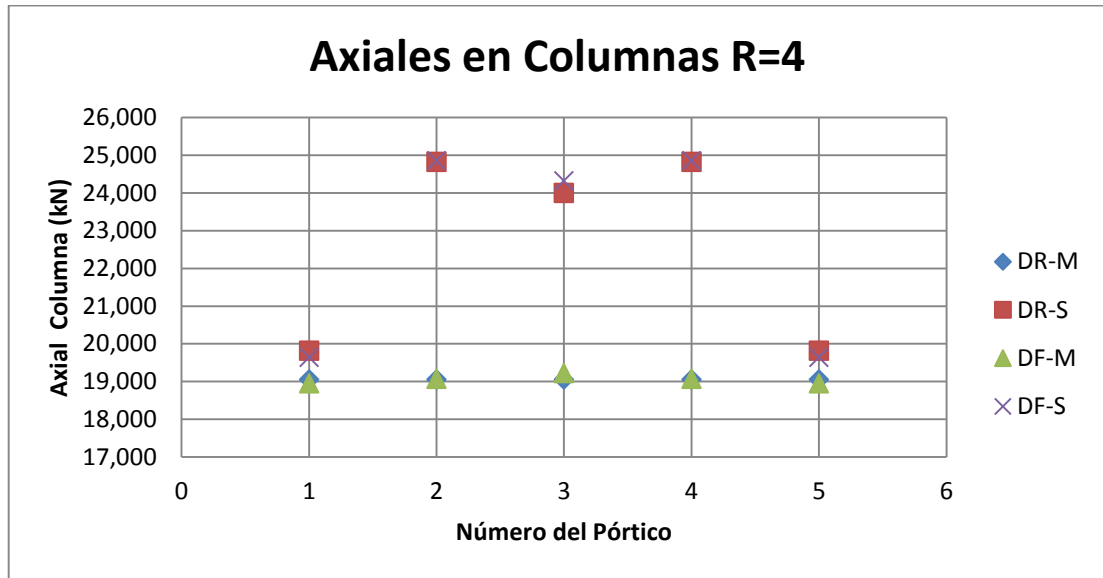


Figura 37: Fuerzas cortantes debido a cargas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=4

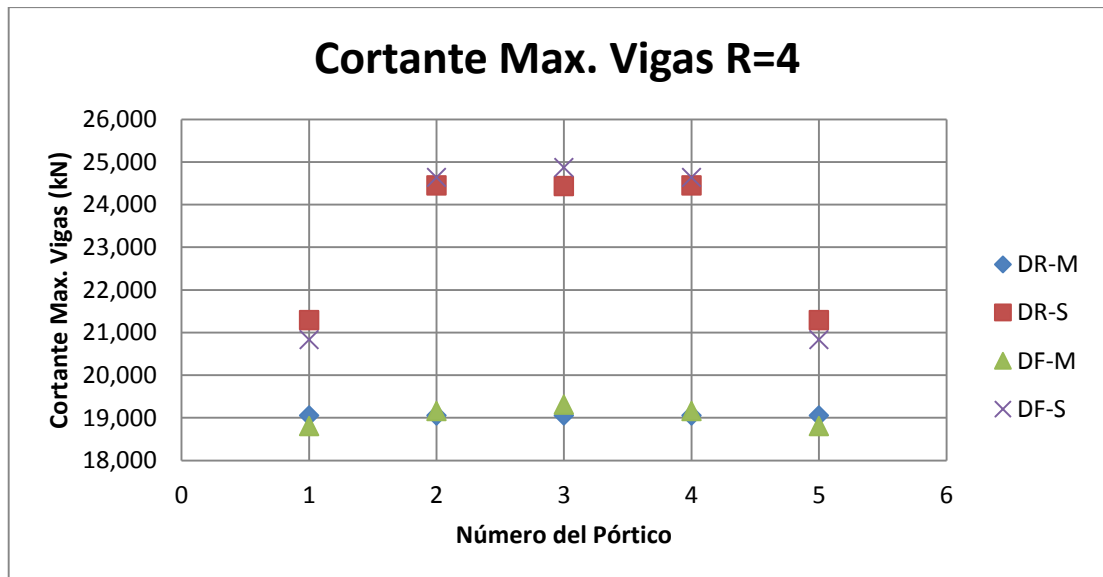


Figura 38: Momentos debido a fuerzas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=4

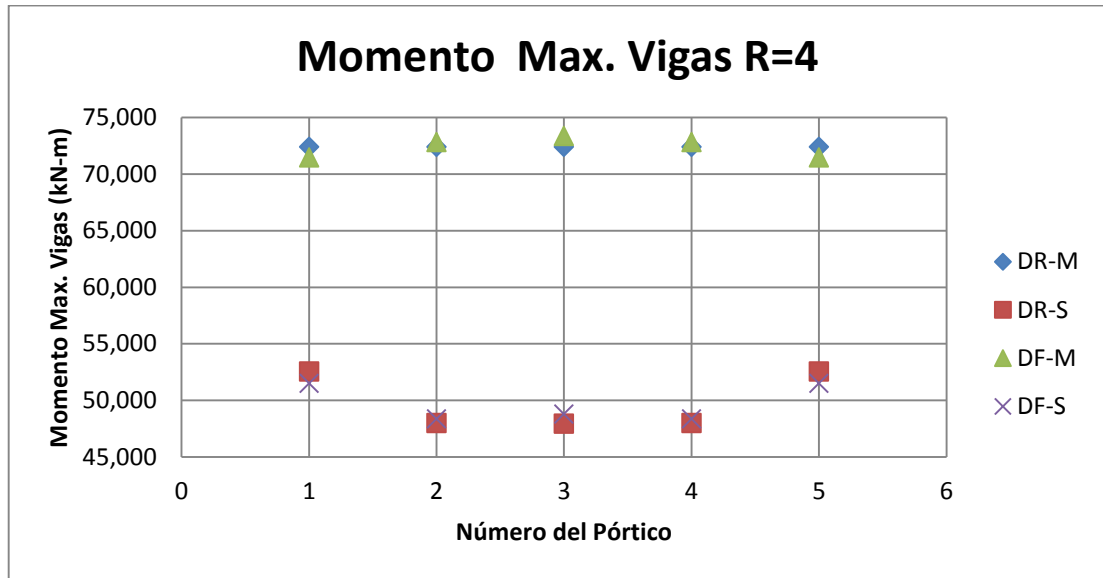
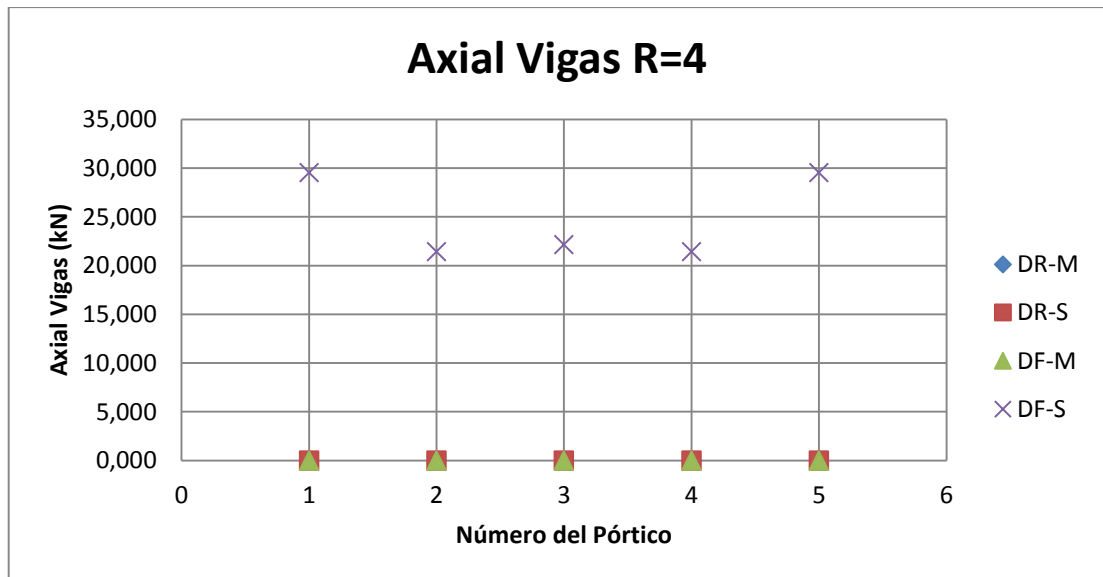


Figura 39: Fuerzas axiales debido a cargas laterales en la viga perteneciente al Pórtico i, para R=4





Es importante recalcar que para todos los casos analizados la suma del cortante en cada uno de los pórticos es igual al cortante basal total de la estructura, lo cual confirma que la estructura se encuentra en equilibrio y que el 100% de la carga está siendo distribuida entre los diferentes elementos.

Según las definiciones dadas anteriormente, un diafragma rígido sería equivalente, por no llamarlo igual en ciertos aspectos, que una losa tipo membrana. No obstante, un diafragma flexible sería semejante a una losa tipo shell. Utilizar combinaciones como DR-S y DF-M sería erróneo desde el punto de vista matemático y matricial, puesto que una propiedad restringe determinados grados de libertad mientras que la otra los libera.

Para los modelos con relación en planta de 2, los cuales según la literatura existente se debería considerar como un diafragma rígido, al asignársele propiedades de un diafragma flexible, la distribución de cargas debería ser proporcional a la rigidez de los elementos, lo cual no se evidenció en los modelos realizados.

De las figuras anteriores es relevante recalcar la distribución de cortante en columnas para  $R=2$  y  $R=4$ . Según los resultados de la modelación y las definiciones de un diafragma rígido y flexible, el modelo que cumple satisfactoriamente con la descripción de un diafragma rígido es DR-M, para los otros 3 modelos, sin importar las asignaciones dadas, se realiza una distribución de fuerzas laterales similar a lo que un diafragma flexible produciría. Pareciera ser que el programa de diseño ETABS, no realiza adecuadamente la distribución de fuerzas cuando se asigna un diafragma rígido a una losa tipo Shell. La tipología de modelos definida como diafragma rígido cumple con todos los criterios reportados en la literatura como lo son cero deformaciones por fuera de su plano, lo que lleva solo a desplazamientos en planta y giros alrededor del eje Z, distribuciones de cargas laterales en proporción a la rigidez de los elementos verticales, entre otros.

En general, las diferencias entre la distribución del cortante considerando un diafragma flexible se evidencia en los pórticos intermedios con diferencias de alrededor de 5% para los casos analizados. Se observa que para los diafragmas flexibles se genera una distribución parabólica de las fuerzas laterales a los diferentes elementos pertenecientes al sistema de resistencia lateral.

Igualmente es importante resaltar que existe una dualidad entre los conceptos mencionados anteriormente. Un diafragma rígido aporta rigidez a la estructura por lo que, en este aspecto, sería comparable con una losa tipo Shell, sin embargo en los otros aspectos como en deformaciones por fuera y en el plano sería comparable a una losa tipo membrana. Por lo tanto, dichos conceptos deben entenderse de forma separada, el tipo de diafragma ese refiere a la rigidez y capacidad de la losa para distribuir cargas laterales, influye en la distribución de las mismas a los elementos verticales y en la respuesta sísmica de la estructura, mientras que la tipología de losa Shell o membrana se refiere al método matemático para distribuir cargas gravitacionales e influye en la distribución de las mismas y en el diseño de los elementos pertenecientes al sistema de resistencia lateral debido a que su rigidez por fuera del plano puede arriostrar dichos elementos. Se debe tener coherencia en su uso en un diseño estructural.

## 7. DISEÑO DEL DIAFRAGMA ANTE CARGAS LATERALES

Las losas son elementos estructurales de suma importancia para los sistemas de resistencia sísmica, puesto que son las encargadas de distribuir las cargas inerciales a los diferentes elementos verticales que las llevan finalmente a la fundación. Adicionalmente, tienen como función unir todos los elementos verticales, generando estabilidad tanto en el rango elástico como inelástico y una distribución de fuerzas adecuadas entre ellos.

El International Building Code, comenta que las losas sean diseñadas para transferir las cargas laterales a los elementos verticales pero que no hagan parte del sistema de resistencia sísmica para los nuevos edificios que pertenezcan a las categorías de diseño B, C, D, E o F. Para el caso colombiano dichas categorías son equivalentes a estructuras de disipación de energía moderada o especial, DMO y DES, respectivamente. El fin último del diseño es que el diafragma soporte adecuadamente las cargas laterales debido a las excitaciones sísmicas y que dichas cargas sean transmitidas a los elementos del sistema de resistencia sísmica de forma segura sin que éste haga parte de dicho sistema.

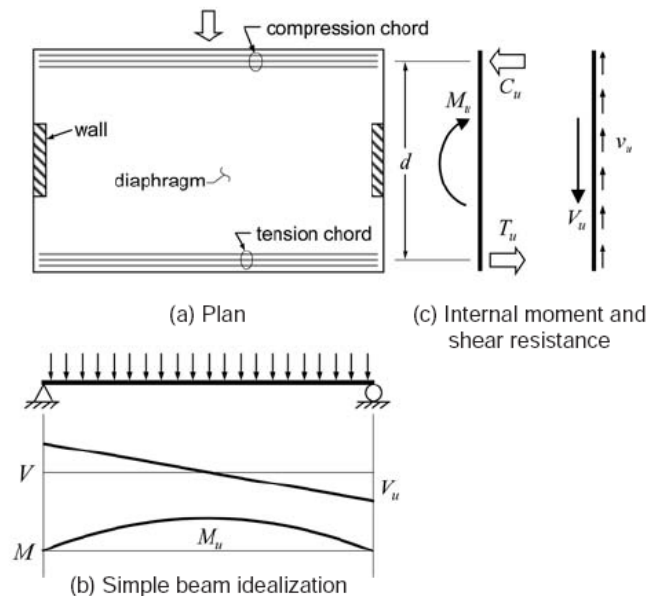
El capítulo C21.11 de la NSR-10 define los criterios ante los cuales se deben diseñar los diafragmas para que transmitan las cargas laterales a los elementos verticales, sin que los sistemas de piso hagan parte del sistema de resistencia lateral ante fuerzas sísmicas. Sin embargo, el capítulo menciona únicamente el diseño del diafragma para estructuras tipo DES pero aun así para estructuras DMO debería verificarse el comportamiento del diafragma ante cargas laterales (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

El ejemplo por excelencia para el diseño del diafragma consiste en losas planas soportadas en muros de cortante. Sin embargo, en la práctica local es común tener sistemas de losas aligeradas con casetones ante lo cual los elementos que se

encargan de conformar el diafragma en realidad son las viguetas o nervios, de igual modo, dichos elementos deben diseñarse para cumplir una adecuada transmisión de fuerzas. Este último aspecto del diseño del diafragma con sistemas de vigas y nervios, es un tema del que hay poca o ninguna información en la literatura existente y ante lo cual mayores investigaciones deben realizarse para determinar cuál es la mejor manera de analizarlo y para que futuras versiones de los códigos contemplen dicho tema.

Para el diseño deben considerarse dos aspectos fundamentales, refuerzo de las fibras superiores e inferiores y las barras colectoras. Los diafragmas pueden asemejarse a modelos de vigas apoyadas en los diferentes elementos verticales donde las fuerzas sísmicas están uniformemente distribuidas en uno de los extremos para diafragmas rígidos y con distribuciones aproximadamente parabólicas para diafragmas flexibles.

Figura 40: Idealización de fuerzas de compresión y tracción en los extremos de la losa con diafragma rígido

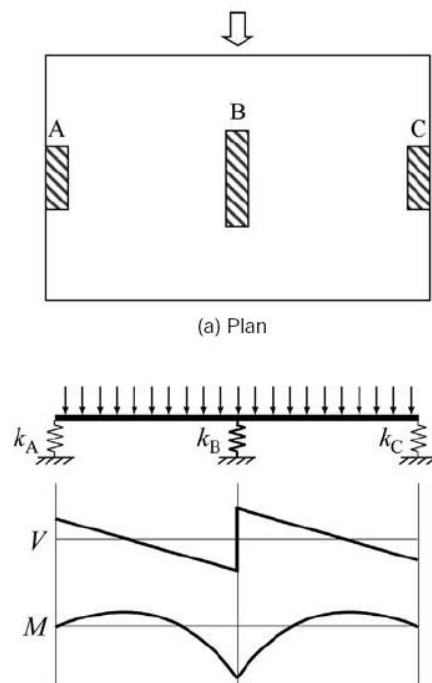


Fuente: (Moehle, Hooper, Kelly & Meyer, 2010)

Para la figura mostrada anteriormente, las cargas distribuidas generan cierta distribución de momentos que puede ser descompuesta en compresión y tracción en la zona superior e inferior, respectivamente. Se debe adicionar cierto refuerzo en dichas áreas para evitar una alta concentración de esfuerzos. Para la mayoría de las estructuras de viviendas que se construyen en Colombia, se tienen vigas en dichos extremos sometidos a compresión y tensión, por lo que se debe verificar la capacidad de dichas vigas, en conjunto con la losa superior y/o nervios para resistir dichas cargas (Moehle, 2015).

Existen otras aproximaciones para determinar las fuerzas de compresión y tracción en los bordes de la losa como lo son modelos de vigas apoyadas sobre resortes, los cuales deben tener en cuenta la rigidez de los diferentes elementos verticales que pertenecen al sistema de resistencia lateral y así generar una distribución de cargas no lineal.

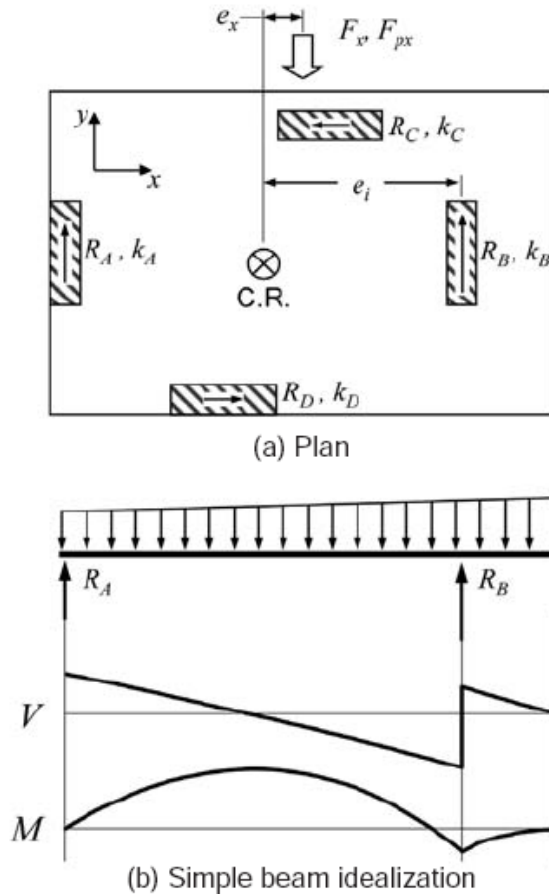
Figura 41: Idealización del diafragma apoyado en resortes



Fuente: (Moehle, Hooper, Kelly & Meyer, 2010)

Por otro lado, también existen modelos que consideran otros factores como la torsión, para lo cual reemplazan la carga uniformemente distribuida por una trapezoidal equivalente que incluye los efectos torsionales en el diafragma.

Figura 42: Carga trapezoidal para considerar los efectos torsionales

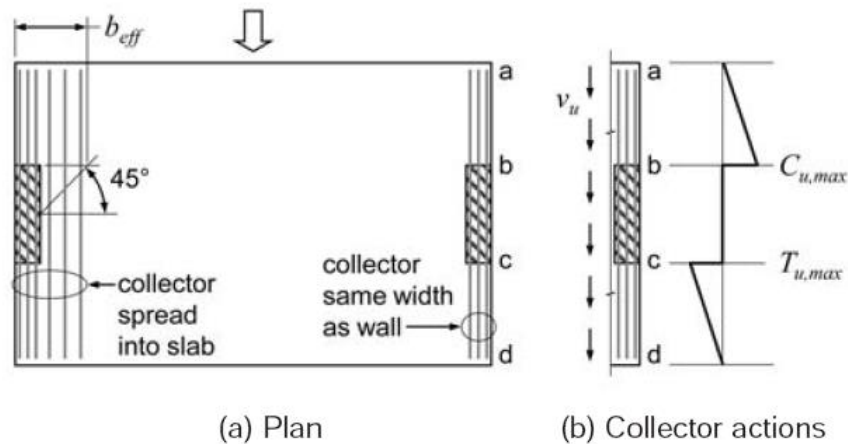


Fuente: (Moehle, Hooper, Kelly & Meyer, 2010)

Para edificaciones con geometrías de mayor complejidad donde la distribución de los diferentes elementos verticales sea asimétrica, se pueden realizar modelos de elementos finitos para determinar la cantidad de cortante que toma cada elemento y cuáles son los esfuerzos y fuerzas en los bordes del diafragma para así determinar adecuadamente la cantidad de refuerzo necesaria en dichos sitios.

La función principal de las barras colectoras es “arrastrar” efectivamente el cortante desde el borde del diafragma a los diferentes elementos verticales. Dependiendo del espesor de los elementos verticales, la disposición de las barras puede quedar fuera del elemento, existen ciertas recomendaciones para determinar un ancho efectivo para distribuir dicho refuerzo. Comúnmente, en otros países, se usan conectores mecánicos para evitar realizar traslapes dentro de la losa y evitar así la congestión de dicho refuerzo, además que en las zonas donde la losa y los diferentes elementos verticales se unen, generalmente, existe gran cantidad de refuerzo para atender otro tipo de solicitaciones.

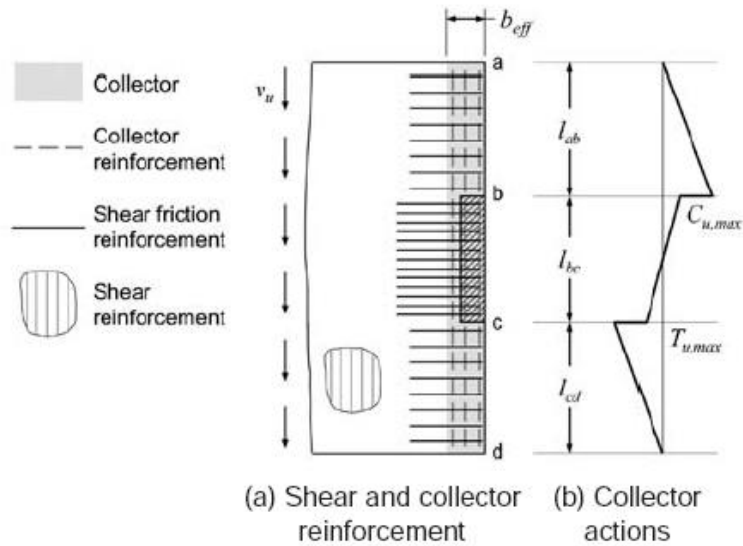
Figura 43: Barras colectoras en el diafragma



Fuente: (Moehle, Hooper, Kelly & Meyer, 2010)

Como se evidencia en la figura anterior, las barras colectoras sufren compresión y tracción en ciertas zonas y deben ser extendidas de extremo a extremo de la losa para garantizar una adecuada transferencia de cargas o hasta donde los esfuerzos a compresión lo permitan.

Figura 44: Barras colectoras y refuerzo a cortante en el diafragma



Fuente: (Moehle, Hooper, Kelly & Meyer, 2010)

Adicionalmente, cuando las barras colectoras se deben extender por fuera del ancho del elemento vertical, se deben colocar barras perpendiculares que trabajen a cortante por fricción para que transmitan finalmente la fuerza al elemento estructural.

Existen ciertos requisitos para la determinación de las fuerzas actuante, criterios de detallado de las barras, análisis de las penetraciones en la losa con modelos puntal-tensor, entre otros, los cuales pueden ser consultados en diversos libros y artículos donde se explica el diseño del diafragma.

Por otra parte, para el caso de la práctica colombiana es poco común, sin embargo, en otros países, aun con requerimientos sísmicos se usan diafragmas de transferencia. Esto significa que los elementos verticales que comienzan desde la fundación son interrumpidos en cierto nivel, donde por disposiciones arquitectónicas son reacomodados en planta. Lo anterior implica que dicha losa de transferencia



debe estar en la total capacidad de transferir tanto las cargas verticales como sísmicas, por ello es de esperarse que las dimensiones de dicha losa sea algo fuera de lo que se considera como convencional. En dicho caso las barras colectoras ya no tienen esta función, sino que deben repartir las cargas provenientes a los diferentes elementos, por lo que el nombre de distribuidoras es más adecuado.

## **8. LISTADO PARA LA INCLUSION DE LA LOSA EN EL SISTEMA DE RESISTENCIA LATERAL EN TERMINOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO**

Los primeros pasos para la inclusión de la losa en el sistema de resistencia lateral de una edificación, ya sea ante fuerzas de viento o sísmicas, consiste básicamente en:

- Selección del sistema de piso que se usará en el proyecto como: losa en deck metálico, losa nervada en dos direcciones, losa plana o losa aligerada en una dirección.
- Determinación del espesor requerido (13 cm como mínimo) para la losa o loseta. Dicho espesor consiste en una geometría mínima para que constructivamente exista el suficiente espacio para acomodar el refuerzo a tensión y cortante requerido.
- En modelos de análisis del sistema de resistencia lateral, incluir la losa como un elemento tipo Shell que aporte rigidez por fuera del plano. Como se mencionó anteriormente esto modifica la respuesta de la estructura ante cargas laterales, por lo cual el diseño debe de ser coherente con este aspecto.
- Verificación del tipo de diafragma que se debe usar, ya sea flexible o rígido, tomando en consideración los diferentes criterios de los códigos de diseño, así como las relaciones en planta mencionadas.
- Cálculo de las fuerzas que actúan en la conexión losa-columna o muro.
- Diseño a cortante de la losa en las conexiones con los diferentes elementos verticales. Adicionalmente se debe elegir alguno de los tipos de refuerzo a cortante para diseñarse de una manera adecuada siguiendo los criterios

establecidos en los reportes técnicos de los comités del ACI 352.1R-11 y 421.2R-5 (American Concrete Institute, 2010, 2012).

- Diseño del diafragma, independiente si se definió como rígido a flexible, para una transmisión adecuada de las fuerzas laterales a los demás elementos que hacen parte del sistema de resistencia lateral. Se deben seguir los lineamientos dados en el capítulo C21.11 de la NSR-10 y los documentos técnicos de apoyo mencionados en los comentarios. Para losas planas y en una dirección el método de diseño es claro, sin embargo para losas aligeradas en dos direcciones es de difícil aplicación por lo que estudios y ensayos posteriores se deben realizar.

## 9. CONCLUSIONES

- Existen implicaciones desde el punto de vista estructural en la modelación de la losa como elemento tipo Shell o membrana. Dichas implicaciones no deben ser excluidas del proceso de diseño y detallado de la losa.
- Asumir un comportamiento de membrana implica que toda la responsabilidad sísmica la deben asumir las vigas y/o los demás elementos verticales, lo cual puede generar grandes cuantías del refuerzo longitudinal para secciones insuficientes. Por otro lado, las losas con comportamiento de elemento tipo Shell, entran a participar a través de su rigidez fuera del plano en la transmisión de las cargas sísmicas, debido a ello, la rigidez de la estructura se aumenta, disminuyendo así las derivas.
- Si se usa una losa tipo Shell se podrían reconsiderar los tamaños de los demás elementos del sistema de resistencia sísmica, siempre y cuando se cumplan los límites de derivas establecidos.
- La interacción entre las conexiones losa-muros estructurales debe estudiarse más a fondo para determinar realmente cómo es su comportamiento, sin embargo, los diferentes tipos de refuerzo a cortante para las losas pueden ser usados.
- Para el caso de la práctica colombiana se deben reconsiderar los espesores de losa si se quiere usarse dentro del sistema lateral, para así llevar los diseños a estructuras en verdad construibles. El espesor mínimo de losa, según los ensayos registrados, es de 12.7 cm para que ésta puede entrar a ser parte del sistema de resistencia lateral. Se puede definir 13 cm como el espesor mínimo.

- Se debe tomar en cuenta el incremento en la masa de la estructura por el aumento del espesor de losa, pero por otro lado se deben realizar estudios para determinar qué factor de reducción de resistencia sísmica es el adecuado para este nuevo tipo de sistemas. Si al incluir la losa para disipar energía se encuentra que la reducción de la fuerza sísmica puede ser significativa, este tipo de sistemas se podría volver atractivo para la práctica profesional.
- Las diversas pruebas muestran que en realidad si existe una ductilidad considerable en las uniones losa columna, solo que éstas deben estar adecuadamente confinadas y detalladas.
- Los ensayos muestran que las conexiones losa-columna con algún tipo de refuerzo a cortante nunca fallarán ante las derivas de diseño permitidas por los diferentes códigos internacionales.
- Se debe ser consecuente a la hora del diseño y despiece con las suposiciones de modelación utilizadas desde la concepción inicial de la estructura para que así se diseñen estructuras seguras.
- Algunos programas de diseño convencionales no determinan adecuadamente las diferentes combinaciones de aplicarle a las losas, ya sean Shell o membrana, la condición de diafragma rígido o flexible.
- Para cada estructura en particular se debe considerar qué tipo de diafragma es el que se va a tener, puesto que aspectos de gran importancia como la distribución de las fuerzas laterales y la rigidez de la estructura se ven modificadas por lo anterior.

- Los diafragmas, tanto rígidos como flexibles, deben diseñarse para transmitir adecuadamente las cargas de la losa a los diferentes elementos verticales que hacen parte del sistema de resistencia lateral.
- Al final, los diferentes programas de diseño son herramientas de trabajo. Es responsabilidad del ingeniero estructural determinar hipótesis razonables de trabajo, que sean consecuentes con el diseño y detallado de la estructura para las cargas a las que se verán sometidos los diferentes elementos de la edificación.

## BIBLIOGRAFÍA

Al Harash, M. (2011). "Inelastic Seismic Response of Reinforced Concrete Buildings with Floor Diaphragm Openings". Tesis de doctorado para la Universidad de Washington en Saint Louis, Missouri.

Al Harash, M. & Panahshahi, N. (2012). "Inelastic Seismic Response of Reinforced Concrete Buildings with Symmetric and Unsymmetric Floor Diaphragm Openings". 15 WCEE, Lisboa.

American Concrete Institute (2002). 421.1R-99: "Shear Reinforcement for Slabs".

American Concrete Institute (2010). 421.2R-10: "Guide for Design Seismic of Punching Shear".

American Concrete Institute (2012). 352.1R-11: "Guide for Design of Slab-Column Connection in Monolithic Concrete Structures".

ASCE 7-10 (2010). "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures".

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS (2010). "Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10".

Barbosa, R. & Álvarez, J. (2017). "Modelación de Losas para el Diseño Sísmico de Edificios".

Barron, J. & Hueste, M. (2014), "Diaphragm Effects in Rectangular Reinforced Concrete Buildings", ACI Structural Journal, V. 101, No. 5, Sep-Oct.

Bazan, E. & Dyer, J. "Análisis de la Rigidez de Sistemas de Piso en su Plano". Instituto de Ingeniería UNAM.

Broms, C. (2007). "Flat Plates in Seismic Areas: Comparison of Shear Reinforcement Systems". En: ACI Structural Journal, V. 104, No. 6, Nov-Dec.

Carpenter, J., Kaar, P. & Corley, W. (1973). "Design of Ductile Flat Plate Structures to Resist Earthquakes".

Encina, J. (2011). "Modelación simplificada de edificios altos de planta libre incluyendo el efecto flexural de la losa". Tesis doctorado para la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Fernández, M., Mirzaei, Y. & Muttoni, A. (2013). "Behavior Post-Punching Behavior of Flat Slabs". En: ACI Structural Journal, V. 110, No. 5, Sep-Oct.

Fouad, K., Ali, Z. & Mustapha, R. (2012). "Structural Analyses with Flexibility Effect Of The Floor Slab". 15 WCEE, Lisboa.

García, L. (2006). "Diseño de Muros Estructurales de Concreto Reforzado". En: Noticreto, No.80. Ago-Sep-Oct.

Garcia, L. (2016). "Presentación sobre Diseño de Muros Estructurales".

Ju, S. & Lin, M. (1999). "Comparison of Building Analyses Assuming Rigid or Flexible Floors". En: Journal of Structural Engineering, V. 125, No. 1, January.

Kang, T. & Wallace, J. (2008). "Seismic Performance of Reinforced Concrete Slab-Column Connections with Thin Plate Stirrups". En: ACI Structural Journal, V. 105, No. 5, Sep-Oct.

Lips, S., Fernandez M. & Muttoni, A. (2012). "Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs". En: ACI Structural Journal, V. 109, No. 6, Nov-Dec.



Marzouk, H., Emam, M. & Sameh, M. (1998). "Effect of High-Strength Concrete Slab on Behavior of Slab-Column Connections". En: ACI Structural Journal, V. 95, No. 3, May-June.

Matzke, E., Lequesne, R., Parra, G. & Shield, C. (2015). "Behavior of Biaxially Loaded Slab-Column Connections with Shear Studs". En: ACI Structural Journal, V. 112, No. 3, May-June.

Moehle, J. (2015). "Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings". Chapter 15: Diaphragms and Collectors. McGrawHill.

Moehle, J., Hooper, J., Kelly, D. & Meyer, T. (2010). "Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Diaphragms, Chords, and Collectors, A Guide for Practicing Engineers", NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 3, August.

Mortazavi, P. (2014). "The Effect of Diaphragm Flexibility on the Seismic Response of One-Storey Steel Buildings". Thesis submitted to Ottawa-Carleton University, Canada.

Nakashima, M., Huang, T. & Lu, L. (1981). "Effect of Diaphragm Flexibility on Seismic Response of Building Structures".

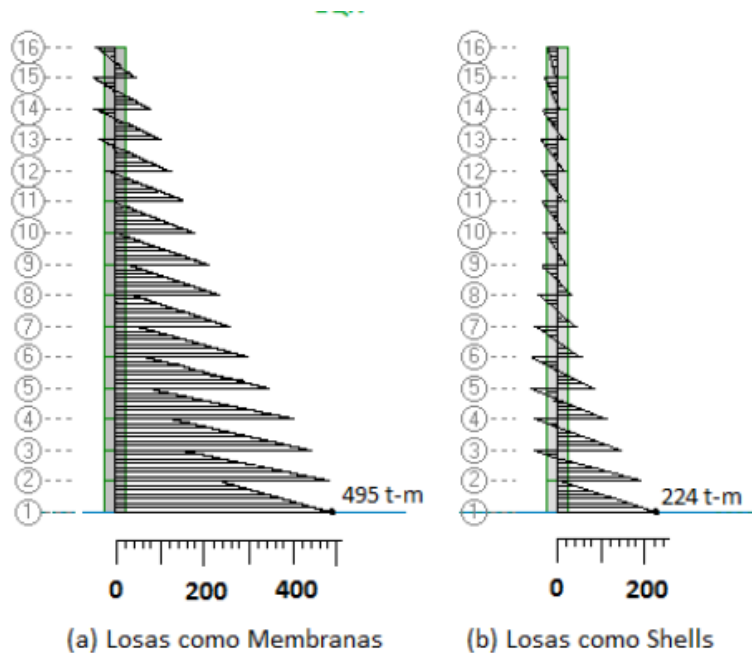
Tena, A., Chinchilla, K. y Juárez, G. (2013). "Evaluación de la flexibilidad elástica de sistemas de piso utilizados en edificios urbanos". En: Revista de Ingeniería Sísmica, No. 89, 135-166.

## **ANEXO A: COMPORTAMIENTO DE COLUMNA O MURO A PARTIR DE LA RIGIDEZ POR FUERA DEL PLANO DEL SISTEMA DE PISO EN LA MODELACION DE EDIFICACIONES**

Según se definió anteriormente, una columna es un elemento vertical el cual se encuentra arriostrado por las vigas que llegan al nudo y por lo tanto, ante cargas laterales, su diagrama de momentos flectores tiene punto de inflexión en el centro de la altura y pasa de signo positivo a negativo en cada uno de sus extremos. Por otro lado, un muro es un elemento vertical cuya rigidez es tan grande que los elementos horizontales a los que está conectado no generan arriostramiento significativo y su diagrama de momentos flectores corresponde a un voladizo con el mayor momento en la base del muro.

Pueden existir situaciones, como el ejemplo presentado en [26], donde una modelación que incluya la rigidez por fuera del plano de losa puede cambiar en comportamiento del diagrama de momentos de los elementos verticales, tal que, pueden pasar de catalogarse como muros a columnas. En la siguiente figura se muestra un caso en particular donde el comportamiento de los elementos verticales se puede ver modificado por la rigidez de la losa.

Figura 45: Diagrama de momentos flectores para un muro de cortante, a) losas sin rigidez por fuera de su plano, b) losas con rigidez por fuera de su plano



Fuente: (Barbosa & Alvarez, 2017)

Es evidente que esto conlleva a posibles deficiencias en el diseño de edificios de concreto, puesto que no puede ser concebible que para el cálculo de las derivas de entre piso se tenga un comportamiento de los elementos verticales como muros, pero el diseño se realice como columnas o viceversa.

Lo anterior confirma que el tipo de modelación que se le da a la losa es de suma importancia pues puede modificar el comportamiento estructural de los diferentes elementos que hacen parte del sistema de resistencia sísmica. Es primordial ser consistente en la modelación y posterior diseño de los elementos de concreto, puesto que la inclusión o no de la losa a través de su rigidez puede generar diseños inseguros ante las cargas sísmica exigidas por lo diferentes códigos de diseño sismo resistente.