

Ménsulas de extremo recortado en vigas de concreto

Juan Rentería Soto¹, Eduardo Aguilera González²,
César Dávalos Chargoy²

¹Estudiante PMIC

²Profesor de Tiempo Completo UACJ

Resumen

En esta investigación se pretende retardar el agrietamiento de las ménsulas en lo posible. El término ménsula, se da al elemento que se proyecta desde una columna o del extremo de una viga, es decir, que forma un voladizo, las ménsulas de extremo recortado en vigas de concreto se usan principalmente en puentes con vigas prefabricadas. Se experimenta con dos modelos diferentes puntal tensor. Se realizó el modelo de la ménsula en un software comercial de elementos finitos, discretizando la sección hasta lograr que los resultados tendieran a una convergencia. Tratándose de un modelo de ayuda para identificar los esfuerzos y no un modelo para el diseño, se planteó como único material el concreto, con la resistencia igual a la que se utilizaría en los especímenes

Palabras clave: Ménsulas, Puntal Tensor.

Introducción

Las ménsulas de extremo recortado comúnmente se analizan mediante el método puntal – tensor. Una ménsula produce una zona de discontinuidad en la distribución de esfuerzos hasta una distancia h ; donde h es la altura del elemento (Comite ACI 318, 2014). Las ménsulas de extremo recortado en vigas de concreto comúnmente tienen una relación claro peralte de alrededor de 1:1.

Las ménsulas de extremo recortado en vigas de concreto se usan principalmente en puentes con vigas prefabricadas. Un problema notable es el agrietamiento de las ménsulas a baja carga. El agrietamiento ocasiona corrosión del acero de refuerzo dada su exposición al medio ambiente. Los modelos de análisis para ménsulas predicen

razonablemente la resistencia más no el agrietamiento temprano.

En los modelos estudiados hasta ahora se ha avanzado en la descripción del comportamiento de las ménsulas en uniones viga-viga, y no es aplicable completamente la teoría de las uniones viga-columna debido a que el puntal diagonal que se forma en la discontinuidad de la viga, no cuenta con apoyo inferior como en el caso de las que se encuentran unidas a la columna donde el esfuerzo del puntal diagonal se transmite directamente a la columna.

En esta investigación se pretende retardar el agrietamiento de las ménsulas en lo posible. Se construyen 2 especímenes con las

dimensiones mostradas en la Figura 1. En los especímenes se utilizó concreto

$$f'_c = 280 \frac{kg}{cm^2} \text{ y refuerzo de acero corrugado}$$

$$f_y = 4200 \frac{kg}{cm^2}$$

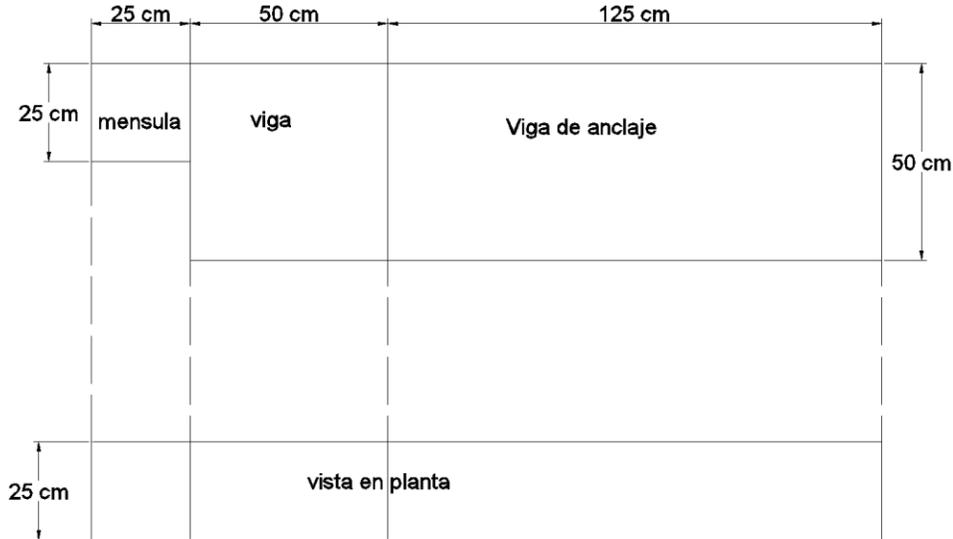


Figura 1 Dimensiones del espécimen

Se experimenta con dos modelos diferentes puntal tensor. En la Figura 2(a) se muestra un modelo puntal – tensor 1. El modelo puntal – tensor 1 es un modelo típico con el puntal 1 en la dirección 45°. En la Figura 2(b) se muestra un modelo puntal – tensor 2

que es alternativo. En el modelo puntal – tensor 2 asume el primer tensor (número 2) en la dirección de los esfuerzos principales y el primer puntal (número 1) con una ligera inclinación con la vertical.

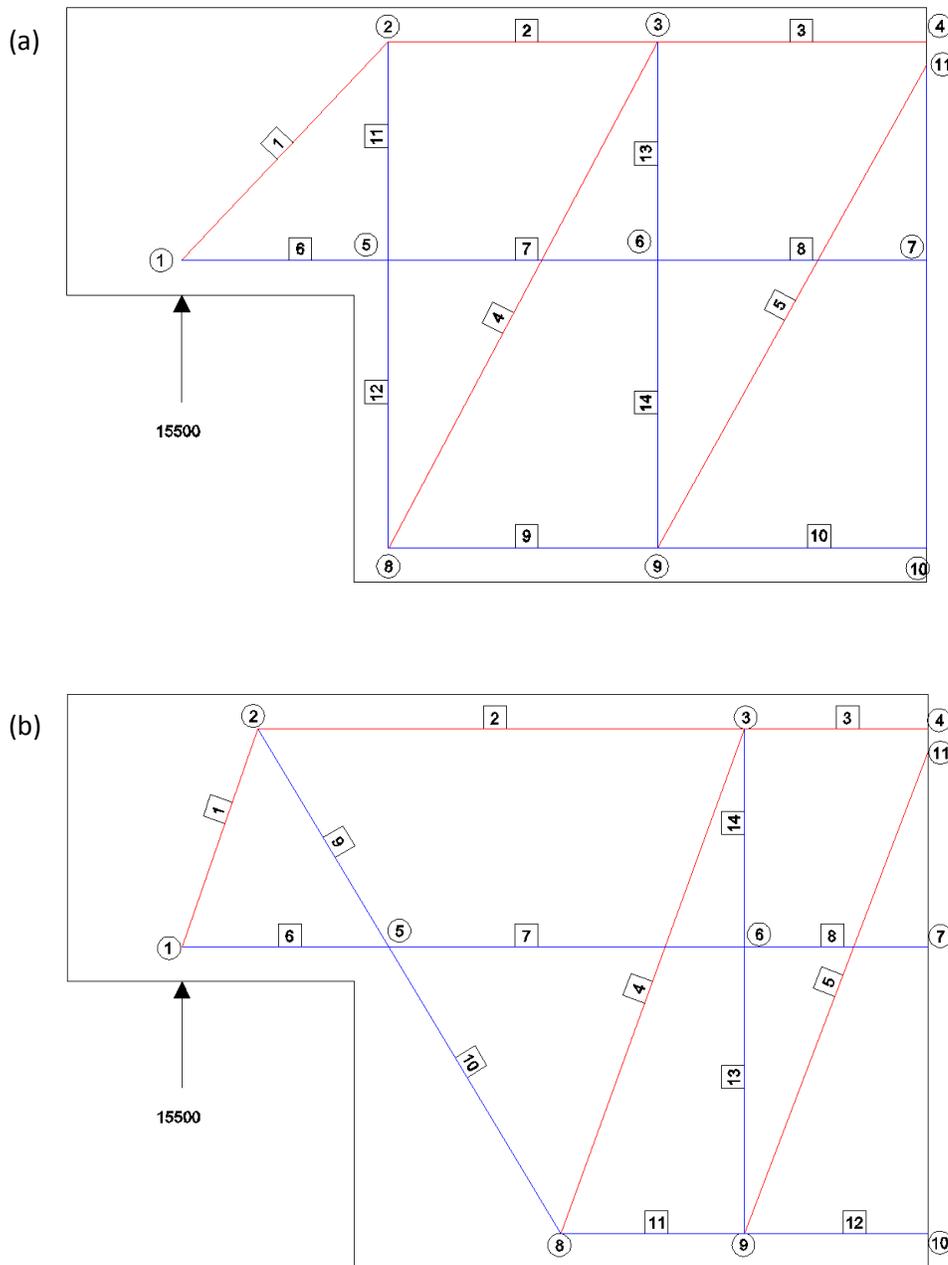


Figura 2 Modelo puntal-tensor: a) propuesta 1; b) propuesta 2.

Comportamiento y diseño en ménsulas de concreto

El término ménsula, se da al elemento que se proyecta desde una columna o del extremo de una viga, es decir, que forma un voladizo. Deben resistir fuerza cortante

acompañada de flexión. En elementos de concreto reforzado es necesario tener ductilidad para evitar que la fuerza cortante ocasione una falla frágil. Las ménsulas se diseñan principalmente para transmitir la reacción vertical V_u en el extremo de la viga cargada; pero a menos que se tomen

precauciones especiales para evitar las fuerzas horizontales que genera la contracción por fraguado, el flujo plástico o los cambios de temperatura, la ménsula también debe resistir una fuerza normal N_u .

En un estudio realizado por Ponce (2008) por medio de ensayos de especímenes en uniones viga columna, se identifican 6 principales mecanismos de falla que a continuación se describen:

1. Falla por flexión. La cedencia excesiva del refuerzo por flexión provoca que se aplaste el concreto en el extremo inferior de la ménsula. Las grietas se ensanchan y se forman en la parte superior de la ménsula.
2. Fisuración Diagonal. Se forman grietas en el puntal diagonal de compresión, debido a la compresión por cortante. Se forman después de que se forman las grietas de flexión.
3. Falla por cortante deslizante. Se forman grietas en la unión ménsula-viga debido a cortante por fricción, que puede llevar a la separación de la ménsula con la viga.
4. Falla por fisuración a lo largo del refuerzo a flexión mal anclado, cuando la carga se aplica muy cerca al extremo libre.
5. Aplastamiento del concreto en la zona de aplicación de la carga, debido a placas de apoyo muy pequeñas o flexibles.
6. Mecanismo de tensión horizontal, cuando se presenta la fuerza horizontal en combinación con la vertical. Se forman grietas verticales bajo la carga vertical, lo que puede provocar que se desprenda el

concreto en esa zona debido a la fuerza de tensión directa.

El procedimiento de diseño para ménsulas asume que el comportamiento se puede estudiar como armaduras o vigas aperaltadas con poca longitud de corte. El diseño busca impedir los modos de falla descritos anteriormente, y que se reducen a cuatro modos de falla potenciales:

1. Falla por cortante directo en la interface entre la ménsula y el elemento de apoyo.
2. Fluencia del elemento en tensión por momento y tensión directa.
3. Aplastamiento del puntal diagonal.
4. Falla por aplastamiento o por corte bajo el área cargada.

La sección de la cara del apoyo se considera como crítica en el diseño de ménsulas porque la carga puntual genera una concentración de esfuerzos. Esta sección debe diseñarse para resistir simultáneamente un esfuerzo cortante generado por V_u , una fuerza de tensión N_u y un momento de flexión, producido por estas fuerzas.

El refuerzo que debe tener una ménsula se compone de barras de acero que en conjunto con el concreto forman una armadura, en la que se deben incluir cuatro tipos de refuerzo (Mattock, 2012):

1. Refuerzo horizontal Asc — Refuerzo por flexión, para resistir el momento.
2. Refuerzo horizontal secundario Ah — Refuerzo para evitar la falla de corte directo y tensión diagonal, distribuido a $2/3$ del

peralte efectivo adyacente al refuerzo principal.

3. Refuerzo horizontal complementario An — Refuerzo por tensión, para resistir la tensión directa, este acero es adicional al de flexión horizontal.

4. Refuerzo vertical principal Av — Refuerzo al corte por tensión diagonal, para evitar fallas de tensión diagonal.

Método de Puntal y Tensor

Este método es la segunda opción que ofrece el ACI-318-14 para el diseño de ménsulas en vigas. Durante el dimensionamiento de las estructuras se debe tener especial cuidado en aquellas regiones en donde se presentan discontinuidades, tales como esquinas de marcos rígidos, ménsulas, apoyos en trabes, entre otras. El adecuado diseño de tales áreas es esencial para la integridad global del sistema estructural. En la práctica es común encontrarse con procedimientos de diseño basados en resultados de pruebas experimentales o reglas empíricas que suelen cubrir algunos casos de tales discontinuidades en los elementos.

Las estructuras de concreto reforzado soportan cargas a través de un campo de esfuerzos a compresión que se distribuyen e interconectan por medio de tensores. Estos tensores pueden ser barras de acero de refuerzo, tendones de pre-esfuerzo o campos de esfuerzos a tensión en el concreto. De ahí

el nombre de -Modelos Puntal Tensor|| o -Método del Puntal Tensor|| (MPT). En el MPT, los elementos se intersecan unos a otros; estas uniones son denominadas -nodos|| y son parte importante para detallado del modelo.

El procedimiento de diseño del modelo puntal tensor se resume en los siguientes puntos:

1. Definir y aislar las regiones-D
2. Calcular las fuerzas resultantes en las fronteras de cada región-D
3. Seleccionar un modelo de armadura para transmitir las fuerzas resultantes a través de la región-D. Los puntales y los tensores de la armadura se seleccionan de acuerdo a la distribución de esfuerzos a la que se encuentren sometido.
4. Los anchos efectivos de los puntales y los nodos se determinan de acuerdo a la resistencia del concreto.

Diseño del Experimento

Para plantear la armadura del modelo puntal tensor fue necesario identificar la dirección de los esfuerzos en la sección discontinua.

Se realizó el modelo de la ménsula en un software comercial de elementos finitos, discretizando la sección hasta lograr que los

resultados tendieran a una convergencia. Tratándose de un modelo de ayuda para identificar los esfuerzos y no un modelo para el diseño, se planteó como único material el concreto, con la resistencia igual a la que se utilizaría en los especímenes. En el análisis se consideró únicamente la carga aplicada de 15500 kg dividida en cargas puntuales aplicada en los nodos. Los

esfuerzos principales se pueden apreciar en la Figura 3. Los esfuerzos principales se obtuvieron mediante un análisis de elemento finito con una malla de 2.5cm x 2.5cm.

El modelo estudiado solo comprende la región denominada D. Por las dimensiones del elemento, los esfuerzos presentan una distribución no lineal como lo marcó la literatura.

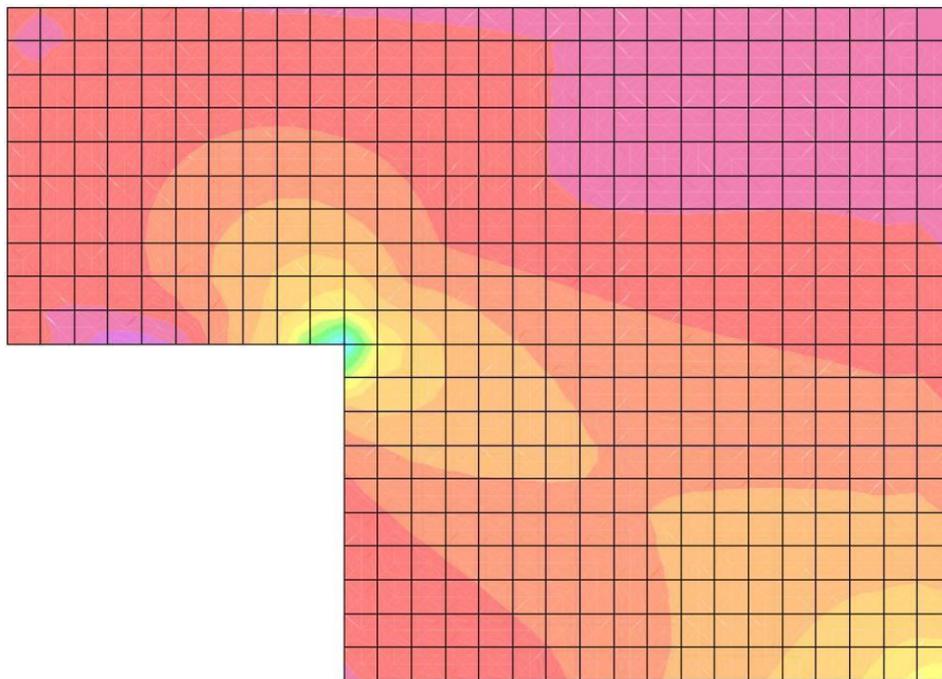


Figura 3 Esfuerzos en ménsula mediante elemento finito 2.5cm x 2.5cm

Instrumentación

Con base a los esfuerzos principales y la definición de los modelos mostrados en las

Figura 2(a) y (b) se establece la configuración del acero de refuerzo para cada uno de los especímenes, como se muestra en la Figura 4.

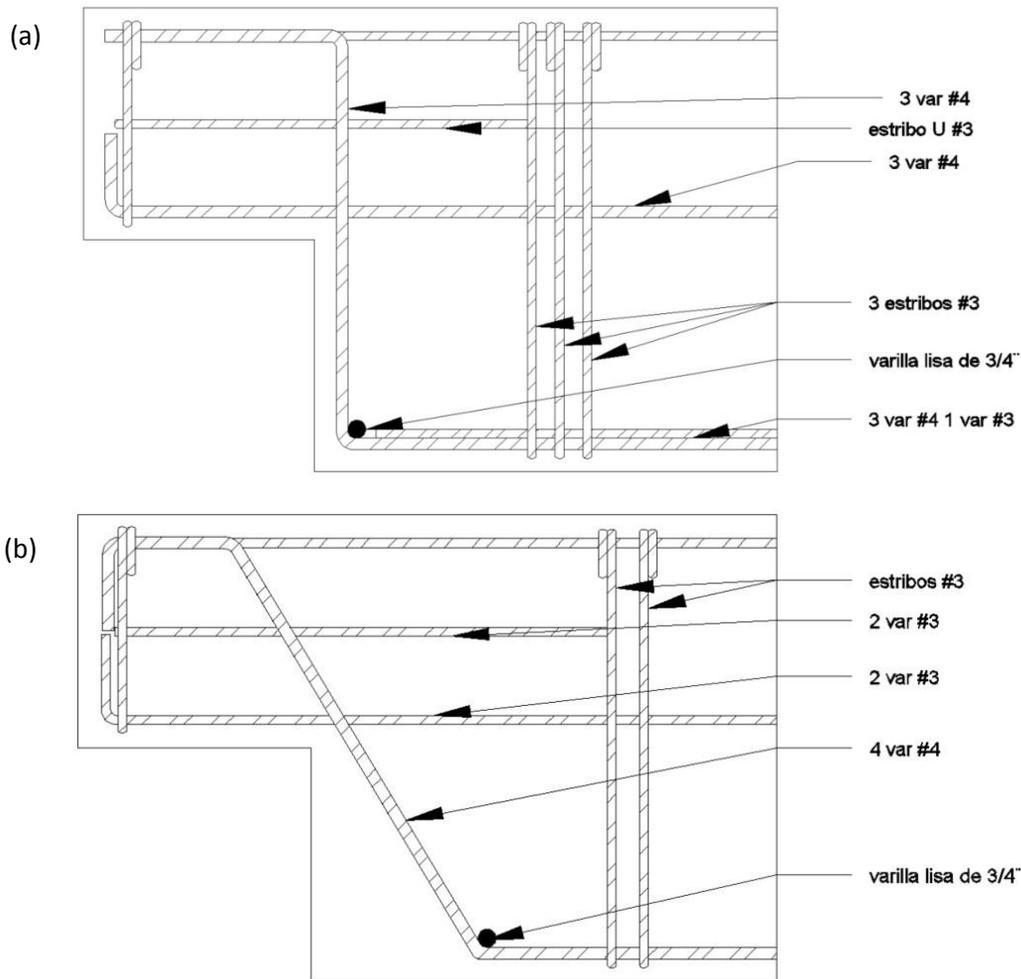


Figura 4 Configuración del acero de refuerzo para los especímenes: (a) modelo 1, (b) Modelo 2

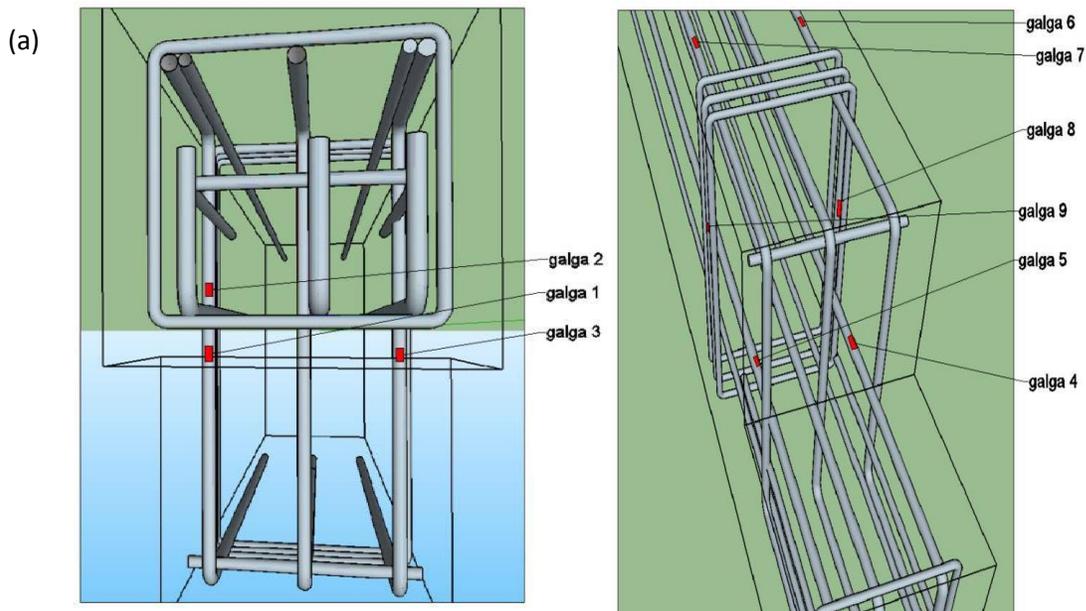
Para poder medir la deformación de las barras de acero se colocaron galgas extensométricas adheridas a las barras en las zonas donde era necesario conocer los esfuerzos, la posición específica de cada galga se presentan en las Figura 5(a) y (b). La numeración se dio como se colocaron en el espécimen, iniciando por el acero vertical, quedando las galgas 1, 2 y 3. Las galgas 4 y 5 se colocaron en cada extremo del acero por flexión en el extremo recortado. Las galgas 6 y 7 se situaron en el acero por flexión de la viga y por último las galgas 8 y 9 se colocaron en el refuerzo del tensor en

forma de estribos, colocándose de igual forma una galga en cada barra del extremo.

Para la colocación de las galgas de tomarán las consideraciones del fabricante que son, desbastar la barra hasta alcanzar una área lisa por medio de lija gruesa y después se pulieron lija fina para que se adhieran las galgas completamente, posteriormente se hizo un pulido químico con acetona para remover cualquier contaminación existente y proveer una superficie apta para que funcione el adhesivo. El siguiente paso fue colocar las galgas siguiendo las pautas que marca el fabricante, y colocando sobre estas

los recubrimientos necesarios, primero una protección contra la humedad, enseguida una protección contra golpes y por último la protección impermeabilizante. Las galgas de la 1 a la 3 se colocaron en la cara de la varilla más cercana hacia la cara frontal del elemento como se muestra en la Figura 5(a), las galgas de la 4 a la 7 se colocaron en la

cara de la varilla más cercana al extremo de flexión, en la Figura 5(a) se muestra la posición pero todo el armado se encuentra girado 180° para una mayor apreciación. Las últimas dos galgas se colocaron en posición hacia la cara exterior, se empleó la misma distribución para ambos modelos.



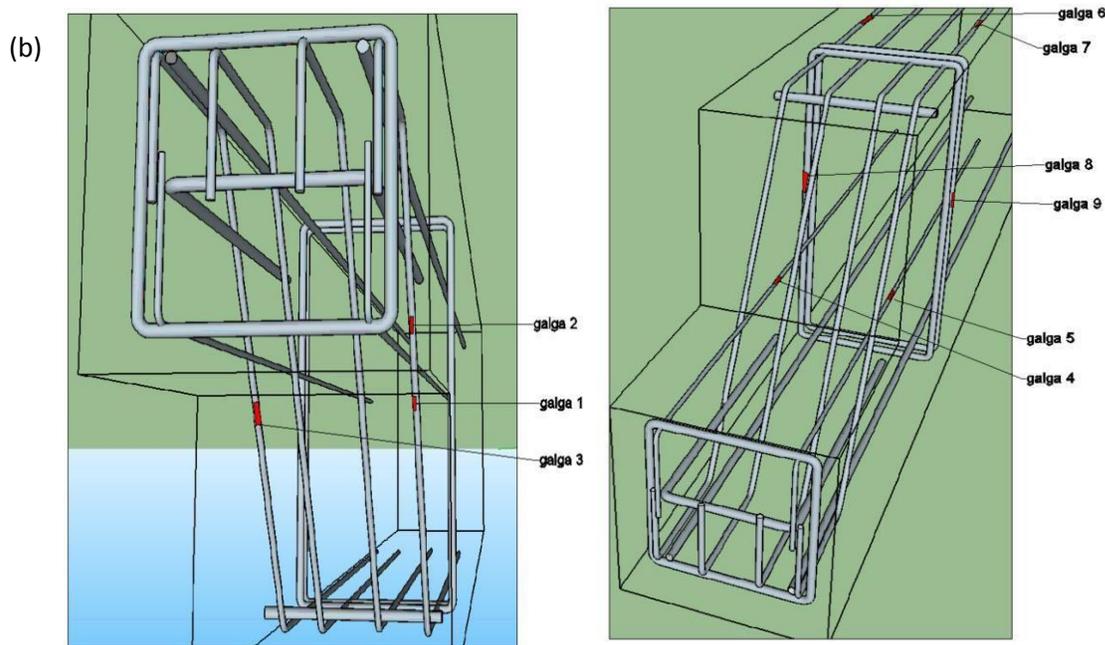


Figura 5. Colocación de galgas extensométricas: (a) modelo 1, (b) modelo 2

Resultados

A continuación se describirán los resultados de la experimentación. Como se comentó en un inicio la experimentación sólo contempla carga puntual monótona.

Modelo 1

La carga se aplicó al espécimen en incrementos de 1000 kg hasta llegar a los 4000 kg, a partir de ahí los incrementos fueron de 500 kg, hasta el final de la prueba.

Al aplicar la carga de 4000 kg apareció la primera grieta, desarrollándose en la esquina reentrante con una longitud aproximada de 7 cm y con un ángulo de 45° con respecto a la horizontal como se alcanza a apreciar en la Figura 6, en este momento el espécimen presentaba un desplazamiento de 0.368 mm. A partir de ese momento el concreto dejó de soportar las tensiones y la totalidad son absorbidas por el acero de refuerzo.

En la Figura 6 se presenta el patrón de agrietamiento hasta llegar al agrietamiento final que presentó el espécimen 1. Al aumentar 500 kg de carga, llegando a 4500 kg de carga apareció una segunda grieta, siendo una prolongación de la primera, siguiendo el mismo patrón de dirección. Al llegar a los 5000 kg apareció una grieta sumándose a la anterior con una longitud aproximada de 2.5 cm, la grieta 3 cambió el rumbo quedando una inclinación con respecto a la horizontal de 40° aproximadamente.

La grieta número 4 apareció a una carga de 5500 kg, en la zona inferior izquierda como se observa en la figura del patrón de agrietamiento, teniendo 90° con la horizontal y una longitud de 7.5 cm, registrando el acero de refuerzo de esa zona un esfuerzo de 482 kg. En ese momento se monitoreó un

desplazamiento del extremo de la ménsula de 1.185 mm.

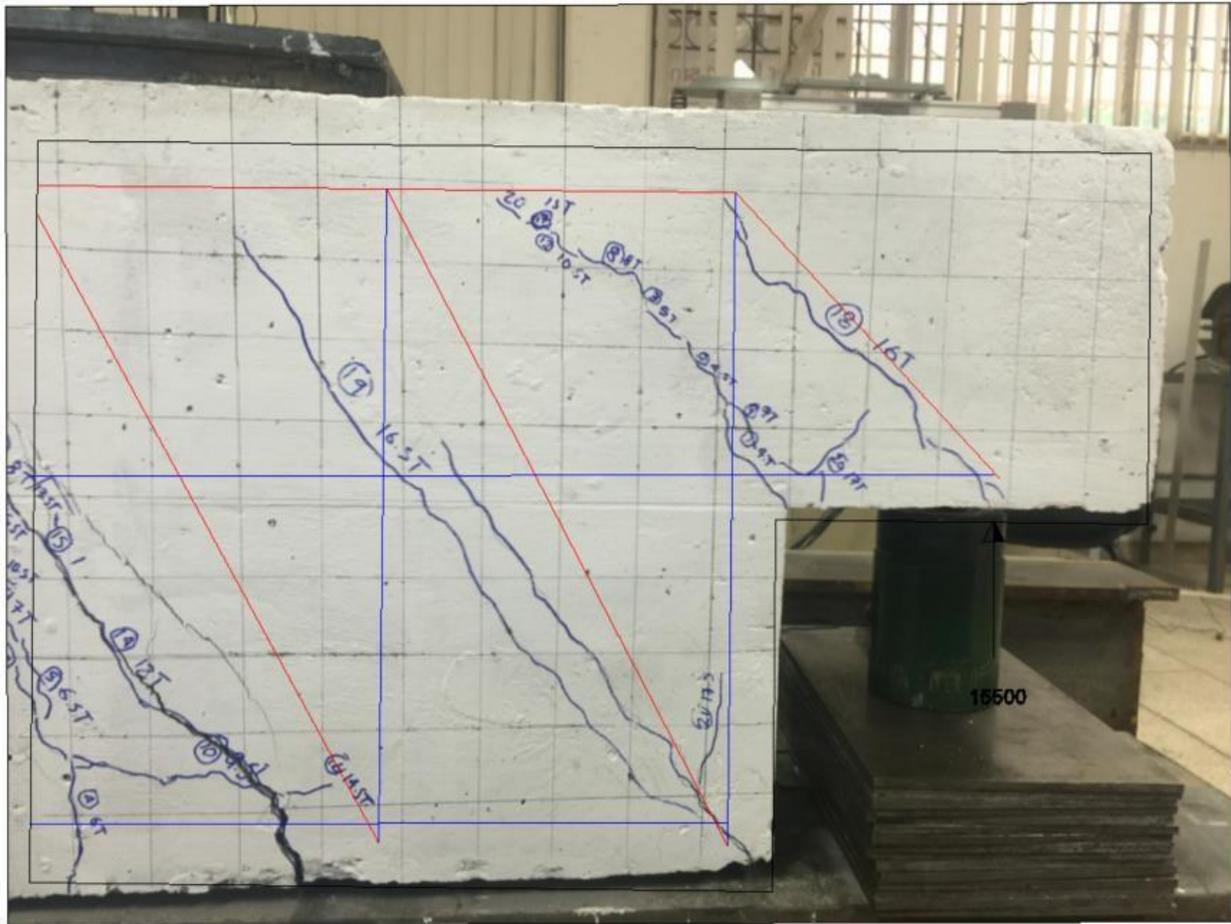


Figura 6 Prueba en espécimen del modelo 1

Los valores de las fuerzas en el refuerzo, correspondientes a puntales y tensores, se pueden ver en las Tabla 1 y Tabla 2. El acero del tensor 6, 7 y 8 fue el primero alcanzar la deformación de fluencia, ocurriendo esto a una carga de 10000 kg, teniendo en ese momento una deformación unitaria de 0.002077, calculándose un esfuerzo de 4362 kg/cm². Esto lo registro la galga número 5.

Al incrementar 500 kilogramos más, la galga colocada en la misma posición pero en el extremo opuesto de la galga número 4

quedo en el límite de su deformación de fluencia. Al llegar a los 11000 kg, la galga número 4 alcanzó una deformación unitaria de 0.002273. A este nivel de carga también superó el límite de deformación la galga número 7 registrando una deformación unitaria de 0.002078.

Superando la carga de diseño de 15500 kg y llegar a los 16000 kg, apareció la grieta del puntal 1, teniendo una trayectoria que va desde el punto de aplicación de la carga hasta el punto donde se planteó en el modelo.

La sección presento una falla dúctil hasta llegar a la carga de 16500 kg, en este nivel de carga la sección falló súbitamente, formándose una grieta desde la esquina inferior de la sección sin recortar.

Hasta este momento las galgas 8 y 9 no habían registrado alguna lectura, aceptando que el concreto estaba resistiendo toda la fuerza. Después de la falla de la sección completa, se siguió incrementando buscando definir por completo los puntales.

Se continuó incrementando la carga, lo único que presentó la sección fue aumentar la dimensión de algunas grietas y desplazándose más pero ya no presento algún otro cambio.

Después de retirada la carga, las grietas por flexión en la unión viga de anclaje-viga no se retrajeron esto debido a que el acero se deformato por completo.

Elemento	fuerza en kg
1	21351
2	14684
3	22963
4	17572
5	17761
6	-14684
7	-14684
8	-14684
9	-8278
10	-16951
11	-15500
12	-15500
13	-15500
14	-15500

Tabla 1. Fuerzas en puntales modelo 1

Elemento	Fuerza (kg)	As requerida (cm²)	refuerzo
Tensor 6	14684	3.496	3 No 4 A=3.75 cm ²
Tensor 7	14684	3.496	3 No 4 A=3.75 cm ²
Tensor 8	14684	3.496	3 No 4 A=3.75 cm ²
Tensor 9	8278	1.970	2 No 4 A=2.5 cm ²
Tensor 10	16951	4.035	3 No 4 y 1 No 3 A=4.46 cm ²
Tensor 11	15500	3.690	3 No 4 A=3.75 cm ²
Tensor 12	15500	3.690	3 No 4 A=3.75 cm ²
Tensor 13	15500	3.690	6 No 3 A=4.26 cm ²
Tensor 14	15500	3.690	6 No 3 A=4.26 cm ²

Tabla 2. Fuerzas en tensores modelo 1

Los resultados del valor de carga a la cual las galgas superaron el límite de fluencia se presentan en la Tabla 3. Se presentan los valores de las primeras 7 galgas, dado que en las últimas dos no registraron medición hasta que la sección falló completamente.

De las galgas colocadas en el acero se puede identificar que en su mayoría alcanzaron el límite de fluencia, la única excepción fue la galga número 1, que se situaba en una barra del tensor vertical justo afuera del cambio de sección.

galga	deformación	carga
1	0.001833	17500
2	0.002079	14500
3	0.002001	14000
4	0.002115	11000
5	0.002077	10000
6	0.002078	12500
7	0.002078	11000

Tabla 3 Deformación unitaria por galga extensiométrica

Modelo 2

En el segundo modelo, los incrementos de carga aplicados fueron de 500 kg desde inicio hasta la conclusión. Cada incremento de carga se monitoreaba las galgas como en el modelo anterior y se medía el desplazamiento. Siendo en la carga de 2000 kg cuando las galgas iniciaban por registrar mediciones, siendo de valores tan bajos como 241 kg/cm².

El agrietamiento que desarrolló el modelo 2, fue iniciando una grieta de flexión justo en el borde del apoyo. Este modelo presentó un agrietamiento menor, solo mostrando aumentos de la dimensión de la grieta en la esquina reentrante con los incrementos de la carga. En el caso de los puntales diagonales

si aparecieron en la viga marcándose por las grietas número 15 y número 6, quedando un poco desfasadas de donde se planteó inicialmente. Esto es porque solo se reforzó la zona donde se supuso tendría en tensor vertical y la aparición de esfuerzos de tensión en la sección tendrían que ser absorbidos por el concreto.

Como se observa en la Figura 7 la sección sufrió menor agrietamiento, siendo consistente el planteamiento que en la esquina reentrante se presentan tensiones en ambos sentidos. Las grietas en dirección perpendicular con la inicial de la esquina reentrante muestran que si se tienen tensión en dirección perpendicular entre sí.

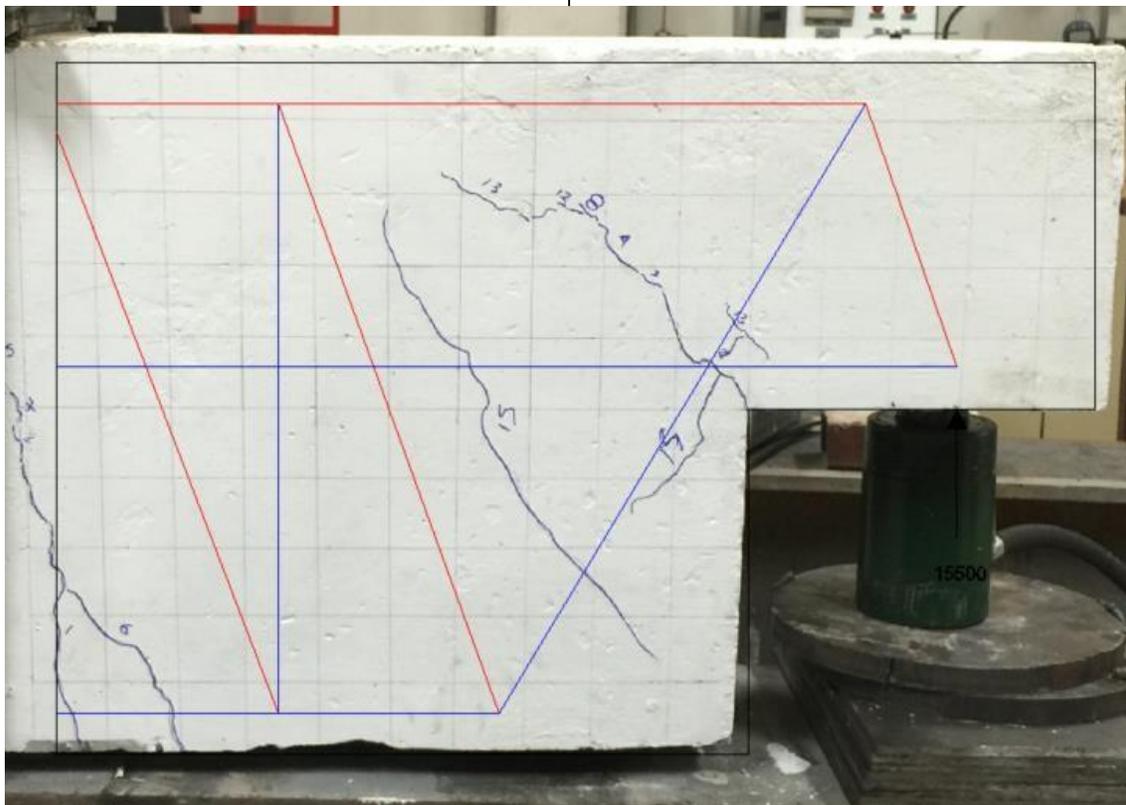


Figura 7 Prueba en espécimen del modelo 2

Para este segundo modelo la carga de agrietamiento se midió en 5500 kg. En la figura del agrietamiento del modelo 2, se

observa que conforme las grietas aparecen en la zona superior, tienden a una trayectoria horizontal, es debido a que en la parte

superior se forma un puntal. Las grietas definen donde se encuentra el eje neutro de la sección porque dejan de incrementar la longitud de agrietamiento.

La barra que registró deformación superior correspondiente al límite de fluencia, también lo hizo en la zona donde se monitoreaba con la galga 7, siendo en la zona de flexión de la viga. Obteniéndose una deformación unitaria de 0.00216.

Después apareció una grieta prolongando la grieta de la esquina reentrante marcada con el número 8 en la figura del agrietamiento. Siendo una grieta de 1.2 cm de longitud. La grieta apareció a 10500 kg de carga, ver Tabla 4 y Tabla 5.

A una carga de 13500 kg apareció una grieta siguiente continuando con la grieta de la esquina reentrante, marcada con el número 12. Al llegar a la carga de 15000 kg apareció una grieta de aproximadamente 7 cm, con una trayectoria de tan solo 20° con respecto a la horizontal, identificada con el número 13.

Las mediciones se detuvieron a los 16100 kg y después se le aplicó carga tratando de hacer fallar por completo el espécimen, lo que se logró fue que presentara las grietas marcadas con el número 15. En este caso no se determinó la carga.

Elemento	fuerza en kg
1	16403
2	14684
3	20321
4	16493
5	16587
6	-5368
7	-5384
8	-5384
9	-18084
10	-18076
11	-14936
12	-20841

13 -15500

14 -15500

Tabla 4 Fuerzas en puntales modelo 2

Elemento	Fuerza (kg)	As cm ²	varillas
Tensor 6	5368	1.278	2 No 3 A=1.42 cm ²
Tensor 7	5384	1.281	2 No 3 A=1.42 cm ²
Tensor 8	5384	1.281	2 No 3 A=1.42 cm ²
Tensor 9	18084	4.305	4 No 4 A=5 cm ²
Tensor 10	18076	4.303	4 No 4 A=5 cm ²
Tensor 11	14936	3.556	4 No 4 A=5 cm ²
Tensor 12	20841	4.962	4 No 4 A=5 cm ²
Tensor 13	15500	3.690	4 No 3 A=2.84 cm ²
Tensor 14	15500	3.690	4 No 3 A=2.84 cm ²

Tabla 5 Fuerzas en tensores modelo 2

Conclusiones.

El objetivo de la investigación fue el planteamiento de un modelo puntal tensor que ayude a controlar el agrietamiento en la esquina reentrante. Con los dos modelos estudiados se encontró un comportamiento aproximado al planteamiento. Teniendo una notable mejoría el modelo que se planteó con el tensor en diagonal. Con el modelo II que tiene dirección del tensor diagonal similar a los esfuerzos principales obtenido del análisis, se obtiene unos niveles de agrietamiento muy bajos con respecto al modelo I que tiene un armado ortogonal. Con respecto a la carga, el modelo II, presenta mejor comportamiento, resistiendo una carga 4 % mayor que el modelo I.

La falla obtenida en el espécimen I fue una falla frágil por tensión diagonal en la viga pero la ménsula presentó una falla dúctil por la fluencia del acero de refuerzo en esa zona. En el espécimen II la falla fue dúctil en ambas secciones, la ménsula como la viga.

Se concluye que el modelo II es aceptable para controlar el agrietamiento ya que la carga de agrietamiento se presenta a los 5500 kg con esto se cumple con el objetivo principal.

Los objetivos específicos también se cumplieron, siendo estos indispensables para desarrollar la experimentación. Se diseñó la viga para soportar el espécimen, las placas de anclaje, los tensores para fijar ambas

vigas, la de concreto a la de acero. De
diseño todo el sistema de aplicación de

carga y monitoreo de los aparatos.

Referencias

ACI, (2008), Committee 318: -Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI-318S-08) and commentary. Farmington Hills, Michigan, American concrete Institute.

ACI, (2014), Committee 318: -Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI-318S-14) and commentary. Farmington Hills, Michigan, American concrete Institute.

González C. O. (2005), -Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado, Limusa, cuarta edición, México, 804 pp.

Mattock A. H. (2012), -Strut-and-Tie Models for Dapped End Beams, Concrete International, 34(2), 35-40

PCI (2010), -PCI Design Handbook Precast and Prestressed Concrete, seventh Edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois.

Ponce P. C. (2008), -Comportamiento de Ménsulas en Extremos de Vigas de Concreto Reforzado y Preforzado, tesis de maestría Facultad de Ingeniería, UNAM, México, DF, Septiembre. 132 pp.

Wang Q., Guo Z., Hoogenboom P. C. J., (2005), -Experimental Investigation on The Shear Capacity of RC Dapped end Beams and Design Recommendations, Structural Engineering and Mechanics, 21(2), 221-235