



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
Maestría

Trabajo de Grado

**Evaluación del comportamiento sísmico en sistemas losa columna,
fabricados en concreto con fibras de acero.**

Ramón Álvarez Mantilla
Sergio Torres Tafur

Directores

ING. Yezid Alexander Alvarado Vargas.
ING. Daniel Mauricio Ruiz Valencia.

BOGOTÁ D.C.
9 de marzo de 2016

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	9
1.1. MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	9
1.2. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECIFICOS	12
1.2.1 Objetivo general.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	13
INTRODUCCION	¡Error! Marcador no definido.
2.1 MARCO CONCEPTUAL	14
2.2 MARCO DE ANTECEDENTES.....	17
2.2.1 Colapsos por punzonamiento..	17
2.2.2 Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero.	19
2.3.3 Montajes experimentales.	22
2.3 MARCO TEÓRICO	26
2.3.1 Falla por punzonamiento..	26
2.3.2 Capacidad de disipación de energía.....	29
CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOS.....	31
3.1 MODELACIÓN NUMÉRICA Y MODELO EXPERIMENTAL	31
3.1.1 Modelo numérico del edificio..	31
3.1.2 Diseño modelo experimental.....	37
3.1.3 Montaje experimental.	39
3.2 MATERIALES.....	40
3.2.1 Agregados	40
3.2.2 Cemento.....	45
3.2.3 Fibras de acero.	45
3.2.4 Aditivo.	45
3.2.5 Concreto.....	46
3.3 DISEÑO DE MEZCLA.....	46
3.3.1 Diseño de mezcla teórico..	46
3.3.2 Diseño de mezcla experimental.	47
3.4 ELABORACIÓN DE LOS SISTEMAS LOSA-COLUMNA	47
3.5 METODOLOGÍA DE ENSAYO	50

3.5.1 Ensayo de corte de corte directo en vigas.	50
3.5.2 Ensayo cíclico de punzonamiento.	51
CAPITULO 4. RESULTADOS ANALISIS Y DISCUSIÓN.....	55
4.1 PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO	55
4.1.1 Compresión.	55
4.1.2 Cortante.	56
4.2 ENSAYOS DE PUNZONAMIENTO.....	60
4.3 DISIPACION DE ENERGIA	71
4.3.1 Disipación de energía calculada con base en ciclos histeréticos de cargas horizontales.	71
4.3.2 Disipación de energía debida a cargas verticales.....	75
4.4 RESISTENCIA AL CORTE	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados ensayos a compresión cilindros 150x300mm con diferente dosificación (Altun et al, 2005).	20
Tabla 2. Resultados ensayos a flexión para vigas con diferente dosificación (Altun et al, 2005)	21
Tabla 3. Resumen de datos obtenidos. (Antonio Grimaldi, 2013)	24
Tabla 4. Resumen de los datos obtenidos (Álvarez y Torres, 2014)	29
Tabla 5. Derivas máximas.....	35
Tabla 6. Granulometría agregado grueso	41
Tabla 7. Tamaños máximos y mínimos agregado grueso.	41
Tabla 8. Características material grueso	42
Tabla 9. Granulometría agregado fino.	43
Tabla 10. Tamaños máximos y mínimos agregado fino.	43
Tabla 11. Características material fino.....	44
Tabla 12. Propiedades de los materiales para diseño de mezcla.	46
Tabla 13. Diseño de mezcla teórico.	47
Tabla 14 Diseño de mezcla final	47
Tabla 15. Ensayo resistencia a la compresión.....	55
Tabla 16. Cortante máximo en vigas.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (Murillo Jimenez, 2004).....	9
Figura 2. (Dave Swanson, 2011).....	9
Figura 3. (Kalyani Shakti, 2015).....	10
Figura 4. (Dave Swanson, 2011).....	10
Figura 5. Aumento resistencia del concreto adicionado. (Gouveia et al, 2014)	11
Figura 6. Ábaco.....	14
Figura 7. fibras de acero 3D, 4D y 5D (NV Bekaert SA, 2012).	16
Figura 8. Falla por punzonamiento (Murillo, 2004).	17
Figura 9. Falla por punzonamiento (englishrussia.com).	18
Figura 10. Falla por punzonamiento (Journal of engineering and technology).....	18
Figura 11. Falla por punzonamiento (Reidmiddleton, 2013).	18
Figura 12. Esfuerzo vs deformación cilindros 150x300mm con diferente dosificación (Altun et al, 2005).	19
Figura 13. Carga vs desplazamiento para diferentes cuantías y losas (NGUYEN et al, 2011).....	22
Figura 14. Apoyo del sistema en la columna (Michels et al, 2012).....	23
Figura 15. Apoyo del sistema en la losa (Grimaldi et al, 2013).	23
Figura 16. Esquema del montaje para fallas por punzonamiento en un sistema losa-columna (NGUYEN, et al, 2011)	25
Figura 17. Montaje y apoyos (Álvarez, Torres, 2014)	25
Figura 18. Falla tronco piramidal por punzonamiento.....	26
Figura 19. Falla típica por punzonamiento. (Santos, et al, 2014).....	27
Figura 20. Fallas por punzonamiento concreto con y sin fibras. (Nguyen et al, 2011)	28
Figura 21. Resumen de los datos obtenidos (Álvarez y Torres, 2014)	30
Figura 22. Planta tipo (García, 1996).....	32
Figura 23. Planta tipo modificada.	32

Figura 24. Modelo numérico.....	33
Figura 25. Sismo Tauramena.....	34
Figura 26. Nodo seleccionado.....	34
Figura 27. Desplazamientos máxima deriva.....	35
Figura 28. Fuerza Axial.....	36
Figura 29. Momento en el nodo.....	36
Figura 30. Perímetro de falla nodo.....	37
Figura 31. Falla punzonamiento (Álvarez, Torres, 2015)	38
Figura 32. Modelo del nodo mediante elementos finitos.....	38
Figura 33. Concentración de esfuerzo cortante.....	39
Figura 34. Montaje experimental completo	40
Figura 35. Detalle montaje experimental.....	40
Figura 36. Granulometría material grueso.....	42
Figura 37. Granulometría material fino.....	44
Figura 38. Curva esfuerzo vs deformación diferentes tipos de fibra. (NV Bekaert SA, 2012).	45
Figura 39. Armado y formaleta para losas.....	48
Figura 40. Materiales para concreto.....	48
Figura 41. Mezcladora planetaria Zyklos.....	49
Figura 42. Vibrador de concreto.....	49
Figura 43. Sistema losa columna.....	49
Figura 44. Vigas y cilindros.....	50
Figura 45. Configuración general según recomendación japonesa JSCE-Sf6 (Carmona, Cabrera, 2009).	50
Figura 46. Aditamentos metálicos para ensayos a corte.....	51
Figura 47. Detalle de ubicación de LVDTs.....	52
Figura 48. Desplazamiento horizontal ciclos.....	53

Figura 49. Esquema cargas de ensayo.	53
Figura 50. Montaje Experimental ensayo dinámico de punzonamiento.	54
Figura 51. Falla cilindro concreto con fibra.....	56
Figura 52. Montaje vigas a corte.....	56
Figura 53. Sección de corte de las vigas.....	57
Figura 54. Modo de falla a corte viga sin fibra.....	58
Figura 55. Modo de falla a corte viga con fibra.....	59
Figura 56. Modo de falla fibras.	59
Figura 57. Carga deformación vigas con y sin fibra.....	59
Figura 58 Índice de disipación en vigas a corte.....	60
Figura 59. Esquema cargas modelo resistencia máxima 170 KN.	61
Figura 60. Ciclos histeréticos de carga axial 170 KN.	61
Figura 61. Desplazamiento vertical carga axial 170 KN.....	62
Figura 62. Fotos de la falla primer modelo.	63
Figura 63. Esquema cargas modelo resistencia máxima 190 KN	63
<i>Figura 64. Ciclo histeréticos carga axial 210 KN</i>	64
Figura 65. Desplazamiento vertical carga axial 210 KN.....	65
Figura 66. Fotos de la falla segundo modelo.	65
Figura 67. Esquema cargas modelo resistencia máxima 190 KN.	66
Figura 68. Ciclo histeréticos carga axial 190 KN.....	67
Figura 69. Desplazamiento vertical carga axial 190 KN.....	68
Figura 70. Fotos de la falla segundo modelo.	68
Figura 71. Ciclo histeréticos carga axial 110 KN.....	69
Figura 72. Desplazamiento vertical carga axial 110 KN.....	70
Figura 73. Fotos de la falla cuarto modelo sin fibras.	71

Figura 74. Disipación de energía calculada con base en ciclos históricos de cargas horizontales (losa 170 KN).....	72
Figura 75. Disipación de energía calculada con base en ciclos históricos de cargas horizontales (losa 210 KN).....	73
Figura 76. Disipación de energía calculada con base en ciclos históricos de cargas horizontales (losa 190 KN).....	74
Figura 77. Disipación de energía calculada con base en ciclos históricos de cargas horizontales promedio.....	75
Figura 78. Disipación energía vertical losa 170 KN.	76
Figura 79. Disipación energía vertical losa 210 KN.	76
Figura 80. Disipación energía vertical losa 190 KN.	77
Figura 81. Elementos finitos con refuerzo a flexión.....	78
Figura 82. Esfuerzo cortante en modelo de elementos finitos.....	78
Figura 83. Esfuerzo cortante losa 170 KN.	79
Figura 84. Esfuerzo cortante losa 210 KN.	80
Figura 85. Esfuerzo cortante losa 190 KN.	81
Figura 86. Esfuerzo cortante promedio.	82

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Las fallas de estructuras en sistemas losa columna han tenido un gran impacto en la ingeniería a lo largo del tiempo, lo anterior debido a la gravedad de las mismas pues en varias ocasiones, han generado colapsos progresivos de estructuras trayendo como consecuencia la perdida de bienes materiales e incluso la pérdida de vidas (Aoude *et al*, 2013).

A continuación, se presentarán algunas fallas en sistemas de losa plana sin vigas principales que se han presentado en diferentes partes del mundo. En la Figura 1 se puede observar que las losas de un edificio quedan sin apoyo generando un colapso total de las mismas (Murillo, 2004). En 2013 en Rusia se presentó una falla por punzonamiento, a pesar de tener un refuerzo en la unión losa columna para este tipo de falla como se puede ver en la Figura 2. El 17 de enero de 1994, en el sur de California se presentó una falla por punzonamiento la cual hizo que se generara un colapso progresivo de toda la estructura (Figura 3). En diciembre de 2012 se presenta en nueva Zelanda un colapso por falla de punzonamiento en un parqueadero construido en sistema losa-columna, con pos tensado en las losas (Figura 4). Todas las fallas por punzonamiento presentadas sucedieron a partir de una acción sísmica.



Figura 1. (Murillo Jimenez, 2004).



Figura 2. (Dave Swanson, 2011).



Figura 3. (Kalyani Shakti, 2015).



Figura 4. (Dave Swanson, 2011).

Dichas fallas son generadas en principio por los esfuerzos debido a las tracciones que pueda llegar a generar un elemento estructural de naturaleza puntual sobre su plano de apoyo. Comúnmente estos esfuerzos son producidos en el encuentro de una columna con un entrepiso haciendo que se genere la rotura de la placa en los alrededores de la columna en la cual se apoya, lo que en algunas ocasiones ha llegado a generar el colapso súbito y/o progresivo de muchas estructuras.

A partir de lo anterior las normas de diseño estructural (National Building Code of Canadá, NSR 10, entre otras), han tenido que limitar el uso del sistema estructural “*losa-columna*”, pues una losa, al no tener la misma capacidad de disipar energía que una viga, suele ser mucho más vulnerable a este tipo de falla. Dichas limitaciones han sido modificadas a lo largo del tiempo y van desde el aumento de los espesores en las losas hasta tener especial cuidado en la colocación del acero a flexión (tanto en la parte superior como inferior de la losa). Esto con el fin de que si se presenta una falla por punzonamiento no se genere un colapso progresivo de toda la estructura (Aoude *et al* ,2013).

En el caso de Colombia, el sistema “*losa-columna*” es bastante limitado, ya que la norma específica que solo se podrá construir con dicho sistema estructural en zonas de riesgo sísmico intermedio, en estructuras de hasta 15 m de altura, y en zonas de riesgo sísmico bajo, en estructuras de hasta 21 m de altura (Tabla A.3-3 NSR-10).

Debido a lo anterior, en Colombia no es usual realizar edificaciones bajo este sistema estructural pues, aunque proporciona grandes beneficios en el proceso constructivo, las limitaciones son muy grandes en cuanto a uso y altura.

En países como Panamá y Estados Unidos (TRUMP INTERNATIONAL CONDO HOTEL TOWER, LAS VEGAS, NV, USA) este sistema es muy común debido al conocimiento y desarrollo que allí se tiene. Algunas de las técnicas usadas para realizar edificaciones bajo este sistema es la elaboración de pórticos intermedios resistentes a

momento (pórticos “losa-columna”), cuyos nudos están acompañados de ábacos o capiteles en las zonas críticas o vulnerables a la falla por punzonamiento. Adicionalmente se realizan grandes muros estructurales que proporcionan una gran rigidez a la estructura.

Por otra parte, se ha logrado justificar que un concreto adicionado con fibras de acero tiene un comportamiento superior al de uno sin adición de fibras, debido al aumento de la resistencia a la flexión, disminución del agrietamiento por contracción plástica, aumento en la ductilidad, mayor resistencia a cortante, entre otras (Gouveia *et al*, 2014) como se puede ver en la Figura 5. Esto se puede evidenciar en varios estudios que se han realizado a lo largo del tiempo entre los cuales se destacan dos artículos publicados por Nguyen-Minh (2011) y Gouveia, (2014).

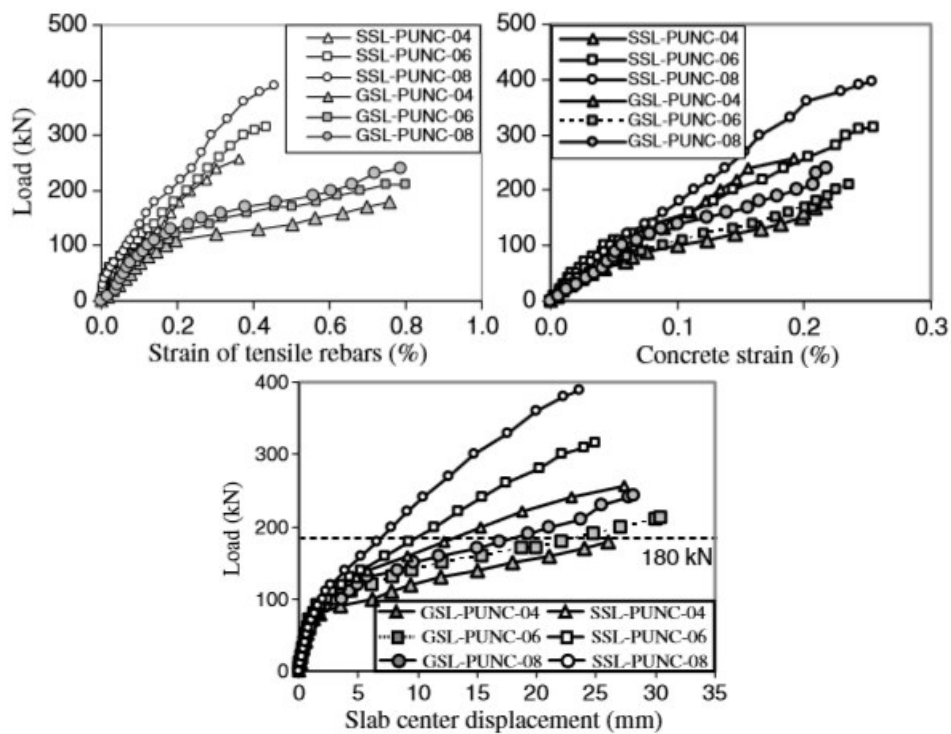


Figura 5. Aumento resistencia del concreto adicionado. (Gouveia et al, 2014)

De acuerdo con lo anterior, se ha podido comprobar que una buena mezcla de concreto con fibras de acero mejora la capacidad de carga y la capacidad de absorción de energía en la conexión de la losa y la columna. Estos beneficios se obtienen debido a que la fibra detiene la propagación de fisuras en el concreto. Así mismo retrasa la actuación del acero convencional (Moraes et al. , 2013).

De lo anterior resulta interesante comprobar experimentalmente los beneficios que podrían aportar las fibras 5D ante esfuerzos de punzonamiento debidos a sollicitaciones sísmicas en un sistema estructural “losa-columna”. Lo anterior, con el fin de llegar a usar este sistema estructural con mayor intensidad, ya que proporciona grandes ventajas en el proceso constructivo de una estructura, entre las que se destacan el ahorro de tiempo y dinero.

Finalmente, para desarrollar este estudio se plantea la presente propuesta con el fin de evaluar la capacidad de disipación de energía de sistemas “losa-columna” en concreto con fibras de acero 5D ante cargas que traten de inducir punzonamiento.

1.2. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECIFICOS

1.2.1 Objetivo general

- ✓ Evaluar el comportamiento sísmico de un nudo en un sistema losa columna, fabricado en concreto con y sin fibras de acero.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar las sollicitaciones de un nudo en un edificio construido mediante sistema losa columna.
- ✓ Diseñar un modelo experimental que simule las condiciones a las que se somete un nudo en un sistema losa columna bajo efectos sísmicos.
- ✓ Evaluar y comparar la capacidad de disipación de energía en sistemas losa columna, fabricados en concreto con y sin fibras de acero.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

INTRODUCCION.

En este capítulo se pretende establecer los antecedentes y estado actual de conocimiento que motivan el desarrollo del presente trabajo. En la primera parte se describen términos los cuales se consideran de gran importancia para el entendimiento de este trabajo. Posteriormente, se describen las investigaciones realizadas a las propiedades mecánicas de concretos adicionados con fibras de acero, entre las cuales se destacan la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, capacidad de disipación de energía y cortante inducido por punzonamiento. Finalmente se presenta cómo se genera una falla típica de punzonamiento.

En términos generales, el concreto hidráulico es un material cuyo conocimiento acerca de sus propiedades mecánicas es considerablemente amplio y confiable. Por lo tanto es acertado indicar que el concreto tradicional es un material frágil que, ante grandes esfuerzos, falla de una manera súbita presentando muy bajas deformaciones, lo que lo convierte en un material con muy poca ductilidad.

A partir de lo anterior y conociendo alguna de las propiedades de los concretos adicionados con fibra de acero, conviene preguntarse si desde el punto de vista sísmico la inclusión de fibras de acero hace viable la construcción de sistemas losa columna.

2.1 MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se muestra una serie de definiciones sobre conceptos los cuales son de gran importancia para el entendimiento del presente trabajo (definiciones tomadas de la norma ACI 318S-14 capítulo 2 notación y terminología).

Ábaco: proyección debajo de la losa usada para reducir la cantidad de refuerzo negativo sobre una columna el espesor mínimo requerido para una losa, y para aumentar la resistencia a cortante de la losa. (Véase Figura 6).



Figura 6. Ábaco.

Aditivo: material distinto del agua, de los agregados o del cemento hidráulico, utilizado como componente del concreto, y que se añade a éste antes o durante su mezclado con el fin de modificar sus propiedades.

Agregado: material granular, tal como arena, grava, piedra triturada y escoria de hierro de alto horno, empleado con un medio cementante para formar concreto o mortero.

Análisis con elementos finitos: procedimiento de modelaje analítico en el cual la estructura se divide en un número de elementos discretos para el análisis.

Capitel de columna: ensanchamiento del extremo superior de una columna de concreto ubicada directamente bajo la losa o ábaco y construida monolíticamente con la columna.

Categoría de Diseño Sísmico: clasificación que se asigna a una estructura con base en su tipo de ocupación y en la severidad de los movimientos sísmicos del terreno para diseño en el lugar correspondiente.

Columna: miembro, usualmente o predominantemente vertical, usado principalmente para resistir carga axial de compresión, pero que también puede resistir momentos, cortantes o

torsión. Para un miembro de sección variable, la menor dimensión lateral corresponde al promedio de las dimensiones superior e inferior del lado menor.

Concreto estructural: concreto utilizado con propósitos estructurales incluyendo concreto simple y reforzado.

Concreto simple: concreto estructural sin refuerzo o con menos refuerzo que el mínimo especificado para concreto reforzado.

Concreto reforzado: concreto reforzado con no menos de las cuantías mínimas de refuerzo pre esforzado o no pre esforzado.

Concreto reforzado con fibras de acero: concreto que contiene fibras de acero discontinuas, corrugadas, dispersas, y orientadas aleatoriamente.

Construcción en dos direcciones: miembros diseñados para ser capaces de soportar cargas a través de flexión en dos direcciones. Dentro de esta clasificación se encuentran algunas losas y cimentaciones.

Construcción en una dirección: miembros diseñados para ser capaces de soportar todas las cargas a través de la flexión en una sola dirección.

Diafragma estructural: miembro, como una losa de piso, que transmite fuerzas que actúan en el plano del miembro hacia los elementos verticales del sistema de resistencia ante fuerzas sísmicas.

Disipación de energía: cantidad de energía que absorbe un material antes de llegar a su esfuerzo de rotura. En este trabajo de grado la tenacidad ha sido calculada como el área bajo la curva del diagrama carga vs desplazamiento siguiendo las recomendaciones de la norma Japonesa JSCE SF-6.

Elemento dúctil de acero: un elemento con un alargamiento medido en un ensayo de tracción de al menos 14 por ciento, y una reducción de área de al menos un 30 por ciento. Un elemento de acero que cumple con las disposiciones de ASTM A307 debe considerarse un elemento dúctil de acero, excepto en lo que se modifica para efectos sísmicos, las barras corrugadas de acero de refuerzo que cumplen con los requisitos de ASTM A615M, A706M o A955M, deben considerarse elementos dúctiles de acero.

Elemento frágil de acero: un elemento con un alargamiento medido en un ensayo de tracción menor al 14 por ciento, o una reducción en área de menos del 30 por ciento en la falla.

Fibra de acero: filamento o hilo de acero desarrollado para mejorar las propiedades mecánicas de concreto.

Fibra de acero 3D: fibra de acero desarrollado con un sistema de anclaje único empleado habitualmente en la construcción de pisos industriales recubrimiento de túneles entre otros.

Fibra de acero 4D: fibra de acero desarrollada con un doble gancho en los extremos que junto con una gran resistencia a tracción del alambre se emplean para actuar sobre planos de fisuración de entre 0,1 y 0,3 mm.

Fibra de acero 5D: fibra de acero desarrollada con un triple gancho en los extremos donde el alambre dúctil se alarga mientras el gancho permanece estable en su sitio aumentando de esta forma la resistencia y ductilidad del hormigón.

En la Figura 7 se observan las fibras de acero 3D, 4D y 5D.

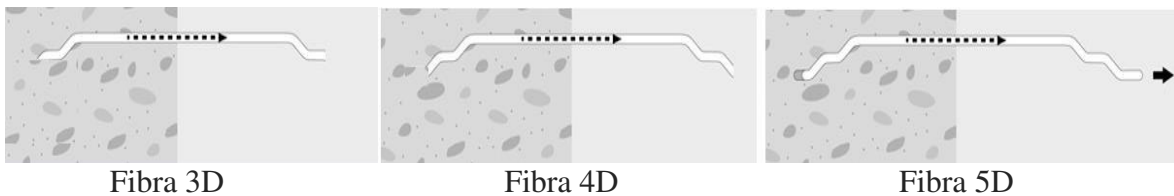


Figura 7. fibras de acero 3D, 4D y 5D (NV Bekaert SA, 2012).

Módulo de elasticidad: relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material.

Nudo: parte de una estructura que es común a los miembros que se intersectan.

Punzonamiento: esfuerzo en dos direcciones en elementos como losas o zapatas donde la falla puede ocurrir a lo largo de una pirámide o conos truncados alrededor de una carga concentrada o zona de reacción (NSR-10).

Sistema estructural: miembros estructurales interconectados diseñados para cumplir con un requisito de desempeño.

Sistema Losa-Columna: sistema de entrepiso en el cual el forjado o losa se encuentra directamente apoyado sobre las columnas de la estructura.

2.2 MARCO DE ANTECEDENTES

Este apartado tiene como objetivo principal el suministrar información que permita identificar las propiedades mecánicas de un concreto elaborado con fibras de acero, así como algunas fallas típicas de punzonamiento que se han presentado a lo largo de la historia.

Entre las propiedades que se describen a continuación se pueden encontrar la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, capacidad de disipación de energía, cortante inducido por punzonamiento, entre otras.

Cabe resaltar que una de las propiedades de la cual se hace gran énfasis es la capacidad de disipación de energía, pues esta propiedad permite evaluar el comportamiento sísmico del sistema en cuestión.

Por otra parte, se expondrán algunos montajes experimentales realizados en laboratorios de diferentes partes del mundo, en donde se fallaron sistemas losa columna ante esfuerzos de punzonamiento. Lo anterior, con el fin de tomarlos como punto de referencia para la elaboración del modelo experimental en cuestión.

2.2.1 Colapsos por punzonamiento. A continuación, se presentaran algunas fallas por punzonamiento que han ocurrido a lo largo de la historia debido a la acción sísmica. Como se puede ver en la figura 8 las losas quedan sin apoyo generando un colapso total de las mismas (Murillo, 2004).



Figura 8. Falla por punzonamiento (Murillo, 2004).

En 2013, en Rusia se presentó una falla por punzonamiento, a pesar de tener un refuerzo en la unión losa columna para este tipo de falla como se puede ver en la figura 9.

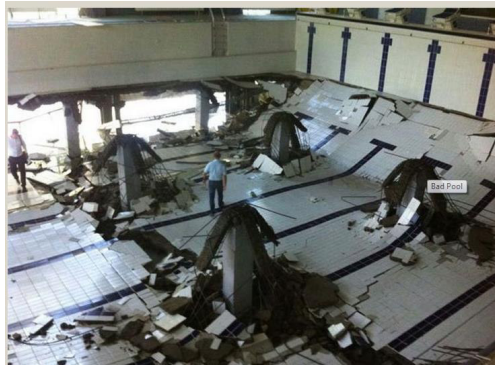


Figura 9. Falla por punzonamiento (englishrussia.com).

El 17 de enero de 1994, en el sur de California se presenta una falla por punzonamiento dejando caer todos los pisos en un colapso progresivo como se ve en la figura 10.



Figura 10. Falla por punzonamiento (Journal of engineering and technology).

En diciembre de 2012 se presenta en NUEVA ZELANDA un colapso por falla de punzonamiento en un parqueadero construido con el sistema losa-columna, con pos tensado en las losas. Figura 11.



Figura 11. Falla por punzonamiento (Reidmiddleton, 2013).

2.2.2 Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero.

Resistencia a la compresión. La capacidad de resistencia a la compresión del concreto agregado con fibras puede verse disminuida en una proporción muy pequeña, siendo casi la misma en la medida en que se aumente el porcentaje de fibras en la mezcla, como se puede evidenciar en la Figura 12.

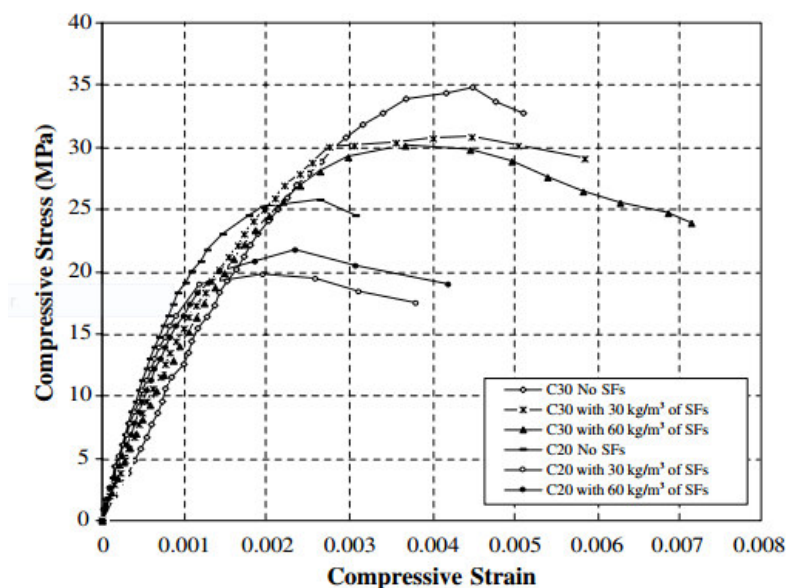


Figura 12. Esfuerzo vs deformación cilindros 150x300mm con diferente dosificación (Altun et al, 2005).

Por otro lado, al momento de la falla en los cilindros con fibras no se genera una rotura en pedazos (“explosión”). Por el contrario, los esfuerzos terminales parecían estar distribuidas en todo el cilindro (Altun et al, 2005).

En la Tabla 1 se muestran los valores medios de la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, tenacidad y resistencia a la flexión. Medida realizada para pruebas estándar ASTM C 496. Se evidencia que tanto la resistencia a la compresión como el módulo elástico sufren una pequeña disminución al aumentar la dosificación de fibras (Altun et al, 2005), aunque por el contrario la tenacidad del concreto aumenta en el mejor de los casos en más del 100% con 60kg/m³ de fibra, al igual que la resistencia a la flexión aumenta a medida se aumenta la cuantía.

Average mechanical properties of different combinations of concrete measured on 150 * 300 mm cylindrical samples and 150*150*750 mm prisms.

Type of concrete	Concrete class	Average compressive strength (N/mm ²)	Modulus of elasticity (N/mm ²)	Split tensile strength (N/mm ²)	Toughness (Kn*mm)	Flexural strength (N/mm ²)
No SFs	C20	24.4	29500	1.59	202	5.4
	C20-30	22.5	27500	2.3	446	8.3
	C20-60	22.6	26000	2.55	474	9.8
No SFs	C30	34.8	32950	1.95	306	7.8
	C30-30	30.8	32200	2.71	415	9.4
	C30-60	30.2	32050	3.01	462	11.4

Tabla 1. Resultados ensayos a compresión cilindros 150x300mm con diferente dosificación (Altun et al, 2005).

Capacidad de disipación de energía. Esta propiedad en particular es de vital importancia para el estudio de este trabajo de grado, debido que la naturaleza de los sistemas losa columna comúnmente no presentan capacidades altas de disipación de energía, por lo cual se ve restringido su uso en Colombia por la norma colombiana NSR-10 según se planteó anteriormente.

La capacidad de disipación de energía (tenacidad) en varias vigas de 300x300x2000 mm con 2 tipos de concreto y diferentes porcentajes de fibra fueron ensayadas a flexión, mostrando resultados de 5.7 KNxmm para concreto sin fibra, y de 28.2 y 30.1 KNxmm para concretos adicionados con 30 y 60 Kg/m³ de fibra (Altun, 2005). Como se puede ver en la última columna de la Tabla 2, hay evidencia de una mejora en la capacidad de disipación de energía de hasta un 391% con una cantidad de fibra de 30 Kg/m³ respecto a las vigas sin fibra y de un 32% adicional con 60kg/m³ (Altun et al, 2005) lo cual evidencia el gran aporte que generan las fibras en el concreto.

Beam sample	Concrete class	SF dosage (kg/m ³)	Tensile steel (mm)	Theoretical ultimate load (KN)	Measured ultimate load (KN)	(Experimental ultimate load)/(theoretical ultimate load)	Average of (experimental load)/(theoretical ultimate load) ratios	Toughness (KN mm)
C20-1-0	C20	0	2φ16	126	184.50	1.46	1.55	5,495
C20-2-0					202.00	1.6		5,970
C20-3-0					201.60	1.6		5,830
C20-4-30		30	2φ16	126	201.90	1.6	1.63	27,835
C20-5-30					202.30	1.61		27,550
C20-6-30					210.00	1.67		29,501
C20-7-60		60	2φ16	126	210.30	1.67	1.67	29,830
C20-8-60					211.00	1.67		30,800
C20-9-60					209.00	1.66		29,800
C30-1-0	C30	0	2φ16	148.6	262.30	1.77	1.74	10,782
C30-2-0					260.15	1.75		9,925
C30-3-0					250.90	1.69		10,965
C30-4-30		30	2φ16	148.6	320.25	2.16	2.26	26,382
C30-5-30					330.00	2.22		27,989
C30-6-30					357.20	2.4		29,856
C30-7-60		60	2φ16	148.6	370.45	2.49	2.45	29,979
C30-8-60					368.75	2.48		30,045
C30-9-60					352.95	2.38		29,460

Tabla 2. Resultados ensayos a flexión para vigas con diferente dosificación (Altun et al, 2005)

En la Figura 13 se muestra el comportamiento de varias losas con diferente cuantía de fibra Dramix RC-80/60 3D. En 2011 Nguyen-Minh, indica que el comportamiento de las losas se puede dividir en 2 partes: “etapa previa a la formación de grietas” y “etapa pos formación de grietas”, en la que el comportamiento debido a la carga de todas las losas fue similar, y aproximadamente lineal. En la siguiente etapa resulta en una disminución de la rigidez de las losas. Se puede ver que bajo un mismo nivel de carga las deformaciones del concreto con fibra son menores a las de concreto sin fibra. Esto significa que las fibras aumentan la rigidez del sistema y el aumento es directamente proporcional al volumen de fibras utilizado (Nguyen, et al, 2011).

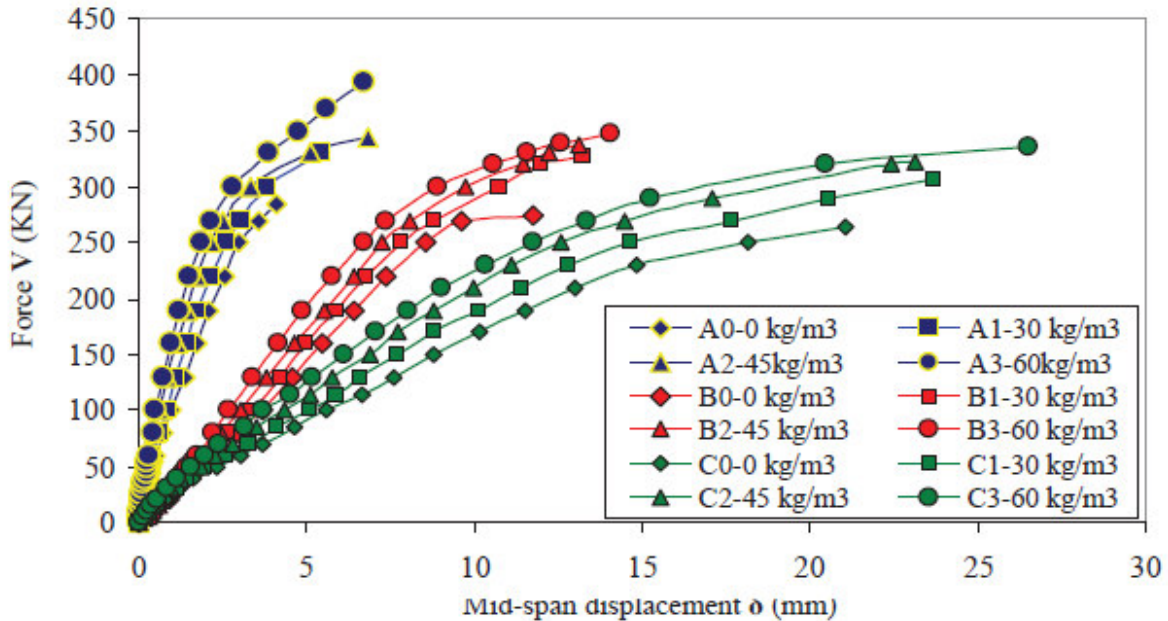


Figura 13. Carga vs desplazamiento para diferentes cuantías y losas (NGUYEN et al, 2011).

La adición de fibra de acero en 30 y 60 kg/m³ revela un aumento en la resistencia al punzonamiento del orden de 16-39% para losas tipo A, 9-15% para losas tipo B, 16-23% para el grupo C (NGUYEN et al, 2011). En esta misma proporción de aumento en la resistencia al punzonamiento se encuentra la mayoría de investigaciones consultadas en donde se evidencia una ganancia del 30% al 35% usando fibras de 50 mm de largo y un diámetro de 0.75mm al 0.5 % en el volumen de la mezcla (Grimaldi, et al, 2012). El aumento de la capacidad es debido a la presencia de las fibras las cuales ayudan a contener las grietas en todo el volumen transfiriendo la tensión a través de ellas hacia la otra cara de la fisura hasta que la fibra pierde adherencia o se rompe. Esto también genera que la falla se produzca de una manera más dúctil en el sistema losa columna aumentando su capacidad de deformación debido a la unión que ofrecen las fibras en la matriz del concreto, antes de llegar al colapso de la estructura.

2.3.3 Montajes experimentales. Para generar una falla por punzonamiento, en la bibliografía consultada se encontraron diferentes condiciones de apoyo, condiciones de carga, refuerzo a flexión y modelaciones geométricas para asegurar que la falla se genere de la manera esperada.

Las condiciones de apoyo y de carga para sistemas losa-columna se pueden realizar principalmente de dos maneras: la primera consiste en apoyar todo el sistema sobre la columna y aplicar la carga mediante gatos hidráulicos ubicados perimetralmente en la losa para generar la falla como se puede ver en la Figura 14 (Michels et al, 2012).

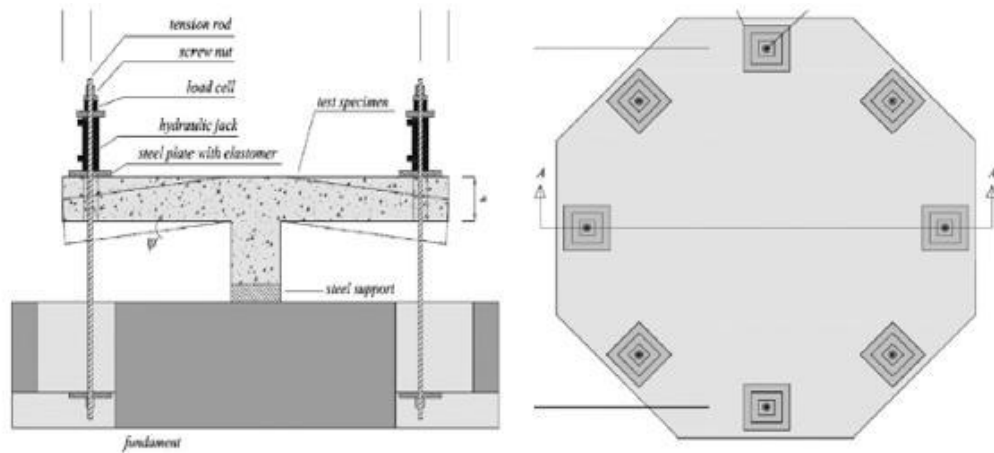


Figura 14. Apoyo del sistema en la columna (Michels et al, 2012).

El segundo modelo de ensayo consiste en apoyar el sistema perimetralmente sobre la losa y aplicar la carga con un gato hidráulico directamente a la columna del sistema, como se puede ver en la Figura 15 (Grimaldi, et al, 2013.). Gran parte de las investigaciones consultadas coinciden en utilizar el segundo método descrito

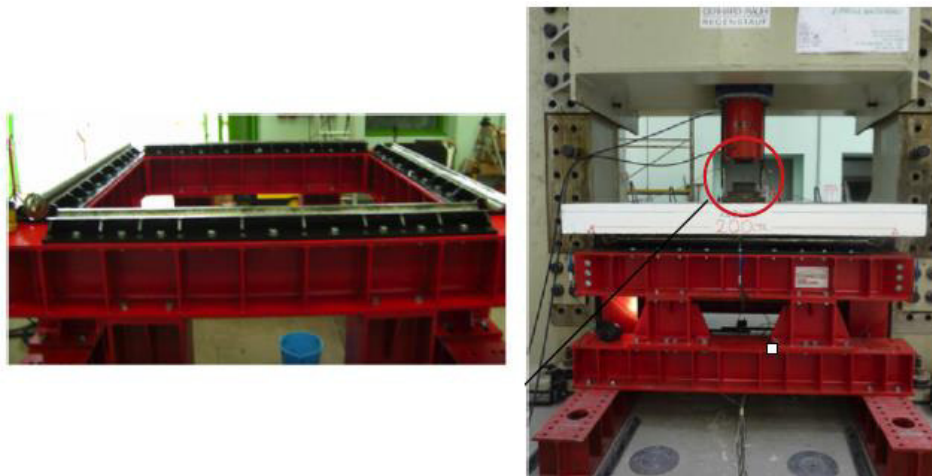


Figura 15. Apoyo del sistema en la losa (Grimaldi et al, 2013).

El refuerzo a flexión para conseguir este tipo de falla varía entre el 0.4% y el 0.8% (Long Nguyen-Minh, Marián Rovňák, 2013) sin embargo, para este tipo de ensayo es común encontrar en diferentes investigaciones que usen cuantías altas que pueden llegar hasta el 0,9% (Antonio Grimaldi, 2013) para asegurar que la falla no se presente por flexión.

La geometría de la losa puede presentar grandes variantes de acuerdo a las condiciones que se tengan para realizar esta falla, se encuentran sistemas circulares y rectangulares, comúnmente son más utilizados los sistemas rectangulares debido a su menor complejidad en el proceso constructivo, de armado y montaje. Se pueden encontrar losas grandes cuadradas de 2200 mm x 2200mm (Long Nguyen-Minh, Marián Rovňák, 2013) o losas circulares de hasta 2340 mm de diámetro (Julien Michels et al, 2012), y losas pequeñas cuadradas de 650 mm x 650 mm (M. H. Harajli et al, 1994) y aun así en ambos casos presentarse una falla por punzonamiento. La geometría de la columna está dada por el perímetro de falla crítico en donde se genera el cono de corte. Este perímetro se presenta a $D/2$ de la cara de la columna siendo D el ancho efectivo de la losa (Antonio Grimaldi et al, 2013). El espesor de la losa es un factor influyente cuando se requiere obtener una falla por punzonamiento, si el espesor es muy bajo la falla podría presentarse por flexión, como se puede evidenciar en la Tabla 3 para losas de 650 mm x 650 mm con adición de fibras de acero. Se puede ver en la Tabla 3 que las losas bajo esta configuración con mayor espesor siempre presentan falla por punzonamiento, mientras que las losas de menor espesor en ocasiones presentan fallas por flexión.

Tipo	Espesor	% Fibra	Losa	Modo de falla
A	55 mm	0,45	A2	Punzonamiento
		0,8	A3	Flexión
		1	A4	Flexión
		2	A5	Flexión
B	75 mm	0,45	B2	Punzonamiento
		0,8	B3	Punzonamiento
		1	B4	Punzonamiento
		2	B5	Punzonamiento

Tabla 3. Resumen de datos obtenidos. (Antonio Grimaldi, 2013)

En las figuras 16 y 17 se muestra otro montaje experimental elaborado en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana. En dicho ensayo la carga fue aplicada por medio de una máquina universal de 1000 KN de capacidad a una velocidad de carga de 1,3 mm /min hasta llegar a una deformación en el sistema de 25 mm de acuerdo a lo sugerido por las especificaciones EFNARC para calcular la absorción de energía en Julios. La carga fue registrada mediante una celda de carga y los desplazamientos fueron registrados mediante tres LVDT, uno posicionado en el centro de la losa y los otros dos ubicados a un cuarto de la amplitud de la losa, ambas señales fueron registradas mediante un sistema de adquisición de datos. Las losas fueron apoyadas perimetralmente por un

marco metálico de 600mm x 600 mm lo suficientemente rígido como para no deformarse durante los ensayos.

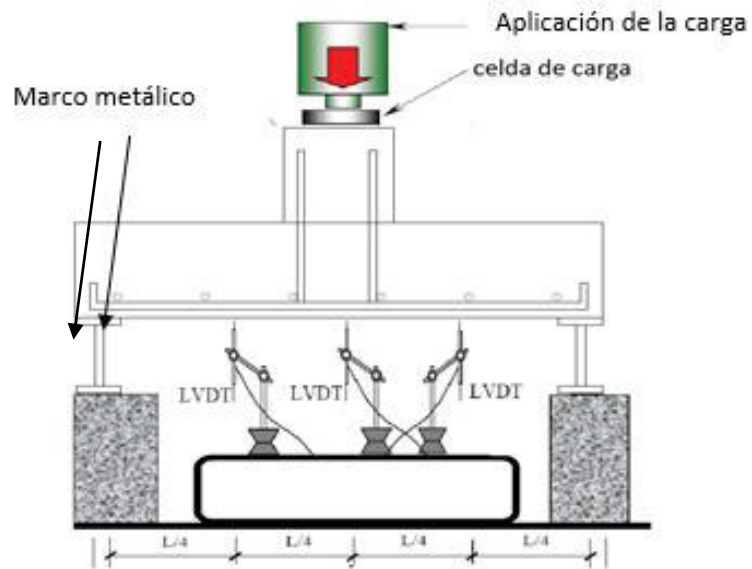


Figura 16. Esquema del montaje para fallas por punzonamiento en un sistema losa-columna (NGUYEN, et al, 2011)



Figura 17. Montaje y apoyos (Álvarez, Torres, 2014)

2.3 MARCO TEÓRICO

Este apartado tiene como objetivo principal la inclusión de información que sustente el planteamiento del problema en donde se evidencia que la gran problemática en estos sistemas y la razón por la cual su uso es muy limitado es el punzonamiento.

Antes de hablar acerca de cómo se generan las fallas debidas a esfuerzos de punzonamiento conviene definir el punzonamiento propiamente dicho. El punzonamiento es un esfuerzo en dos direcciones en elementos como losas o zapatas donde la falla puede ocurrir a lo largo de una pirámide o conos truncados alrededor de una carga concentrada o zona de reacción (NSR-10).

De acuerdo a lo anterior es posible asimilar dichas fallas a los sistemas losa columna pues estos no son más que una carga concentrada induciendo esfuerzos cortantes directos en su elemento de apoyo (losa).

2.3.1 Falla por punzonamiento. El estado límite último de punzonamiento se alcanza por agotamiento de la pieza bajo tracciones debidas a esfuerzos tangenciales originadas por una carga o reacción concentrada en un sector pequeño de un elemento bidireccional de concreto (Bernat, *et al*, 2002). Estos esfuerzos tangenciales originan unas tracciones a lo largo del canto de la losa, que en caso de aplicar cargas elevadas las losas macizas presentan rotura alrededor de la columna donde se apoya, esta falla se presenta de forma tronco piramidal como se ve en la Figura 18.

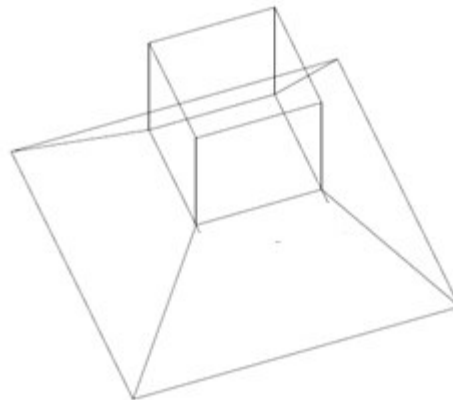


Figura 18. Falla tronco piramidal por punzonamiento

De acuerdo con lo anterior, en columnas de sección rectangular, la superficie crítica de falla en punzonamiento se presenta desde el perímetro de la columna extendiéndose en el espesor de la losa con un ángulo de 30° a 45° como se puede ver en la Figura 19.

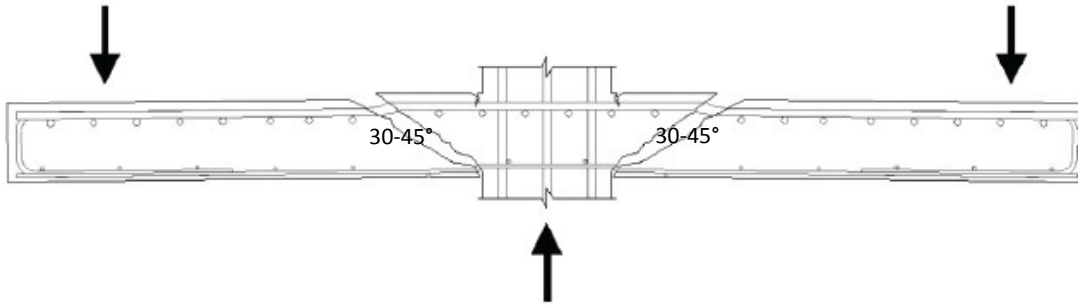


Figura 19. Falla típica por punzonamiento. (Santos, et al, 2014)

La superficie crítica de punzonamiento es aquella en donde se realizan las comprobaciones para asegurar el buen funcionamiento de la losa frente al punzonamiento. Según la NSR-10 Título C, esta superficie se encuentra ubicada en una distancia de $d/2$ a partir de la periferia de la carga concentrada, donde d es el espesor efectivo de la losa. Para columnas rectangulares esta sección crítica está definida por líneas paralelas. La norma permite el uso de una sección crítica rectangular.

La unión entre una losa y una columna puede ser, o bien simplemente apoyada o un empotramiento. En el caso de que sea simplemente apoyada, las únicas acciones que provocarán punzonamiento serán los axiales de las columnas, mientras que si la unión es un empotramiento, los momentos flectores también contribuirán con el punzonamiento del sistema. El caso en que no se transfieren momentos entre la columna y la losa se denomina punzonamiento centrado. Los esfuerzos que se producen en este caso solo son producidos por el esfuerzo axial transferido a la columna, los esfuerzos que se crean son producto del reparto uniforme de este esfuerzo a lo largo de la superficie crítica de la losa. Así, el esfuerzo de corte que se presenta en el sistema se expresa en la ecuación 1.1.

$$\tau = \frac{V}{Ac} \quad (1.1)$$

Donde V es la fuerza axial aplicada en la cabeza de la columna y Ac es el área crítica de punzonamiento. De acuerdo a la NSR-10, V debe ser calculado como el menor valor entre las Ecuaciones 1.2, 1.3 y 1.4

$$V = 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \sqrt{F'c} b o d \quad (1.2)$$

$$V = 0,083 \left(2 + \frac{\alpha d}{b o} \right) \sqrt{F'c} b o d \quad (1.3)$$

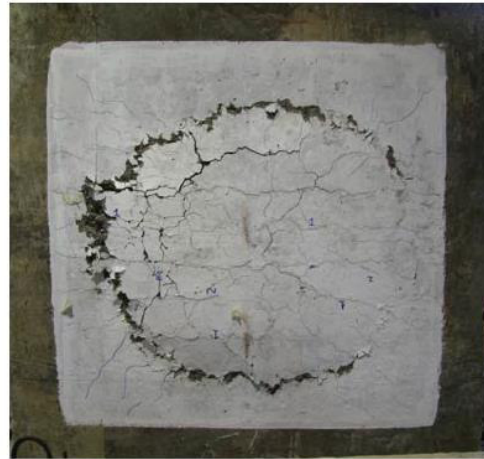
$$V = 0,33 \sqrt{F'c} b o d \quad (1.2)$$

Donde β es la relación del lado largo al lado corto de la columna, la carga centrada, o el área de reacción, b_o es el perímetro de la sección crítica para cortante, d es la distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción y α es 40 para columnas interiores, 30 para columnas de borde, y 20 para columnas en esquina.

Estudios demuestran (Nguyen et al, 2011) que las losas en concreto sin fibras ensayadas a punzonamiento presentan fallas muy frágiles como se ve en la Figura 20, en donde el recubrimiento de concreto en la superficie inferior se pierde. Por otro lado, las losas en concreto reforzado con fibras de acero fallan de un modo más dúctil, además las grietas se forman de una manera uniforme con un ancho menor debido al efecto “puente” que proporcionan las fibras, aumentando la ductilidad y la integridad del sistema (NGUYEN, et al, 2011).



(Concreto sin fibras)



(Concreto con fibras)

Figura 20. Fallas por punzonamiento concreto con y sin fibras. (Nguyen et al, 2011)

La problemática más abordada por los autores para sistemas losa-columna con adición de fibras de acero, es cómo estas aumentan la resistencia al punzonamiento. Por otra parte, la capacidad de disipación de energía en concretos con fibras de acero no es evaluada para este sistema, esta capacidad de disipación solo se ve evaluada en vigas a flexión, aunque se vea aumentada la disipación de energía en las vigas, este modelo no representa la capacidad de disipación que pueda tener un sistema losa-columna frente al punzonamiento.

2.3.2 Capacidad de disipación de energía. En la Tabla 4 se presentan los resultados del trabajo de investigación (Álvarez y Torres, 2014) en el que se elaboraron 4 sistemas losa columna, 3 de ellos con fibra (60 kg/m^3) y uno de control (sin fibra). Las dimensiones de la placa eran de $60 \times 60 \times 15.5 \text{ cm}$ y las de la columna de $12.5 \times 12.5 \times 10 \text{ cm}$. Todos los sistemas fueron ensayados a punzonamiento en donde se evidencia un aumento significativo en la capacidad de disipación de energía de los sistemas con fibra, así como la carga máxima soportada por los mismos.

RESUMEN DE DATOS				
	Losa 1 (Con fibra)	Losa 2 (Con fibra)	Losa 3 (Con fibra)	Losa 4 (Sin fibra)
Carga máxima (kgf)	18536	18252	17550	14687
Incremento en la carga máxima respecto a la losa sin fibra.	26.20%	24.30%	21.00%	-
Capacidad de disipación de energía.	2268	2409	2400	1760
Incremento en la capacidad de disipación de energía respecto a la losa sin fibras.	28.90%	36.90%	36.40%	-

Tabla 4. Resumen de los datos obtenidos (Álvarez y Torres, 2014)

Para el cálculo de la disipación de energía de los sistemas fue necesaria la elaboración de la gráfica Carga vs. Desplazamiento (Figura 21) de los sistemas a medida que iban siendo ensayados. Finalmente, el área bajo la curva de dicha gráfica da como resultado la capacidad de disipación de energía de los sistemas.

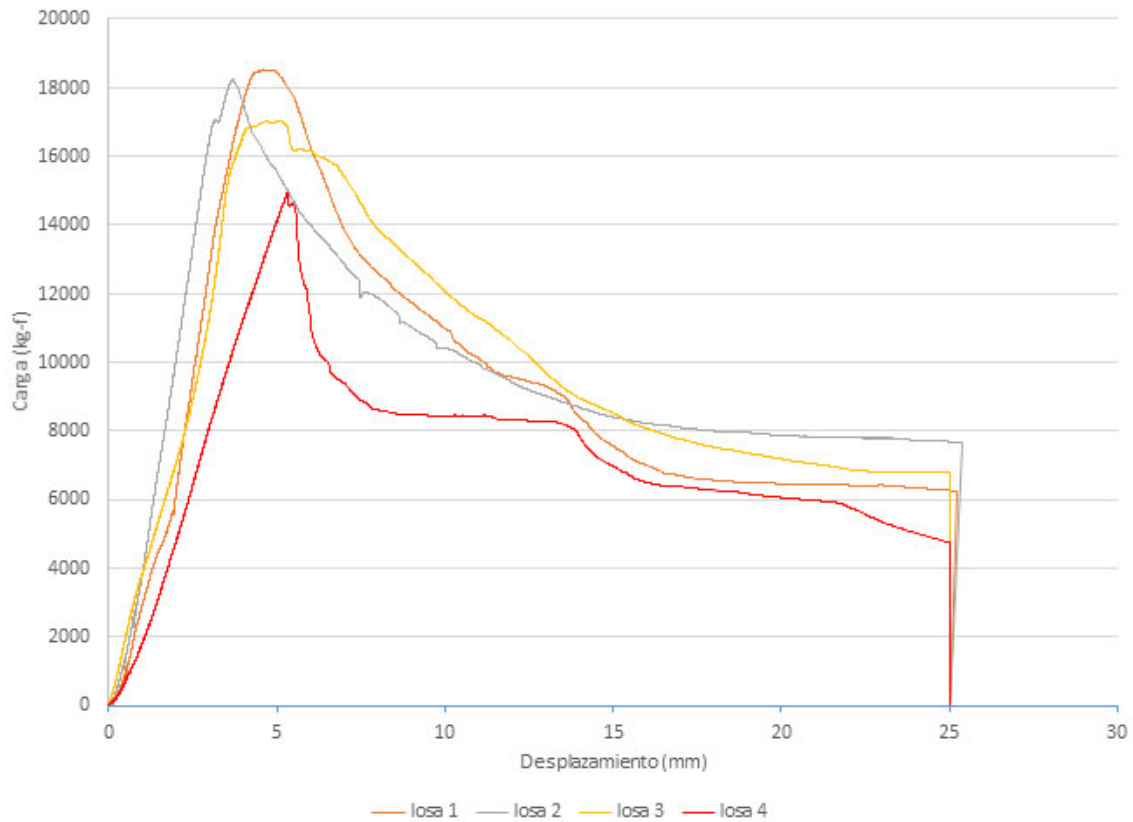


Figura 21. Resumen de los datos obtenidos (Álvarez y Torres, 2014)

Según los resultados anteriormente expuestos, es posible evidenciar no solo que los sistemas con fibra (losa 1, losa 2 y losa 3) tuvieron un aumento en promedio del 35% en su capacidad de disipación de energía, sino que también aumentaron en promedio un 24% en la carga máxima alcanzada por el mismo.

Ahora bien, pese a que los resultados obtenidos de los sistemas con fibra son muy similares, no sería incorrecto afirmar que las discrepancias entre un sistema y otro pudieron deberse a la configuración de las fibras, ya que estas se colocan en el concreto de forma aleatoria.

CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOS

INTRODUCCION

En este capítulo se expone la metodología necesaria para reproducir los ensayos realizados en el laboratorio. En ella se expone desde los modelos numéricos y recopilación de datos necesarios para la elaboración de los sistemas losa columna, hasta una completa descripción de la metodología empleada para ensayar los sistemas. Cabe resaltar que se realizó una breve descripción de los instrumentos empleados tanto en el laboratorio como fuera de él.

3.1 MODELACIÓN NUMÉRICA Y MODELO EXPERIMENTAL

3.1.1 Modelo numérico del edificio. Para la realización de este trabajo de grado se propuso modelar un edificio cuyas características geométricas, de altura y ocupación, generaran durante un evento sísmico solicitaciones de momento y carga axial en los nodos del edificio de tal manera que pudieran ser representadas en el Laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

Para realizar este modelo se tuvieron en cuenta las principales limitaciones que condicionarían el diseño de este modelo. En este caso la limitación más importante está dada por los actuadores hidráulicos, los cuales tienen una capacidad máxima de carga de 25 y 10 toneladas, con los cuales se debe aplicar la fuerza axial y el momento al nodo en cuestión.

Por otro lado, se tuvieron en cuenta las limitaciones geométricas para realizar el modelo experimental. Por tal motivo, la losa debe ser del menor espesor posible debido a que esta dimensión será la que rijan el diseño geométrico del nodo. Esto si se tiene en cuenta que la falla por punzonamiento se genera desde el borde de la columna propagándose en el espesor de la losa con un ángulo de 30° a 45° como se explicó en el marco teórico del presente documento. Por tal motivo, a menor espesor de la losa será menor el área superficial requerida en el modelo experimental para que se presente una falla por punzonamiento.

La edificación diseñada en este trabajo está basada en una planta tipo que ha sido utilizada anteriormente en trabajos de investigación (Ruiz et al, 2012) como se muestra en la figura 22. Esta planta tipo fue estudiada en la década de los 90 para realizar balances económicos de las edificaciones diseñadas con la norma NSR98. (García, 1996).

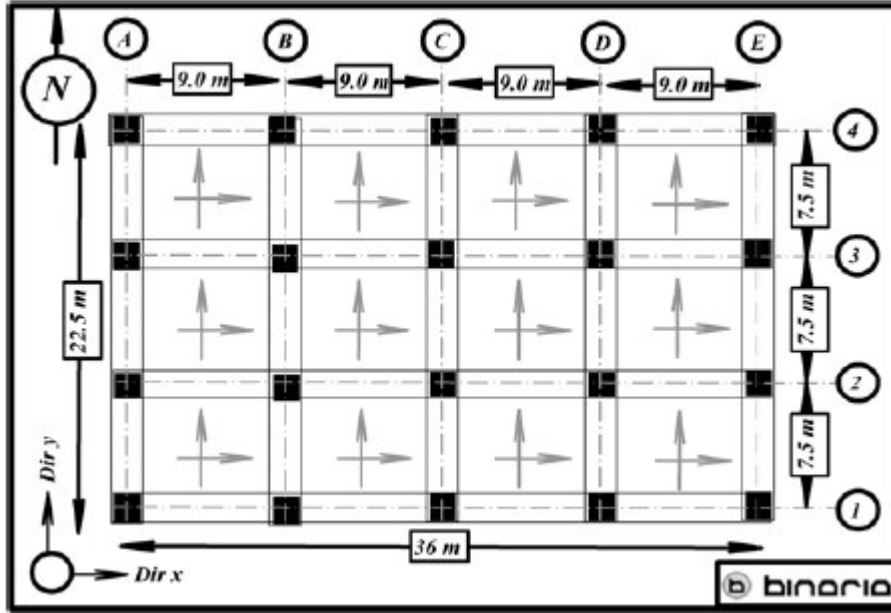


Figura 22. Planta tipo (García, 1996).

Debido a las limitaciones mencionadas anteriormente las luces de esta planta base no podían ser utilizadas debido a que las cargas axiales en las columnas superan la capacidad de los actuadores, por este motivo se utilizó una planta tipo que tuviera el mismo número de pórticos en la dirección X y en la dirección Y con una luz entre columnas de 3 metros como se muestra en la figura 23.

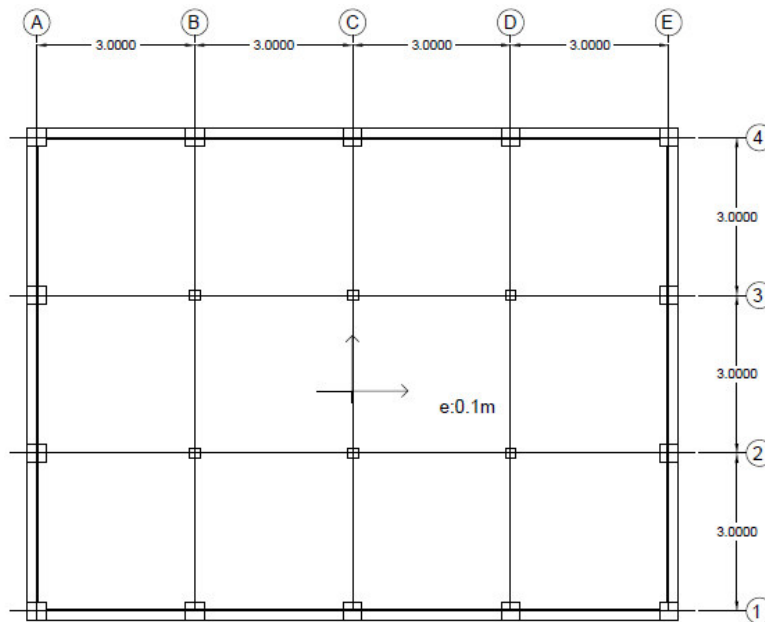


Figura 23. Planta tipo modificada.

La planta fue modelada con columnas perimetrales de 35x35 cm, columnas centrales de 20x20 cm, vigas de 20x30 cm y una losa maciza de 10 cm de espesor en toda su área. El concreto empleado en la placa fue de 21 Mpa y en columnas de 28 Mpa. La losa fue sometida a solicitaciones de carga viva y muerta uniformemente distribuidas según se indica en la NSR 10 TITULO B (Tabla B.4.2.1-1 y Tabla B.3.4.3-1) con una magnitud de 1.6 Kn/m^2 y 3.0 Kn/m^2 respectivamente.

Definida la planta tipo, se realizó un modelo elástico lineal de un edificio en el programa SAP2000 de 4 pisos con una altura total de 12 m como se muestra en la figura 24 (cumpliendo lo establecido en la Tabla A-3-3 de la NSR-10). Cabe resaltar que dicho edificio fue modelado para una zona de riesgo sísmico intermedio (Bogotá) y su geometría cumple con la deriva máxima permitida por la norma.

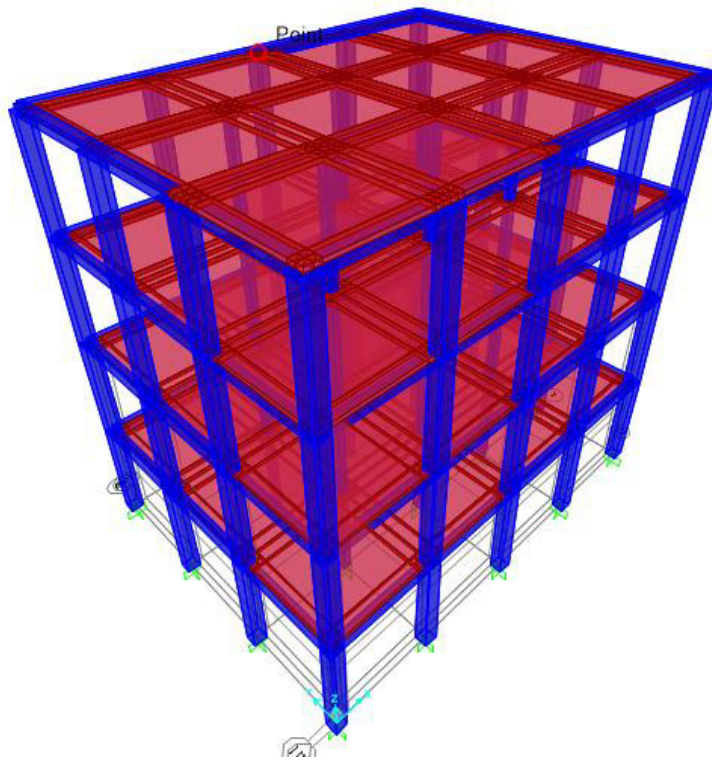


Figura 24. Modelo numérico.

Considerada la ubicación de la edificación la estructura fue sometida al sismo de Tauramena. La señal sísmica que fue ingresada en el modelo numérico se muestra en la figura 25, la cual tiene una aceleración máxima de $0,2 \%$ de la gravedad y duración de 57 segundos.

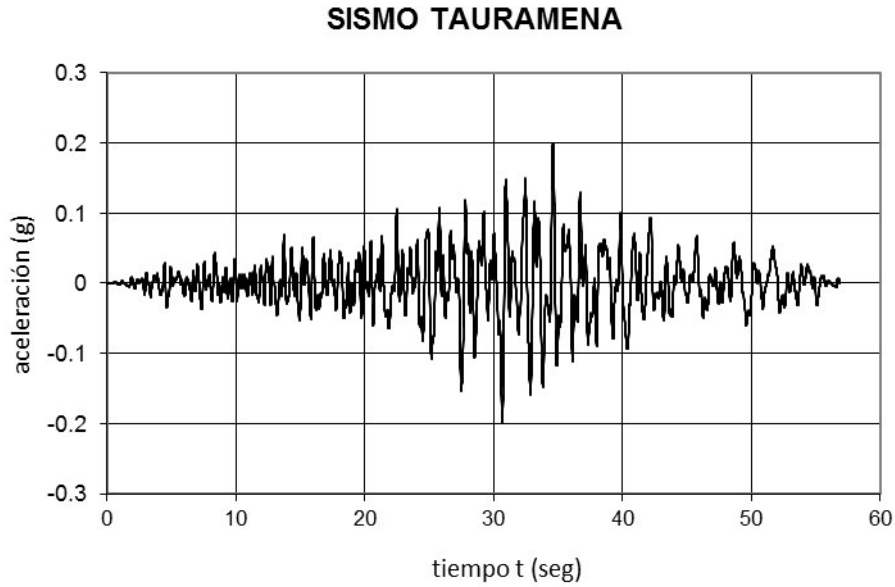


Figura 25. Sismo Tauramena.

Una vez realizado el modelo en SAP2000, lo siguiente fue seleccionar el nudo de interés basados en las limitaciones del laboratorio de la universidad. En la figura 26 se muestra el nudo que se decidió iba a ser representado en el modelo experimental. Cabe resaltar que el piso en el cual se seleccionó el nudo fue el piso 3, dado que se debían obtener valores de momento y axial no muy altos que pudieran ser simulados correctamente.

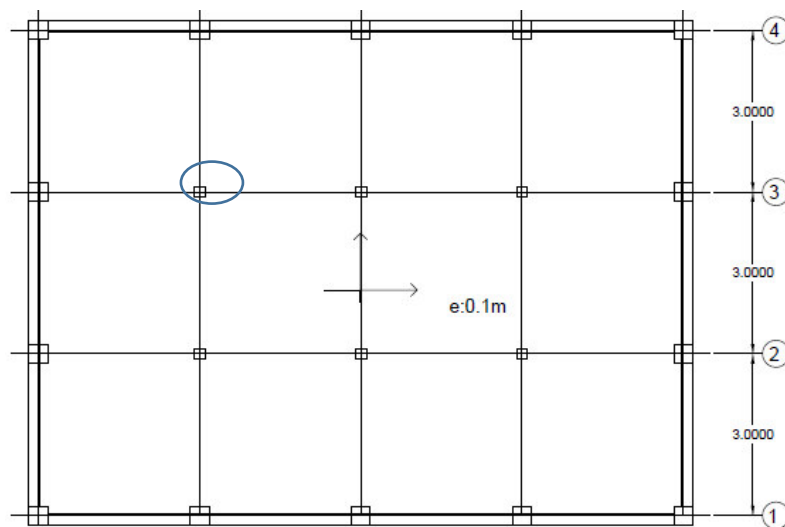


Figura 26. Nudo seleccionado.

Una vez definidos todos los parámetros de diseño se calculó la deriva de la estructura, la cual debe ser menor al 1% según la NSR-10 (Tabla A.6.4-1). Los resultados se presentan en la tabla 5.

Se puede observar que la deriva más grande que se presenta tiene un valor de 0.88% y se presenta en el piso 2. De acuerdo a estos resultados en la Figura 27 se presentan los desplazamientos en los nodos inferior y superior de la columna del piso 2.

	Dirección X		Dirección Y		Deriva x	Deriva y	Deriva total	Deriva en %
	Piso inferior	Piso superior	Piso inferior	Piso superior				
piso1	0	0,0173	0	0,0002	0,00577	0,00007	0,0058	0,58%
piso2	0,0173	0,0436	0,0002	0,0004	0,00877	0,00007	0,0088	0,88%
piso3	0,0436	0,0649	0,0004	0,0005	0,00710	0,00003	0,0071	0,71%
piso4	0,0649	0,0779	0,0005	0,0006	0,00433	0,00003	0,0043	0,43%

Tabla 5. Derivas máximas.

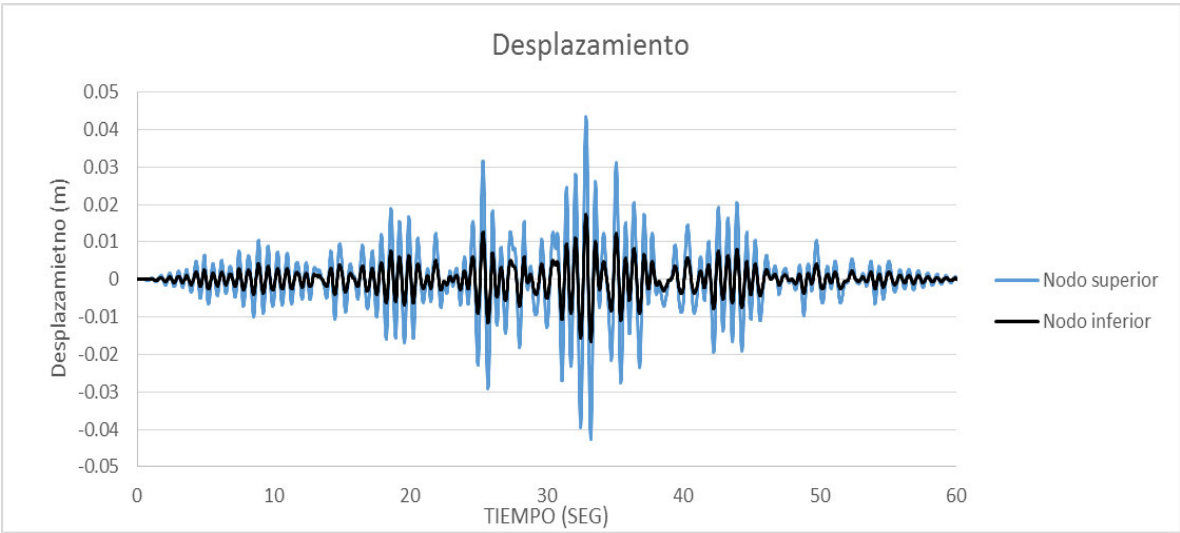


Figura 27. Desplazamientos máxima deriva.

La primera sollicitación de interés fue la fuerza axial de la columna, esta se obtuvo de dos formas, la primera de ellas bajo la acción de cargas vivas y muertas y, la segunda de forma dinámica (100% sismo en x, 30% sismo en Y) obteniendo así valores de 11 y 10.32 Ton-f respectivamente. La variación de la carga axial durante el sismo se presenta en la figura 28.

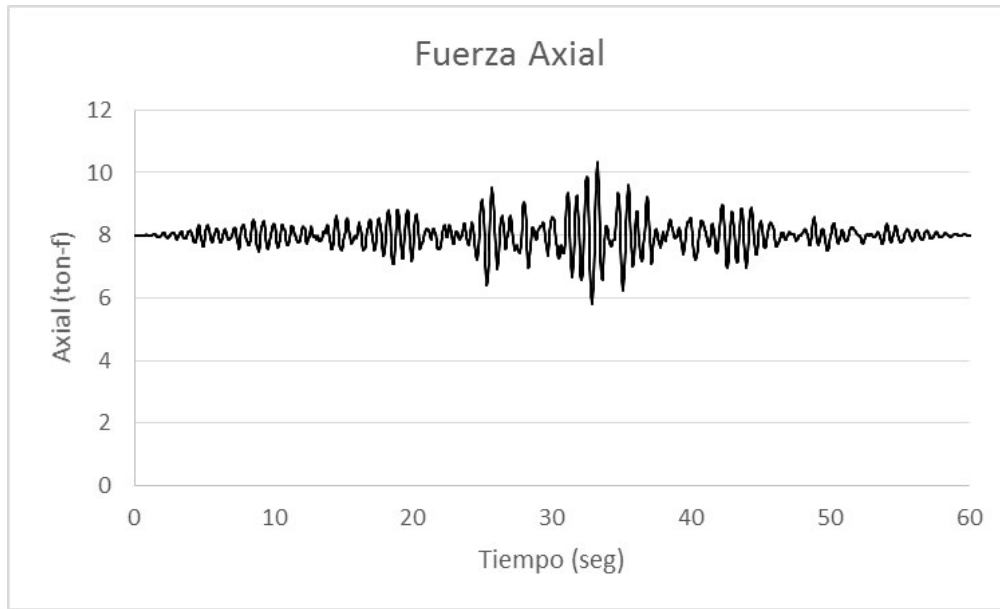


Figura 28. Fuerza Axial.

La siguiente sollicitación evaluada fue el momento que se presenta en el nodo durante el evento sísmico. El momento máximo positivo fue de 1.29 Tonf-m mientras que el negativo fue de -1.31 Tonf-m. La variación del momento durante el evento sísmico se muestra en la figura 29.

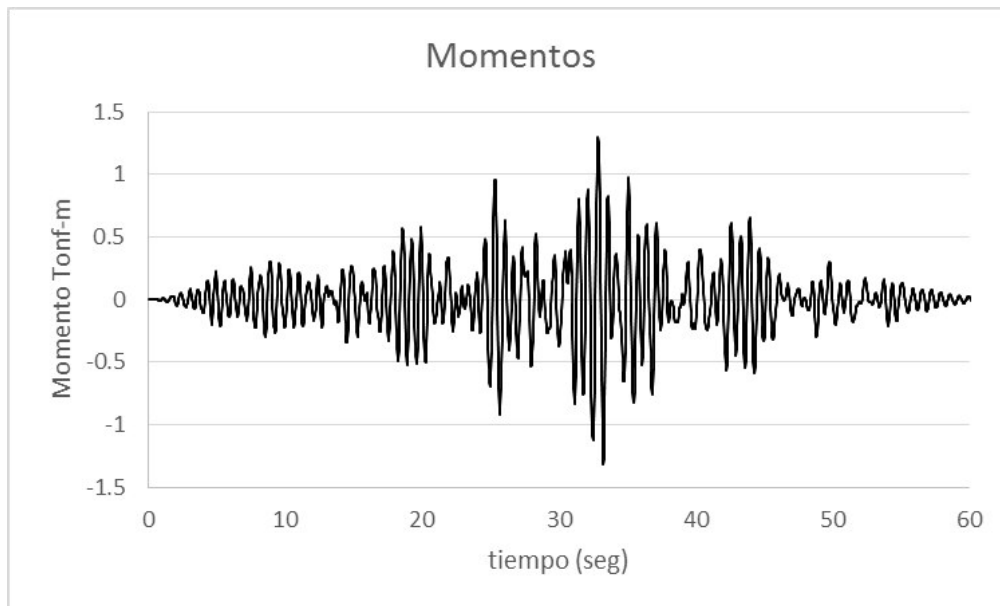


Figura 29. Momento en el nodo.

3.1.2 Diseño modelo experimental. Obtenidas las solicitaciones, se elaboró el diseño geométrico del modelo experimental, para lo cual se propuso realizar una losa de 70x70 cm, la cual permite que la falla por punzamiento teórica se genere dentro del área de la losa. Considerando que la columna es de 20x20 cm, el ancho de la losa 10 cm y el ángulo de falla de 45° la falla se presentará a 10 cm del borde de la columna generando un área de falla de 40x40 cm, permaneciendo a 15 cm del borde de la losa como se muestra en la figura 30.

Así mismo, el sistema se apoya en dos direcciones haciendo que se dificulte la falla a flexión del sistema. Para evitar una posible falla a flexión, las losas deberán llevar un refuerzo a tensión con un recubrimiento de 20 mm y una cuantía de $P=0.0142$ conformado por siete varillas #3 separadas a 110 mm en ambos sentidos, cumpliendo con la cuantía mínima de $P=0.002$ según la NSR 10 (C.14.3.3).

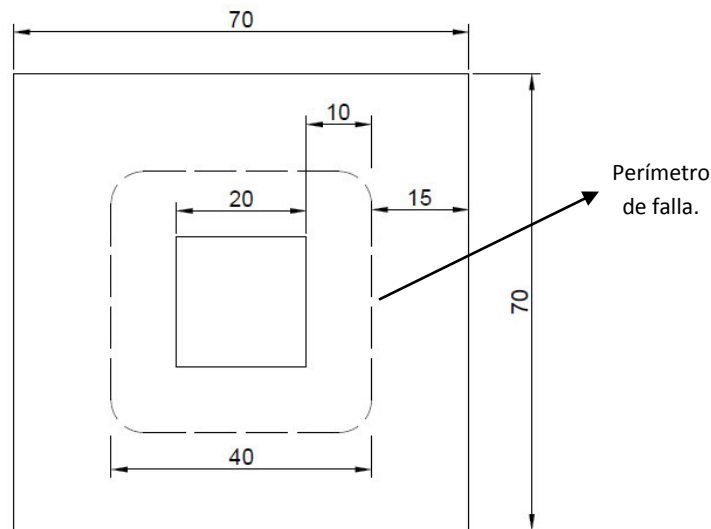


Figura 30. Perímetro de falla nodo.

Por otro lado, fue posible comprobar en trabajos de investigación (Álvarez, Torres, 2015) que bajo geometrías similares se puede generar una falla por punzonamiento. En este trabajo se utilizaron losas con un área 60 x 60 cm con un espesor de 12.5 cm y una columna de 12.5x12.5 cm en donde se presentó la falla con un ángulo de 45° dentro del perímetro de la losa como se ve en la figura 31.



Figura 31. Falla punzonamiento (Álvarez, Torres, 2015)

Una vez definidas las dimensiones se realizó un modelo de elementos finitos con el fin de comprobar si existe una concentración de esfuerzo cortante en el sistema dentro de la geometría propuesta. EL modelo numérico por el método de los elementos finitos se realizó mediante el software SAP2000, el modelo numérico del sistema losa-columna está compuesto por elementos sólidos en concreto de 21 MPA, con una malla de 5x5 mm en la sección transversal de la losa y una malla de 2.5 mm en su altura con 4 capas para generar el espesor de 10 cm, la columna se modeló con una malla de 5x5 mm en la sección transversal y una altura 30 cm dividida en una malla cada 5 mm, el modelo fue cargado axialmente con 11 toneladas. El detallado del modelo en elementos finitos se muestra en la figura 32.

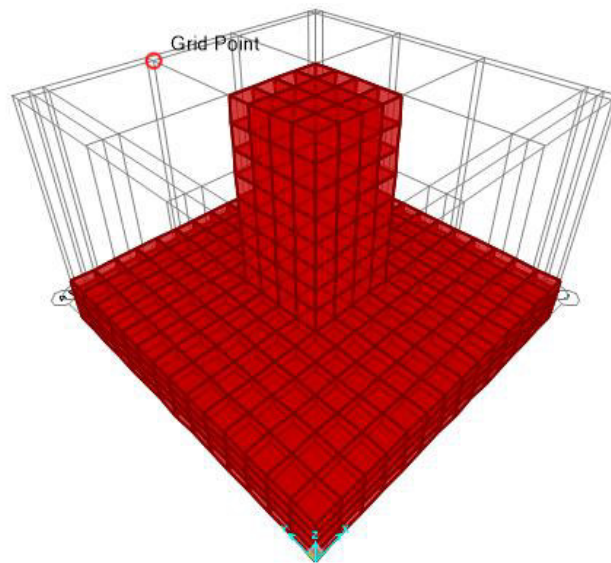


Figura 32. Modelo del nodo mediante elementos finitos

Como se puede observar en la Figura 33 (a) existe una concentración de esfuerzos cortantes en la losa ubicados perimetralmente alrededor de la columna a una distancia cercana al espesor de la losa. Adicionalmente en la figura 33 (b) se puede observar que la concentración de esfuerzos forma un trapecio de falla con un ángulo de 45°. A partir de este modelo numérico se puede concluir que mediante el modelo experimental propuesto para el nodo es posible obtener una falla por punzonamiento del sistema losa-columna dentro de la geometría propuesta.

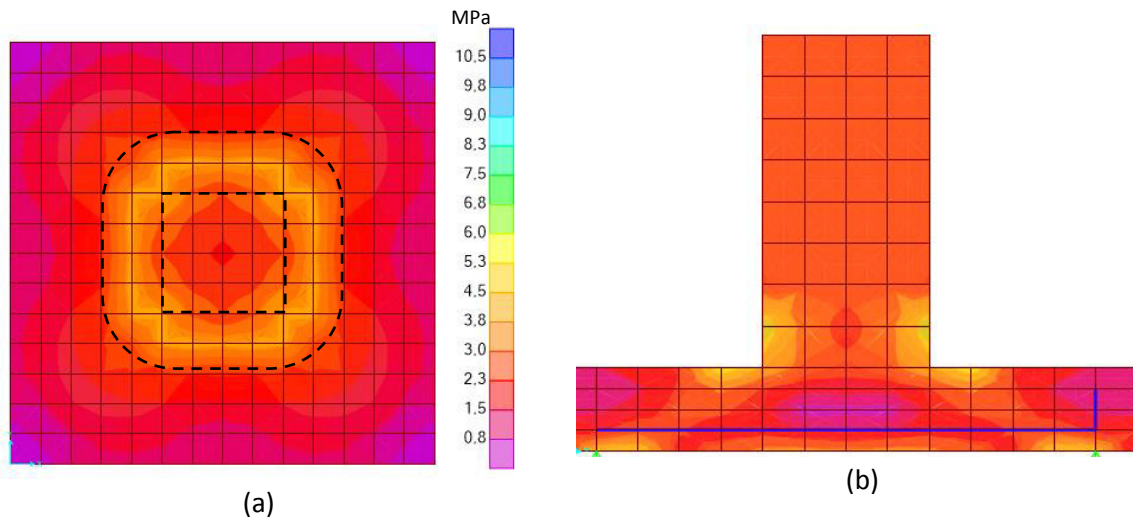


Figura 33. Concentración de esfuerzo cortante.

3.1.3 Montaje experimental. Definidas las solicitaciones y geometría del nodo, se diseñó el montaje experimental. Se verificó que la fuerza axial máxima solicitada pudiese ser generada por el actuador de mayor capacidad, al tener una carga axial máxima de 10.32 Ton-f se comprueba que sí es posible generar esta carga en laboratorio con el actuador de 25 Ton de capacidad, dejando un rango de 14 Ton para llevar el modelo a solicitaciones mayores que pudieran generar una falla por punzonamiento en caso de que las solicitaciones del evento sísmico no la generen.

Adicionalmente, el momento máximo generado fue de 1.31 Ton-m, momento que pudiese ser reproducido en el laboratorio con el actuador pequeño, el cual tiene una capacidad de hasta 10 Ton-f. Para verificar lo anterior, conviene definir la ecuación de momento como $M=F \times H$ siendo F la fuerza y H el brazo en que ella se aplica. De acuerdo a lo anterior, con un brazo de 40 cm (longitud de columna a analizar) es posible llegar al momento deseado con una carga aplicada de 3.3 Ton, valor que está dentro del rango de aplicación de carga del actuador.

Una vez verificado que los actuadores pudiesen reproducir en laboratorio las solicitaciones a las que está sometido el nodo del sistema losa-columna, se confirmó que las condiciones geométricas del pórtico en donde se realizarán los ensayos son apropiadas para la realización de los mismos. A partir de lo anterior, se realizó un plano del montaje experimental el cual se muestra en la figura 34 y en la figura 35.

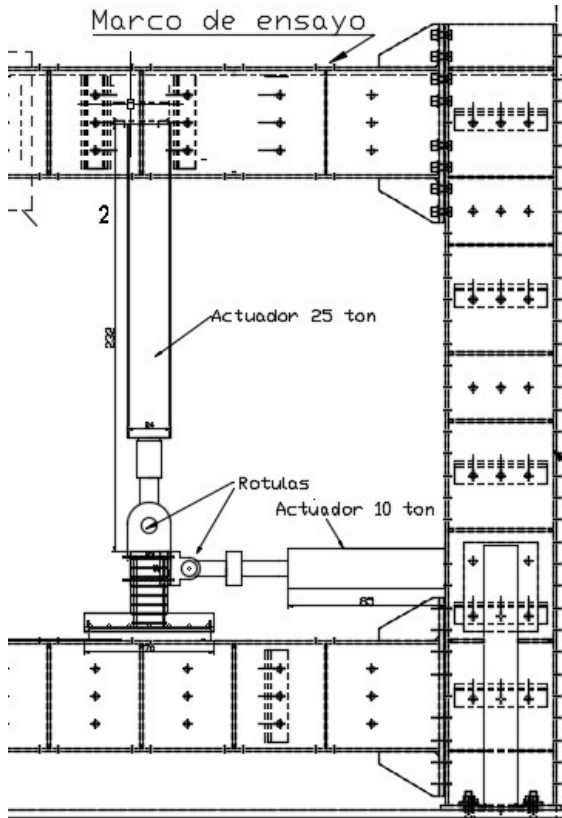


Figura 34. Montaje experimental completo

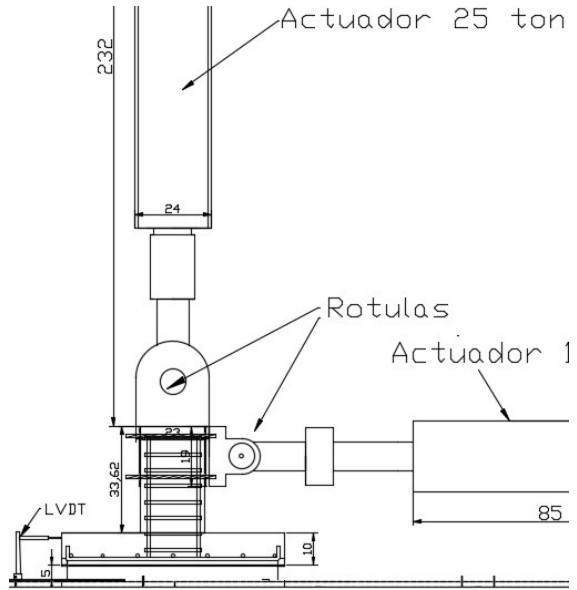


Figura 35. Detalle montaje experimental.

3.2 MATERIALES

Se utilizaron los siguientes materiales para la construcción de cilindros, vigas y cuatro sistemas de losa-columna para ensayos de punzonamiento.

3.2.1 Agregados

3.2.1.1 Agregado grueso Se utilizó agregado grueso de tamaño máximo nominal de 1/2". Para obtener las características del material se le realizó un análisis granulométrico cumpliendo con todos los requisitos de ensayo según la norma I.N.V.E-213-07.

Para tener un material homogéneo y reducir la variación en la granulometría, todo el material grueso fue lavado y tamizado bajo un tamiz N.4, posteriormente se llevó a un horno a 110°C durante 24 horas para eliminar la humedad.

En la Tabla 6 se muestran los resultados de la granulometría realizada donde se confirma el tamaño máximo nominal de 1/2''.

Peso total muestra inicial 2004.5 g					
Abertura (mm)	Tamiz	Peso Retenido (g)	% Retenido	Retenido acumulado	% Pasa
19	3/4"	0	0.0	0.0	100.0
12.7	1/2"	201.7	10.1	10.1	89.9
9.5	3/8"	650.1	32.5	42.5	57.5
4.8	#4	1073.6	53.6	96.1	3.9
1.18	Fondo	77.1	3.9	100.0	0.0
Total		2002.5	% perdido de la muestra		0.10

Tabla 6. Granulometría agregado grueso

En la Tabla 7 se muestran los valores máximos y mínimos de porcentaje que pasa, que deben cumplir los materiales de 1/2'' para usarse en concretos, según la norma ASTM C33. Al analizar las tablas 7 y 8 se puede concluir que el material está entre los valores permitidos por la ASTM C33 en todas las aberturas de los tamices, por lo cual el material es apto para ser usado como agregado para concretos. En la Figura 36 se muestra la granulometría del material y los valores límites de la norma.

Abertura (mm)	% Pasa	
	Máximo	Mínimo
19	100	98
12.7	100	90
9.5	70	40
4.8	15	0
1.18	5	0

Tabla 7. Tamaños máximos y mínimos agregado grueso.

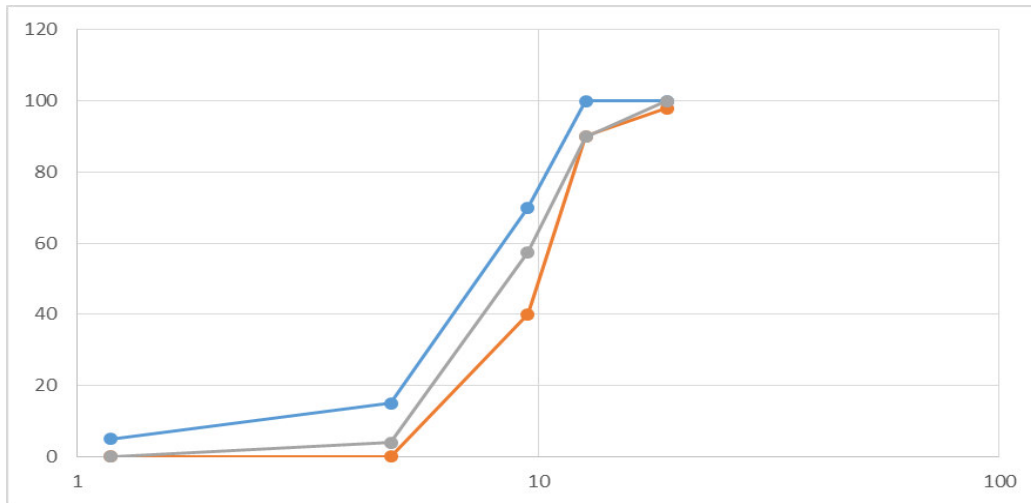


Figura 36. Granulometría material grueso.

Para obtener las propiedades del material requeridas para hacer un diseño de mezcla, se siguieron todas las indicaciones establecidas por las normas pertinentes. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

Ensayo	Norma	Resultado
Masa unitaria suelta g/lt	I.N.V.E-217-07	1439.0
Masa unitaria compacta g/lt	I.N.V.E-217-07	1570.8
Gravedad específica Gs	I.N.V.E-223-07	2.48
Gravedad específica saturada superficialmente seca Gs(sss)	I.N.V.E-223-07	2.53
Gravedad específica aparente	I.N.V.E-223-07	2.62
Absorción (%)	I.N.V.E-223-07	2.27

Tabla 8. Características material grueso

3.2.1.2 Agregado Fino

Granulometría. Para obtener las características del material se realizó un análisis granulométrico cumpliendo con todos los requisitos de ensayo según la norma I.N.V.E-213-07.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la granulometría realizada. Cabe resaltar que se obtuvo un módulo de finura de 3.13 en el agregado fino.

Peso total muestra inicial		423.31 g			
Abertura (mm)	Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido	Retenido acumulado	% Pasa
2.4	#8	101.3	24.0	24.0	76.0
1.2	#16	86.2	20.4	44.3	55.7
0.6	#30	88.8	21.0	65.3	34.7
0.3	#50	64.2	15.2	80.5	19.5
0.15	#100	76	18.0	98.5	1.5
0.075	#200	4.79	1.1	99.6	0.4
0.04	fondo	1.59	0.4	100.0	0.0
Total		422.88	% Perdido de la muestra		0.10

Tabla 9. Granulometría agregado fino.

En la Tabla 10 se muestran los valores máximos y mínimos de % que pasa, que deben cumplir los materiales finos para usarse en concretos, según la norma NTC 174. Al analizar las tablas se puede concluir que el material está entre los valores permitidos por la NTC 174 en todas las aberturas de los tamices, por lo cual el material es apto para ser usado como agregado para concretos. En la Figura 37 se muestra la granulometría del material y los valores límites de la norma.

Abertura (mm)	% Pasa	
	Mínimo	Máximo
2.4	80	100
1.2	50	85
0.6	20	60
0.3	10	30
0.15	2	10

Tabla 10. Tamaños máximos y mínimos agregado fino.

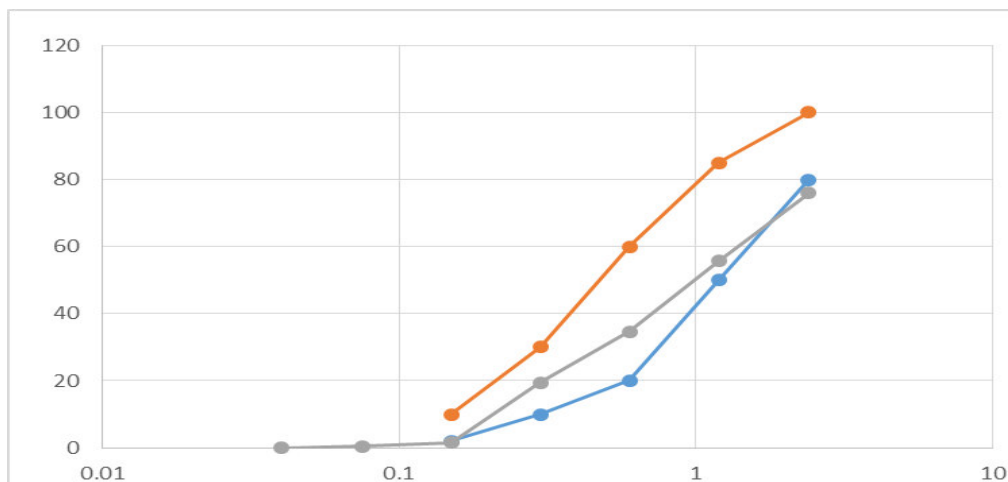


Figura 37. Granulometría material fino.

Para obtener las propiedades del material requeridas para hacer un diseño de mezcla, se siguieron todas las indicaciones establecidas por las normas pertinentes. Los resultados se presentan en la Tabla 11.

Ensayo	Norma	Resultado
Masa unitaria suelta g/lt	I.N.V.E-217-07	1460.9
Masa unitaria compacta g/lt	I.N.V.E-217-07	1551.6
Gravedad específica Gs	I.N.V.E-223-07	2.33
Gravedad específica saturada superficialmente seca Gs(sss)	I.N.V.E-223-07	2.43
Gravedad específica aparente	I.N.V.E-223-07	2.58
Absorción (%)	I.N.V.E-223-07	4.10

Tabla 11. Características material fino.

3.2.2 Cemento. Se utilizó cemento Argos gris de uso general. Según especificaciones de Argos ofrece altas resistencias iniciales y finales, provee una excelente durabilidad en ambientes con polución y tiene un buen desempeño en el terminado.

3.2.3 Fibras de acero. Se utilizaron fibras de acero Bekaert Dramix® 5D con una longitud de 61 mm, diámetro de 0,9 mm, relación de aspecto de 68, resistencia a la tracción de 2300 N/mm² y módulo de elasticidad de 200 GPA (BEKAERT, 2013). Estas fibras presentan “un alambre de gran ductilidad y una resistencia a la tracción extremadamente elevada. Las fibras de acero 5D permiten crear un anclaje más resistente, con lo que se mantienen firmemente en su lugar dentro del hormigón. Ante la tracción, el alambre se alarga, lo cual proporciona ductilidad según el mismo principio que el acero de refuerzo tradicional” (NV Bekaert SA, 2012).

En la Figura 21 se muestra la curva tensión deformación que presentan los diferentes tipos de fibra de fácil consecución en el mercado, evidenciando la superioridad en resistencia y ductilidad de las fibras 5D utilizadas en los modelos utilizados en este trabajo de grado.

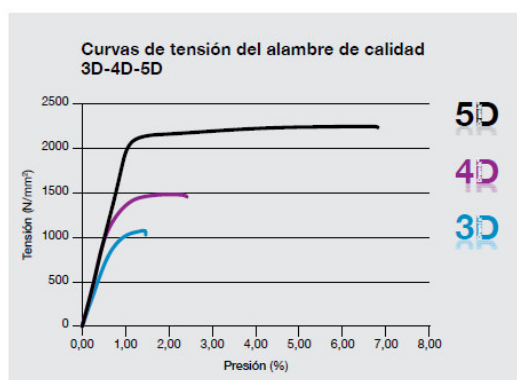


Figura 38. Curva esfuerzo vs deformación diferentes tipos de fibra. (NV Bekaert SA, 2012).

3.2.4 Aditivo. Se utiliza un aditivo súper plastificante del tipo GLENIUM® C 355 plus, que según sus características es un aditivo reductor de agua de alta actividad. Es utilizado para producir concreto con diferentes niveles de manejabilidad, el cual fluye fácilmente, manteniendo su trabajabilidad por prolongados períodos de tiempo sin ningún efecto en el tiempo de fraguado (Master builders solution). En este caso el uso del súper plastificante en la mezcla no fue para reducir el agua y obtener mayor resistencia, sino para mantener la manejabilidad del concreto a pesar de la presencia de las fibras de acero en la cuantía propuesta.

3.2.5 Concreto. Las losas, vigas y cilindros usados para este trabajo de investigación fueron realizados con un diseño de mezcla para concretos de 21 MPa. Las columnas fueron construidas con un concreto de 35 MPa. Los diseños de mezcla para concretos de 21 y 35 MPa se muestran en el siguiente numeral.

3.3 DISEÑO DE MEZCLA

3.3.1 Diseño de mezcla teórico. El concreto utilizado para este trabajo de investigación fue diseñado y elaborado con los materiales antes descritos, por el método de la ACI 211.1. El diseño de mezcla fue planteado para tener una resistencia final a la compresión de 21 Mpa, y un asentamiento de 10 cm. En la Tabla 12 se muestran los resultados y consideraciones tomadas en cuenta para realizar el diseño de mezcla propuesto.

Materiales	Gs	% Hum.	% Abs.	MUC	MUS
Agua	1	-----	-----	-----	-----
Cemento	2.86	-----	-----	-----	-----
Grava	2.48	0.33	2.27	1571	1439
Arena	2.33	4.47	4.1	1552	1461
M finura =	3.13				
TMN	1/2 "				

Tabla 12. Propiedades de los materiales para diseño de mezcla.

El volumen de agua y contenido de aire de acuerdo a la ACI 211.1 se obtiene a partir del asentamiento y el tamaño máximo nominal, 10cm y ½” respectivamente, dando como resultado un volumen de 215 lt/m³ con un contenido de aire de 2.5%.

La relación de agua cemento se da a partir de la resistencia del concreto a los 28 días y la inclusión de aire en la mezcla, para este diseño el concreto no tendrá inclusión de aire y se diseña para una resistencia de 21 MPA. Bajo estas condiciones la relación agua cemento es de 0.6.

La cantidad de grava se obtiene a partir del Módulo de Finura de la arena y del tamaño máximo nominal de la grava, 3.13 y ½” respectivamente. Para este valor de Módulo de Finura y tamaño máximo nominal se obtuvo como resultado 0,517 m³ de agregado grueso por 1 m³ de concreto.

De acuerdo a lo anterior el diseño de mezcla teórico final por metro cúbico de concreto de 21 MPa y 35 MPa se muestra en las Tablas 13 (a) y (b) respectivamente. Cabe resaltar que las losas, cilindros y vigas se fabricaron con concreto de 21 Mpa y las columnas de 35 Mpa.

Material	KG por 1 m ³		Relación	Material	KG por 1 m ³		Relación
	Seco	Húmedo			Seco	Húmedo	
Agua	215.00	228.42	0.49	Agua	215.00	220.85	0.411
Cemento	463.36	463.36	1.00	Cemento	537.50	537.50	1.000
Grava	812.10	814.78	1.76	Grava	1062.54	1062.54	1.977
Arena	630.32	658.50	1.42	Arena	398.80	415.15	0.772

(a) Concreto de 21 MPa

(b) Concreto de 35 MPa

Tabla 13. Diseño de mezcla teórico.

3.3.2 Diseño de mezcla experimental. Al incorporar fibras de acero en el concreto, se hizo necesaria una modificación en el diseño teórico de mezcla teórico para obtener los 10 cm de asentamiento esperado mediante la inclusión de una determinada cantidad de aditivo plastificante. El diseño de mezcla final por metro cubico de concreto de 21 MPA teniendo en cuenta tanto el diseño teórico como experimental se muestra en la Tabla 14.

Material	KG por 1 m ³		Relación
	Seco	Húmedo	
Agua	215	216.95	0.605
Cemento	358.33	358.33	1
Grava	1062.54	1062.54	2.965
Arena	557.92	580.79	1.621
Fibra	60.00	60.00	0.209
Glenium 355	-----	-----	0.0018

Tabla 14 Diseño de mezcla final

3.4 ELABORACIÓN DE LOS SISTEMAS LOSA-COLUMNA

Una vez definida la mezcla de concreto se procedió a realizar el armado a flexión de las losas y la formaleta con la cual se llevó a cabo la fundición de las losas como se ve en la figura 39.



Figura 39. Armado y formaleta para losas.

Posteriormente se realizaron las losas para lo que se elaboró un procedimiento de mezclado que consistió en lo siguiente:

- ✓ Verter el agregado junto con la arena en la maquina DOMAT y mezclar por 30 segundos.
- ✓ Verter el cemento y mezclar durante 30 segundos.
- ✓ Verter el 70% del agua y mezclar durante 45 segundos.
- ✓ Verter las fibras de acero y mezclar durante 45 segundos.
- ✓ Verter el 30% de agua restante junto con el aditivo y terminar de mezclar durante 1 minuto.

Nota: Cabe resaltar que para la losa de control (sin fibra) se siguió exactamente el mismo procedimiento salvo la inclusión de aditivo y fibra.

En la Figura 40 se muestran algunas de las cantidades de material que fueron utilizados para la elaboración de las losas.



Figura 40. Materiales para concreto.

La máquina con la cual se realizó el mezclado de las 4 losas fue la mezcladora planetaria Zyclos, Figura 41.



Figura 41. Mezcladora planetaria Zyklos.

Para compactar las losas se utilizó un vibrador de aguja para concreto asegurando una mejor distribución del concreto en la formaleta y eliminar el aire en la mezcla. Dicho vibrador se observa en la Figura 42.



Figura 42. Vibrador de concreto.

Una vez elaborada la mezcla y se tiene listo el vibrador se procede a vaciar el concreto sobre la formaleta. En la figura 43 se muestra la losa de control terminada.



Figura 43. Sistema losa columna.

Con el fin de realizar la correspondiente caracterización del concreto con fibras de acero se elaboraron vigas y cilindros como se observa en la Figura 44.



Figura 44. Vigas y cilindros.

3.5 METODOLOGÍA DE ENSAYO

3.5.1 Ensayo de corte de corte directo en vigas. Para este ensayo se siguieron las recomendaciones japonesas JSCE-Sf6 las cuales permiten alcanzar resultados válidos y con poca variabilidad (Carmona, Cabrera, 2009). Se establece el uso de la configuración mostrada en la Figura 45.

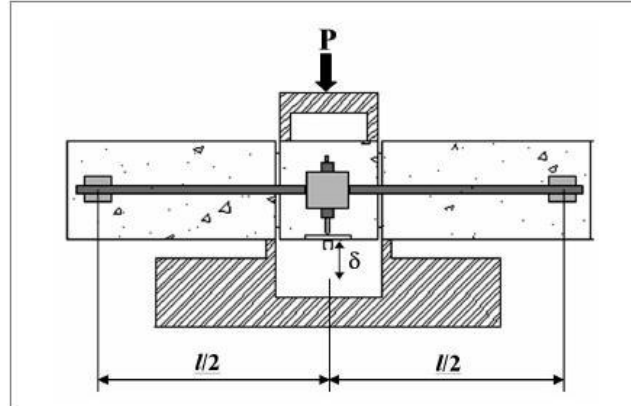


Figura 45. Configuración general según recomendación japonesa JSCE-Sf6 (Carmona, Cabrera, 2009).

La carga de corte se aplicará a una velocidad de 1.3 mm/ min sobre una viga prismática de 100 mm x 100mm x 350 mm de lado que fueron compactadas en dos capas apisonadas 50 veces. Las vigas tendrán unas entallas cortadas con una sierra con 10mm de profundidad en todas sus caras. El esfuerzo de corte se produce mediante una carga de compresión transmitida a la viga por medio de un bloque metálico con dos cuñas, cuyas caras exteriores coinciden con el borde interno de las entallas realizadas en la viga, separadas 100 mm entre sí. La viga debe ser apoyada en dos cuñas metálicas fijas a un bloque rígido, cuyas caras internas coincidan con el borde externo de las entallas de las vigas, separadas 105 mm, de manera que a través de una zona de 2.5 mm de ancho se produzca un campo de esfuerzos de corte concentradas (Mirsayah, Bantia, 2002). Los aditamentos metálicos pueden verse en la Figura 46.

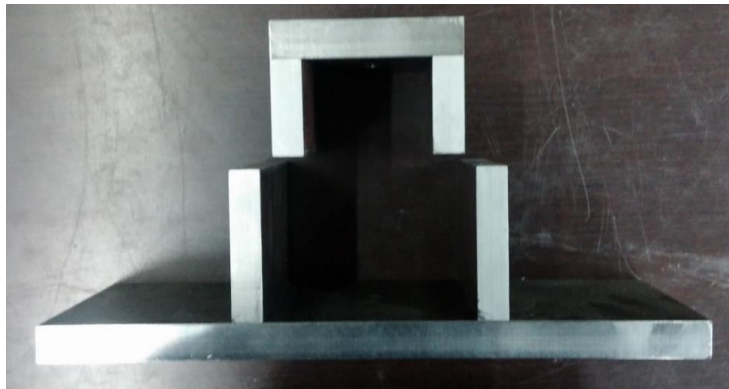


Figura 46. Aditamentos metálicos para ensayos a corte.

Las vigas sin fibra se cargarán hasta evidenciar la falla o hasta la rotura de la viga. Las vigas con fibra, según las investigaciones realizadas anteriormente, se cargarán hasta conseguir un desplazamiento en el bloque interior de la viga de 10 mm.

Los ensayos se realizaron en una máquina universal marca SHIMADZU UH 100A con una capacidad de carga de 1000 KN, la carga aplicada fue registrada con una celda de carga modelo ACE Instruments modelo 4105 con capacidad de 1000 KN. El desplazamiento se mide con un transductor de desplazamiento (LVDT), ubicado en el centro de la viga, ambas señales serán registradas mediante un sistema de adquisición de datos marca NATIONAL INSTRUMENTS.

3.5.2 Ensayo cíclico de punzonamiento. Para la realización de este ensayo, los modelos losa columna fueron apoyados perimetralmente en un marco metálico de 600 mm x 600 mm, lo suficientemente rígido para no deformarse durante los ensayos. Para impedir deslizamientos horizontales en el modelo, se ubicaron dos perfiles metálicos en el borde de la losa en dirección perpendicular a la aplicación de la carga asegurados al pórtico de apoyo. Para la adquisición de datos se utilizaron dos LVDTs conectados a un sistema de adquisición de datos, el primero posicionado en el centro de la losa para medir la deflexión

de la losa, y el segundo ubicado en el perfil metálico que asegura el modelo para medir posibles desplazamientos horizontales. El detalle de la ubicación de los LVDTs se muestra en la figura 47, los datos de fuerza y desplazamiento horizontal fueron tomados directamente del sistema de adquisición de datos del actuador al igual que los datos de fuerza vertical.



LVDT vertical.



LVDT horizontal.

Figura 47. Detalle de ubicación de LVDTs

Los ensayos fueron controlados por desplazamiento en el actuador horizontal y controlados por carga para el actuador vertical; esto con el fin de mantener una fuerza axial uniforme en el modelo durante el ensayo. Se llevó el modelo a un desplazamiento máximo horizontal equivalente a una deriva del 1%, si se considera que la columna tiene una altura de 400 mm, el desplazamiento total ejercido en el modelo deberá ser de 4 mm. Este desplazamiento se dividió en diez ciclos, cada ciclo se realizó tres veces. En el primer ciclo los modelos se llevaron a un desplazamiento máximo de 0,4 mm, aumentando en cada ciclo el desplazamiento máximo en 0,4 mm hasta llevarlo a 4 mm de desplazamiento horizontal, como se observa en la figura 48. Con los ciclos horizontales establecidos, los modelos losa columna fueron cargados axialmente, comenzado con una carga de 80 KN, la cual se aplicó de manera constante hasta terminar los ciclos de desplazamiento horizontal. Una vez se terminan los ciclos en los modelos se llevaron a su estado inicial sin cargas. Posteriormente se repitió el proceso para cargas axiales de 110 KN, 140 KN, 170 KN, 190 KN y 210 KN, hasta obtener la falla por punzonamiento. El esquema de ensayo se muestra en la figura 49.

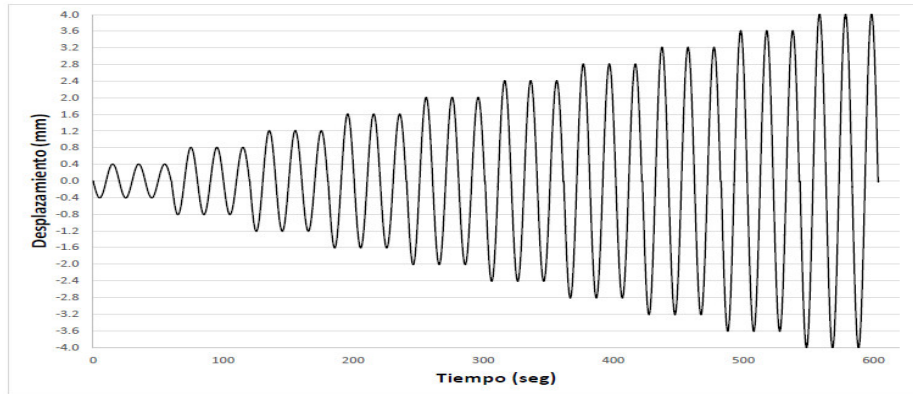


Figura 48. Desplazamiento horizontal ciclos.

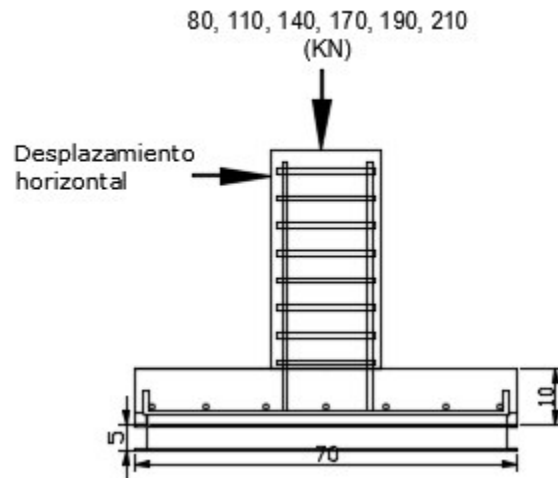


Figura 49. Esquema cargas de ensayo.

Finalmente, en la figura 50 se presenta el montaje experimental para el ensayo dinámico de punzonamiento, en donde se pueden apreciar todos los componentes involucrados en la realización de los ensayos.

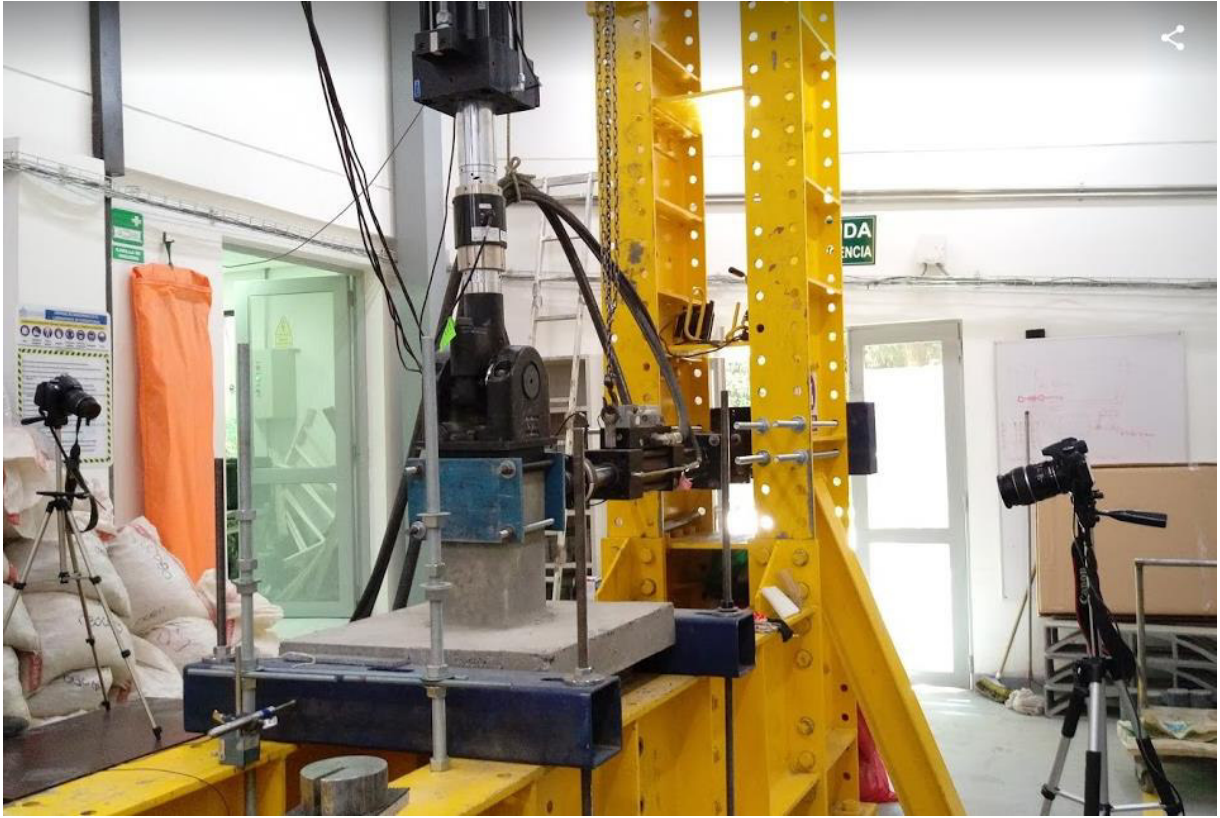


Figura 50. Montaje Experimental ensayo dinámico de punzonamiento.

CAPITULO 4. RESULTADOS ANALISIS Y DISCUSIÓN

4.1 PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO

4.1.1 Compresión. Para el ensayo de compresión se realizaron 3 cilindros por cada una de las placas y 3 más para las columnas. Lo anterior, con el fin de conocer la resistencia del concreto con el cual fue elaborado cada uno de los elementos que integran los sistemas, y de esta manera contribuir a la caracterización de cada una de las mezclas elaboradas (concreto con y concreto sin fibra). La carga fue aplicada mediante la máquina universal antes descrita, siguiendo los estándares de la norma I.N.V. E – 410 – 07. Los cilindros fueron llevados a cámara de curado durante 28 días. En la Tabla 15 se muestran las características geométricas de los cilindros y su resistencia a la compresión.

Elemento	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Área mm ²	P Max (N)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Edad (Días)
Losa 1	101.6	202.5	8,104	234,526	28.9	28
Losa 2	101.8	204.3	8,141	240,000	29.5	28
Losa 3	101.6	203.4	8,107	226,623	27.9	28
Losa 4	102.4	204.7	8,232	222,333	27.0	28
Losa 5	101.2	203.6	8,044	229,676	28.6	28
Columnas	102.1	203.1	8,186	290,833	35.5	28

Tabla 15. Ensayo resistencia a la compresión.

Algo importante para resaltar es que las mezclas de las losas y columnas fueron diseñadas para una resistencia de 28 y 35 Mpa respectivamente, esperando obtener valores de resistencia a la compresión promedio de 21 y 28 Mpa. Lo anterior, debido a que la NSR-10 establece que en caso de que el concreto vaya a ser elaborado por inexpertos la resistencia de diseño deberá ser al menos 7 Mpa por encima de la esperada.

Finalmente, los valores promedio obtenidos fueron de 28.4 y 35.5 Mpa, valores que se asemejan mucho más a los de diseño que a los esperados, lo cual es correcto dado que se está cumpliendo con lo estipulado por el reglamento.

Por otra parte, como se puede ver en la Figura 51 las mezclas con fibra de acero no presentan pérdida de fragmentos grandes en la matriz de concreto, solo presentan un descascaramiento en el perímetro de la falla. Esto se debe a que las fibras generan una adherencia en la matriz del concreto en el momento en que se presenta la falla, dándole de esta manera una mayor cohesión a toda la mezcla.



Figura 51. Falla cilindro concreto con fibra.

4.1.2 Cortante. Se realizaron 12 ensayos de corte en vigas de acuerdo al montaje experimental descrito en el numeral 3.2.1 (Ensayo de cortes para vigas). Se fallaron 9 vigas con fibras con una cuantía de 60 kg/m³ y 3 vigas sin fibra como especímenes de control. El montaje del ensayo se muestra en la Figura 52. Todas las vigas fueron llevadas a cámara de curado y falladas a una edad de 28 días.

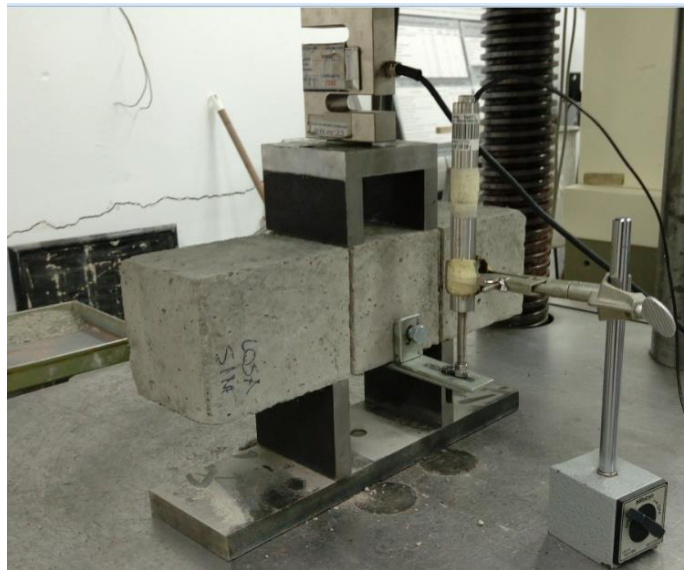


Figura 52. Montaje vigas a corte.

La carga máxima soportada por las vigas con fibra y sin fibra se presenta en la Tabla 16. La carga máxima soportada por una viga sin fibra fue de 4790 kg-f, mientras que la carga máxima soportada por una viga con fibra fue de 10550 kg-f. Los valores de resistencia al corte se determinó utilizando la ecuación 2 (Sergio Carmona Malatesta, Manuel Cabrera

Contreras, 2009), siendo P_{max} la carga máxima registrada en el ensayo, D_{ef} y b_{ef} el ancho y alto efectivo del área sometida a carga.

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{2xD_{ef}xb_{ef}} \quad (2)$$

Con el fin de obtener valores precisos de ancho y alto efectivo, las vigas fueron llevadas hasta la rotura de la sección como se puede observar en la Figura 53.



Sin fibra



Con fibra

Figura 53. Sección de corte de las vigas

El cortante máximo obtenido en las vigas sin fibras fue de 2.5 Mpa, mientras que el cortante máximo obtenido en vigas con fibras fue de 5,1 Mpa, lo que indica un incremento de hasta un 104% al cortante, con una presencia de fibras de 60 kg/m³. En la Tabla 17 se encuentran todos los valores de cortante obtenidos para vigas con fibra (Cf) y sin fibra (Sf), en donde la poca variación de los datos de corte máximo valida la confiabilidad de los datos.

ID	Cuantía KG/m ³	P _{max} (kg-f)	Def (mm)	b _{ef} (mm)	τ (Mpa)
Viga 1-Sf	0	4660	79.7	79.3	2.5
Viga 2-Sf	0	4790	81.7	82.4	2.4
Viga 3-Sf	0	3180	77.4	77.3	1.8
Viga 1-Cf1	60	7420	77.9	77.9	4.1
Viga 2-Cf1	60	10550	83.5	83.2	5.1
Viga 3-Cf1	60	7840	76.7	77.5	4.4
Viga 1-Cf2	60	10030	82.3	82.4	4.9
Viga 2-Cf2	60	8350	76.7	77.4	4.7
Viga 3-Cf2	60	8900	78.6	78.5	4.8
Viga 1-Cf3	60	7750	76.9	77.5	4.3
Viga 2-Cf3	60	8900	81.6	82.9	4.4
Viga 3-CF3	60	7540	76.1	78.6	4.2

Tabla 16. Cortante máximo en vigas

Como se puede observar en las gráficas carga-deformación de la Figura 55 en las vigas sin fibra la falla se presentó con un desplazamiento máximo de 4 mm aunque después del pico de carga se observa una rápida disminución en la resistencia de la viga. De este modo se puede concluir que la falla se presenta de manera súbita, es decir la viga no presentó una deformación visualmente apreciable antes fallar y mostrar un desprendimiento total en la sección de concreto, como se puede observar en la Figura 54.



Figura 54. Modo de falla a corte viga sin fibra

Las vigas con fibra no presentan una falla frágil ni desprendimientos en la sección de concreto como se ve en la Figura 55. Debido a esta condición se pudo llegar a una deformación de 10 mm en donde se presenta una disminución de hasta 60 % de la carga máxima soportada, este efecto se debe la presencia de las fibras las cuales crean un puente entre los bloques que tienden a desprenderse transmitiendo los esfuerzos entre ellos. Debido

a los esfuerzos a los que se ven sometidas las vigas, las fibras tienden a fallar por corte y en una menor proporción fallan por deslizamiento, como se puede ver en la Figura 56.



Figura 55. Modo de falla a corte viga con fibra.



Figura 56. Modo de falla fibras.

En la Figura 57 se muestra la gráfica carga vs. desplazamiento de las vigas con fibra y sin fibra en donde se ve claramente el gran aporte tanto a carga máxima como a capacidad de disipación en las vigas con fibra, además la gráfica revela un valle en la carga máxima que se debe al aporte de las fibras en el momento en que se comienzan a presentar las fisuras en el concreto.

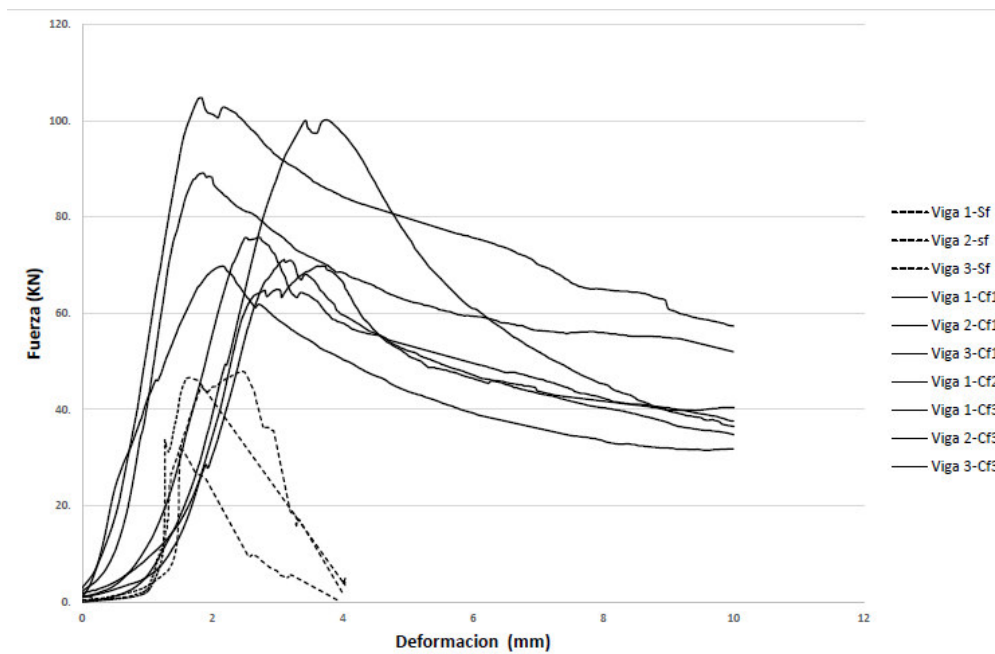


Figura 57. Carga deformación vigas con y sin fibra.

Con los resultados obtenidos en estos ensayos se podrían calcular índices de disipación para las vigas, estos índices se calculan como el área bajo la curva carga vs. desplazamiento. Según la recomendación de la SF4 de la JSCE los límites del desplazamiento están definidos por la sección de la probeta, y el desplazamiento máximo debe ser calculado como $D = S/150$ siendo S la luz entre apoyos. Para este estudio se ha optado por utilizar el límite de desplazamiento en el punto correspondiente a la carga máxima, debido a que este valor se puede determinar de manera precisa y objetiva. Este cálculo permitirá evaluar el efecto de las fibras en el comportamiento del concreto, aunque no se pueda hacer una comparación directa entre las vigas con y sin fibra debido a que la superficie de falla varía entre ellas. Finalmente, las fibras hacen que los especímenes disipen mucha más energía en comparación a los que no tienen fibra, y esto puede verse reflejado en la figura 58.

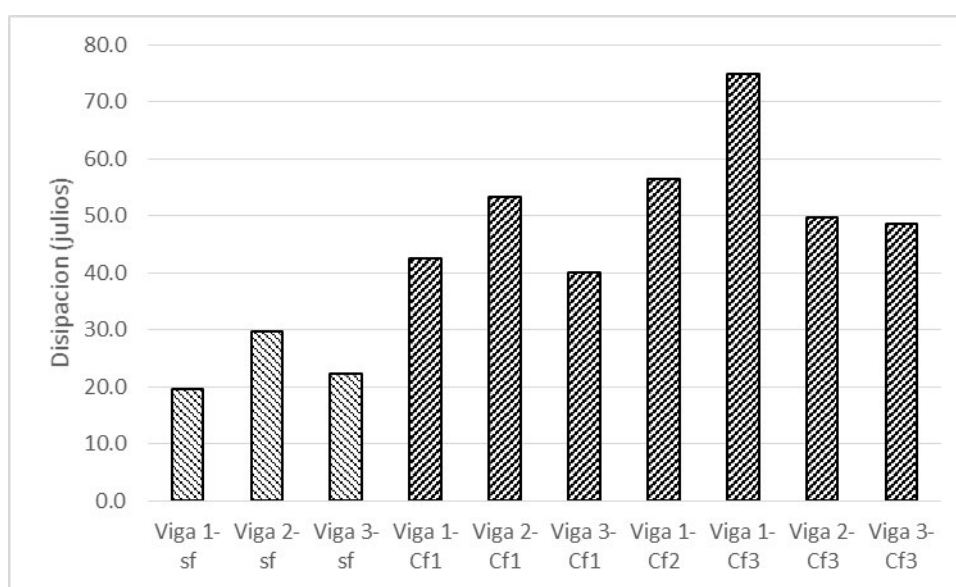


Figura 58 Índice de disipación en vigas a corte

4.2 ENSAYOS DE PUNZONAMIENTO

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los 4 sistemas losa columna por separado, los 3 primeros modelos corresponden a los fabricados en concreto con inclusión de fibras de acero, el cuarto modelo fue fabricado en concreto convencional. Los resultados presentados corresponden a los ciclos histeréticos con la carga axial que llevó a la falla por punzonamiento. Cabe resaltar que los modelos se sometieron a ciclos histeréticos previos según lo mencionado en la metodología de ensayo.

El primer sistema losa columna tuvo un historial de carga axial de 80, 110, 140 y 170KN, en cada carga axial se sometió el modelo a desplazamientos horizontales como se ve en la figura 59. Este modelo resistió una carga axial de 170 KN en el ciclo de falla el cual se muestra en la figura 60. En esta figura se puede observar que este primer sistema logro un

desplazamiento máximo de 3.6 milímetros con una carga máxima de 52 KN, por otra parte se puede observar que el último ciclo de carga presentó cargas significativamente altas para obtener el mismo desplazamiento de los ciclos anteriores hasta un desplazamiento de 2.5 milímetros, por lo cual este ciclo es aquel que disipa mayor energía presentando una respuesta satisfactoria debido a la inclusión de fibras.

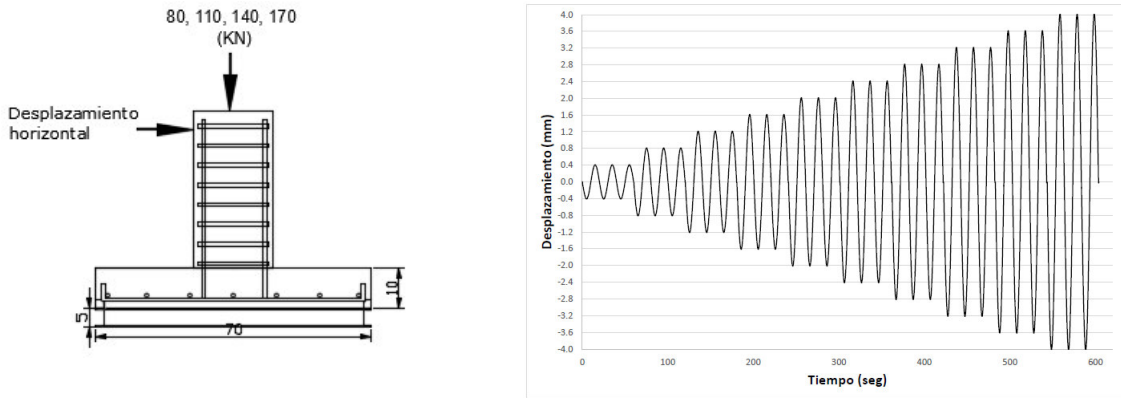


Figura 59. Esquema cargas modelo resistencia máxima 170 KN.

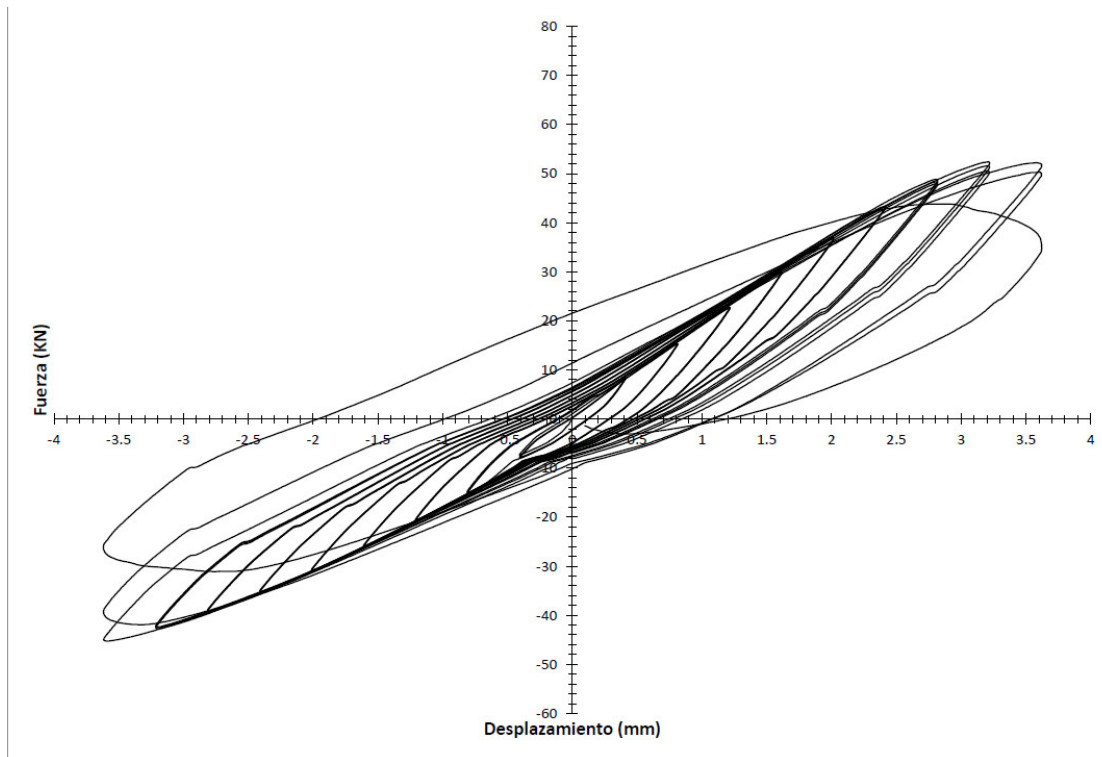


Figura 60. Ciclos histeréticos de carga axial 170 KN.

Igualmente, para este ensayo se registraron los desplazamientos verticales medidos en el centro de la losa, en donde se puede evidenciar las cargas axiales a las que fue sometido el modelo y los ciclos histeréticos.

En la figura 61 se observan las cargas y descargas de las fuerzas axiales las cuales indican el comienzo y final de cada ciclo histerético, las cargas axiales para este modelo fueron de 80 KN, 110 KN, 140 KN y 170 KN. En esta figura se evidencia cómo en las primeras dos cargas el modelo tiene un comportamiento lineal en el desplazamiento vertical, en la tercera y en última carga presentan un comportamiento no lineal en la medida que se aumenta el desplazamiento horizontal en los ciclos histeréticos, lo que evidencia la presencia y acción de las fibras de acero en el concreto, de igual forma se evidenciaron desplazamientos permanentes una vez que finalizaron cada uno de los ciclos histeréticos. Por último, el modelo tuvo un desplazamiento vertical máxima de 5.8 mm con una carga axial de 170 KN.

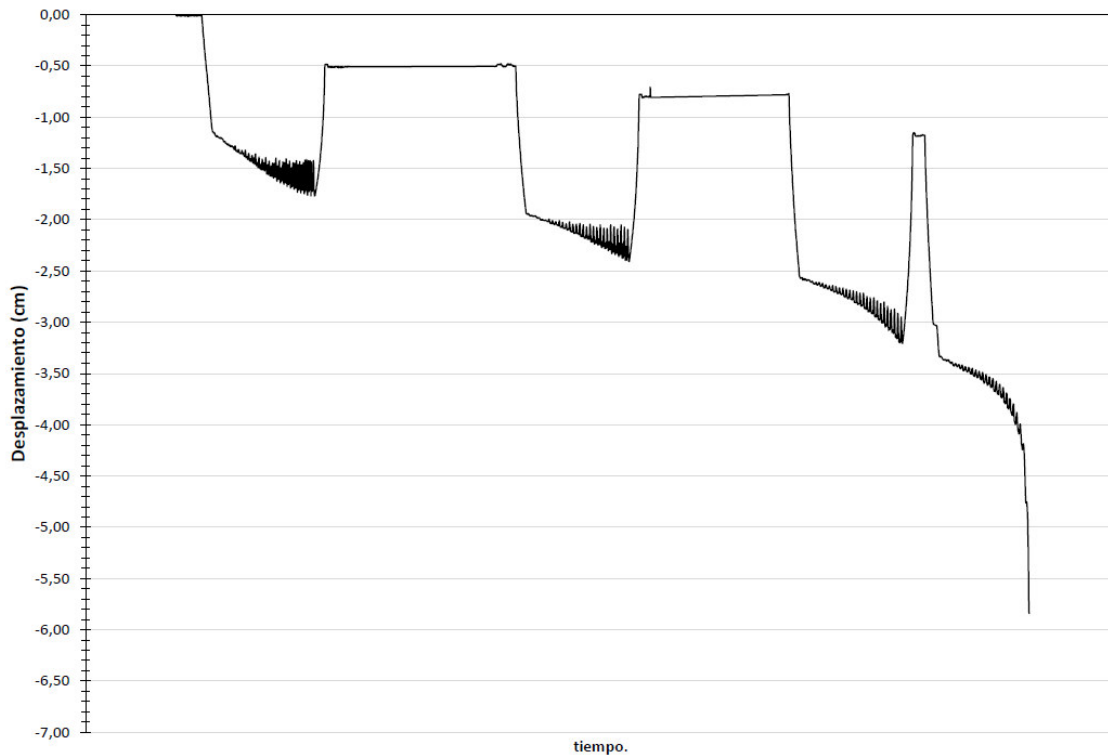


Figura 61. Desplazamiento vertical carga axial 170 KN.

En la Figura 62 se muestra la falla por punzonamiento del primer modelo, en donde se puede observar claramente que tanto la superficie como los planos de corte corresponden a una falla debida a esfuerzos punzantes, además se puede observar en la falla cómo las fibras de acero crean un puente entre las dos caras de la fisura.



Figura 62. Fotos de la falla primer modelo.

El segundo sistema losa columna tuvo un historial de carga axial de 80, 110, 140, 170, 190 y 210 KN, en cada carga axial se sometió el modelo a desplazamientos horizontales como se ve en la figura 63. Este modelo resistió una carga axial de 210 KN en el ciclo de falla el cual se muestra en la figura 64, en esta figura se observó que este sistema logra un desplazamiento máximo de 3.6 milímetros con una carga máxima de 70 KN. Por otra parte, se evidenció que en el último ciclo de carga se presentaron cargas significativamente altas para obtener el mismo desplazamiento hasta un desplazamiento de 2 milímetros en donde se presentan las mismas cargas obtenidas en ciclos anteriores, por lo cual este ciclo es aquel que disipa mayor energía presentando una respuesta satisfactoria debido a la inclusión de fibras.

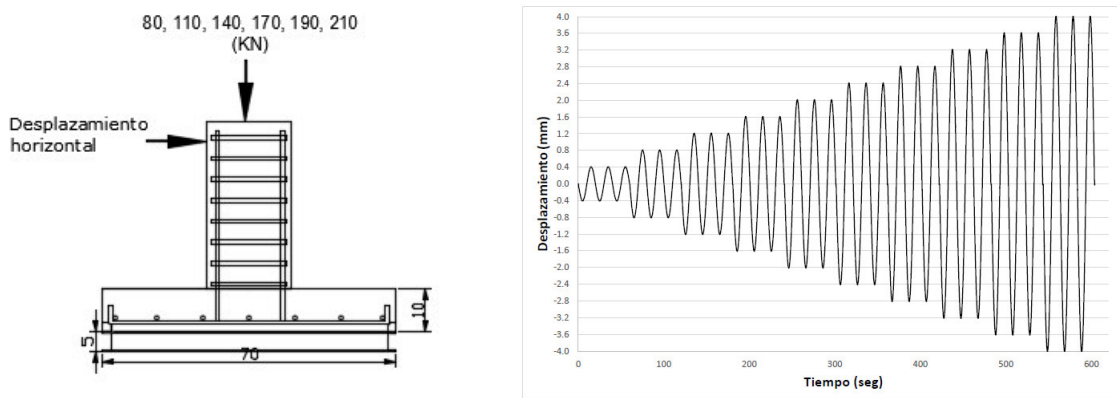


Figura 63. Esquema cargas modelo resistencia máxima 190 KN

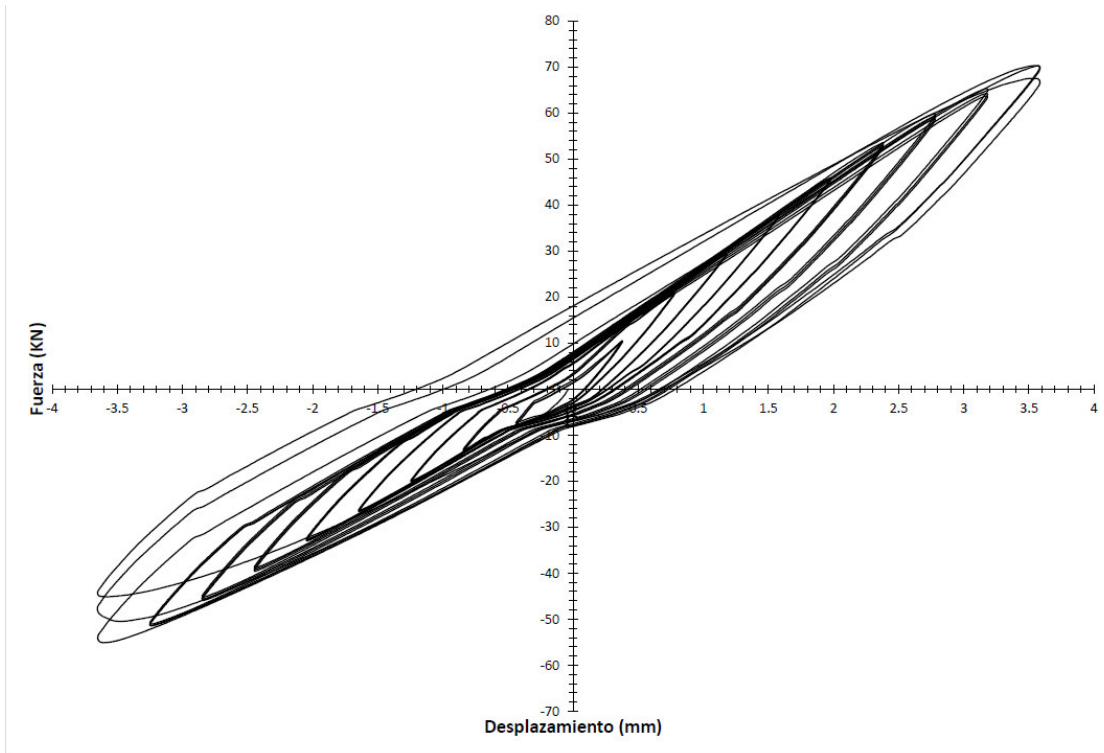


Figura 64. Ciclo histéricos carga axial 210 KN

En la figura 65 se pueden observar las cargas y descargas de las fuerzas axiales las cuales indican el comienzo y final de cada ciclo histérico, las cargas axiales para este modelo fueron de 80 kN, 110 kN, 140 kN, 170 kN, 190 kN y 210 kN. En esta figura se observa cómo en las primeras tres cargas el modelo tiene un comportamiento lineal en el desplazamiento vertical, en la cuarta carga comienza a presentar un comportamiento no lineal, la quinta y última carga presentan un claro comportamiento no lineal en la medida que se aumenta el desplazamiento horizontal en los ciclos histéricos, lo que evidencia la presencia y acción de las fibras de acero en el concreto, de igual forma se evidenciaron deformaciones permanentes una vez que finalizaron cada uno de los ciclos histéricos. Por último, este modelo tuvo un desplazamiento vertical máxima de 5.66 mm con una carga axial de 210 kN.

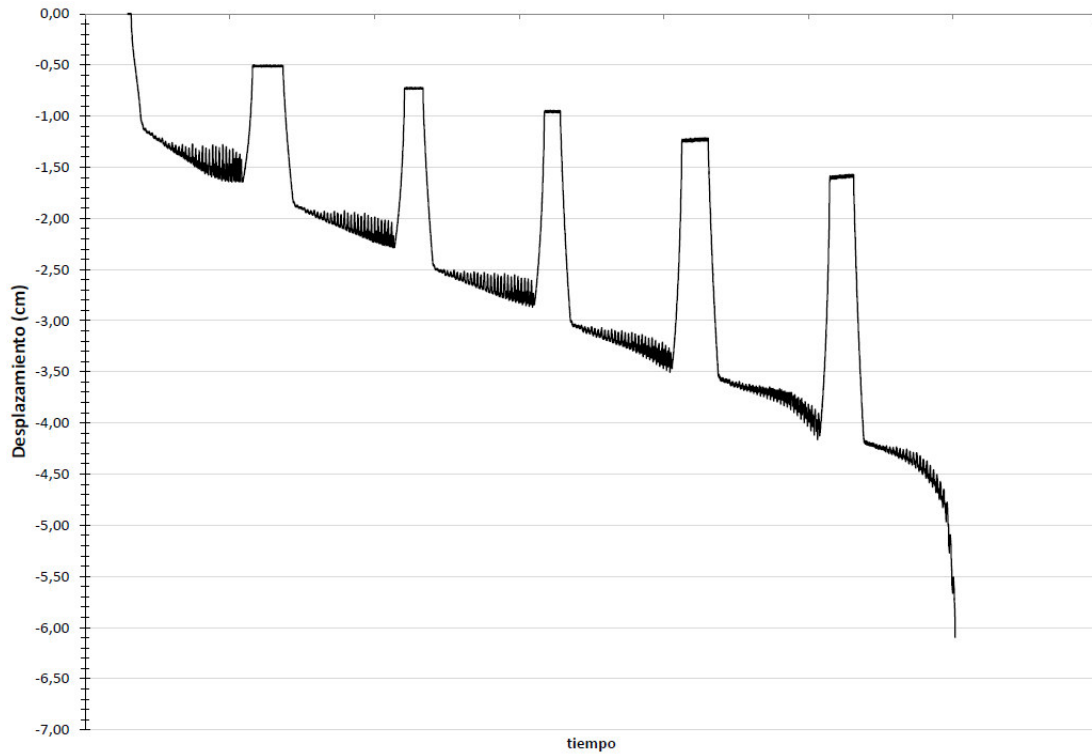


Figura 65. Desplazamiento vertical carga axial 210 KN.

En la Figura 66 se muestra la falla por punzonamiento del segundo modelo, en esta figura se puede observar que la falla se generó con un ángulo de entre 30°-45°.

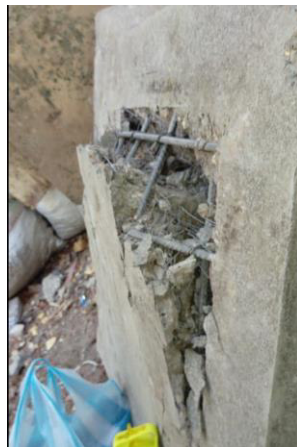


Figura 66. Fotos de la falla segundo modelo.

El tercer sistema losa columna tuvo un historial de carga axial de 80, 110, 140, 170 y 190 KN, en cada carga axial se sometió el modelo a desplazamientos horizontales como se ve en la figura 67.

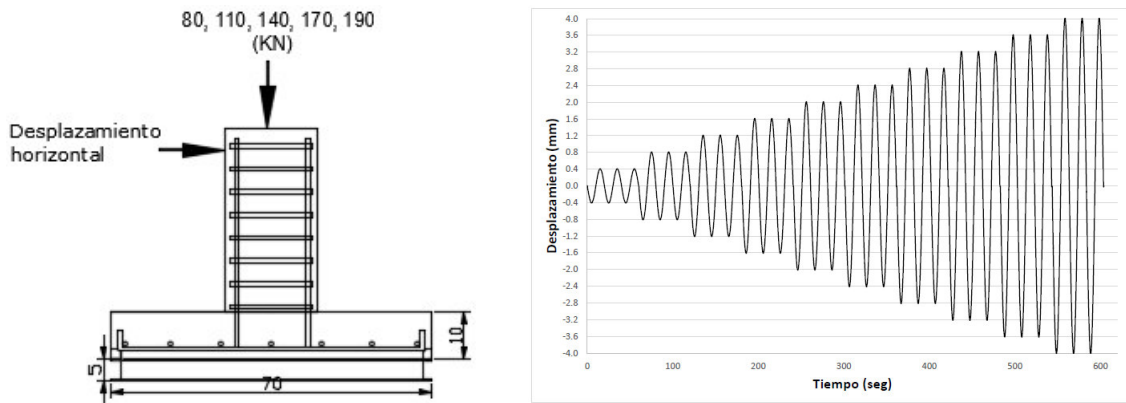


Figura 67. Esquema cargas modelo resistencia máxima 190 KN.

Este modelo resistió una carga axial de 190 KN en el ciclo de falla mostrado en la figura 68. En esta figura se puede observar que este tercer sistema logra un desplazamiento máximo de 2.8 milímetros con una carga máxima de 48 KN. En este modelo no se observó un aumento significativo en la fuerza lateral para el último ciclo de carga, por lo tanto presenta una menor capacidad de disipación de energía que los modelos fallados anteriormente. Por otro lado, la carga máxima resistida por el modelo, a pesar de estar sometida a una carga axial de 190 KN, fue menor al modelo cuya carga axial máxima resistente fue de 170 KN. Esto es debido a que este modelo no logró llegar a un desplazamiento horizontal igual al del primer y segundo modelo ensayado.

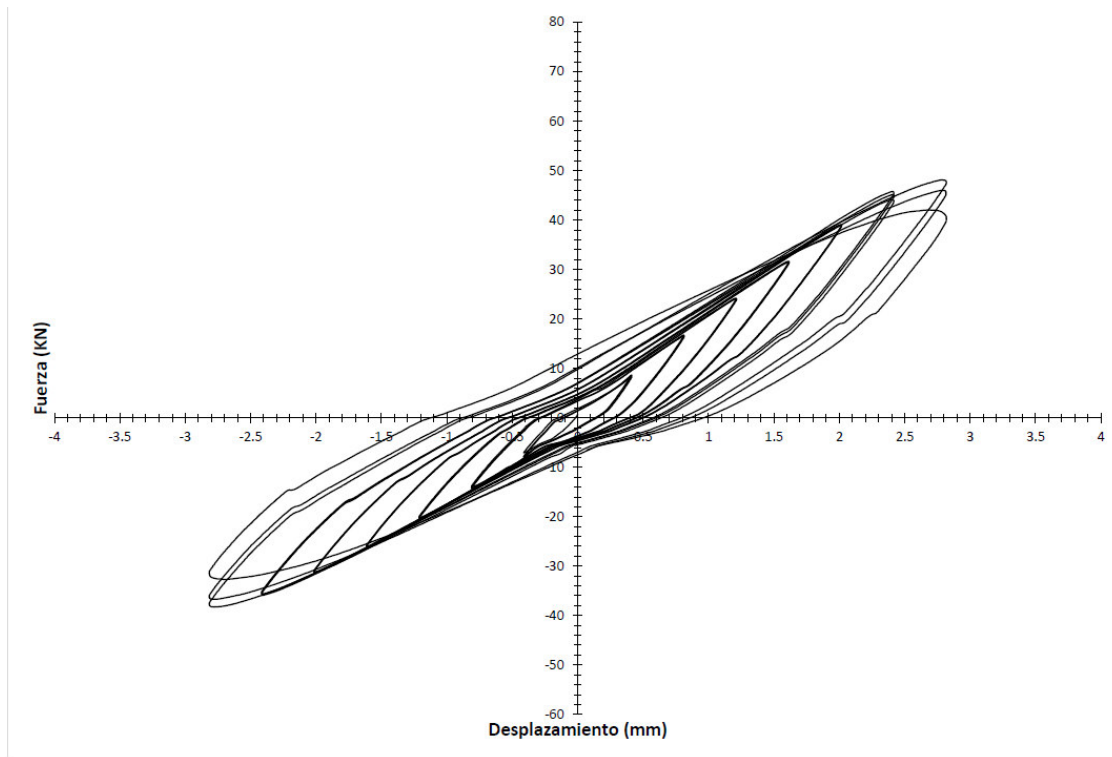


Figura 68. Ciclo histéricos carga axial 190 KN.

En la figura 69 se pueden observar las cargas y descargas de las fuerzas axiales las cuales indican el comienzo y final de cada ciclo histérico, las cargas axiales para este modelo fueron de 80 kN, 110 kN, 140 kN, 170 kN y 190 kN. En esta figura se observa cómo en las primeras tres cargas el modelo tiene un comportamiento lineal en el desplazamiento vertical, la cuarta y en la última carga se presenta un claro comportamiento no lineal en la medida que se aumenta el desplazamiento horizontal en los ciclos histéricos, lo que evidencia la presencia y acción de las fibras de acero en el concreto, de igual forma se evidenciaron deformaciones permanentes una vez que finalizaron cada uno de los ciclos histéricos. Por último, este modelo tuvo un desplazamiento vertical máximo de 5.62 mm con una carga axial de 190 kN.

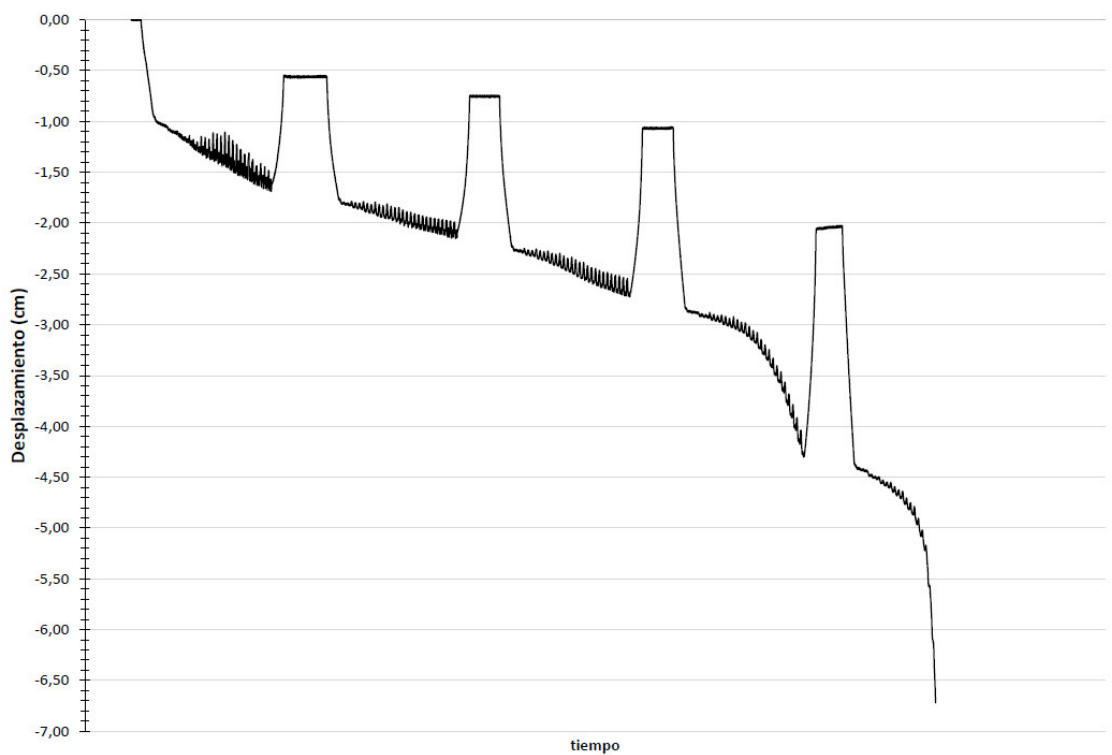


Figura 69. Desplazamiento vertical carga axial 190 KN.

En la Figura 70 se muestra la falla por punzonamiento del tercer modelo en donde se evidencia el mismo comportamiento que los modelos fallados anteriormente.



Figura 70. Fotos de la falla segundo modelo.

El cuarto sistema losa columna tuvo un historial de carga axial de 80, 110 KN, el modelo resistió una carga axial de 110 KN en el ciclo de falla. El ciclo histerético mostrado en la figura 71 corresponde a la carga axial mencionada, en esta figura se observa que el sistema sin fibras de acero logra un desplazamiento máximo de 3.2 milímetros con una carga máxima de 46 KN, por otra parte este modelo como se ve en la figura 71, no presenta en el ciclo de falla un comportamiento distinto al observado en los ciclos anteriores, lo cual era de esperarse debido a que el concreto es el único que está absorbiendo la energía y este no puede hacerlo más allá de su rango elástico.

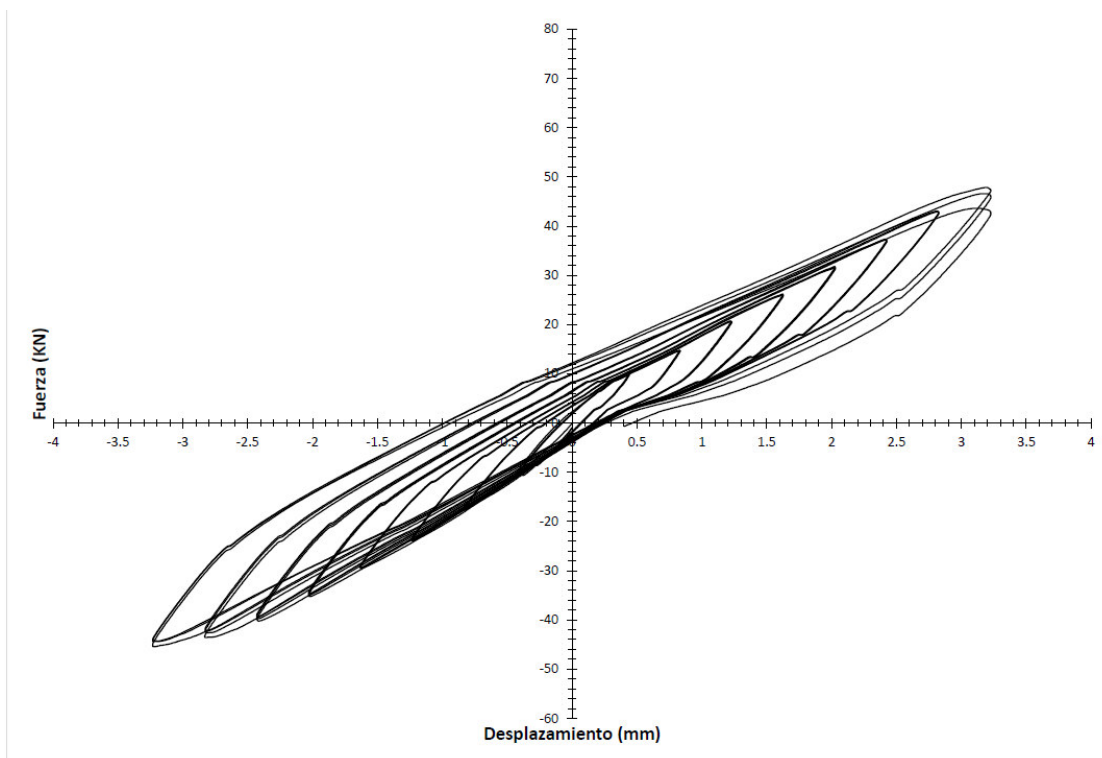


Figura 71. Ciclo histeréticos carga axial 110 KN.

Como se esperaba y según lo investigado en artículos con ensayos a punzonamiento, la carga axial máxima resistente del modelo fabricado en concreto convencional fue menor que la carga máxima resistente en los modelos fabricados en concreto con fibras de acero.

En los sistemas fabricados con fibras de acero se presentó un aumento de la resistencia a carga axial de un 73% considerando que los modelos con fibras de acero resistieron en promedio una carga axial máxima de 190 KN. Por otra parte, los resultados del trabajo de investigación (Álvarez y Torres, 2014) presentaron un aumento del 24% en la carga axial bajo cargas monotónicas. De acuerdo a estos resultados es evidente que, bajo una combinación de carga axial y cargas cíclicas horizontales, la presencia de las fibras tiene mayor relevancia en el comportamiento del sistema, debido a que este efecto combinado

realizado de manera repetitiva es el causante de la falla por punzonamiento en este sistema estructural.

En la figura 72 se pueden observar las cargas y descargas de las fuerzas axiales las cuales indican el comienzo y final de cada ciclo histerético, las cargas axiales para este modelo fueron de 80 KN y 110 KN. En esta figura se puede observar cómo en ambos ciclos el desplazamiento tiene un comportamiento lineal, lo que comprueba que la presencia de las fibras le genera un comportamiento dúctil al sistema en el momento que se aumenta la carga y se llevan los desplazamiento horizontales por encima de los 2 milímetros en los ciclos histeréticos, sin embargo y como sucedió en los modelos con fibras de acero se evidenciaron deformaciones permanentes una vez que finalizaron los ciclos histeréticos. Por último, este modelo tuvo un desplazamiento vertical máxima de 4.42 mm con una carga axial de 110 KN.

Considerando que los modelos fabricados en concreto con fibras de acero fallaron con un desplazamiento vertical promedio de 5.69 mm se halló un aumento en la deflexión de la losa de un 28 %.

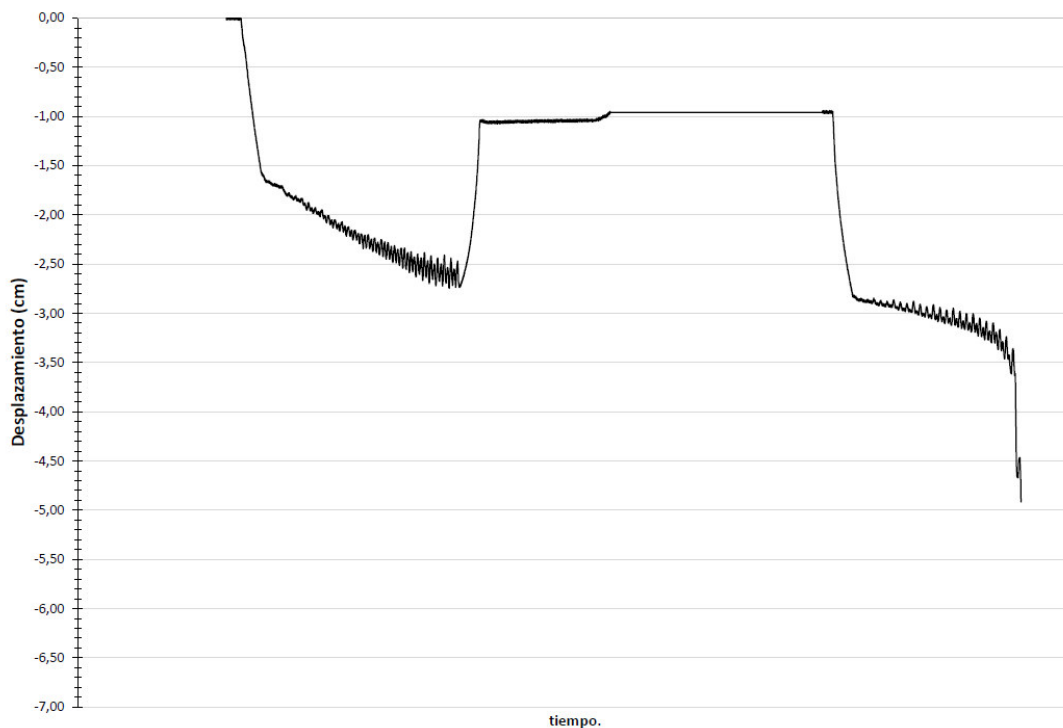


Figura 72. Desplazamiento vertical carga axial 110 KN.

En la Figura 73 se muestra la falla por punzonamiento del cuarto modelo, en donde se observó que la falla generó un desprendimiento de grandes bloques debido a que no existe un puente entre las fisuras que se generan en el modelo, incluso se presentó una pérdida del recubrimiento lo cual no se presentó en los modelos adicionados con fibra de acero. Por otra parte los resultados del trabajo de investigación (Álvarez y Torres, 2014) reportaron que bajo cargas monotónicas las fibras de acero fallaron por esfuerzos de corte y no por deslizamiento de las mismas, sin embargo bajo cargas cíclicas se observó que la mayor parte de las fibras fallaron por deslizamiento.



Figura 73. Fotos de la falla cuarto modelo sin fibras.

4.3 DISIPACION DE ENERGIA

4.3.1 Disipación de energía calculada con base en ciclos histeréticos de cargas horizontales. A partir de los resultados obtenidos se realizó el cálculo de la capacidad de disipación de energía tanto en los ciclos histeréticos como en el desplazamiento horizontal. Este valor se calcula como el área bajo la curva carga vs. desplazamiento. Con el fin de apreciar esta propiedad, los sistemas en concreto con fibras de acero ensayados fueron comparados con el sistema en concreto convencional.

La capacidad de disipación de energía en los ciclos histeréticos del primer modelo se representan mediante una línea por cada carga axial en la figura 74. Como se observa en la figura, la capacidad de disipación en los primeros ciclos tanto para los modelos en concreto convencional como en concreto con fibras de acero es similar, sin embargo en los últimos ciclos con carga axial de 170 KN se puede observar un aumento en la capacidad de disipación de energía de más del doble respecto al modelo sin fibras, este aumento es el reflejo del aumento en el ancho del último ciclo histeréticos mostrado en la figura 74.

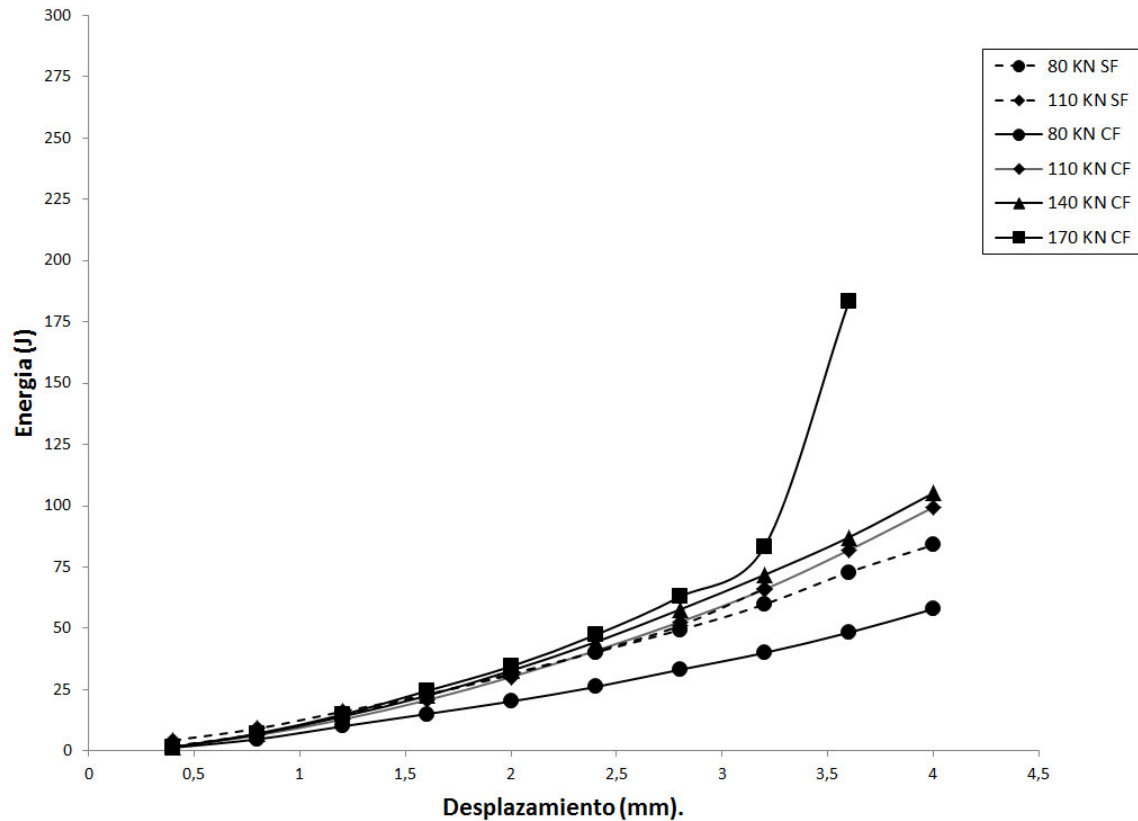


Figura 74. Disipación de energía calculada con base en ciclos histéricos de cargas horizontales (losa 170 KN).

La capacidad de disipación de energía en los ciclos histeréticos del segundo modelo ensayado se muestran en la figura 75. Como se observa en la figura la capacidad de disipación de energía en este modelo es muy similar en todas las cargas axiales para desplazamientos menores a 2 milímetros, a partir de este nivel de desplazamiento se presentan aumentos en la capacidad de disipación. Como se puede ver en esta figura el modelo en concreto con fibras de acero presentó una mayor capacidad de disipación para todos los niveles de carga axial, sin embargo la mayor capacidad de disipación se presenta con una carga de 140 KN en donde se puede ver un aumento de más de 2 veces respecto al modelo en concreto convencional. El hecho de que esta carga axial presente mayor disipación que las obtenidas para fuerzas axiales más altas, se debe a que el concreto ha presentado fisuraciones previas las cuales generan un deterioro en el concreto, por tal motivo se necesita aplicar menor fuerza horizontal para aplicar los mismos desplazamientos.

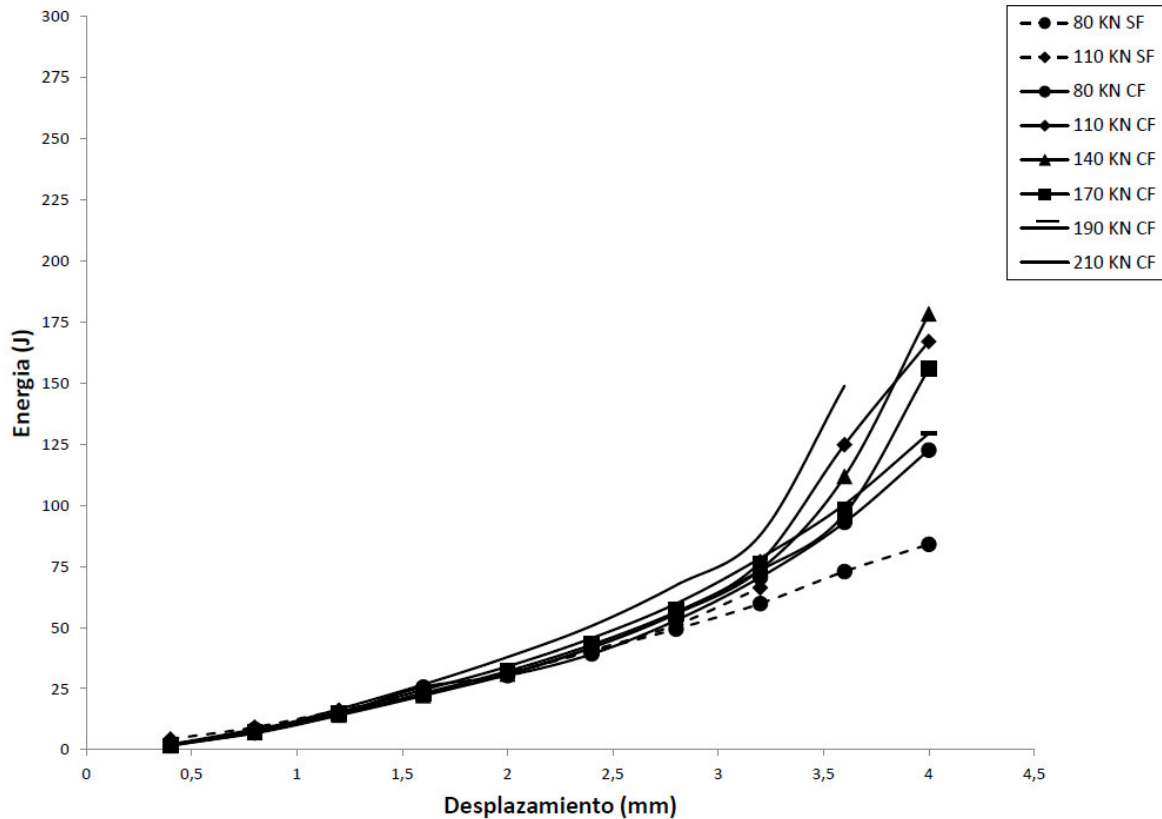


Figura 75. Disipación de energía calculada con base en ciclos históricos de cargas horizontales (losa 210 KN).

La capacidad de disipación de energía en los ciclos histeréticos del tercer modelo ensayado se representan en la figura 76. Como se puede observar en la figura la capacidad de disipación de energía en este modelo, al igual que en el anterior, es muy similar para desplazamientos menores a 2 milímetros, a partir de este nivel de desplazamiento se presentan aumentos en la capacidad de disipación. Como se ve en esta figura el modelo en concreto con fibras de acero presentó una mayor capacidad de disipación para todos los niveles de carga axial después de los 2 milímetros, al igual que el modelo anterior la mayor capacidad de disipación se presenta con una carga de 140 KN, sin embargo este modelo presentó un aumento en la capacidad de disipación de más de 3 veces respecto al modelo en concreto convencional, igualmente presenta un aumento en la disipación más evidente en todas las cargas axiales.

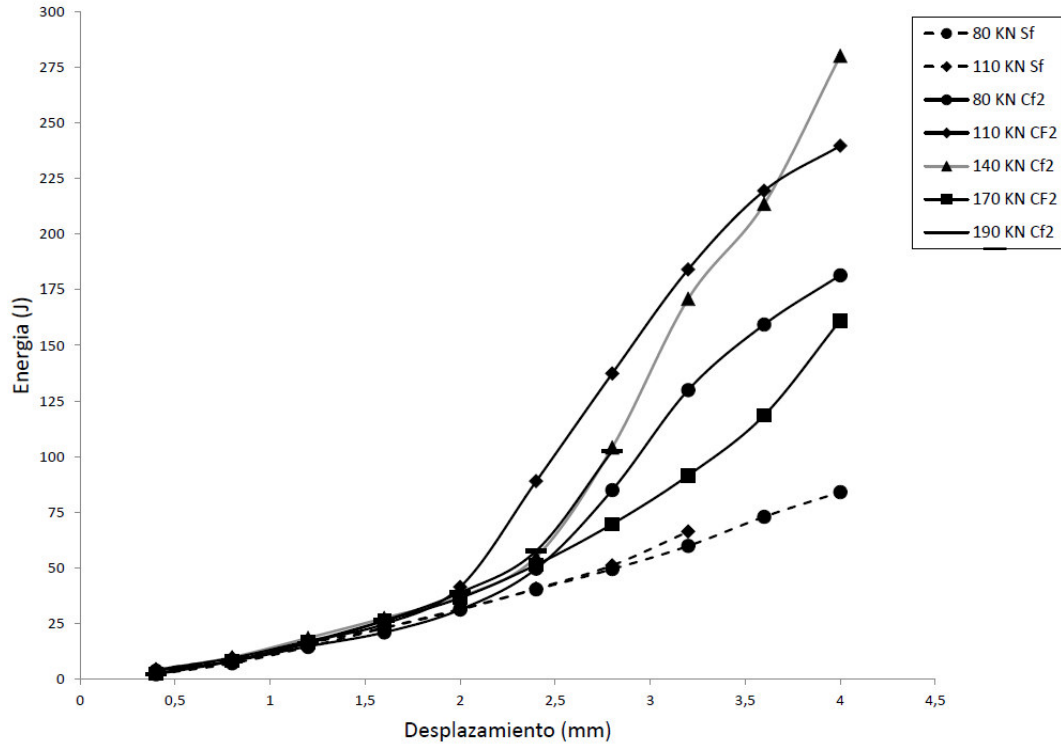


Figura 76. Disipación de energía calculada con base en ciclos histéricos de cargas horizontales (losa 190 KN).

Finalmente, en la figura 77 se presenta la disipación promedio de los modelos con fibras comparados con la disipación del modelo sin fibra, es esta gráfica se comprueba que existe un cambio en el comportamiento del concreto con fibras de acero a partir de los 2 mm de desplazamiento, con un aumento promedio de más de 2 veces en su capacidad de disipación, lo cual evidencia el gran aporte de las fibras de acero, y como estas cambian el modo de falla del modelo haciéndolo mucho más dúctil.

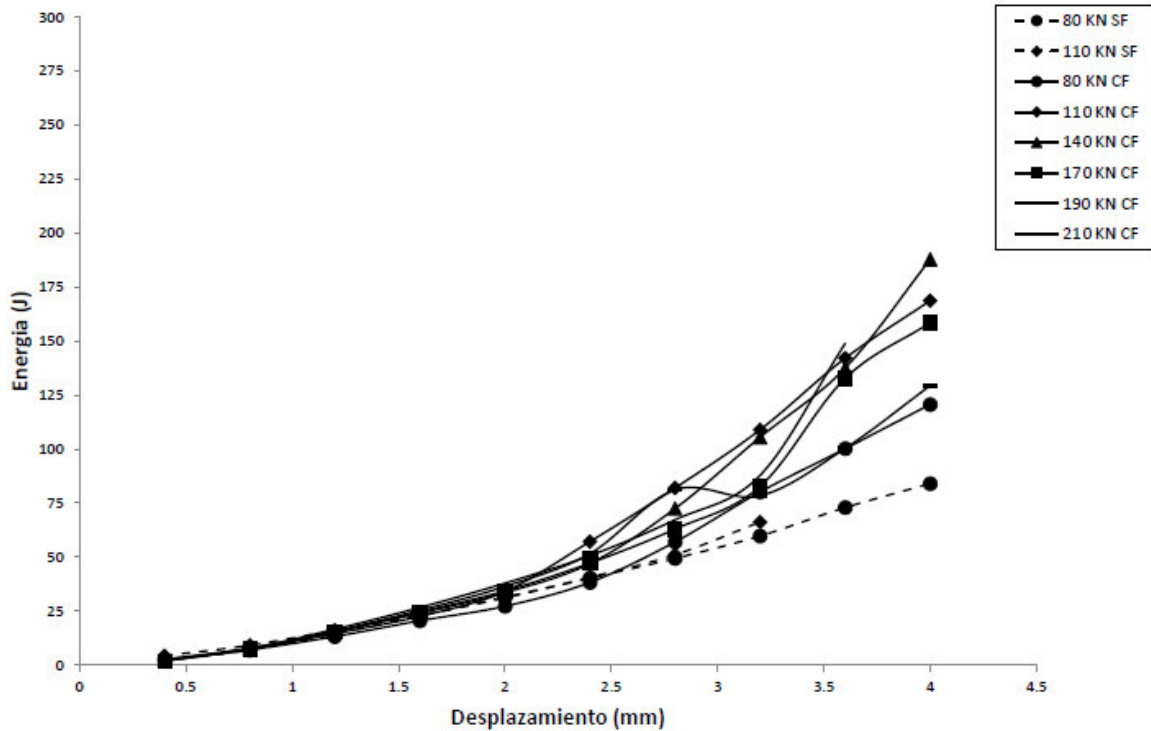


Figura 77. Disipación de energía calculada con base en ciclos históricos de cargas horizontales promedio.

4.3.2 Disipación de energía debida a cargas verticales La disipación de energía debida a cargas verticales de los sistemas losa columna, se determinó a partir de los desplazamientos verticales en la placa producidos por la carga axial y horizontal inducidos a los sistemas. Los resultados de los modelos con fibra fueron comparados con el sistema sin fibra en todos los casos. Lo anterior, con el fin de determinar cuál fue el incremento en la disipación de energía vertical en los modelos con fibra.

En la figura 78, correspondiente al primer modelo, se puede ver que en los primeros ensayos la capacidad de disipación de energía es muy similar entre un modelo y otro. Caso contrario ocurre en los últimos ciclos con carga axial constante de 170 KN, en donde el incremento en la disipación de energía del sistema con fibra es aproximadamente 70% con respecto al modelo sin fibra.

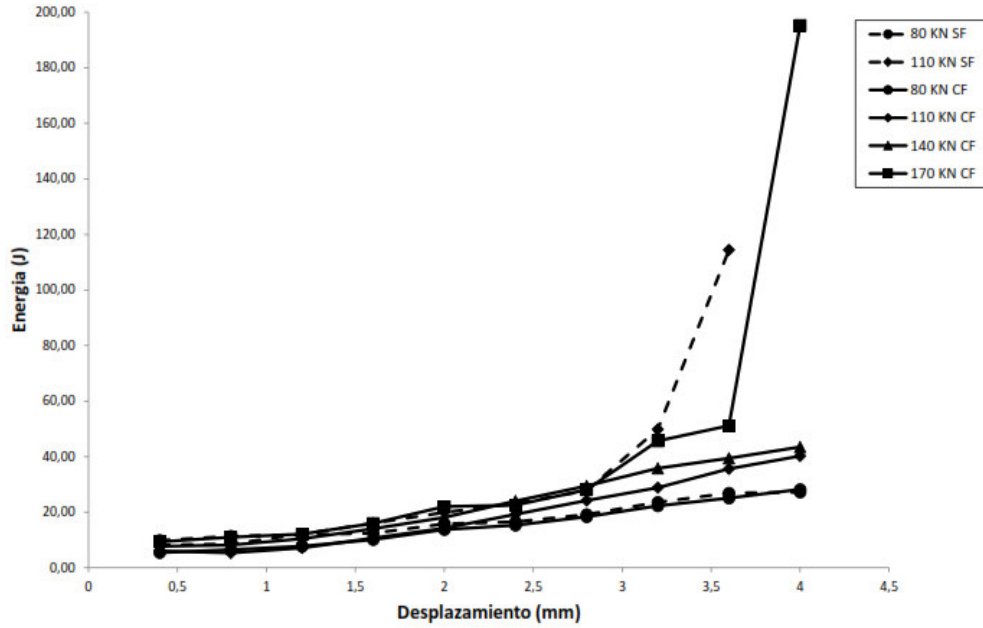


Figura 78. Disipación energía vertical losa 170 KN.

En el segundo modelo ocurre lo mismo que en el primero, pues como se ve en la figura 79 en los primeros ensayos la disipación de energía no varía de manera importante y esta solo se hace evidente hasta que el sistema está a punto de fallar. En este modelo el incremento en la disipación de energía alcanzada por el sistema fue de aproximadamente 60% con respecto al modelo sin fibra, poco menos que el incremento alcanzado en el primer modelo.

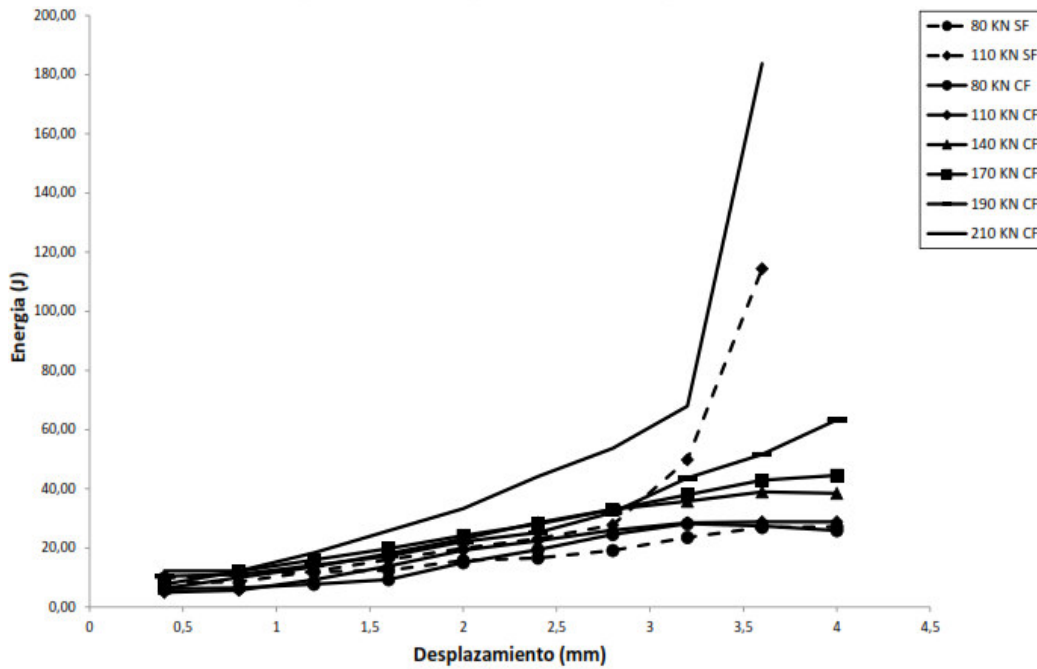


Figura 79. Disipación energía vertical losa 210 KN.

En el tercer modelo ocurre algo similar, pero en una menor proporción. Allí se puede ver que el incremento en la disipación de energía del sistema se hace evidente (al igual que en los dos primeros modelos) en el ciclo de falla, el cual para este caso en particular se dio para una carga axial de 190 KN. El incremento en la disipación de energía vertical del segundo modelo fue de aproximadamente 50% con respecto al modelo sin fibra como se puede ver en la figura 80.

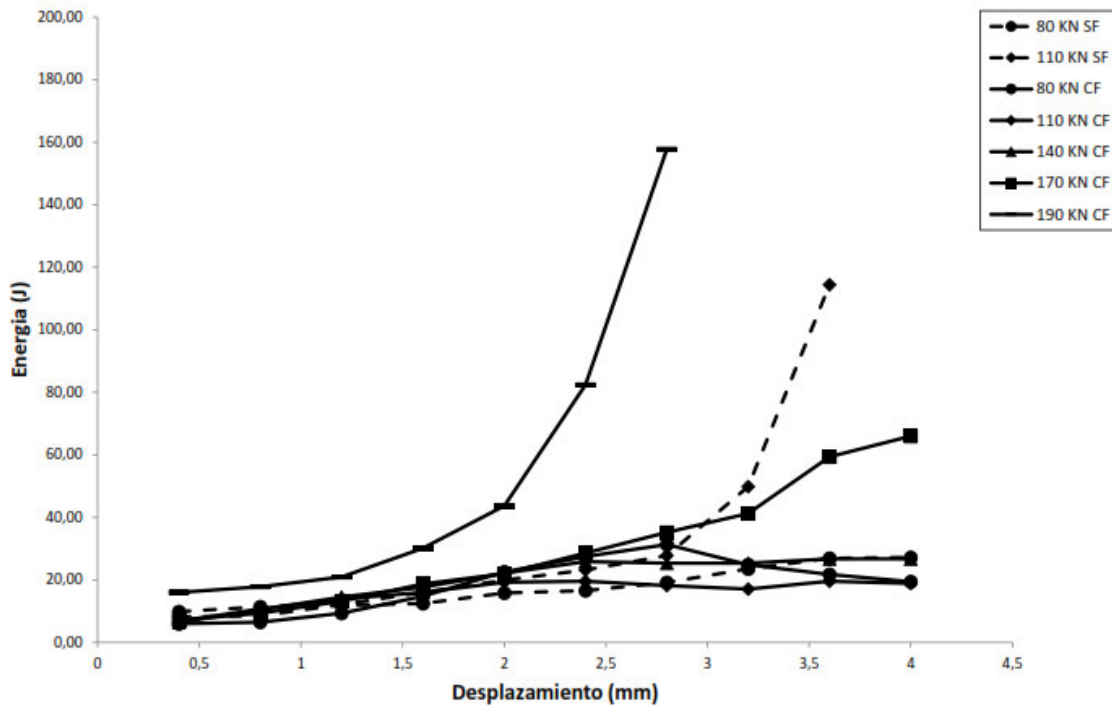


Figura 80. Disipación energía vertical losa 190 KN.

4.4 RESISTENCIA AL CORTE

Para evaluar la resistencia al corte de los sistemas se utilizó el modelo de elementos finitos indicado en el capítulo 3 incluyendo en el modelo numérico el refuerzo a flexión de la losa como se observa en la figura 81.

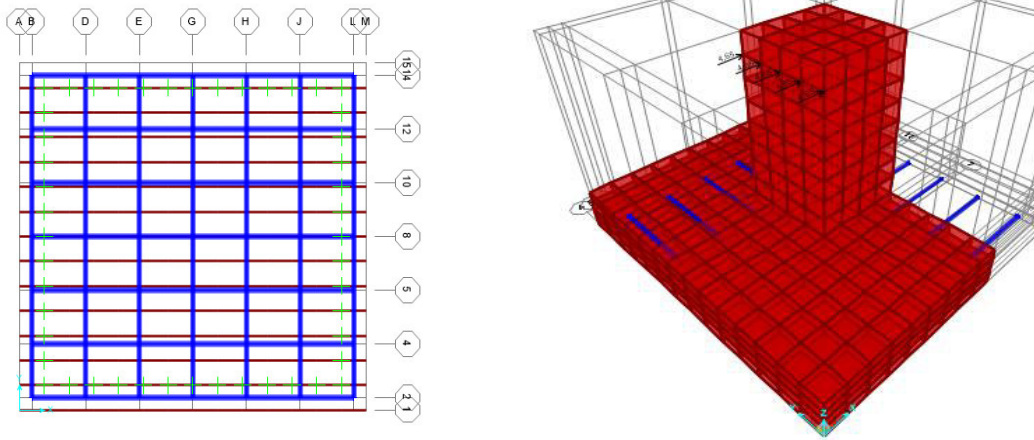


Figura 81. Elementos finitos con refuerzo a flexión.

En este modelo se aplicaron en conjunto la carga axial ejercida en el ciclo y la fuerza horizontal máxima aplicada para cada desplazamiento, la carga axial se aplicó mediante una presión uniforme en la cara superior de la columna, mientras que la fuerza horizontal se aplicó en 5 nodos ubicados a 5 cm del borde superior de la columna como se observa en la figura 82.

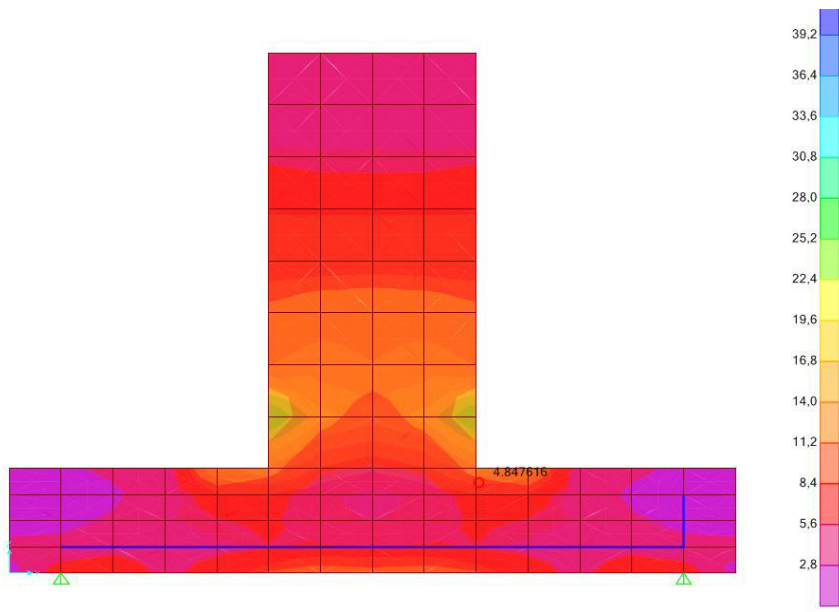


Figura 82. Esfuerzo cortante en modelo de elementos finitos.

Una vez aplicadas las fuerzas se procedió a obtener el esfuerzo cortante máximo en la parte superior de la losa a 2,5 cm de la superficie y al borde de la columna como se mostró a

manera de ejemplo en la figura 76, la cual está cargada con una fuerza axial de 140 KN y una fuerza lateral de 63.017 KN correspondiente al décimo ciclo del sistema en concreto con fibras de acero cuya resistencia máxima axial fue de 210 KN.

La resistencia al corte de los sistemas losa columna, se determinó a partir de la carga axial y de las fuerzas horizontales máximas aplicadas en cada uno de los ciclos de carga. Los resultados de los modelos con fibra fueron comparados con el sistema sin fibra en todos los casos. Lo anterior, con el fin de determinar cuál fue el incremento en la resistencia a cortante de los modelos con fibra.

En la figura 83, correspondiente al primer modelo, se puede ver que en los primeros ensayos la resistencia al corte es muy similar en casi todos los ciclos para ambos modelos. Caso contrario ocurre al comparar el ciclo de falla entre un modelo y otro, pues para dicho ciclo, el primer modelo registró una resistencia al corte de hasta 4.9 Mpa, mientras que el sistema sin fibra tan solo 3.5 Mpa. A partir de lo anterior, el incremento a cortante alcanzado por el primer modelo con fibra sería de hasta un 40%.

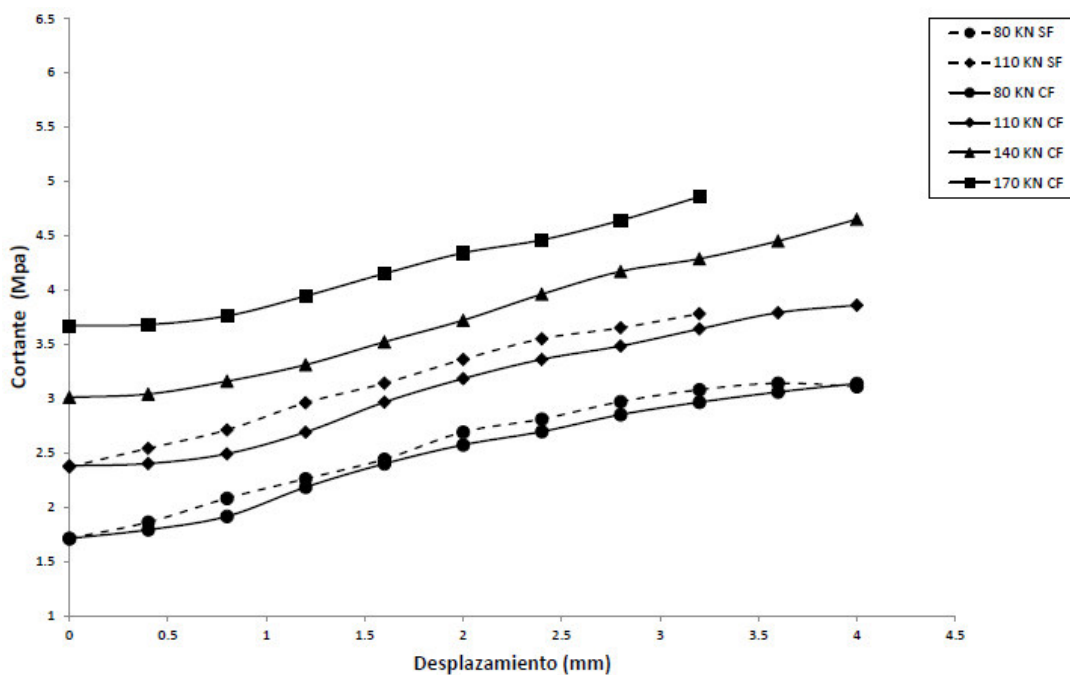


Figura 83. Esfuerzo cortante losa 170 KN.

En el segundo modelo con fibra ocurre lo mismo que en el primero, pero en una mayor proporción. En la figura 84 se puede ver que en los primeros ensayos la resistencia al corte es muy similar en casi todos los ciclos para ambos modelos. Caso contrario ocurre al comparar el ciclo de falla entre un modelo y otro, pues para dicho ciclo, el segundo modelo registró una resistencia al corte de hasta 6 Mpa, lo que se traduce en un aumento de hasta 70% en la resistencia al corte con respecto al modelo sin fibras.

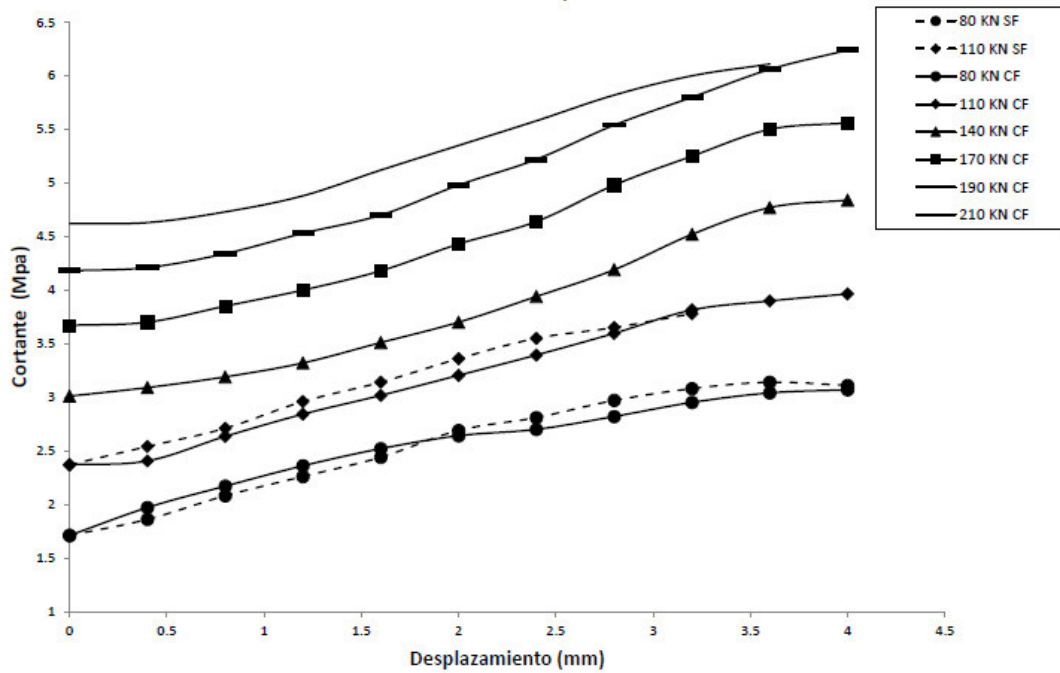


Figura 84. Esfuerzo cortante losa 210 KN.

Finalmente, el tercer modelo presenta el mismo comportamiento de los dos anteriores como se ve en la figura 85, con la diferencia que en este modelo la resistencia al corte, alcanzada por el sistema, fue de 5.5 Mpa, obteniendo así un incremento en la resistencia a cortante de hasta un 60% con respecto al modelo sin fibra.

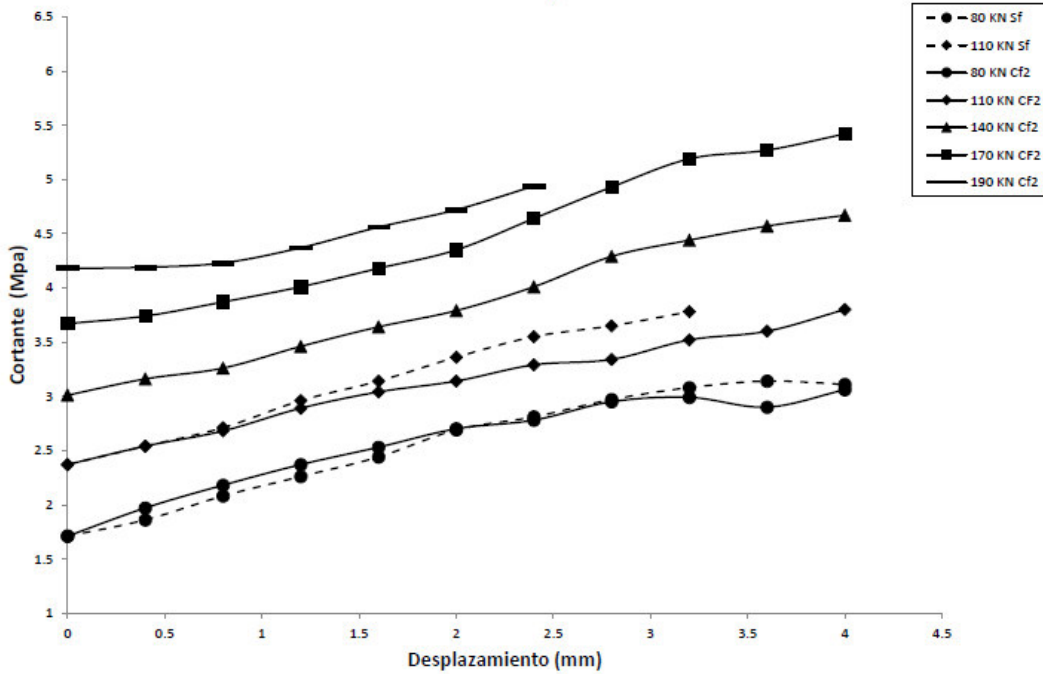


Figura 85. Esfuerzo cortante losa 190 KN.

A continuación, en la figura 86 se puede ver una gráfica con el comportamiento promedio de los 3 ensayos. En ella se puede ver no solo que se mantiene la tendencia en la que el cortante es muy similar en los primeros ensayos de los modelos, sino también que el incremento se hace evidente únicamente en el ciclo de falla de los mismos. Finalmente, el aumento promedio de los modelos fue de hasta un 57%, valor que refleja el gran aporte que tienen las fibras en el concreto.

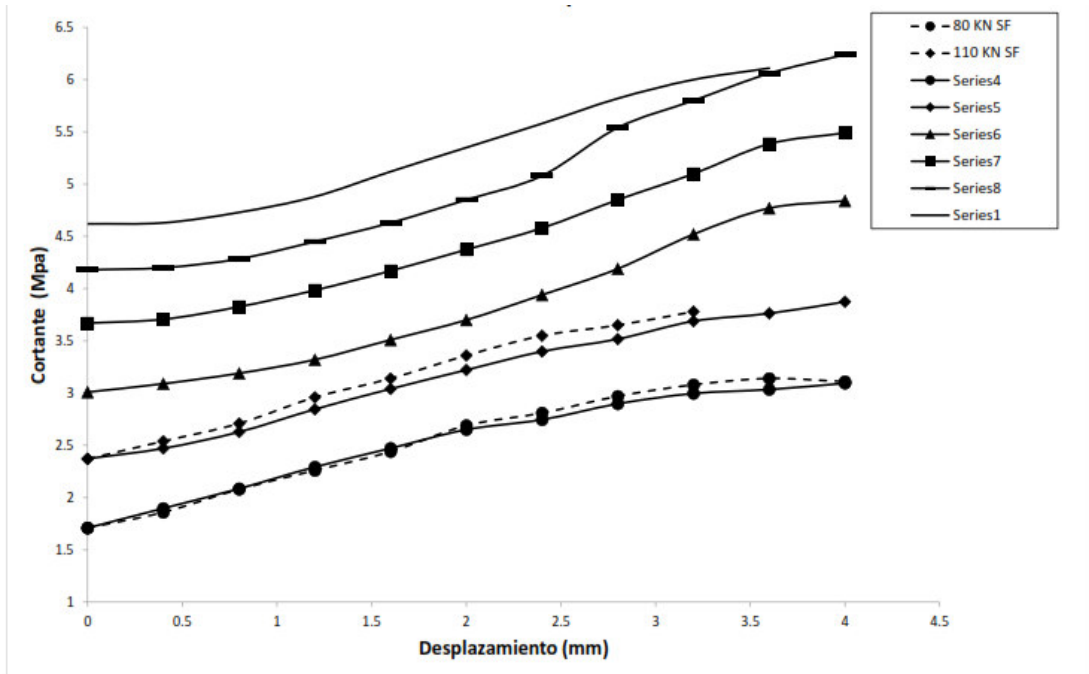


Figura 86. Esfuerzo cortante promedio.

Por otra parte, es importante resaltar que la fuerza horizontal inducida a los sistemas favorece en gran medida la falla por punzonamiento de los mismos, pues a pesar de que la fuerza axial fue bastante alta, ninguno de ellos falló únicamente bajo este efecto, todos fallaron bajo la combinación de los efectos producidos por las cargas vertical y horizontal.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

De la determinación de las solicitaciones de un nudo en un edificio construido mediante sistema losa columna, se puede concluir que:

- ✓ Mediante los modelos numéricos realizados se logró estimar en un nudo, cuáles son las solicitaciones que se debían tener en cuenta para lograr una falla por punzonamiento en los modelos experimentales.

En el desarrollo del presente documento se realizó un diseño de un modelo experimental, en donde se simularon las condiciones a las que se somete un nudo en un sistema losa columna bajo efectos cíclicos. De dicho diseño se puede concluir que:

- ✓ Con las dimensiones implementadas para el sistema losa columna y con el montaje experimental realizado fue posible, mediante una combinación de cargas axiales y cíclicas horizontales, generar una falla por punzonamiento en el sistema.
- ✓ Mediante el montaje experimental realizado, se pudo evidenciar que las fuerzas horizontales inducidas a los sistemas favorecen en gran medida la falla por punzonamiento de los mismos, pues esta se presentó en todos los casos hasta que dicha fuerza fue aplicada.

De la evaluación y comparación bajo efectos cíclicos, en la capacidad de disipación de energía del sistema losa columna en concreto reforzado con fibra acero y en concreto convencional se puede concluir que:

- ✓ La presencia de fibras en la matriz del concreto, junto a una buena adherencia debida a los ganchos, refleja una clara contribución en la etapa de post-Fisuración del concreto, permitiéndole al sistema seguir resistiendo esfuerzos punzantes cíclicos mayores a los soportados por los sistemas convencionales sin armadura de punzonamiento en el momento de falla.
- ✓ La inclusión de fibras en el concreto genera un menor desprendimiento de bloques de concreto en el momento de la falla.
- ✓ Las fibras permitieron aumentar la carga axial máxima resistente en el sistema, presentando un aumento del 73 % frente a un concreto convencional.
- ✓ Los desplazamientos verticales máximos en la losa, antes de presentarse la falla por punzonamiento, se incrementaron en un 28 %.
- ✓ La capacidad de disipación de energía bajo ciclos histeréticos, es muy similar en todas las cargas axiales para desplazamientos menores a 2 milímetros en los sistemas con y sin fibras. A partir de este nivel de desplazamiento se presentan aumentos en la capacidad de disipación en los sistemas con fibras. Esto, debido a que las fisuras del concreto en este punto comienzan a ser controladas por la presencia de fibras.
- ✓ La capacidad de disipación de energía calculada con base en ciclos histeréticos de cargas horizontales en sistemas reforzados con fibra, es en promedio dos veces mayor al sistemas en concreto convencional.

- ✓ La disipación de energía debido a cargas verticales registró un aumento promedio del 60% para los sistemas con fibra con respecto al realizado con concreto convencional.
- ✓ La resistencia promedio al corte en los sistemas con fibra se incrementó en hasta un 57% con respecto al modelo sin fibra.
- ✓ El modo de falla de los sistemas con fibras tiene una mayor capacidad de ductilidad al desplazamiento horizontal, debido al incremento en la disipación de energía que estas proporcionan.

CAPITULO 6. REFERENCIAS

Álvarez, Torres. Evaluación de la capacidad de disipación de energía de sistemas losa columna fabricados en concreto con fibras de acero, 2014.

G. S. Santos; W. G. NicácioI; A. W. Lima; G. S. S. A. Melo. Punching strengthening in flat plates of reinforced concrete with carbon fiber reinforced polymer (CFRP), 2014.

ACI 318S-14, American Concrete Institute, Building code requeriments for structural concrete, 2014.

Bernardo N. Moraes Neto, Jouaquim A.O. Barros, Guilherme S.S.A. Melo. “A model for the prediction of the punching resistance of Steel fibre reinforced concrete slabs centrally loaded”. Construction and Building Materials.

Aoude Hassan, William D. Cook, and Denis Mitchell, “Two way slab parking structures in Canada”, concrete international DECEMBER 2013.

Julien Michels, Daniele Waldmann, Stefan Maas, Arno Zurbes. “Steel fibers as only reinforcement for flat slab construction – Experimental investigation and design. Construction and Building Materials.

Kyoung – Kyu Choi, Manhmoud M. Reda Taha, Hong-Gun Park, Arup K. Maji. “Puniching shear strength of interior concrete slab-column connections reinforced with steel fibers”. Cement & Concrete Composites 29 (2007) 409-420.

L. yen-Minh, M. Rovnak, T. Tran-Quoc, and K, Nguyen-Kim. “Puniching shear Resistance of steel fiber reinforced concrete flat slabs”. Procedia Engineering 14 (2011) 1830-1837.

L.F.Maya, M. Fernandez Ruiz, A, Muttoni, S.J. Foster. “Punching shear strength of Steel fibre reinforced concrete slabs” Engineering Structures.

L. Garcia, “economic considerations of displacement-based seismic desing of structural concrete buildings” Strectural Engineering International, Vol 6, nº 4, Zurich, Suiza, 1996.

NSR 10, “Titulo C: concreto estructural”, 2010.

Nuno D. Gouveia, Nelos A.G. Fernandes, Duarte M.V. Faria, Antonimo M.P.Ramos, Valter J.G. Lucio. “Sfrce flat slabs puniching behaviour-Experimental research” Composites: part B 63 (2014) 161-171.

Dave Swanson. “”, Reid Middleton, 2011.

Altun, Haktanir, Kamura, “Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams”, *Construction and Building Material*), 2007, pp. 654–661.

Sergio Torres, Ramon Alvarez “Evaluación de la capacidad de disipación de energía de sistemas losa columna fabricados en concreto con fibras de acero”, Tesis pregrado, Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, 2015.

Santos, NicácioI, Lima y Melo. “Punching strengthening in flat plates of reinforced concrete with carbon fiber reinforced polymer (CFRP)”, *Ibracon de estructuras y materiales*. vol.7 (4). 2014.

Setia Saraswati, Kalyani Shakti “Seismic Behavior of Connections Subjected to Punching Shear in Flat-Slab Systems”, *Journal of engineering and technology*. Vol 5. (1), 2015 pp 45-51.

Murillo Jiménez Carlos Guillermo, 2004 “Análisis de las causas que dieron origen a los daños estructurales, en las edificaciones del Estado de Puebla, provocados por el sismo del 15 de junio de 1999” (tesis Profesional), Universidad de la Américas, Puebla México.

Josian, Mickael, Bogota geografie e historia <http://off2colombia.com.co/bogota-geografia-historia>