



FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Pregrado

Trabajo de Grado

**Evaluación de la capacidad de disipación de energía de sistemas losa columna
fabricados en concreto con fibras de acero**

Ramón Álvarez Mantilla
Sergio Torres Tafur

Director

ING. Yezid Alexander Alvarado Vargas

Co-Director

ING. María Patricia León Neira

BOGOTÁ D.C.
Junio 9 de 2015

APROBACIÓN

El Trabajo de grado titulado: **Evaluación de la capacidad de disipación de energía de sistemas losa columna fabricados en concreto con fibras de acero**, desarrollado por los estudiantes Ramón Andrés Álvarez Mantilla y Sergio Yamid torres Tafur, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de Pregrado en Ingeniería Civil, fue aprobado por:

Director
Yezid Alexander Alvarado Vargas.

Co-Director
María Patricia León Neira.

Resumen

Es el objetivo del presente documento, evaluar la capacidad de disipación de energía en sistemas losa columna fabricados en concreto con fibras de acero ante esfuerzos de punzonamiento. Lo anterior, mediante el diseño de un modelo experimental que permita generar falla debida a esfuerzos cortantes, así como la realización y posterior falla de 2 sistemas losa columna, de los cuales uno de ellos fue elaborado en concreto simple, y el otro realizado en 3 losas con adición de fibra, con el fin de comparar la capacidad de disipación de energía de un sistema elaborado en concreto con fibras de acero con respecto a uno elaborado en concreto convencional. De acuerdo a lo anterior, se espera demostrar la mejora de un concreto elaborado con fibras de acero no solo a soportar esfuerzos cortantes, sino también para suministrarle un aumento en la disipación de energía de los sistemas y por ende una mayor ductilidad a la falla.

Resumen.....	3
CAPITULO 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS.....	10
1.2 Motivación de la investigación:	10
1.3 Objetivos.....	11
Objetivos específicos	11
CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.	12
2.1 Introducción.....	12
2.2 Marco conceptual	12
2.3 Colapsos por punzonamiento.....	15
2.4 Propiedades mecánicas del concreto con fibras de acero	16
2.5 Capacidad de disipación de energía de concreto con fibra de acero.	18
2.6 Modelos experimentales a punzonamiento en concreto con fibras de acero	19
2.7 Resistencia al punzonamiento en concreto con fibras de acero	21
2.8 Falla por punzonamiento.	22
CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL.	25
3.1 Diseño de los modelos losa-columna.....	25
3.1.1 Diseño.....	25
3.2 Montaje experimental y plan de ensayos.	27
3.2.1 Ensayos de corte para vigas de concreto con fibras de acero.....	27
3.2.1 Ensayo de punzonamiento para concretos con fibras de acero.	28
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE MEZCLA Y ELABORACIÓN DE LOSAS	30
4.1 Materiales.....	30
4.1.1 Agregados	30
4.1.1.1 Agregado grueso.....	30
4.1.1.2 Agregado Fino	32
4.1.2 Cemento.....	33
4.1.3 Fibras de acero.....	33
4.1.4 Aditivo.....	33
4.1.5 Concreto.	34
4.2 Diseño de mezcla	34
4.2.1 Diseño de mezcla teórico.....	34
4.2.2 Diseño de mezcla experimental.....	35
4.3 Elaboración de los sistemas losa-columna.....	38

CAPITULO 5. RESULTADOS ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	44
5.1 Propiedades mecánicas del concreto.....	44
5.1.1 Compresión.....	44
5.1.2 Cortante en vigas	45
5.2 PUNZONAMIENTO	50
5.2.1 Descripción de los ensayos.....	50
5.2.2 Resultados obtenidos.	51
5.2.2.1 <i>Cálculo</i> de la disipación de energía.....	51
5.2.2.2 <i>Cálculo</i> de esfuerzos de punzonamiento	58
5.3 Análisis de costos.....	59
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	61

Contenido.

Capítulo 1

El Capítulo 1 corresponde a la introducción del documento en donde se justifica la importancia que tiene el tema en cuestión para la ingeniería contemporánea, así como los aportes que se pretenden alcanzar con esta investigación. De igual manera, se especifica el objetivo general y los objetivos específicos, con el fin de dar una mayor claridad a la finalidad del presente trabajo.

Capítulo 2

El Capítulo 2 se refiere al estado del arte del tema, en donde se resume todo lo correspondiente a estudios previos. Así mismo, se puede observar un marco conceptual con las definiciones de ciertos términos, los cuales consideramos de gran importancia para el entendimiento del presente trabajo.

Capítulo 3

El Capítulo 3 corresponde a la descripción del modelo experimental en donde se describe, el diseño del modelo experimental, geometría del sistema, un plan de ensayos de laboratorio y los montajes necesarios para llevar a cabo la investigación y posterior cumplimiento de los objetivos.

Capítulo 4

El Capítulo 4 especifica la elaboración de los modelos los materiales necesarios para realizarlos, el diseño de mezcla y la fabricación de los modelos.

Capítulo 5

El Capítulo 5 consiste en la recopilación de datos, gráficos, y fotografías de ensayos que fueron necesarios realizar en el laboratorio y que sustentan el trabajo realizado para su posterior análisis y comparación.

Capítulo 6

El Capítulo 6 se refiere a las conclusiones obtenidas luego de realizar el correspondiente análisis de resultados a los datos obtenidos en el laboratorio y que da lugar a comparaciones entre lo obtenido y lo investigado en el capítulo 2.

Capítulo 7

El Capítulo 7 corresponde a la recopilación de todas las referencias que fueron necesarias para realizar este trabajo de investigación.

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1 Resultados ensayos a compresión cilindros 150x300mm con diferente dosificación (Altun <i>et al</i> , 2005)	17
Tabla 2 Resultados ensayos a flexión para vigas con diferente dosificación (Altun <i>et al</i> , 2005).....	18
Tabla 3 Modo de falla (Grimaldi <i>et al</i> , 2013).....	21
Tabla 4 Granulometría agregado grueso.	30
Tabla 5 tamaños máximos y mínimos agregado grueso.....	31
Tabla 6 Características material grueso.....	31
Tabla 7 Granulometría finos.....	32
Tabla 8 Características material fino.	32
Tabla 9 Propiedades de los materiales para diseño de mezcla.	34
Tabla 10 Diseño de mezcla teórico.....	35
Tabla 11 Diseño de mezcla final	38
Tabla 12 Resumen de fechas ensayos.....	42
Tabla 13 Resistencia a la compresión del concreto.....	44
Tabla 14 Cortante máximo en vigas	46
Tabla 15 Resumen de los datos obtenidos.....	57
Tabla 16 Esfuerzo de punzonamiento máximo del sistema con y sin fibra.	59
Tabla 17. Costo de concreto.	59
Tabla 18 Costo de concreto por MPa a corte.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Abaco (propia).	12
Figura 2 fibras de acero 3D, 4D y 5D (NV Bekaert SA, 2012).	14
Figura 3 Falla por punzonamiento (Murillo, 2004).	16
Figura 4 Falla por punzonamiento (englishrussia.com)	16
Figura 5 Falla por punzonamiento (Journal of engineering and technology)	16
Figura 6 Falla por punzonamiento (Reidmiddleton)	16
Figura 7 Esfuerzo vs deformación cilindros 150x300mm con diferente dosificación (Altun <i>et al</i> , 2005).	17
Figura 8 Apoyo del sistema en la columna (Michels <i>et al</i> , 2012).	19
Figura 9 Apoyo del sistema en la losa (Grimaldi <i>et al</i> , 2013).	20
Figura 10 Carga vs desplazamiento para diferentes cuantías y losas (NGUYEN-MINH <i>et al</i> , 2011).	21
Figura 11 Falla tronco piramidal por punzonamiento.	22
Figura 12 Falla típica por punzonamiento. (Santos, <i>et al</i> , 2014)	23
Figura 13 Fallas por punzonamiento concreto con y sin fibras. (NGUYEN-MINH <i>et al</i> , 2011)	24
Figura 14 Dimensiones del sistema losa-columna	26
Figura 15 Modelo numérico sistema losa columna mediante elementos finitos	26
Figura 16. Esfuerzos cortantes en el sistema losa-columna mediante modelo numérico	27
Figura 17 Configuración general según recomendación japonesa JSCE-Sf6 (Carmona, Cabrera, 2009).	28
Figura 18 Aditamentos metálicos para ensayos a corte.	28
Figura 19 Esquema del montaje para fallas por punzonamiento en un sistema losa-columna (NGUYEN-MINH, <i>et al</i> , 2011).	29
Figura 20 Granulometría material grueso.	31
Figura 21 Curva tensión vs deformación diferentes tipos de fibra. (NV Bekaert SA, 2012)	33
Figura 22 Asentamiento mezcla # 1	36
Figura 23 Mezcla # 2	36
Figura 24 Asentamiento mezcla # 3	37
Figura 25 Asentamiento mezcla # 4	37
Figura 26 Armado y formaleta para losas	38
Figura 27 Materiales	39
Figura 28 Separadores.	39
Figura 29 mezcladora planetaria DOMAT	40
Figura 30 Vigas y cilindros.	40
Figura 31 Vigas y cilindros concreto simple	41
Figura 32 Asentamiento concreto simple	41
Figura 33 Colocación del concreto losa # 4	41
Figura 34 Vibrador de concreto.	41
Figura 35 Losas	42
Figura 36 Formaleta para columna	42
Figura 37 Asentamiento mezcla de concreto para columnas.	43
Figura 38 Falla cilindro concreto con fibra	44
Figura 39 Montaje vigas a corte.	45

Figura 40 Sección de corte de las vigas.....	46
Figura 41 Carga vs desplazamiento vigas sin fibra	47
Figura 42 Modo de falla a corte viga sin fibra.	47
Figura 43 Modo de falla a corte viga con fibra.	48
Figura 44 Modo de falla las fibras.....	48
Figura 45 Carga deformación vigas con y sin fibra.....	48
Figura 46 Índice de disipación en vigas.	49
Figura 47 Montaje final.	50
Figura 48 Gráfica carga vs deformación sistema # 1	51
Figura 49 Falla por punzonamiento sistema # 1	52
Figura 50 Gráfica carga vs deformación sistema # 2	53
Figura 51 Falla por punzonamiento sistema.	53
Figura 52 Gráfica carga vs deformación sistema # 3	54
Figura 53 Falla por punzonamiento sistema #3.....	54
Figura 54 Gráfica carga vs deformación sistema # 4 (sin fibra)	55
Figura 55 Falla por punzonamiento sistema # 4.....	56
Figura 56 Resumen de todas las gráficas obtenidas	57
Figura 57 Área de punzonamiento.....	58

CAPITULO 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.2 Motivación de la investigación

Las fallas en estructuras por punzonamiento 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 pérdida de bienes materiales e incluso la pérdida de vidas (Aoude *et al*, 2013).

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 un pilar con un entre piso haciendo que se genere la rotura de la placa en los alrededores del pilar en la cual se apoya, lo que en algunas ocasiones ha llegado a generar el colapso súbito y progresivo de muchas estructuras.

A partir de lo anterior las normas de diseño estructural (National Building Code of Canadá, NSR 10, entre varias), 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 especifica que solo se podrá construir con dicho sistema estructural en zonas de amenaza sísmico intermedio, en estructuras de hasta 15 m de altura, y en zonas de amenaza sísmico bajo, en estructuras de hasta 21 m de altura. Es decir, más o menos edificios de 6 y 8 pisos de altura.

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.

Ahora bien, en países como Panamá y Estados Unidos 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. Esto se puede evidenciar en varios

estudios que se han realizado a lo largo del tiempo entre los cuales destacamos dos artículos publicados por los autores (Nguyen-Minh *et al*, 2011) y según (Gouveia *et al*, 2014).

Adicionalmente en Europa, el uso de fibras de acero ha sido estudiado e implementado como prácticamente el único refuerzo en losas planas para edificios residenciales y de comercio en donde usualmente se usa un volumen de fibra del 1% del volumen de la mezcla acompañado de una mínima cantidad de barras que en caso de un colapso evita que este sea progresivo (Moraes *et al*, 2013).

De acuerdo a lo anterior, se ha podido comprobar que una buena mezcla de concreto con fibras de acero puede llegar a ser un refuerzo de corte adecuado para sistemas losa columna, pues 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 estas fibras 5D ante esfuerzos de punzonamiento generados en el 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 fallas por punzonamiento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la capacidad de disipación de energía de sistemas losa columna fabricados en concreto con fibras de acero ante esfuerzos de punzonamiento.

Objetivos específicos

- ✓ Diseñar un modelo experimental que permita generar falla por punzonamiento de sistemas losa columna.
- ✓ Evaluar la capacidad de disipación de energía en sistemas losa columna en concreto reforzado con fibras de acero.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En términos generales, el concreto hidráulico es un material cuyo conocimiento acerca de sus propiedades mecánicas es considerablemente amplio y confiable. Por la 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.

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 describirán ciertos términos los cuales consideramos de gran importancia para el entendimiento de este trabajo. Posteriormente, se describirán las investigaciones realizadas a las propiedades mecánicas de concretos adicionados con fibras de acero. Seguidamente se presentará la capacidad de disipación de energía que presenta el concreto adicionado con fibra, modelos que han sido utilizados para conseguir fallas por punzonamiento, se presenta la utilidad que tiene este tipo de adición de fibras para fallas por punzonamiento en un sistema losa columna, por último se presenta como se genera una falla típica por punzonamiento.

2.2 Marco conceptual

A continuación se muestran una serie de definiciones sobre conceptos que consideramos 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 1).



Figura 1. Ábaco (propia).

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: Un 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.

Estribo: Refuerzo empleado para resistir fuerzas cortantes y de torsión en un miembro; por lo general consiste en barras corrugadas, alambres corrugados o refuerzo electro soldado de alambre (liso o corrugado) ya sea sin dobleces o doblados en forma de L, U o en formas rectangulares, y colocados perpendicularmente o en ángulo con respecto al refuerzo longitudinal.

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 2 se observan las fibras de acero 3D, 4D y 5D.

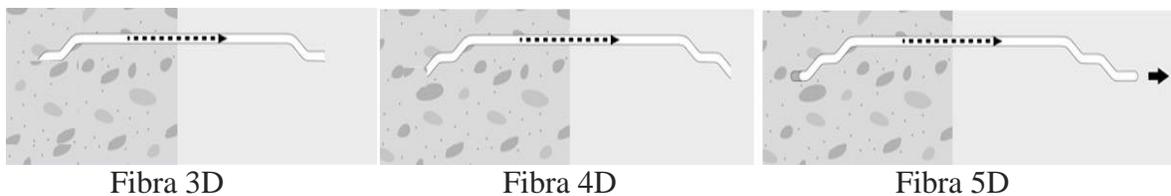


Figura 2. fibras de acero 3D, 4D y 5D (NV Bekaert SA, 2012)

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.

Muro estructural: Columna de gran tamaño que incrementa la rigidez lateral.

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).

Pórtico intermedio resistente a momento: Pórtico columna losa de dos direcciones sin vigas, construido en sitio.

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 los pilares de la estructura.

2.3 Colapsos por punzonamiento

A continuación se presentarán algunas fallas por punzonamiento que se han presentado en diferentes partes del mundo. En la Figura 3 se puede observar las losas de un edificio quedan sin apoyo generando un colapso total de las mismas, manteniendo en pie únicamente las columnas (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 4. 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 Figura 5. 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 6. Todas las fallas por punzonamiento presentadas sucedieron a partir de una acción sísmica.



Figura 3. Falla por punzonamiento
(Murillo, 2004)



Figura 5. Falla por punzonamiento
(Journal of engineering and technology)



Figura 4. Falla por punzonamiento
(englishrussia.com)



Figura 6. Falla por punzonamiento
(Reidmiddleton)

2.4 Propiedades mecánicas del concreto con fibras de acero

La capacidad de resistencia a la compresión del concreto 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 7.

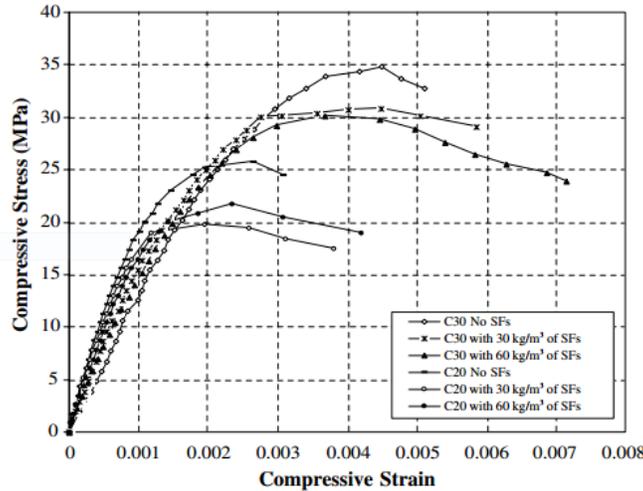


Figura 7. Esfuerzo vs deformación cilindros 150x300mm con diferente dosificación (Altun *et al*, 2005).

Por otro lado, al momento de la falla en los cilindros con fibras no se genera una rotura en pedazos (“explosión”), por el contrario las tensiones 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, medidas realizadas 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.

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

Promedio de las propiedades mecánicas de diferentes combinaciones de hormigón medidos en 150 * 300 mm muestras cilíndricas y 150 * 150 * 750 mm prismas.

Tipo de concreto	Clase de concreto	Media de resistencia a la compresión (N/mm ²)	Módulo de elasticidad (N/mm ²)	Resistencia a la tracción (N/mm ²)	Tenacidad (kN*mm)	Resistencia a la flexión (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

2.5 Capacidad de disipación de energía de concreto con fibra de acero

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

La capacidad de disipación de energía (tenacidad) en varias vigas de 300 x 300 x 2000mm con 2 tipos de concreto y diferentes porcentajes de fibra fueron ensayadas a flexión mostrando resultados de 5.7, 28.2 y 30.1 kN para concreto sin fibra, con 30 kg/m³ y 60 kg/m³ respectivamente (Altun *et al* 2005). Como se puede ver en la columna tenacidad de la Tabla 2, hay evidencia de una mejora en la capacidad de disipación de hasta en un 391% con cuantía de 30 kg/m³ respecto a las vigas sin fibra y un 32% adicional con 60kg/m³ (Altun *et al.*, 2005), lo cual evidencia el gran aporte que generan las fibras.

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

Viga	Clase concreto	Dosificación Fibras (kg/m ³)	Acero (mm)	Carga teórica ultima (kN)	Carga última experimental (kN)	(Experimental carga última) / (carga última teórica)	Promedio de carga (experimental) / ratios (carga máxima teórica)	Tenacidad (kN mm)
C20-1-0	C20	0	2φ16	126	184.50	1.46	1.55	5,495
C20-2-0					202.00			5,970
C20-3-0					201.60			5,830
C20-4-30	C20	30	2φ16	126	201.90	1.6	1.63	27,835
C20-5-30					202.30			27,550
C20-6-30					210.00			29,501
C20-7-60	C20	60	2φ16	126	210.30	1.67	1.67	29,830
C20-8-60					211.00			30,800
C20-9-60					209.00			29,800
C30-1-0	C30	0	2φ16	148.6	262.30	1.77	1.74	10,782
C30-2-0					260.15			9,925
C30-3-0					250.90			10,965
C30-4-30	C30	30	2φ16	148.6	320.25	2.16	2.26	26,382
C30-5-30					330.00			27,989
C30-6-30					357.20			29,856
C30-7-60	C30	60	2φ16	148.6	370.45	2.49	2.45	29,979
C30-8-60					368.75			30,045
C30-9-60					352.95			29,460

De acuerdo a lo anterior, acerca de la disipación de energía de concretos con fibra y aunque el sistema losa-columna no corresponda directamente al mismo comportamiento que en una viga a flexión, se sugiere que las fibras también aportaran una gran capacidad de disipación para el sistema losa columna.

2.6 Modelos experimentales a punzonamiento en concreto con fibras de acero

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 8 (Michels *et al*, 2012). El segundo modelo de ensayo consiste en apoyar el sistema perimetralmente sobre la losa y aplicar la carga con un solo gato hidráulico directamente a la columna del sistema como se puede ver en la Figura 9 (Grimaldi, *et al*, 2013.). Gran parte de las investigaciones consultadas coinciden en utilizar el segundo método descrito.

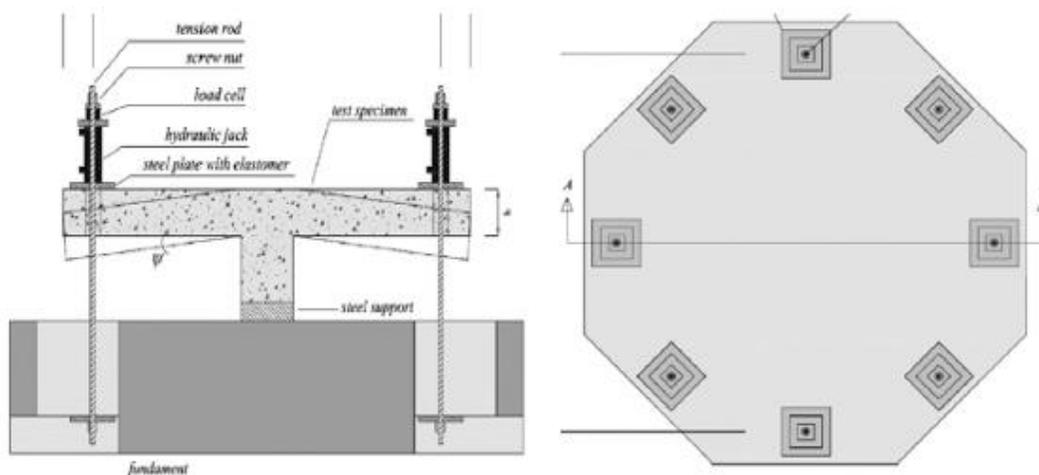


Figura 8. Apoyo del sistema en la columna (Michels *et al*, 2012).

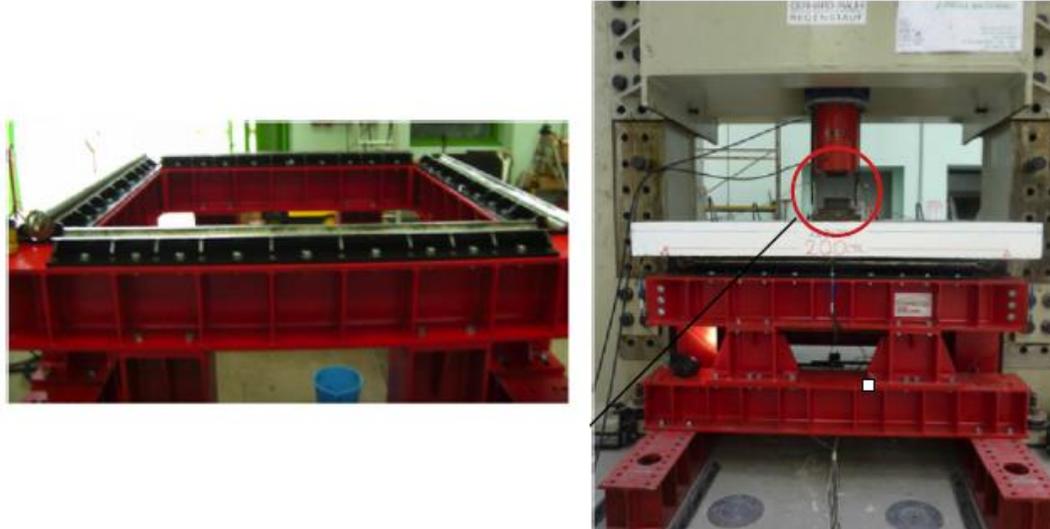


Figura 9. Apoyo del sistema en la losa (Grimaldi *et al*, 2013)

El refuerzo a flexión para conseguir este tipo de falla varía entre el 0.4% al 0.8% (Nguyen-Minh y 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% (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 (Nguyen-Minh y 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*, 1995) 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.

Tabla 3. Modo de falla (Grimaldi *et al*, 2013)

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

2.7 Resistencia al punzonamiento en concreto con fibras de acero

En la Figura 10 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” en la que el comportamiento debido a la carga de todas las losas fue similar, y aproximadamente lineal.
- ✓ “Etapa post formación de grietas” donde se presenta una disminución de la rigidez de las losas. Además se puede observar 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.

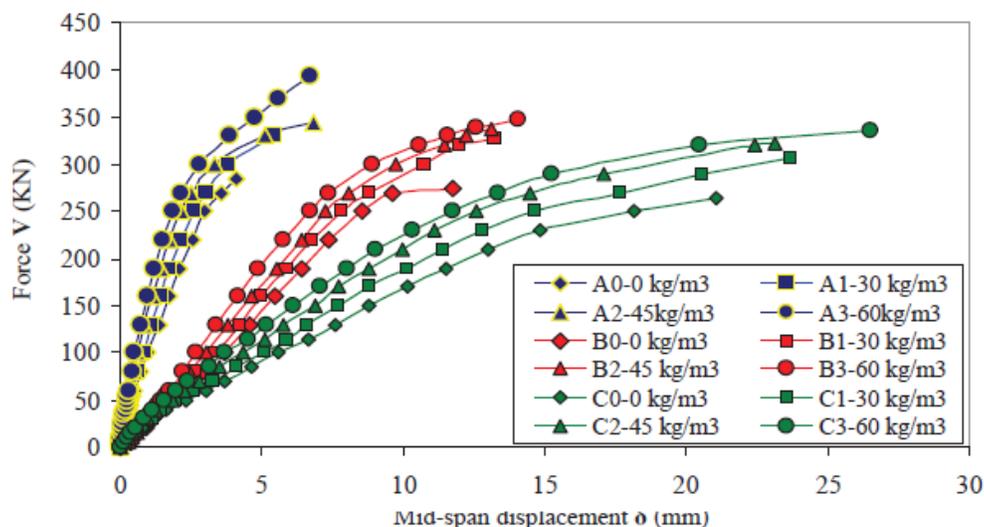


Figura 10. Carga vs desplazamiento para diferentes cuantías y losas (NGUYEN-MINH *et al*, 2011)

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-Minh *et al*, 2011). En esta misma proporción de aumento en la resistencia al punzonamiento se encuentran la mayoría de investigaciones consultadas en donde se evidencia una ganancia del 30% al 35% usando fibras 3D 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 fisuras 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 rompen. 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 con matriz del concreto, evitando alcanzar el colapso del sistema.

2.8 Falla por punzonamiento

El estado límite último de punzonamiento se alcanza por agotamiento de la pieza bajo tracciones debidas a tensiones tangenciales originadas por una carga o reacción concentrada en un sector pequeño de un elemento bidireccional de concreto (Bernat, *et al*, 2002). Estos cortantes 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 11.

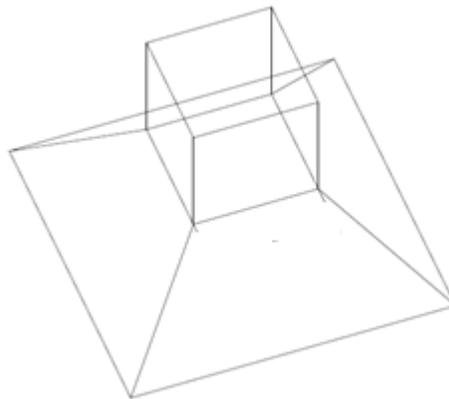


Figura 11. Falla tronco piramidal por punzonamiento

De acuerdo a 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 12.

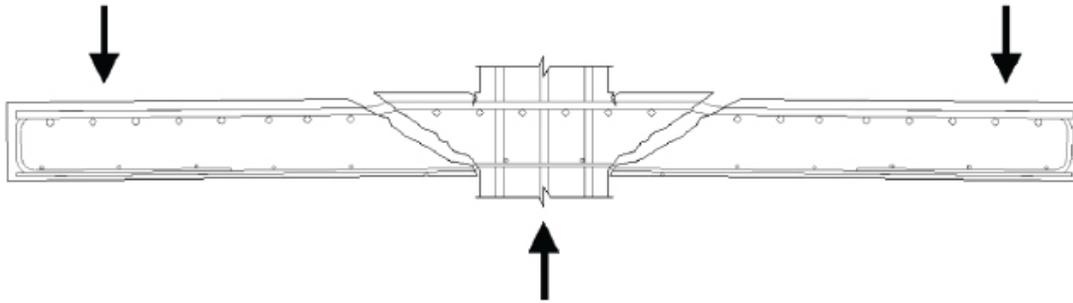


Figura 12. Falla típica por punzonamiento (Santos, *et al*, 2014)

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 un pilar 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 axiles de las columnas, mientras que si la unión es un empotramiento también provocarán tensiones los momentos flectores del pilar. 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 por el pilar, las tensiones que se crean son producto del reparto uniforme de este esfuerzo a lo largo de la superficie crítica de la losa. Así la tensión de corte que se presentan en el sistema se expresa en la ecuación 1.1

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

Donde V es la fuerza axial aplicada en la cabeza del pilar y A_c es el área crítica de punzonamiento

Desacuerdo a la NSR-10 V debe ser calculado como el menor valor entre las Ecuaciones 1.2, 1.3 y 1.4

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

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

$$V = 0,33 \sqrt{F'c} b_o d \quad (1.4)$$

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 que las losas en concreto sin fibras ensayadas a punzonamiento presentan fallas muy frágiles como se ve en la Figura 13, en donde el recubrimiento de hormigón en la superficie inferior se pierde. Por otro lado las losas en concreto con fibra fallan de un modo más dúctil, además las fisuras se forman de una manera uniforme con anchura menor como se muestra en la Figura 13 debido al efecto de puente que proporciona las fibras, aumentando la ductilidad y la integridad del sistema losa columna (NGUYEN-MINH, *et al*, 2011).



Concreto sin fibras



Concreto con fibras

Figura 13. Fallas por punzonamiento concreto con y sin fibras. (NGUYEN-MINH *et al*, 2011)

CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL

3.1 Diseño de los modelos losa-columna

3.1.1 Diseño

Para el diseño del modelo losa-columna en primer lugar fue necesario la definición de las dimensiones que deberá tener la losa y la columna así como el refuerzo a flexión para garantizar la falla por punzonamiento.

De acuerdo al estado del arte, para garantizar la falla por punzonamiento se debe tener en cuenta 4 aspectos principalmente, estos son:

- ✓ Dimensiones de la losa: la losa debe ser cuadrada. Lo anterior, con el fin de apoyar el sistema en sus dos direcciones haciendo que se dificulte la falla a flexión del sistema. Teniendo en cuenta las limitaciones geométricas de la maquina universal, la cual tiene un espacio máximo entre tornillos de 700 mm x 700mm, y además, después de consultar varios artículos de investigación se determinó que las dimensiones serian de 600mm x 600mm.
- ✓ Espesor de la losa: como se encontró en distintas investigaciones, entre mayor sea el espesor de la losa es más factible que la falla se presente por punzonamiento y no por flexión, por lo que se determinó que el espesor de la losa deberá ser de 125 mm.
- ✓ Dimensiones de la columna: la falla a punzonamiento se presenta a una distancia d de la columna por lo que se definió que la columna deberá tener una sección de 125mm * 125mm generando una falla teórica en la base de la losa a 75 mm del borde de la losa, garantizando que la falla se encuentre dentro de la losa dimensionada.
- ✓ Refuerzo a flexión: Para evitar una posible falla a flexión, todas las losas llevan un refuerzo a tracción con un recubrimiento de 25 mm y una cuantía de $P=0.0142$ conformado por seis varillas #3 separadas 110mm en ambos sentidos, cumpliendo con la cuantía mínima de $P=0.002$ según la NSR 10 C.14.3.3.

Las dimensiones para el sistema se muestran en la Figura 14.

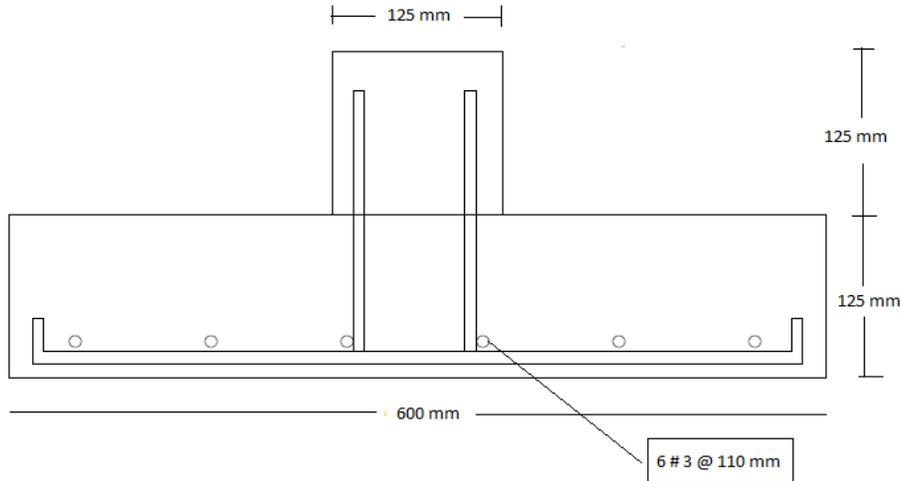


Figura 14. Dimensiones del sistema losa-columna (Propia)

Una vez definidas las dimensiones se realizó un modelo de elementos finitos con el fin de comprobar si existe una concentración de esfuerzos cortantes 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 del sistema losa-columna está compuesto por elementos sólidos en concreto de 21 MPa, con una malla de 5mm x 5mm en la sección transversal de la losa y una malla de 2.5 mm en su altura como se puede ver en la Figura 15.

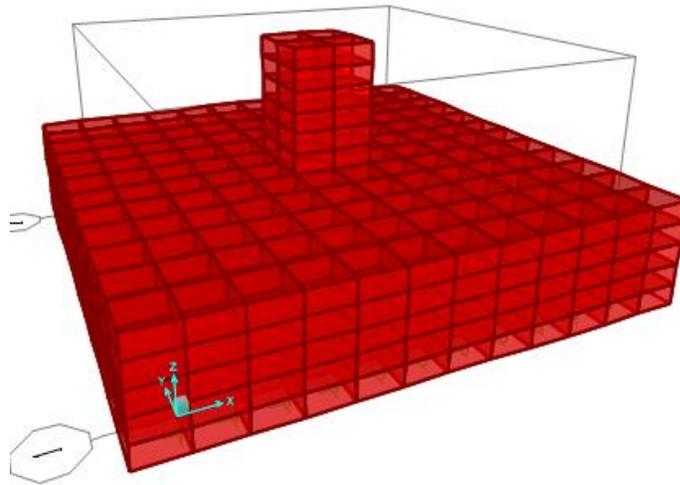


Figura 15. Modelo numérico sistema losa columna mediante elementos finitos (Propia).

Como podemos observar en la Figura 16 existe una concentración de esfuerzos cortantes en la losa ubicados perimetralmente alrededor de la columna a una distancia de más o menos d siendo d el espesor efectivo de la losa. A partir de este modelo podemos concluir que mediante el modelo experimental propuesto es posible obtener una falla por punzonamiento del sistema losa-columna dentro de la geometría propuesta.

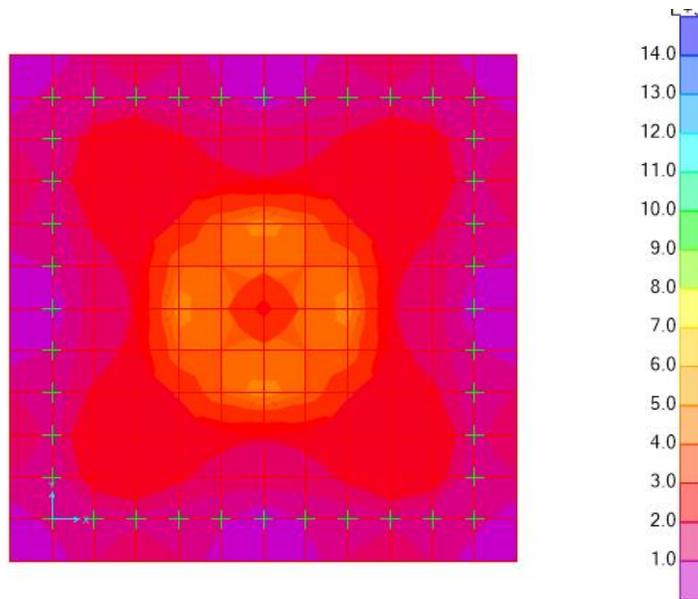


Figura 16. Esfuerzos cortantes en el sistema losa-columna mediante modelo numérico.
(Propia)

3.2 Montaje experimental y plan de ensayos

Para el desarrollo de este trabajo de grado se realizan dos modelos experimentales, los cuales aún no están implementados en los laboratorios de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá). Por tal motivo fue necesario diseñar estos modelos que serán descritos en este documento.

3.2.1 Ensayos de corte para vigas de concreto con fibras de acero

Para este ensayo se seguirán las recomendaciones japonesas JSCE-Sf6 las cuales permiten alcanzar resultados válidos y con poca variabilidad (Carmona y Cabrera, 2009). Se establece el uso de la configuración mostrada en la Figura 17. 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 serán compactadas en dos capas apisonadas 50 veces. Las vigas tendrán unas entallas cortadas con una sierra con 10mm de profundidad en todas sus caras. La tensión 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 tensiones de corte concentradas (Mirsayah, Bantia, 2002). Los aditamentos metálicos pueden verse en la Figura 18. Las vigas sin fibra se cargaran hasta evidenciar la falla o hasta la rotura de la viga. Las vigas con fibra, según las investigaciones realizadas anteriormente, se cargaran hasta conseguir un desplazamiento en el bloque interior de la viga de 10 mm.

Los ensayos se realizaran en una maquina universal marca: SHIMADZU UH 100A con una capacidad de carga de 1000 kN, la carga aplicada será 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.

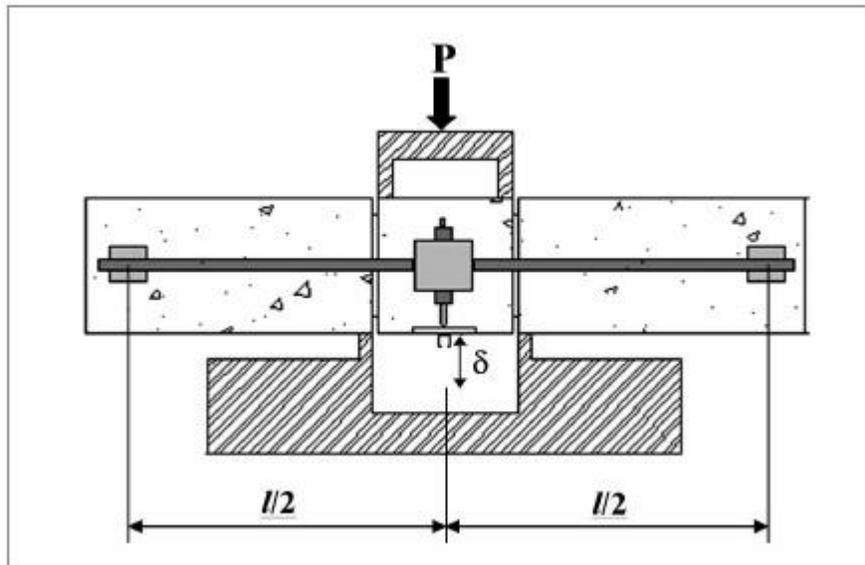


Figura 17. Configuración general según recomendación japonesa JSCE-Sf6 (Carmona, Cabrera, 2009).

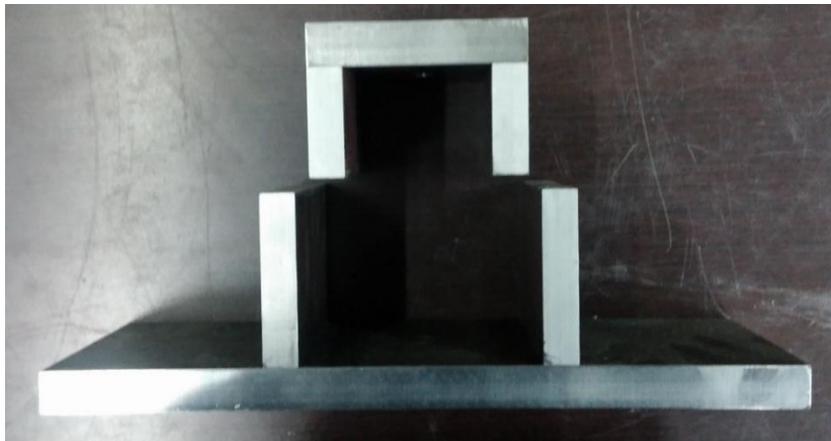


Figura 18. Aditamentos metálicos para ensayos a corte. (Propia)

3.2.1 Ensayo de punzonamiento para concretos con fibras de acero

Para este ensayo se usó como guía el montaje encontrado en la bibliografía (NGUYEN-MINH, *et al*, 2011) realizando algunas modificaciones. La carga será aplicada por medio de la maquina universal antes descrita 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 será registrada mediante una celda de carga y Los desplazamientos serán 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 serán registradas mediante un sistema de adquisición de datos. Las losas estarán apoyadas perimetralmente por un marco metálico de 600mm x 600 mm lo suficientemente rígido como para no deformarse durante los ensayos. El esquema del montaje se ilustra en la Figura 19.

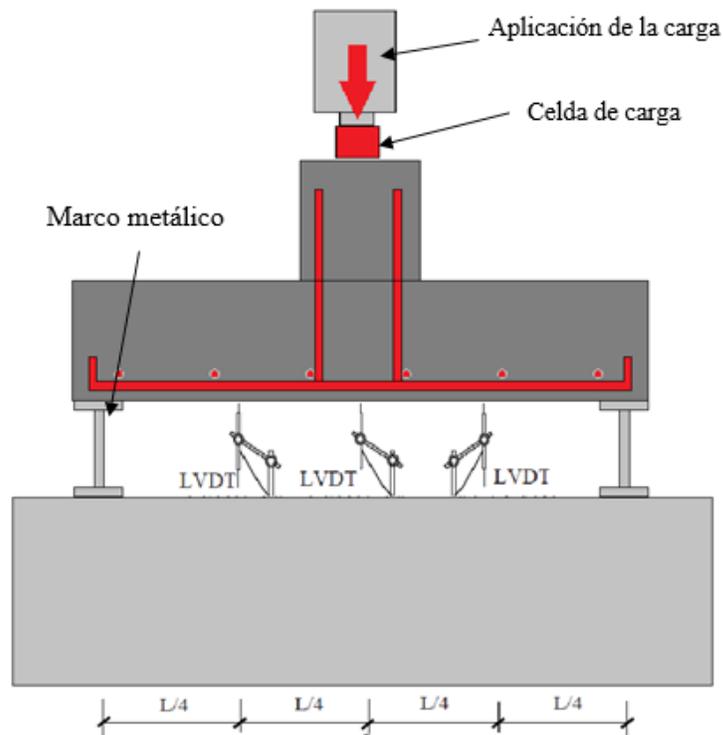


Figura 19. Esquema del montaje para fallas por punzonamiento en un sistema losa-columna.

Como se mencionó anteriormente para este ensayo se construyeron losas con concreto de 21 MPa (descrito anteriormente) de 600mm x 600mm y 125 mm de espesor con una columna central de 125mm de alto y una sección de 125mm x 125mm. Cabe resaltar que el volumen de fibra fue determinado a partir de la bibliografía en donde se puede encontrar que el incremento en la capacidad ductil es directamente proporcional al incremento en el volumen de fibras de acero, aunque después de los 60 Kg/m³ de fibras de acero en la mezcla no se presentan aumentos significativos en la ductilidad. (Gouveia, *et al*, 2014), (NGUYEN-MINH, *et al*, 2011), (Carmona, Cabrera, 2009).

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE MEZCLA Y ELABORACIÓN DE LOSAS

4.1 Materiales

Se utilizaron los siguientes materiales para la construcción de cilindros, vigas y 4 sistemas de losa-columna para ensayos de punzonamiento.

4.1.1 Agregados

4.1.1.1 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 4 se muestran los resultados de la granulometría realizada donde se confirma el tamaño máximo nominal de 1/2".

Tabla 4. Granulometría agregado grueso.

Peso total muestra inicial		2284.1			
Abertura (mm)	Tamiz	Peso Retenido (g)	% Retenido	Retenido acumulado	% Pasa
25.4	1"	0	0	0	100
19	3/4"	39	1.71	1.71	98.29
12.7	1/2"	183.9	8.05	9.76	90.24
9.5	3/8"	533.7	23.37	33.13	66.87
4.8	#4	1372.3	60.09	93.22	6.78
3	Fondo	154.8	6.78	100	0
Total		2283.7	% perdido de la muestra	0.017	

En la Tabla 5 se muestran los valores máximos y mínimos de % que pasa, que deben cumplir los materiales de 1/2" para usarse en concretos, según la norma ASTM C33. Al analizar las

Tablas 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 20 se muestra la granulometría del material y los valores límites de la norma.

Tabla 5. Tamaños máximos y mínimos agregado grueso.

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

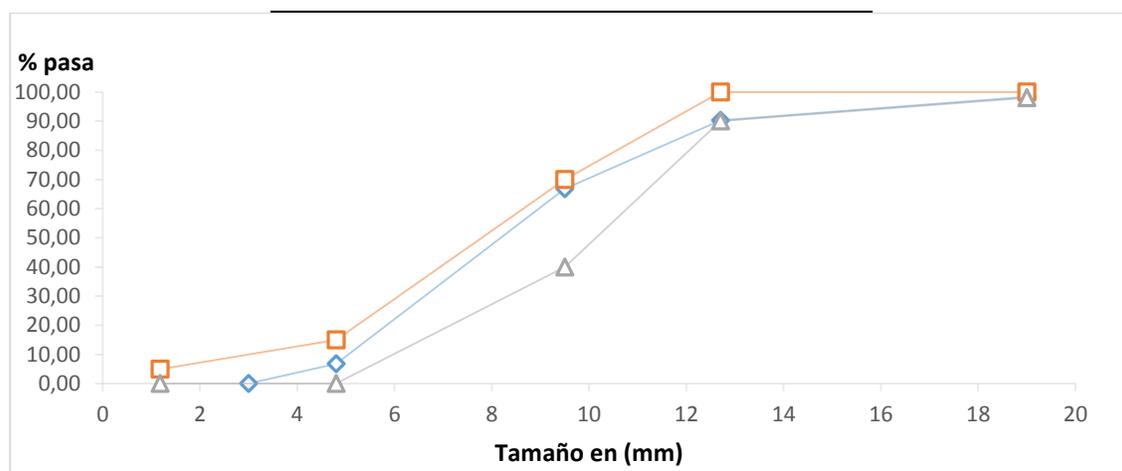


Figura 20. Granulometría material grueso.

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 6.

Tabla 6. Características material grueso

Ensayo	Norma	Resultado
Masa unitaria suelta g/l	I.N.V.E-217-07	1598
Masa unitaria compacta g/l	I.N.V.E-217-07	1660
Gravedad específica Gs	I.N.V.E-223-07	2,56
Gravedad específica saturada superficialmente seca Gs(sss)	I.N.V.E-223-07	2,60
Gravedad específica aparente	I.N.V.E-223-07	2,66
Absorción (%)	I.N.V.E-223-07	1,46

4.1.1.2 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 7 se muestran los resultados de la granulometría realizada. Se obtuvo un módulo de finura de 1.9 con lo cual tendríamos una arena fina.

Tabla 7. Granulometría finos

Peso total muestra inicial		465			
abertura (mm)	tamiz	peso retenido (g)	% Retenido	retenido acumulado	% pasa
2.4	#8	4	0.86	0.86	99.14
1.2	#16	38.8	8.35	9.21	90.79
0.6	#30	58	12.48	21.70	78.30
0.3	#50	183.1	39.41	61.11	38.89
0.15	#100	152.5	32.82	93.93	6.07
0.075	#200	27.1	5.83	99.76	0.24
0.04	fondo	1.1	0.24	100.00	0.00
	Total	464.6	% perdido de la muestra		0.086

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.

Tabla 8. Características material fino.

Ensayo	Norma	Resultado
Masa unitaria suelta g/l	I.N.V.E-217-07	1422,6
Masa unitaria compacta g/l	I.N.V.E-217-07	1613,5
Gravedad específica Gs	I.N.V.E-223-07	2,54
Gravedad específica saturada superficialmente seca Gs(sss)	I.N.V.E-223-07	2,58
Absorción (%)	I.N.V.E-223-07	1,65

4.1.2 Cemento

Se utilizó cemento Cemex “cemento súper resistente” según especificaciones de Cemex ofrece altas resistencias iniciales y finales, provee una excelente durabilidad en ambientes con polución y tiene un buen desempeño en el terminado.

4.1.3 Fibras de acero

Se utilizaron fibras de acero Bekaert Dramix® 5D con una longitud es 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 permite 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.

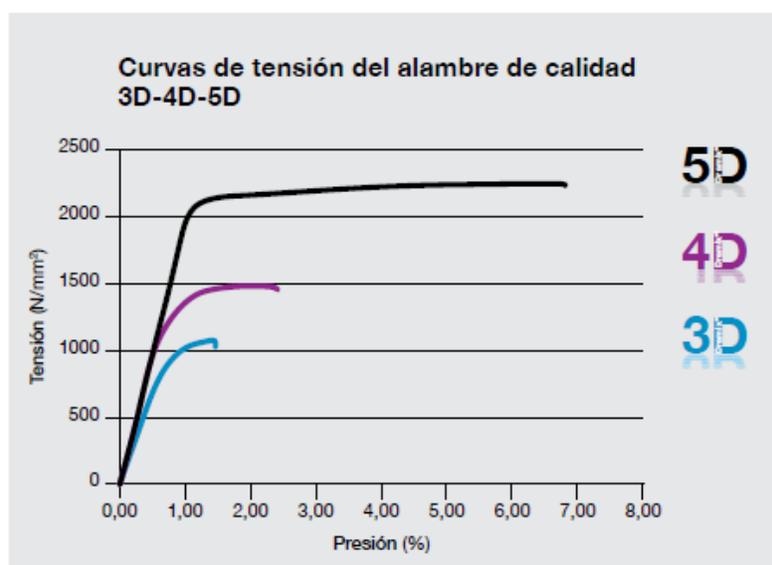


Figura 21. Curva tensión vs deformación diferentes tipos de fibra. (NV Bekaert SA, 2012)

4.1.4 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.

4.1.5 Concreto

Todas las losas, vigas y cilindros usados para este trabajo de investigación fueron realizadas 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.

4.2 Diseño de mezcla

4.2.1 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 9 se muestran los resultados y consideraciones tomadas en cuenta para realizar el diseño de mezcla propuesto.

Tabla 9. Propiedades de los materiales para diseño de mezcla.

Materiales	Gs	% Hum.	% Abs.	MUC kg/m ³	MUS kg/m ³
Agua	1	-----	-----	-----	-----
Cemento	2.86	-----	-----	-----	-----
Grava	2.72	0	1.47	1660	1598
Arena	2.65	4.1	1.65	1614	1423
M finura =	1.87	Arena Fina			
TMN	1/2 "				

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 1/2" respectivamente, dando como resultado un volumen de 215 l/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, 1.9 y 1/2" respectivamente. Para este valor de Módulo de Finura y tamaño máximo nominal se obtuvo como resultado 0,644 m³ de agregado grueso por 1 m³ de concreto.

De acuerdo a lo anterior el diseño de mezcla teórico final por metro cubico de concreto de 21 MPa y 35 MPa se muestra en las Tablas 10 (a) y 10 (b) respectivamente. Cabe resaltar que las losas, cilindros y vigas se fabricaron con concreto de 21 MPa y las columnas de 35 MPa.

Tabla 10. Diseño de mezcla teórico.

Material	kg/m ³		Relación	Material	kg/m ³		Relación
	Seco	Húmedo			Seco	Húmedo	
Agua	215.00	216.95	0.605	Agua	215.00	220.85	0.411
Cemento	358.33	358.33	1.000	Cemento	537.50	537.50	1.000
Grava	1062.54	1062.54	2.965	Grava	1062.54	1062.54	1.977
Arena	557.92	580.79	1.621	Arena	398.80	415.15	0.772

(a) Concreto de 21 MPa

(b) Concreto de 35 MPa

4.2.2 Diseño de mezcla experimental

Al incorporar fibras de acero en el concreto, se hizo necesaria una modificación en el diseño de mezcla teórico para obtener los 10 cm de asentamiento esperado mediante la inclusión de una determinada cantidad de aditivo plastificante.

De acuerdo a lo anterior, se realizaron 4 tipos de mezcla para cumplir dicho objetivo, variando principalmente la cantidad de fibra y el aditivo a incorporar. La primera mezcla realizada fue diseñada para obtener 10 cm de asentamiento y una resistencia a la compresión de 21 MPa de donde se obtuvieron tan solo 2 de los 10 cm de asentamiento esperados, como muestra en la Figura 18 con una cuantía de 75 kg/m³ de fibra y 0.1% (del peso del cemento) de aditivo.



Figura 22. Asentamiento mezcla # 1

La segunda mezcla realizada fue diseñada para los mismos 10 cm de asentamiento y 21 MPa de resistencia a la compresión de la mezcla anterior, pero con una cuantía de 60 kg/m^3 de fibra y el 0.5% de aditivo (del peso del cemento), de donde se obtuvieron 17 cm. de asentamiento con una segregación total en la mezcla como se observa en la Figura 23.

Evidentemente el asentamiento logrado y la segregación en la mezcla se debieron a la cantidad de aditivo incorporado por lo que fue necesario la disminución de dicho porcentaje en una tercera mezcla.



Figura 23. Mezcla # 2.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la mezcla # 2 la mezcla # 3 fue diseñada para 10 cm de asentamiento y 21 MPa de resistencia a la compresión pero con una cuantía de 60 Kg/m^3 de fibra y 0.15% de aditivo (del peso del cemento), de donde obtuvimos un concreto homogéneo y compacto con 7 cm de asentamiento y de excelente aspecto como se observa en la Figura 24.



Figura 24. Asentamiento mezcla # 3.

Finalmente se elaboró una cuarta mezcla con las mismas especificaciones de las 3 anteriores pero aumentando el porcentaje de aditivo de un 0.15% a un 0.18%, en donde finalmente se logró obtener los 10 cm de asentamiento como se observa en la Figura 25.



Figura 25. Asentamiento mezcla # 4.

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 11.

Tabla 11. Diseño de mezcla final

Material	kg/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

4.3 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 llevaríamos a cabo la fundición de las 3 losas como se ve en la Figura 26.



Figura 26. Armado y formaleta para losas.

Posteriormente se procedió con la elaboración de las 3 losas de concreto reforzado con fibra de acero para lo cual elaboramos un procedimiento de mezclado que consistio 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 hacer y mezclar durante 45 segundos.
- ✓ Verter el 30% de agua restante junto con el aditivo y terminar de mezclar durante 1 minuto.

En la Figura 27 se muestran algunas de las cantidades de material que fueron utilizados para la losa # 1 las cuales son exactamente las mismas de las losas 2, 3 y 4.



Figura 27. Materiales.

Para garantizar el recubrimiento de 2.5 cm del armado a flexión en las losas se colocaron los separadores que se muestra en la Figura 28.



Figura 28. Separadores.

La máquina con la cual realizamos el mezclado de las 4 losas fue la mezcladora planetaria DOMAT, Figura 29.



Figura 29. Mezcladora planetaria DOMAT.

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 30.



Figura. 30 Vigas y cilindros.

Una vez fundidas las losas de concreto reforzado con fibras de acero se procedió a elaborar la cuarta y última losa sin fibras como se ve en la Figura 33, la cual será nuestro punto de comparación pues será hecha en concreto simple. El diseño de mezcla utilizado para la construcción de esta losa fue exactamente el mismo que se utilizó para las demás con la diferencia de que no se adicionaran las fibras ni aditivo. Finalmente para esta losa obtuvimos un asentamiento de 10 cm. e igualmente se elaboraron las vigas y cilindros correspondientes para su caracterización como se observa en las Figuras 31 y 32.



Figura 31. Vigas y cilindros concreto simple



Figura 32. Asentamiento concreto simple



Figura 33. Colocación del concreto losa # 4.

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 34.



Figura 34. Vibrador de concreto.

Cabe resaltar que cada losa se realizó en un día diferente y con el fin de fallarlas todas a una misma edad tuvimos que tomar el registro de estas fechas. Las fechas se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Resumen de fechas ensayos.

Losa	Fecha en que fue realizada	Fecha a Fallarla
1	12/04/2015	10/05/2015
2	18/04/2015	16/05/2015
3	24/04/2014	22/05/2015
4	27/04/2014	25/05/2015

A continuación en la Figura 35 se muestran imágenes de las 4 losas una vez el concreto ha endurecido:



Figura 35. Losas.

Una vez terminadas las losas se inició el proceso para la elaboración de las columnas, para lo que fue necesario, en primera instancia, la realización de la formaleta, la cual se muestra a en la Figura 36:



Figura 36. Formaleta para columna.

Una vez finalizada la formaleta se procedió a la elaboración del concreto para la columna. La mezcla de concreto fue diseñada para obtener 5 cm de asentamiento con una resistencia de 35 MPa, dado que la columna es nuestro elemento transmisor de carga y por ningún motivo deberá fallar. El asentamiento del concreto para las columnas se muestra en la Figura 37.



Figura 37. Asentamiento mezcla de concreto para columnas.

CAPITULO 5. RESULTADOS ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1 Propiedades mecánicas del concreto

5.1.1 Resistencia a la Compresión

El ensayo de compresión se realizó a 3 cilindros por cada losa para conocer la resistencia del concreto adicionado con y sin fibras, 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 13 se muestran las características geométricas de los cilindros y su resistencia a la compresión.

Tabla 13. Resistencia a la compresión del concreto.

ID	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Área mm ²	P max (kN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Edad (días)
Losa 1 ccf	10,23	20,5	82,1	16,20	19,7	28
Losa 2 ccf	10,22	20,3	82,0	15,98	19,5	28
Losa 3 ccf	10,22	20,4	82,0	16,10	19,6	28
Losa 4 csf	10,18	20,3	81,3	16,72	20,5	28

La resistencia a compresión del concreto con fibra en promedio es de 19,46 MPa la cual es un poco menor a la resistencia de concreto con fibra que fue de 20,5 MPa. De acuerdo a investigaciones este valor era de esperarse debido a que la presencia de fibras puede llegar a reducir la resistencia a la compresión del concreto. Por otra parte como se puede ver en la Figura 38 el cilindro no presenta pérdida de fragmentos grandes en la matriz, solo presenta 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.



Figura 38. Falla cilindro concreto con fibra.

5.1.2 Cortante en vigas

Se realizaron 5 ensayos de corte en vigas de acuerdo al montaje experimental descrito en el numeral 3.2.1 (Ensayo de cortes para vigas). Se fallaron 3 vigas con fibras con una cuantía de 60 kg/m^3 llamadas viga 1-ccf, viga 2-ccf y viga 3-ccf y 2 vigas sin fibra como especímenes de control llamadas viga 1-csf y viga 2-csf. El montaje del ensayo se muestra en la Figura 39. Todas las vigas fueron llevadas a cámara de curado y falladas a una edad de 28 días.

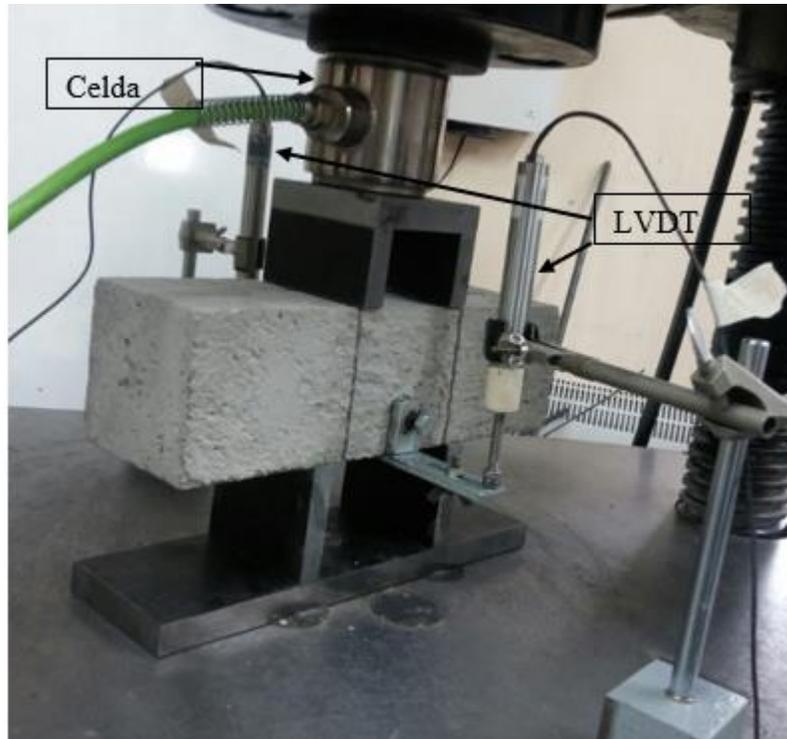


Figura 39. Montaje vigas a corte.

La carga máxima soportada por las vigas con fibra y sin fibra se presenta en la Tabla 14. La carga máxima soportada por una viga sin fibra fue el 86% menor con respecto a las vigas con fibra. Los valores de resistencia al corte se determinaron utilizando la ecuación 5.1 (Carmona, Cabrera. 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.

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{2xD_{ef}xb_{ef}} \quad (5.1)$$

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 40.

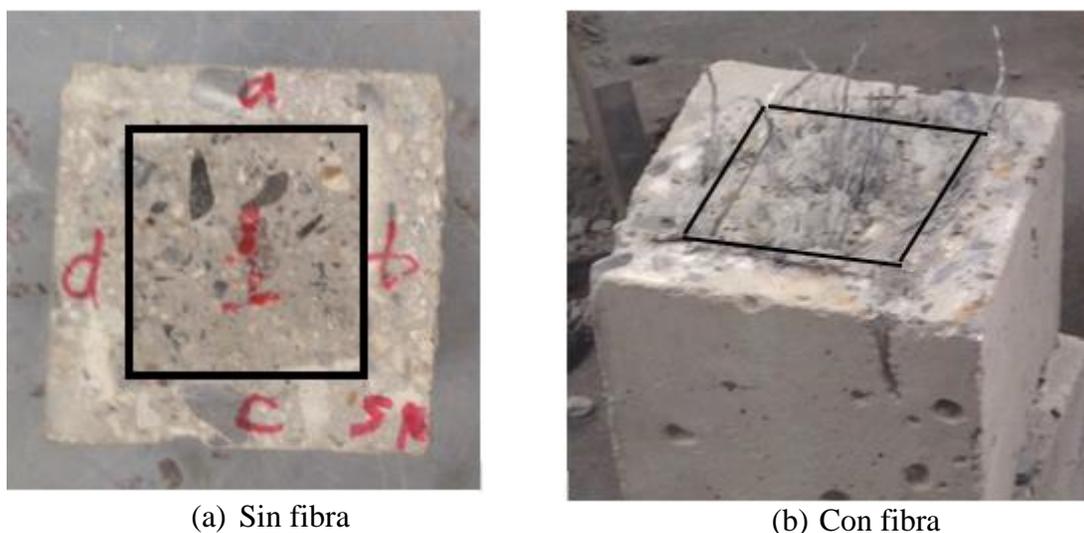


Figura 40. Sección de corte de las vigas.

El cortante máximo obtenido en las vigas sin fibras fue de 3,1 MPa, mientras que el cortante máximo obtenido en vigas con fibras fue de 5,6 MPa, mostrando un incremento del 80,6 % de resistencia frente a esfuerzos de corte con una dosificación de fibras de 60 kg/m³. En la Tabla 14 se encuentran todos los valores de cortante obtenidos, en donde la poca variación de los datos de corte máximo valida la confiabilidad de los datos. Según la bibliografía consultada el incremento a la resistencia al corte puede llegar hasta un 75 % con una cuantía de 100 kg/m³ (Carmona, contreras, *et al*, 2009), sin embargo para cuantías superiores no observan diferencias en el aumento de la resistencia a compresión.

Tabla 14. Cortante máximo en vigas.

ID	Cuantía kg/m ³	P _{max} (kg-f)	D _{ef} (mm)	b _{ef} (mm)	τ (MPa)
Viga 1-csf	0	2930	68,5	70,0	3,1
Viga 2-csf	0	2362	65,7	62,1	2,9
Viga 1-ccf	60	5450	69,0	70,7	5,6
Viga 2-ccf	60	4039	62,7	63,2	5,1
Viga 3-ccf	60	5310	69,5	70,3	5,4

Como se puede observar en las gráficas carga-deformación de la Figura 41 en las vigas sin fibra la falla se presentó con un desplazamiento máximo de 1,8 mm aunque después del pico de carga se observa una rápida disminución en la resistencia de la viga. De este modo podemos 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 42.

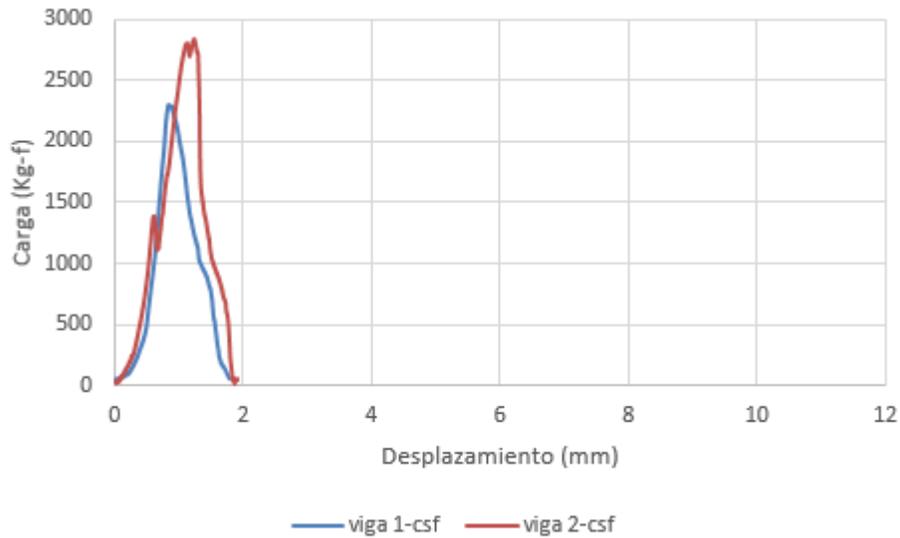


Figura 41. Carga vs desplazamiento vigas sin fibra.



Figura 42. Modo de falla a corte viga sin fibra.

Las vigas con fibra no presentan una falla frágil ni desprendimientos en la sección del concreto como se observa en la Figura 43. Debido a esta condición se pudo llegar a una deformación de 10 mm en donde se presenta una disminución del 50 % de la carga máxima soportada. Este efecto se debe a 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 por deslizamiento, como se puede ver en la Figura 44.



Figura 43. Modo de falla a corte viga con fibra.



Figura 44. Modo de falla las fibras.

En la Figura 45 se muestra la gráfica carga vs desplazamiento de las vigas con y sin fibra en donde se observa claramente el gran aporte tanto a carga máxima como a capacidad de disipación de energía 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.

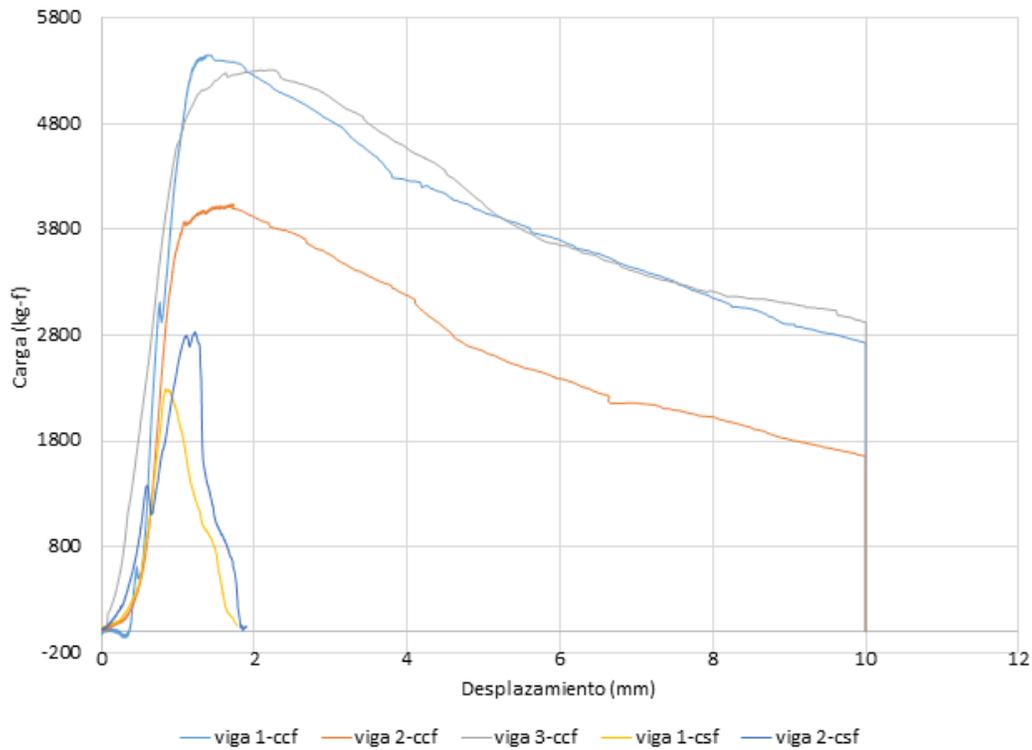


Figura 45. Carga deformación vigas con y sin fibra.

Con los resultados obtenidos en estos ensayos se podrían calcular índices de disipación de energía para las vigas, este índice se calcula como el área bajo la curva carga vs desplazamiento según la recomendación de la SF-4 de la JSCE. Los límites del

desplazamiento pueden estar definidos por la sección de la probeta, también la norma recomienda un desplazamiento máximo de $D=s/150$ 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. Es evidente que las fibras tienen una contribución importante de más de 3 veces la capacidad de disipación de energía como se puede ver en la Figura 46.

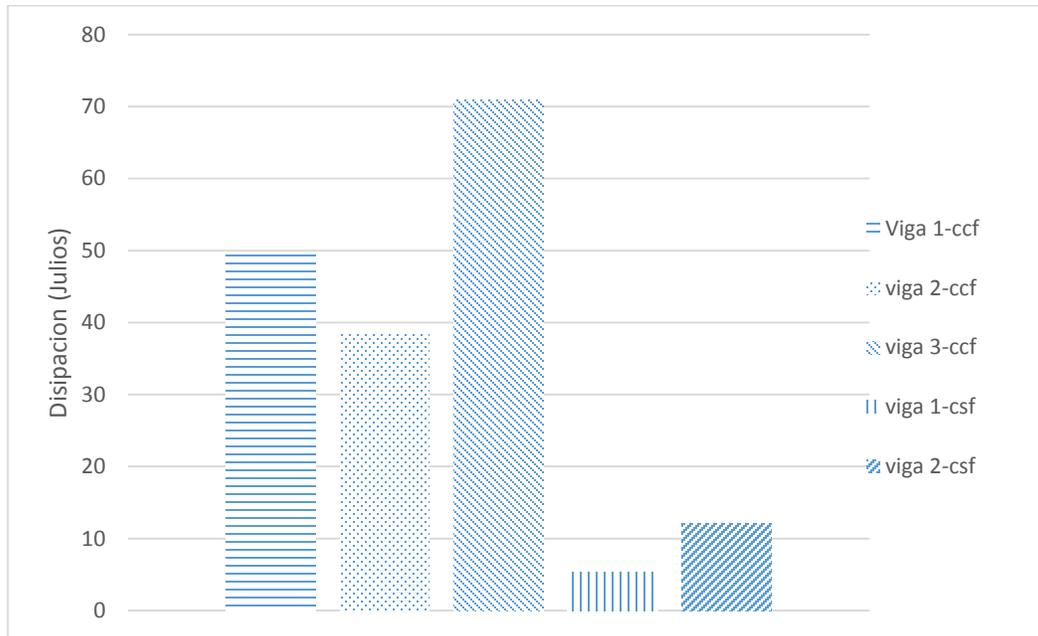


Figura 46. Índice de disipación en vigas.

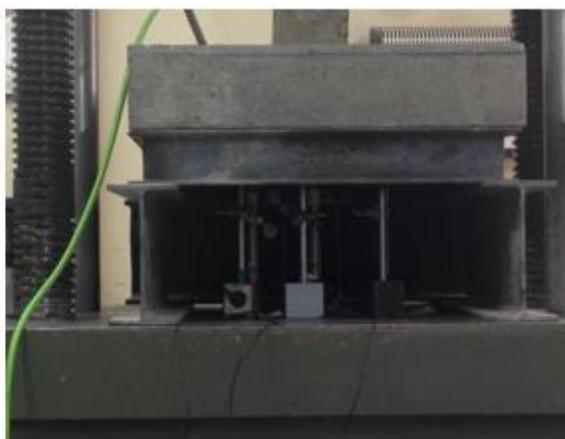
5.2 PUNZONAMIENTO

5.2.1 Descripción de los ensayos

Antes de realizar el análisis de los datos y gráficos correspondientes a los resultados obtenidos en los ensayos de punzonamiento, conviene mostrar algunas imágenes que ilustran el montaje experimental usado para fallar todas las losas y realizar la respectiva recopilación de datos. Dicho montaje fue realizado según lo descrito en el numeral 3.2.1 (Ensayo de punzonamiento para concretos con fibra de acero). Estas imágenes se muestran en la Figura 47.



Sistema de adquisición de datos



transductor de desplazamiento



Figura 47. Montaje final.

En la Figura 47 se pueden observar con claridad los instrumentos más importantes que fueron empleados para el ensayo de punzonamiento así como el montaje experimental finalizado y listo para ser ensayado.

5.2.2 Resultados obtenidos

5.2.2.1 Cálculo de la disipación de energía

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los 4 sistemas losa columna por separado, y posteriormente se compararan los resultados obtenidos.

- ✓ Sistema “losa-columna” # 1 (Con fibras):

El primer ensayo corresponde al elaborado el día 12 de abril de 2015, y ensayado el día 10 de mayo de 2015. Cabe resaltar que los ensayos tenían como criterio base llegar a una deformación máxima de 2.5 cm. Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 48.

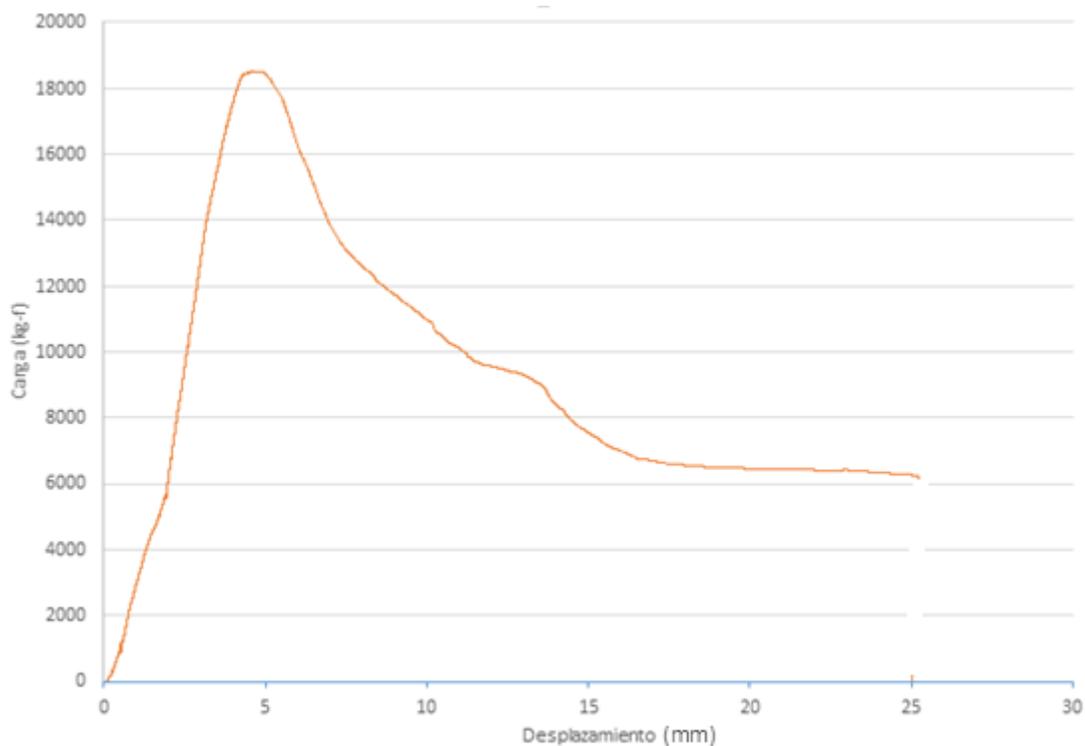


Figura 48. Gráfica carga vs desplazamiento sistema # 1.

En la Figura 48 se observa que para la primera losa la carga máxima con la cual falla el sistema es de 18536 kg-f con una capacidad de disipación de energía de hasta 2268 J. Cabe

resaltar que la disipación de energía se obtiene al determinar el área bajo la curva del gráfico carga vs deformación y está dada en Joules.

Por otra parte, es notorio como la fibra no solo intenta mantener la carga máxima constante por un periodo de tiempo, sino que también hace que la disminución de ésta no se de manera abrupta conforme se va deformando el sistema.

A continuación en la Figura 49 se muestra la falla por punzonamiento del primer sistema, en donde se puede observar claramente que tanto la superficie como los planos de corte corresponden a una falla debida a esfuerzos punzonantes.

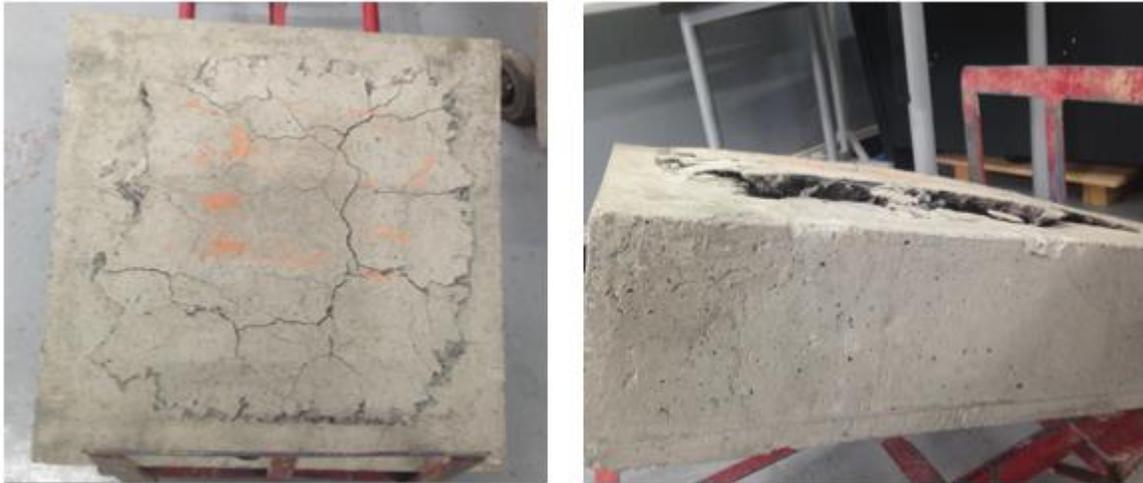


Figura 49. Falla por punzonamiento sistema # 1.

✓ Sistema “losa-columna” # 2 (Con fibras):

El segundo ensayo corresponde al elaborado el día 18 de abril de 2015 y ensayado el día 16 de mayo de 2015. Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 50.

En la Figura 50 se observa que la carga máxima con la cual falla el segundo sistema es de 18252 kgf con una capacidad de disipación de energía de hasta 2409 J. Adicionalmente se observa que la disminución de la carga no se da de manera abrupta debido a las fibras.

En la Figura 51 se muestra la falla por punzonamiento del segundo sistema:

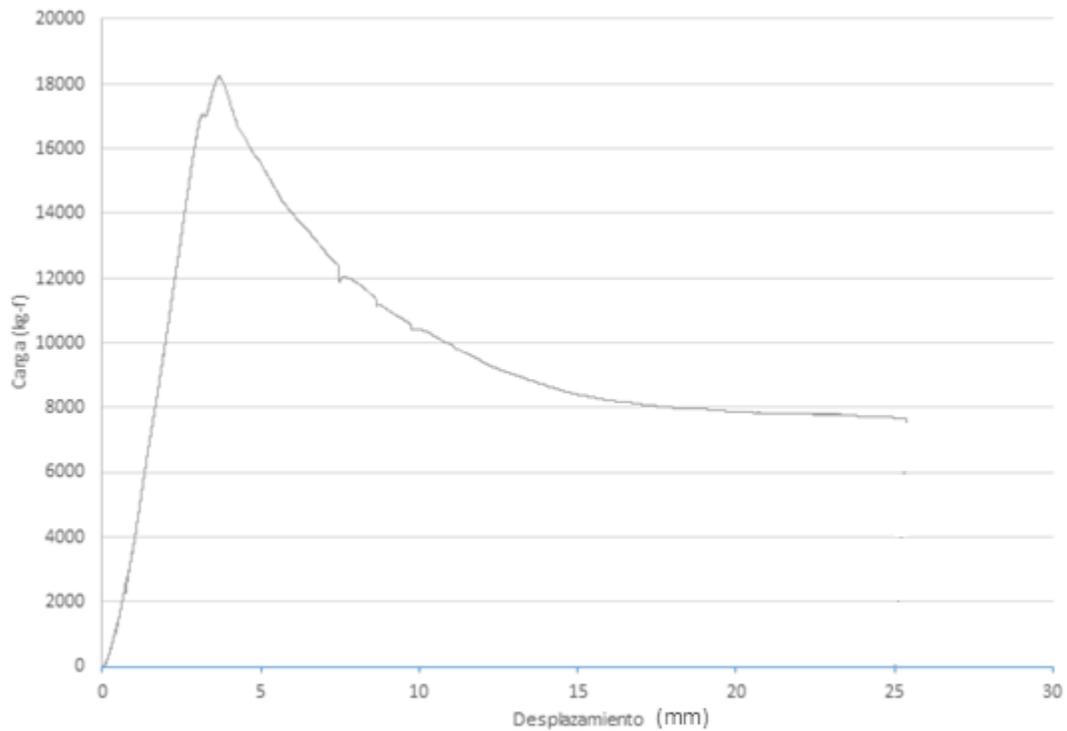


Figura 50. Gráfica carga vs desplazamiento sistema # 2.

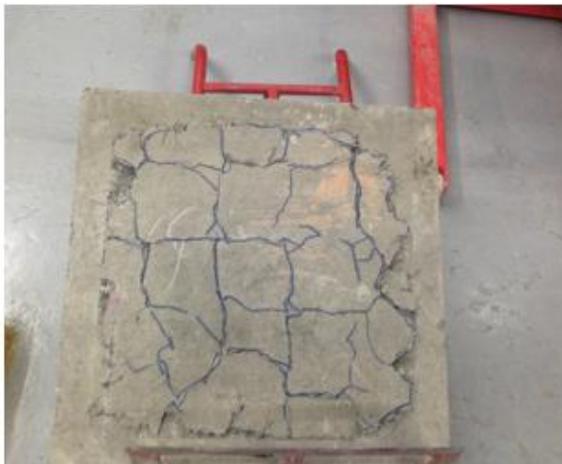


Figura 51. Falla por punzonamiento del sistema.

- ✓ Sistema “losa-columna” # 3 (Con fibras):

El tercer ensayo losa columna corresponde al elaborado el día 24 de abril de 2015 y ensayado del día 22 de mayo de 2015. Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 52.

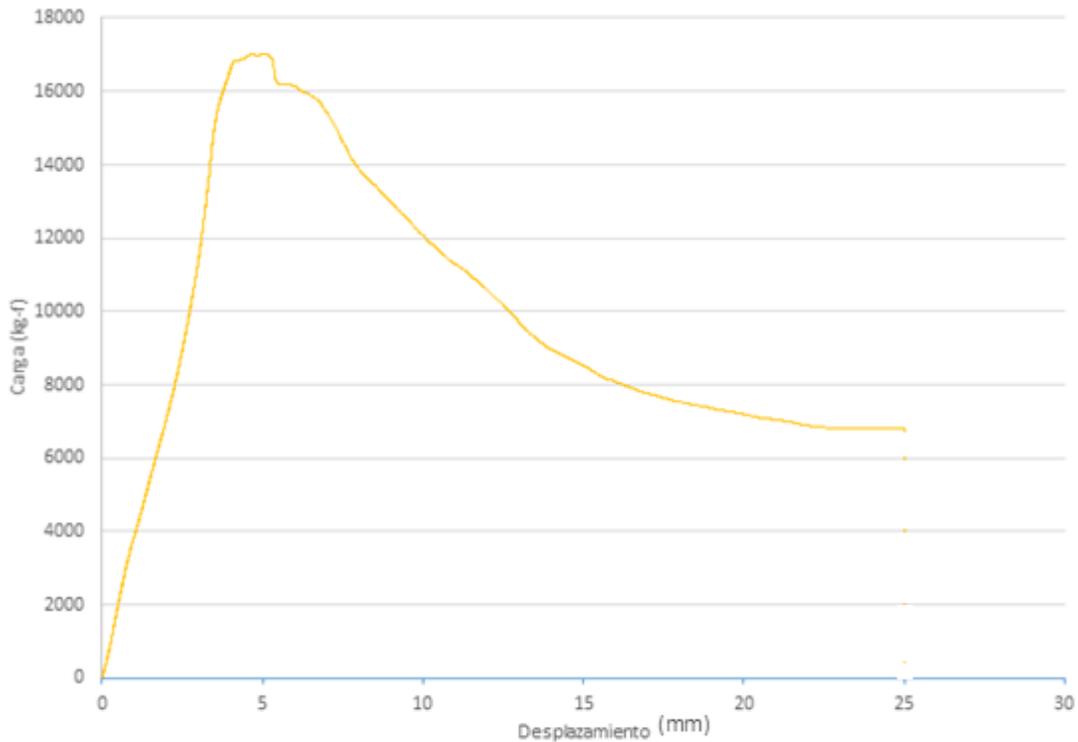


Figura 52. Gráfica carga vs desplazamiento sistema # 3.

En la Figura 52 se observa que para la tercera losa la carga máxima con la cual falla el sistema es de 17550 kgf con una capacidad de disipación de energía de hasta 2400 J. Adicionalmente se observa (al igual que en los dos sistemas anteriores) que la disminución de la carga no se da de manera abrupta.

En cuanto a la falla del tercer sistema se propuso que una vez se alcanzaran los 2.5 cm de deformación para la elaboración del gráfico, se retiraran los LVDT y se aplicara una carga tal, que deformara por completo el sistema con el fin de evidenciar claramente la superficie y planos de falla en la losa como se observa en la Figura 53.



Figura 53. Falla por punzonamiento sistema #3.

✓ Sistema “losa-columna” # 4 (Sin fibras):

El cuarto sistema losa columna corresponde al elaborado el día 27 de abril de 2015 y ensayado el día 25 de mayo de 2015. Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 54.

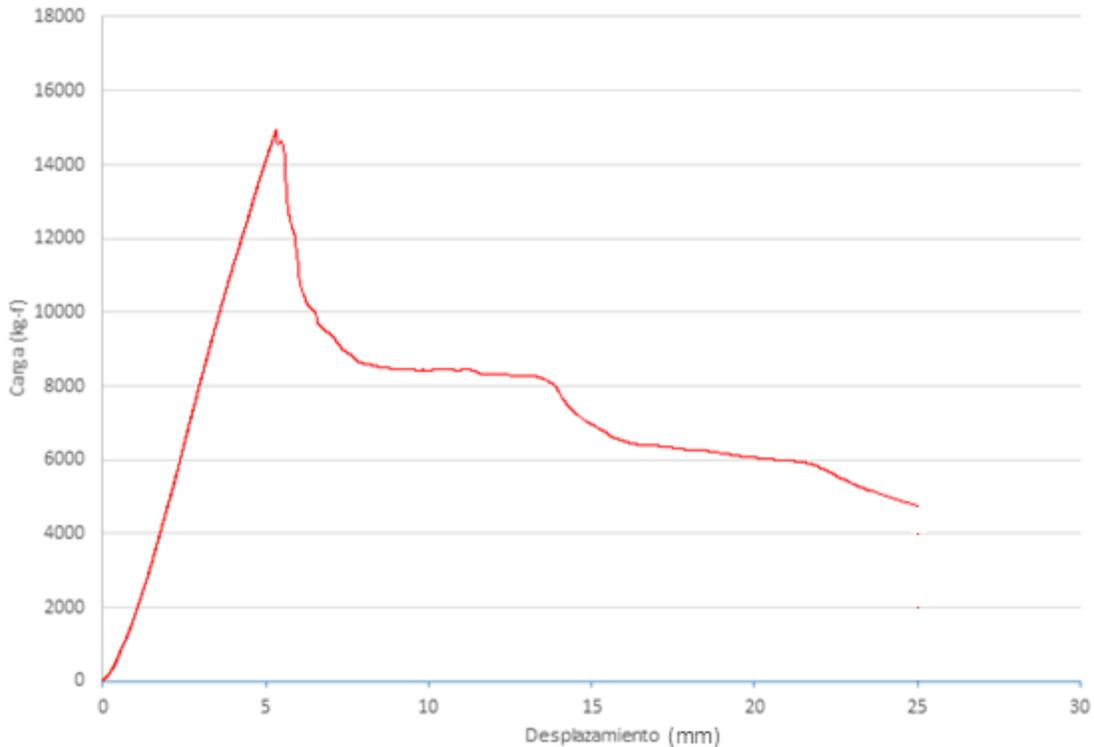


Figura 54. Gráfica carga vs desplazamiento sistema # 4 (sin fibra)

En la Figura 54 se observa que para la cuarta losa la carga máxima con la cual falla el sistema es de 14687 kgf con una capacidad de disipación de energía de hasta 1760 J. Adicionalmente se puede ver que una vez se alcanza la carga máxima que puede soportar el sistema, la gráfica cae de manera abrupta con relación a las gráficas de los sistemas con fibra lo que indica una baja capacidad ductil antes de la falla y por ende una baja capacidad de disipar energía del sistema.

En la Figura 55 se muestra la falla a punzonamiento del quinto y último sistema:



Figura 55. Falla por punzonamiento sistema # 4

En la Figura 55 podemos observar no solo la falla a punzonamiento del sistema sino también la baja cohesión que tiene un concreto elaborado sin fibras de acero frente a estos esfuerzos, por lo que se hace evidente que las fibras no solo mejoraron el comportamiento a corte del concreto sino que proporcionan una gran cohesión en el mismo.

Según las ecuaciones de la NSR-10, la carga máxima resistente por un sistema losa columna en concreto convencional sin refuerzo a punzonamiento es de 13900 kg como se observa en la Tabla 15. La cual refleja un valor muy cercano al obtenido en el laboratorio por la losa 4 sin adición de fibras el cual fue de 14600 kg.

Tabla 15 Carga resistente según NSR-10

Ecuación	V Max (kg-f)
1.2	21400
1.3	22500
1.4	13900
Mínima	13900

En la Tabla 15 y Figura 56 se muestra un resumen de resultados con el fin de realizar la comparación y correspondiente análisis de los datos.

Tabla 15. Resumen de los datos obtenidos

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%	-

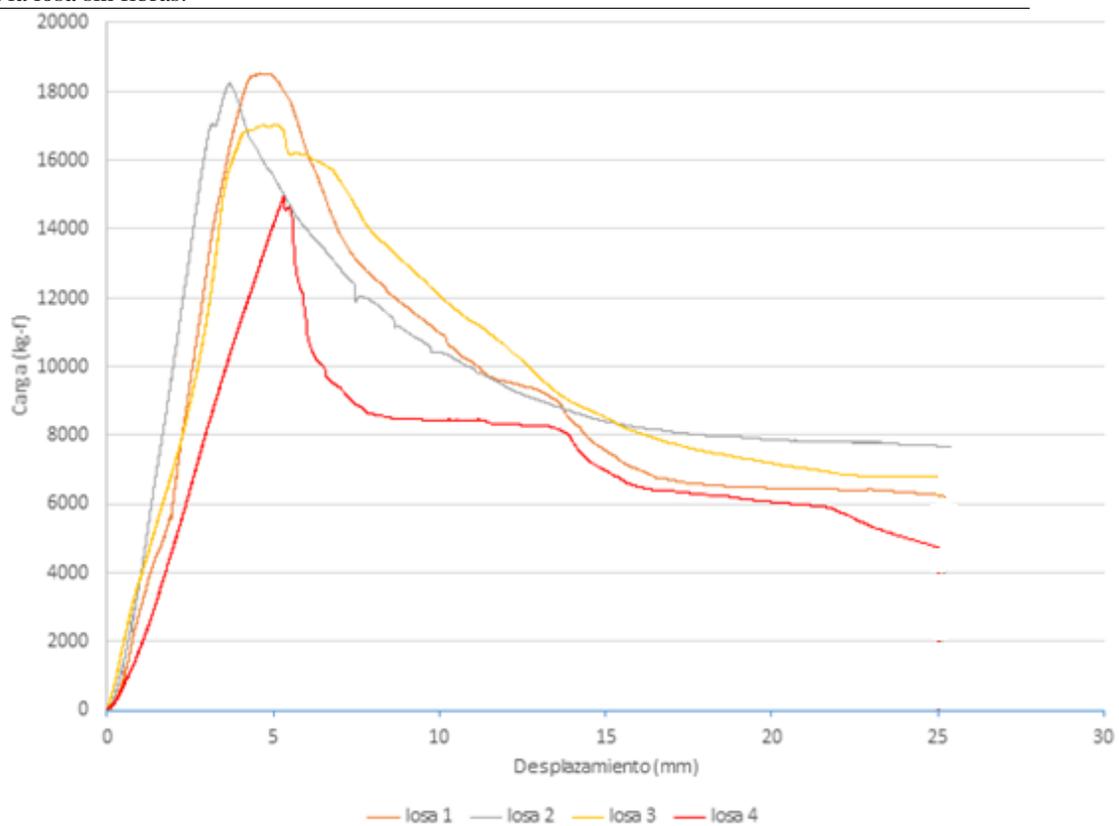


Figura 56. Resumen de disipación de energía.

Según los resultados anteriormente expuestos, es posible evidenciar no solo que los primeros tres sistemas 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.

Por otra parte, conviene resaltar que los resultados encontrados con respecto a la carga máxima alcanzada por los sistemas con fibra, son un 15% inferior a los encontrados por el autor Nguyen-Minh. Esta discrepancia puede deberse a la gran diferencia en la cuantía de acero empleada para soportar los esfuerzos de tracción en el concreto, dicho autor empleo una cuantía del orden de la mitad empleada en el presente trabajo de grado. En cuanto a los resultados de la disipación de energía de los sistemas, no fue posible realizar comparación alguna dado que en la bibliografía consultada ninguno de los autores realizó dicho cálculo.

5.2.2.2 Cálculo de esfuerzos de punzonamiento

Para evaluar el esfuerzo a punzonamiento se tomó como supuesto que la falla se presenta en una superficie tronco piramidal con un ángulo de 45°. Reflejando una falla ideal por esfuerzo punzante mostrada en la Figura 57, el área en donde se presenta el punzonamiento se da en 4 trapezios iguales de 325 mm en su base mayor, 125 mm en su base menor y 173,2 mm en su altura como se muestra en la Figura 53, el área total es de 155880 mm².

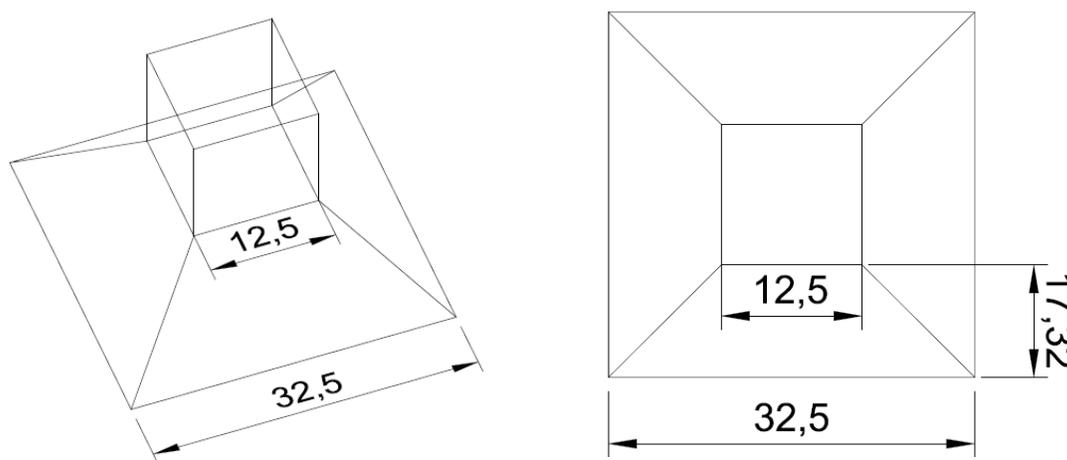


Figura 57. Área de punzonamiento

Conociendo que la falla se presenta por esfuerzo de corte se puede decir que el esfuerzo máximo resistente a punzonamiento es P_{max}/A_p , siendo P_{max} la carga axial máxima que resiste el sistema, y A_p el área total de punzonamiento. En la Tabla 16 se presentan los esfuerzos de punzonamiento para los sistemas con y sin fibra. Se puede ver un incremento máximo de esfuerzo a punzonamiento del 24% para sistemas con fibra. Aunque se pueda ver

un incremento importante en el esfuerzo resistente, el aporte más significativo de la fibra se presenta en el incremento de la capacidad de disipación de energía del sistema.

Tabla 16. Esfuerzo de punzonamiento máximo del sistema con y sin fibra.

ID	Área (mm ²) punzonamiento	Pmax (kg-f)	Esfuerzo punzonamiento (MPa)	Modo de falla	Incremento (%)
Losa 1	155880	18536,0	1,17	Punzonamiento	24,01
Losa 2	155880	18252,0	1,15	Punzonamiento	22,11
Losa 3	155880	17020,0	1,07	Punzonamiento	13,87
Losa 4	155880	14947,0	0,94	Punzonamiento	-

5.3 Análisis de costos

Se analizará el costo por mega pascal de resistencia al corte para los dos diseños de mezcla con y sin fibra. En la Tabla 17 se presenta el costo por metro cubico de los dos diseños de mezcla.

Tabla 17. Costo de concreto.

Material	kg/m ³	Costo COP/kg	Costo COP/m ³	Material	kg/m ³	Costo COP/kg	Costo COP/m ³
Agua	216,95	5	1.085	Agua	216,95	5	1.085
Cemento	358,33	560	200.665	Cemento	358,33	560	200.665
Grava	1062,54	22	23.376	Grava	1062,54	22	23.376
Arena	580,79	18	10.454	Arena	580,79	18	10.454
Fibra	60	6.600	396.000	Fibra	0		
Glenium 355	0,64	6.250	4.000	Glenium 355	0		
Total			635.580	Total			235.580
(a) Concreto con fibra				(b) Concreto sin fibra			

En la Tabla 18 se encuentra el costo del concreto por mega pascal de resistencia al corte si bien podemos ver que el costo por mega pascal es mal alto en el concreto con fibras de acero, para obtener la misma resistencia con un concreto convencional se necesitaría casi el doble de concreto generando más peso para una estructura.

Tabla 18. Costo de concreto por MPa a corte.

ID	Cuantía KG/m3	τ (MPa)	Volumen m3	Concreto COP/m3	viga COP	COP/MPa
Viga 1-csf	0	3,1	0,0035	235.580	825	266
Viga 2-csf	0	2,9	0,0035	235.580	825	284
Viga 1-ccf	60	5,6	0,0035	635.580	2.225	397
Viga 2-ccf	60	5,1	0,0035	635.580	2.225	436
Viga 3-ccf	60	5,4	0,0035	635.580	2.225	412

Esta comparación de costos solo refleja el costo del concreto como material únicamente y no refleja una relación directa con el sistema estructural losa columna, para hacer una comparación de costos directa se debería hacer un sistema a punzonamiento con capiteles que refleje el mismo comportamiento de un sistema con fibras de acero. Teniendo en cuenta los costos de formaleta para capiteles, mano de obra y concreto.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En el desarrollo del presente trabajo de grado se realizó un diseño de un modelo experimental, en donde se buscaba generar la falla por punzonamiento del sistema losa columna. De dicho diseño se puede concluir que:

- ✓ Con las dimensiones implementadas para el sistema losa columna, tanto para la losa como para la columna y con el montaje experimental realizado fue posible generar una falla por punzonamiento en el sistema.
- ✓ La cuantía de acero considera en el diseño probablemente comparando con otros autores pudo llegar a ser excesiva y de alguna forma minimizar aunque en poco el efecto que tiene la fibra en cuanto a la ganancia de resistencia última del sistema.
- ✓ A pesar de la gran cantidad de fibras incorporadas al concreto fue posible obtener una adecuada manejabilidad en el mismo.

Para evaluar la capacidad de disipación de energía del sistema losa columna en concreto reforzado con fibra acero, se realizó una caracterización del concreto frente a esfuerzos de corte en vigas y un ensayo frente a esfuerzos de punzonamiento para el sistema losa columna. De dicho programa experimental se puede concluir que.

- ✓ Los resultados de los ensayos muestran los efectos producidos por las fibras de acero Dramix 5D frente a esfuerzos de corte. La resistencia a corte máxima tuvo un incremento de 80,6 % respecto al concreto sin fibra.
- ✓ La falla a corte en las vigas con fibras no presenta una falla frágil ni desprendimientos de grandes bloques de sección frente a estas sollicitaciones.
- ✓ Después de evaluar índices de ductilidad en las vigas sometidas a esfuerzos de corte, es posible valorar el efecto de las fibras Dramix 5D con los cuales se podrían obtener incrementos con un orden de magnitud de 4 a 7 veces mayores que en concretos convencionales.
- ✓ La capacidad de disipación de energía frente a esfuerzos de corte se ve incrementada al menos 3 veces por la presencia de las fibras, lo que se podría traducir en un efecto positivo frente a sollicitaciones de punzonamiento debido a la naturaleza de dicha sollicitud.
- ✓ La presencia de fibras en la matriz del concreto refleja una clara contribución en la etapa de post-Figuración del concreto, permitiéndole mayores desplazamientos a la matriz y presentando una buena adherencia de la fibra debido a los ganchos consecutivos siendo esta una característica importante de las fibras Dramix 5D
- ✓ Siendo una característica a destacar la adherencia superior que presentan las fibras 5D frente a las otras fibras de acero 3D o 4D es importante resaltar que las fibras fallaron por los esfuerzos a corte y no por deslizamiento de las mismas.
- ✓ La fibra no solo intenta mantener la carga máxima constante por un periodo de tiempo, sino que también hace que la disminución de esta no se de manera abrupta conforme se va deformando el sistema.
- ✓ Al fallar los sistemas con fibras de acero se hizo evidente el gran aporte que tuvieron las fibras en el concreto, dándole una gran ductilidad a la falla y por ende una gran disipación de energía al sistema.

- ✓ Los sistemas con fibra tuvieron un aumento de hasta 37% en su capacidad de disipación de energía.
- ✓ Los sistemas con fibra tuvieron un aumento de hasta 26% en la carga máxima alcanzada por el mismo
- ✓ La configuración de las fibras en el concreto generaran siempre un grado de incertidumbre en los resultados de los ensayos.
- ✓ Los sistemas con fibra presentaron un incremento del 24% en su resistencia ante esfuerzos de punzonamiento.
- ✓ El valor de carga máxima resistente ante esfuerzos de punzonamiento teórico determinado por las ecuaciones de la NSR 10 corresponde al determinado de manera experimental en el presente documento.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

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

Altun, Haktanir, Kamura, “Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams”, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (3), 2007, pp. 654-661.

ASTM C 33. Especificación Normalizada para Agregados para Concreto, 2011

ASTM C 496. Standard test method for split tensile strength of cylindrical concrete specimens. Annual book of ASTM standards; 2011

BEKAERT, Declaración de prestaciones CE DRAMIX 5D 65/60BG. 2013

Bernat, Ortega, Pérez y García, 2002 *recomendaciones para el proyecto y construcción de placas macizas de hormigón “in situ” para forjados*, Cataluña España, Universidad Politécnica de Cataluña.

Bolivar, *Dosificación de mezclas de hormigón Métodos ACI 211.1*, Weymouth, Fuller, bolomey, faury, Medellín, Colombia 2006. Universidad nacional de Colombia.

Carmona y Cabrera, “Comportamiento al corte de hormigones reforzado con fibras de acero”, *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol.24 (1), 2009, pp 74-94.

CEMEX COLOMBIA, cemento súper resistente, disponible en: <http://www.cemexcolombia.com/SolucionesConstructor/files/SuperResistente.pdf>, recuperado: 15 de Abril de 2015

EFNARC, “ESPECIFICACIÓN EUROPEA PARA HORMIGÓN PROYECTADO”, 2002.

Gouveia, Fernandes, Duarte. Faria, Ramos y Lucio. “Sfrc flat slabs punching behaviour- Experimental research” *Composites: part B*, vol. 63, 2014, pp 161-171.

Grimaldi, Meda, Rinaldi. “Experimental behaviour of fibre reinforced concrete bridge decks subjected to punching shear”, *Composites Part B: Engineering*, vol 45 (1) , 2013, pp 811-820.

Guzmán. “Nuevas tendencias en la especificacion y diseño de mezclas de concreto. memorias: x reunión del concreto”. cartagena (colombia). 2004.

Harajli, Maalouf y Khatib, Effect of Fibers on the Punching Shear Strength of Slab-Column Connections, *Cement and Concrete Composites*, vol. 17 (2) 1995, pp 161-180.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, INVIAS I.N.V. E – 213 – 07, I.N.V. E – 217 – 07, I.N.V. E – 222 – 07, I.N.V. E – 223 – 07.

Japan Society of Civil Engineers. JSCE SF-6, “Method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete”, 1990.

Master builders solution. MasterGlenium 330, disponible en: <http://www.master-builders-solutions.basf.cl/es-cl/products/masterglenium/2341>, recuperado: 15 de Abril de 2015

Mirsayah y Banthia, “Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete”, Material Journal”, Vol. 99 (5), 2002, pp 473 – 479.

Neville. Tecnología del concreto tomo I y II. México: instituto mexicano del cemento y del concreto. 1980

Nguyen-Minh y Rovňák, “Punching Shear Resistance of Interior GFRP Reinforced Slab-Column Connections”, Journal of Composites for Construction, vol. 17 (1), 2013, pp 2-13.

Nguyen-Minh, Rovňák, Tran-Quoc, Nguyen-Minhkim “Punching Shear Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete Flat Slabs”, Procedia Engineering, vol. 14, 2011, pp 1830-1837.

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

NV Bekaert SA, 2012. Reforzando el futuro. Brochure Dramix 5D 4D 3D, disponible en: <http://www.bekaert.com/es-MX/productos/construccion/refuerzo-de-hormigon/fibras-de-acero-dramix-5d-para-refuerzo-de-hormigon> recuperado: 10 de Abril de 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.