

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE DIAFRAGMAS PREFABRICADOS

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA – ESTRUCTURAS

ESTUDIANTE:

ING. SEBASTIÁN OCAMPO ECHAVARRÍA

DIRIGIDA POR:

JOHN JAIRO BLANDÓN VALENCIA I.C. PHD

AGRADECIMIENTOS

El presente documento fue realizado gracias a la investigación llevada a cabo en el CENAPRED y patrocinada por la Asociación Nacional de Industriales de Vigüeta Pretensada-ANIVIP.

Agradecimientos al ingeniero Daniel Padilla, por crear el puente y gestionar la consecución de la información derivada de la investigación.

Agradecimientos al profesor John J. Blandón V. por su aportes y la ayuda en la revisión y mejora del presente trabajo.

A mi esposa y mi hijo, por su amor, apoyo, y por animarme a seguir en mi desarrollo académico.

TITULO: Análisis del comportamiento dinámico de diafragmas prefabricados

RESUMEN: Pese al crecimiento en la implementación de los diafragmas prefabricados, no hay un procedimiento de diseño claro y adoptado por la norma colombiana de estos elementos. Esto crea la necesidad de plantear criterios adecuados de análisis y reforzamiento, por lo cual se presenta la siguiente investigación, con el ánimo de perfeccionar los procedimientos mencionados. Para ello se consideraron, entre otros, criterios del estado del arte, normativas de otros países, y los ensayos realizados sobre pisos prefabricados con vigueta y bovedilla, cargados horizontalmente mediante gatos hidráulicos en el laboratorio CENAPRED en las instalaciones de la Universidad Autónoma de México. A partir del análisis de la información y resultados del comportamiento estructural de los sistemas ante cargas en su plano, se presenta una propuesta de metodología de diseño para diafragmas de concreto prefabricado que cumplan los requerimientos y los criterios de la normatividad vigente NSR-10, además, de comparar la rigidez de un diafragma de losa maciza y un diafragma prefabricado ante cargas laterales, y el comportamiento de las deformaciones internas y externas.

PALABRAS CLAVES: Diafragma prefabricado, sistemas de piso, ciclo histerético, momento-curvatura, rigidez, deformación, degradación.

TITLE: ANALYSIS OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF PREFABRICATED DIAPHRAGMS

ABSTRACT: Despite the growth in the implementation of prefabricated diaphragms, there is no clear design procedure adopted by the Colombian standard for these elements. This creates the need to propose adequate criteria for analysis and reinforcement, for which the following research is presented, with the aim of perfecting the aforementioned procedures. For this, state-of-the-art criteria, regulations from other countries, and tests carried out on prefabricated floors with joist and vault, horizontally loaded by hydraulic jacks, were considered in the CENAPRED laboratory at the facilities of the Autonomous University of Mexico. Based on the analysis of the information and results of the structural behavior of the systems in the face of loads in their plane, a design methodology proposal for precast concrete diaphragms that meet the requirements and criteria of the current NSR-10 regulations is presented, in addition to compare the stiffness of a solid slab diaphragm and a precast diaphragm under lateral loads, and the behavior of internal and external deformations.

KEY WORDS: Precast diaphragm, floor systems, hysterical cycle, moment-bending, stiffness, deformation, degradation.

I. CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. ALCANCES	14
1.2. OBJETIVOS	14
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	14
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3. LIMITACIONES	14
2. CONSIDERACIÓN DEL DIAFRAGMA DE PISO PREFABRICADOS	14
2.1. ANTECEDENTES.....	16
2.2. NORMATIVIDAD LOCAL	17
2.2.1. FUERZAS DE DISEÑO SÍSMICO	17
2.2.2. CRITERIOS DE DISEÑO PARA CONCRETO PREFABRICADO	19
2.3. METODOLOGÍAS USADAS PARA EL DISEÑO DE DIAFRAGMAS DE PISO	19
2.4. ANTECEDENTES DE GUÍAS DE DISEÑO SÍSMICO DE DIAFRAGMAS DE CONCRETO PREFABRICADO.....	21
2.4.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIONES Y CRITERIOS DE DISEÑO	22
2.4.2. TIPOLOGÍAS DE DIAFRAGMAS	22
2.4.3. CONEXIONES DE LAS JUNTAS DE ELEMENTOS DE DIAFRAGMA PREFABRICADO	23
2.4.4. TIPOS DE TRASLAPO DE REFUERZO, PARA DIAFRAGMAS PREFABRICADOS	25
2.4.5. LOSETA SUPERIOR DE DIAFRAGMAS PREFABRICADOS.....	27
3. INFORMACIÓN DE LOS ENSAYOS	28
3.1. DESARROLLO DE ENSAYOS	28
3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE ENSAYO	28
3.1.3. INSTRUMENTACIÓN DE ENSAYOS	32
3.4.3.1. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE	32
3.4.4. HISTORIA DE CARGA DE LA PRUEBA A FLEXIÓN-CORTANTE	43
3.4.5. RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTO	44

4.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	46
4.1.	CICLOS HISTERÉTICOS DE LOS MODELOS.....	46
4.1.1.	RESULTADOS TRANSDUCTOR 24.....	46
4.1.2.	RESULTADOS TRANSDUCTOR 3.....	48
4.1.3.	RESULTADOS TRANSDUCTOR 8.....	52
4.1.4.	RESULTADOS TRANSDUCTOR 11.....	54
4.1.5.	RESULTADOS TRANSDUCTOR 17.....	58
4.1.6.	RESULTADOS TRANSDUCTOR 18.....	59
4.1.7.	RESULTADOS TRANSDUCTOR 19.....	61
4.2.	RESULTADOS DE AGRIETAMIENTO DE LOS MODELOS.....	62
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	67
5.1.	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO EN EL RANGO ELÁSTICO Y ENVOLVENTE.....	67
5.2.	ANÁLISIS DE MOMENTOS CURVATURA DERIVADOS DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES DE LOS ENSAYOS.....	71
5.2.1.	DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA DERIVADO DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES EN EL MODELO DIAFRAGMA 1.....	71
5.2.2.	DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA DERIVADO DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES EN EL MODELO DIAFRAGMA 2.....	72
5.2.3.	DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA DERIVADO DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES EN EL MODELO DIAFRAGMA 3.....	73
5.2.4.	ANÁLISIS DE CURVATURA DERIVADA DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES ENTRE MODELOS DE DIAFRAGMA.....	73
5.3.	ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN CON SOFTWARE DE ANÁLISIS DE SECCIONES RESPONSE.....	74
5.4.	ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ EN EL PLANO DEL DIAFRAGMA.....	78
5.4.1.	DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ TEÓRICA RESPECTO DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ EXPERIMENTAL.....	79
5.4.2.	ANÁLISIS DEFORMACIÓN DE LOS VALORES DERIVADOS DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES POR CORTANTE Y POR FLEXIÓN.....	83

5.4.3. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN TEÓRICA RESPECTO LA DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN DERIVADA DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES

87

5.5.	ANÁLISIS MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	91
5.5.1.	CONSIDERACIONES PARA LA MODELACIÓN EN ELEMENTOS FINITOS EN EL RANGO ELASTICO	92
5.5.2.	ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTO ENTRE MODELO DE ELEMENTOS FINITOS Y VALORES DERIVADOS DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES	94
5.5.3.	ESFUERZOS ASOCIADOS EN EL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	97
5.5.4.	MODELO DE PUNTAL Y TIRANTE	98
5.6.	METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA DIAFRAGMAS PREFABRICADOS.....	100
5.6.1.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA A ANALIZAR	101
5.6.2.	ANÁLISIS DE CARGAS DE DISEÑO.....	102
5.6.3.	ALTURA DE DIAFRAGMA.....	103
5.6.4.	ESPESOR DE LA LOSETA SUPERIOR.....	104
5.6.5.	ALTURA DEL PERFIL DE VIGUETA	104
5.6.6.	CONEXIONES Y APOYO.....	106
5.6.7.	REFORZAMIENTO DE LOSETA.....	107
5.6.8.	ANÁLISIS POR CARGAS LATERALES DE LOS DIAFRAGMAS.....	108
5.6.9.	ANÁLISIS POR CARGAS LATERALES DE LOS DIAFRAGMAS.....	111
5.6.10.	DISEÑO DE ELEMENTOS POR EL MÉTODO DE PUNTAL-TIRANTE APÉNDICE C-A NSR-10.	113
5.6.10.1.	CAPACIDAD DE PUNTAL	114
5.6.10.2.	CAPACIDAD DE TIRANTE	115
5.7.	RECOMENDACIONES.....	116
5.7.1.	ENSAYOS DADOS BAJO CONDICIONES LOCALES	116
5.7.2.	COMPORTAMIENTO DE LAS DEFORMACIONES DE CORTANTE Y FLEXION	116
6.	CONCLUSIONES.....	117

I. ANEXO I: CALCULO DE DEFORMACIONES Y CURVATURA EXPERIMENTALES POR CORTANTE Y FLEXION	119
6.1. DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA EXPERIMENTAL MODELO 1	122
6.2. DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA EXPERIMENTAL MODELO 2	124
6.3. DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA EXPERIMENTAL MODELO 3	125
7. ANEXO II. TEORIA DE RIGIDEZ ASOCIADA AL PANEL DE DIAFRAGMA	126
8. ANEXO III: TRANSFORMACION DE LA VIGUETA	129
8.1.1. OBTENCIÓN DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD	129
8.1.2. OBTENCIÓN DE LOS MÓDULOS DE RIGIDEZ A CORTE	131
BIBLIOGRAFÍA	134

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Formulas extraída de ASCE 7-16.....	18
Ecuación 2: Rigidez asociada al diafragma de piso.....	77
Ecuación 3: Deformación de una sección.....	83
Ecuación 4: Desplazamiento relativo de cortante.....	120
Ecuación 5: Ecuación curvatura de la sección.....	122
Ecuación 6: Rigidez asociada al diafragma de piso.....	126
Ecuación 7: Método de la carga unitaria para el cálculo de desplazamientos en un muro empotrados en voladizo. (Caori Patricia Takeuchi Tam, 2013).....	127
Ecuación 8: Método de la carga unitaria para el cálculo de desplazamientos en un muro empotrados en voladizo y momento variable(Caori Patricia Takeuchi Tam, 2013).....	128

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tipologías de sistemas de piso. (Rodriguez et al., 2013).....	16
Figura 2: Coeficientes distribución de aceleraciones en los diafragmas según ASCE/SEI 7-16.	18
Figura 3: Diafragma flexible.(ANIVIP, 2012)	20
Figura 4: Método del puntal y tirante(ANIVIP, 2012)	21
Figura 5: Tipologías típicas de diafragmas prefabricados .(Cleland et al., 2017).	23
Figura 6: Conexión de junta continua con loseta de superior de concreto.	24
Figura 7: Conexión de junta con pasador mecánico.	25
Figura 8: Junta de diafragma con loseta superior reforzada continua en la junta.(ACI Committee 550, 2015)	26
Figura 9: Conectores mecánicos y soldados(ACI Committee 550, 2015).	27
Figura 10: Configuración geométrica de los modelos de vigueta y bovedilla y losa maciza con sección típica.(Giulio A. León Flores, Oscar López Batiz, 2008)	30
Figura 11: Vaciado de concreto con modelo de vigueta y bovedilla en concreto.(ANIVIP, 2012) – información suministrada por el laboratorio).	32
Figura 12: Corte longitudinal de los modelos pruebas flexión-cortante.....	33
Figura 13: Esquema y medidas de la colocación de espárragos en los modelos.	34
Figura 14: Dispositivo de aplicación de carga lateral.....	35
Figura 15: Esquema de carga de modelos.	36
Figura 16: Aplicación de carga vertical a los modelos.	36
Figura 17: Aplicación de carga lateral a los modelos.....	37
Figura 18: Prueba flexión-cortante. Representación esquemática del aparato de carga y dispositivo de instrumentación.	38
Figura 19: Esquema de tubos para colocar instrumentación.	39
Figura 20: Colocación de la instrumentación sobre tubos de acero.	39
Figura 21: Esquema de ángulos de aluminio para colocar instrumentación.	40
Figura 22: Vista lateral de colocación de instrumentación.....	41
Figura 23: Esquema y fotografía de colocación de instrumentación y equipos de aplicación de carga.....	42

Figura 24: Historia de carga modelo 1, modelo 2 y modelo 3.	44
Figura 25: Desplazamiento asociado a cada ciclo de carga del modelo 1, modelo 2 y modelo 3.	46
<i>Figura 26: Ubicación transductor 24.</i>	47
Figura 27: Ciclo histórico asociado al transductor 24 de los modelos.	48
Figura 28: Ubicación transductor 3.	48
Figura 29: Ciclo histórico asociado al transductor 3 de los modelos.	49
Figura 30: Ciclo histerético modelo 1 asociado al transductor 3.	50
Figura 31: Ciclo histerético modelo 2 asociado al transductor 3.	50
Figura 32: Ciclo histerético modelo 3 asociado al transductor 3.	51
Figura 33: Comparativos agrietamiento inicial asociado al transductor 3	52
Figura 34: Ubicación transductor 8.	53
Figura 35: Ciclo histórico asociado a transductor 8 de los modelos.	53
Figura 36: Ubicación transductor 11.	54
Figura 37: Ciclo histórico agrietamiento asociado a transductor 11 de los modelos.....	55
Figura 38: Ciclo histerético modelo 1 asociado al transductor 11.	55
Figura 39: Ciclo histerético modelo 2 asociado al transductor 11.	56
Figura 40: Ciclo histerético modelo 3 asociado al transductor 11.	57
Figura 41: Comparativos agrietamiento inicial asociado al transductor 11.	58
Figura 42: Ubicación transductor 17.	58
Figura 43: Ciclo histórico agrietamiento asociado a transductor 17 de los modelos	59
Figura 44: Ubicación transductor 18.	60
Figura 45: Ciclo histórico agrietamiento asociado a transductor 18 de los modelo.	60
Figura 46: Ubicación transductor 19.	61
Figura 47: Ciclo histórico agrietamiento asociado a transductor 19 de los modelos.....	62
Figura 48: Agrietamiento final de los modelos.	63
Figura 49: Elongación final de transductores 3, 8, 11, 17,18,19,20 y agrietamiento final de los modelos ensayados.(continuación).....	65
Figura 50: Degradación de la rigidez de los de modelo 1,2 y 3.....	66
Figura 51: Agrietamiento en losetas superiores y bovedillas.	67
Figura 52: Ciclo histerético de modelo 1, modelo 2 y modelo 3.	68
Figura 53: Envoltorio de Ciclo Histerético - puntos de fluencia.	69
Figura 54: Deformación y agrietamiento en fluencia de modelos de diafragmas.	70
Figura 55: Momento curvatura modelo 1.	72
Figura 56: Momento curvatura modelo 2.	72
Figura 57: Momento curvatura modelo 3.	73
Figura 58: análisis de curvatura entre modelo 1, modelo 2 y modelo 3.....	74
Figura 59: Datos de entrada loseta superior de 45mm de diafragmas prefabricados.	75
Figura 60: Momento-curvatura loseta superior de especímenes modelos de diafragma prefabricado. Rad/km.	75
Figura 61: Datos de entrada de modelo 3.	76
Figura 62: Momento-curvatura de modelo 3. Rad/km.....	76
Figura 63: Momento-curvatura de los modelos teóricos y experimentales. Rad/km.....	77
Figura 64: Momento-Curvatura teórico Response 2000 respecto ensayos modelos prefabricadas. 78	

Figura 65: Relación de carga impuesta a los modelos vs deformaciones registradas transductor	23.
.....	79
Figura 66: Degradación de la rigidez del modelo 1,2 y 3.	80
Figura 67: Degradación promedio de la rigidez del modelo 1 y 2.	81
Figura 68: Rigidez experimental de los modelos 1, 2 y 3 y rigidez teórica de diafragmas de 45mm y 120mm de espesor.	82
Figura 69: Rigidez teórica vs rigidez experimental.	83
Figura 70: Deformación experimental modelo 1 por cortante y flexión (mm).	85
Figura 71: Deformación experimental modelo 2 por cortante y flexión (mm).	86
Figura 72: Deformación experimental modelo 3 por cortante y flexión (mm).	87
Figura 73: Datos de entrada para la obtención de la deformación a flexión, derivada de los registros experimentales.	89
Figura 74: Deformación experimental y teórica modelo 1, modelo 2 y modelo 3.	91
Figura 75: Vista 3D-MEF	93
Figura 76: Disposición de los elementos tipo shell-thick. Diafragma 45mm, modelo 1, modelo 2 y modelo 3.	93
Figura 77: Comparación de las deformaciones derivada de los datos experimentales vs deformaciones por Modelo de Elementos Finitos (MEF) con 50% de la sección fisurada.	96
Figura 78: Diagrama de esfuerzos a compresión y tensión modelo 1 y modelo 2 MEF.	97
Figura 79: Estimación de respuesta en modelo puntal tirante.	98
Figura 80: Franja a tensión.	99
Figura 81: MEF de 4 niveles con diafragmas en Vigueta-Bovedilla.	102
Figura 82: Sección de perfil P-13(PRESFORZADOS MEXICANOS DE TIZAYUCA, 2013):	105
Figura 83: Sección transversal de los modelos 1 y 2. Apoyo de 10 cms.	107
Figura 84: Cargas por fuerzas horizontales en elementos estructurales que no hacen parte del sistema principal de resistencia.	110
Figura 85: Concentración de cargas en los diafragmas en dirección X y Y.(KN)	110
Figura 86: Fuerzas internas sobre los modelos bajo cargas en la dirección X.	111
Figura 87: Fuerzas internas sobre los modelos bajo cargas en la dirección Y.	112
Figura 88: Cercha de puntal-tirante.	113
Figura 89: Ancho de puntal.	114
Figura 90: Desplazamiento interno asociado al comportamiento de un muro analizado por carrillo(Carrillo et al., 2012).	119
Figura 91: dispositivos asociados a experimento analizado por carrillo(Carrillo et al., 2012).	120
Figura 92: Distancias asociadas a los transductores y dimensiones del diafragma.	121
Figura 93: Esquema de la deformación asociada a la cortante.	122
Figura 94: Momento curvatura modelo 1.	123
Figura 95: Momento curvatura modelo 2.	125
Figura 96: Momento curvatura modelo 3.	126
Figura 97: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la vigueta.	130
Figura 98: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la vigueta.	131
Figura 99: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la vigueta módulo de cortante.	131
Figura 100: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la bovedilla Modulo de elasticidad.	132

Figura 101: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la bovedilla.	133
Figura 102: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la bovedilla módulo de cortante.	133

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de los modelos ensayados.	28
Tabla 2: Propiedades de los materiales.	31
Tabla 3: Valores de las diafragmas para el cálculo de la rigidez.	81
Tabla 4: Valores asociados a la evaluación de la rigidez teórica vs rigidez experimental.	82
Tabla 5: Deformación experimental modelo 1 por cortante y flexión (mm).	84
Tabla 6: Deformación experimental modelo 2 por cortante y flexión (mm).	85
Tabla 7: Deformación experimental modelo 3 por cortante y flexión (mm).	86
Tabla 8: Datos geométricos constates en los modelos.	88
Tabla 9: Δf derivada de los registros experimentales y Δf teórica fisurada al 50% de modelo 1, modelo 2 y modelo 3.	90
Tabla 10: Desplazamientos de MODELOS modelados. mm.	94
Tabla 11: Relación desplazamientos experimentales vs ideal en MEF con sección fisurada al 50%.95	
Tabla 12: Cargas de tensión y compresión a asociados al modelo de puntal y tirante.	98
Tabla 13: Tensión admisible, según refuerzo en la franja de tensión.	100
Tabla 14: Análisis de cargas actuantes en cada nivel de diafragma prefabricado.	102
Tabla 15: Análisis de cargas actuantes en cada nivel de diafragma de losa maciza.	103
Tabla 16: Recomendaciones de espesores para loseta superior (Losa Topping).(ANIVIP, 2012) ...	104
Tabla 17: Abaco para el chequeo de resistencia de las viguetas para Momento y Cortante.(PRESFORZADOS MEXICANOS DE TIZAYUCA, 2013)	106
Tabla 18: Cuantía para control de retracción(Gilbert, 2001)(ANIVIP, 2012).....	108
Tabla 19: Especificaciones sísmicas Título A-NSR-10.	108
Tabla 20: Periodo fundamental según capitulo A.4-NSR-10.	109
Tabla 21: Valor de Sa. Capitulo A.4-NSR-10.	109
Tabla 22: Cargas sobre diafragmas de piso del caso en estudio. (KN).	109
Tabla 23: Análisis de capacidad de puntal para el diafragma.	115
Tabla 24: Primer análisis de capacidad de tirante para el diafragma.	115
Tabla 25: Segundo análisis de capacidad de tirante para el diafragma	116

1. INTRODUCCIÓN

Los elementos de concreto prefabricado se definen como elementos construidos en un sitio distinto a su lugar de disposición final. El desarrollo técnico de los procesos constructivos en busca de una mejora constante y efectiva en el transporte, el costo y velocidad de fabricación, conjugado con la funcionalidad estructural, ha llevado a explorar distintas alternativas y posibilidades que ofrecen estos elementos.

Dentro de la construcción de estructuras prefabricadas se ha desarrollado el uso de elementos tipo columna, viga y sistemas de piso, cuya implementación disminuye los tiempos de ejecución en el desarrollo de proyectos, ya que, permite una construcción más rápida, estructuralmente eficaz y financieramente rentable, frente a la construcción realizada en obra.

La implementación de componentes prefabricados dentro de una estructura facilita el control de calidad y sintetiza algunos de los siguientes procesos de la etapa constructiva, como: encofrado, reforzamiento, vaciado de concreto y des-encofrado.

Particularmente en la práctica se ha probado que el sistema de vigueta-bovedilla reforzada, a pesar de tener un costo mayor, de aproximadamente 20%, presenta un peso en la estructura 15% menor, 16% menos desperdicio de materiales y un ahorro en tiempo hasta del 60% respecto estructuras de sistemas tradicionales en pórticos y losa nervada.

El diafragma prefabricado, es fundamental para alcanzar una óptima respuesta sísmica en toda la estructura, esto debido a que es el responsable de conducir las cargas inerciales a los elementos de resistencia principal y unir estos para que trabajen en conjunto como un solo sistema.

Pese al crecimiento en la implementación de los diafragmas prefabricados, no hay un procedimiento de diseño claro y adoptado por la norma colombiana, entorno a la distribución de fuerzas internas, espesores mínimos, distribución y dirección de los prefabricados, el reforzamiento, y el material más adecuado en ellos.

Esto crea la necesidad de plantear criterios adecuados de diseño para el diafragma prefabricado, por lo cual se presenta la siguiente investigación, con el ánimo de perfeccionar los procedimientos de diseño, a través de la información y resultados de ensayos realizados en el CENAPRED, patrocinados por la Asociación Nacional de Industriales de Vigueta Pretensada-ANIVIP, México, los cuales consideraron, entre otros, la construcción de pisos prefabricados con vigueta y bovedilla, cargados

horizontalmente mediante gatos hidráulicos, y de los cuales se cuenta con los datos obtenidos experimentalmente de deformaciones y carga.

1.1. ALCANCES

Presentar una metodología de diseño para diafragmas de concreto prefabricado que cumplan los requerimientos y los criterios de la normatividad vigente, para ello se emplearan los resultados del análisis de los ensayos dados en el CENAPRED patrocinados por la Asociación Nacional de Industriales de Vigüeta Pretensada-ANIVIP, y criterios propios del estado del arte.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento estructural de un sistema de diafragma prefabricado ante cargas en su plano.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los resultados de ensayos de carga, realizados en el laboratorio del CENAPRED, en sistemas de diafragmas prefabricados.
- Establecer una metodología de diseño para diafragmas de sistemas de piso prefabricado ante cargas laterales.
- Comparar objetivamente la funcionalidad de un diafragma de losa maciza y un diafragma prefabricado ante cargas laterales.

1.3. LIMITACIONES

Los resultados de la presente investigación se obtienen de los datos obtenidos de la investigación llevada a cabo en el CENAPRED y patrocinada por la Asociación Nacional de Industriales de Vigüeta Pretensada-ANIVIP de México, lo cual implica una limitación del desarrollo en la investigación, ya que, los ensayos, han sido controlados y trabajados por terceros.

Por lo anterior los resultados deben verse con alguna reserva dado que los emplearemos para analizar el caso colombiano.

2. CONSIDERACIÓN DEL DIAFRAGMA DE PISO PREFABRICADOS

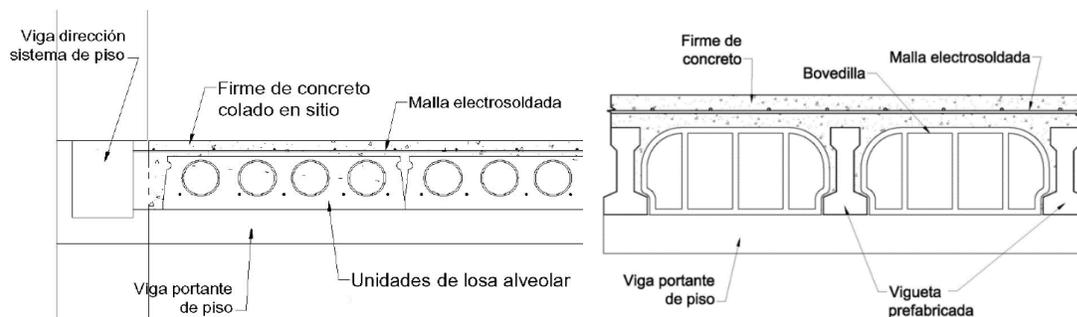
El diafragma de piso desempeña un papel importante en una estructura para obtener un adecuado comportamiento ante cargas laterales, ya que, es el responsable de distribuir las fuerzas inerciales hacia los elementos de resistencia

principal (R. B. Fleischman et al., 2013). Esto implica que se realice un diseño ajustado a la demanda de cargas mencionada, y en coherencia con la normatividad vigente (Cleland et al., 2017).

Para ello, se deben considerar los efectos de los esfuerzos y las deformaciones asociados a la transmisión de cargas a los elementos verticales, tales como columnas y muros. El diseño debe estar direccionado a la obtención de un comportamiento idealmente elástico, de tal manera que, ante una excitación debida a cargas laterales, se garantice su funcionalidad, con el fin de evitar posibles daños y afectaciones, y evitar la posterior necesidad de realizar reparaciones en los sistemas de piso, particularmente en los elementos tipo bovedilla, los cuales no cuentan con un refuerzo que atienda el agrietamiento debido a la tracción (ANIVIP, 2012). Esto se puede lograr empleando el método de diseño por capacidad, considerando a la vez, la correcta evaluación de las fuerzas sísmicas y la distribución de estas dentro del diafragma de piso (Cleland et al., 2017).

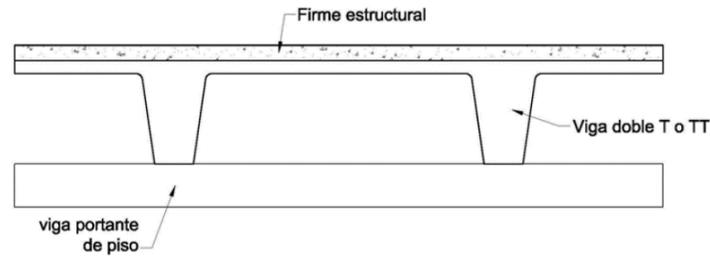
De igual manera, es importante considerar la trayectoria y magnitud de los esfuerzos de tracción y compresión, asociados a las conexiones entre los diafragmas prefabricados y los elementos verticales, ya que, son los puntos que tienden a presentar un mayor daño al cargarse lateralmente, si no se han considerado los valores y dirección de esfuerzos adecuados para su diseño (Rodriguez et al., 2013).

En la Figura 1, se presentan tres tipologías de sistema de piso prefabricados de uso frecuente en la construcción para sistemas de piso en edificios.



A) Losa Alveolar

B) Vigueta en bovedilla



C) Viga en doble T

Figura 1: Tipologías de sistemas de piso. (Rodríguez et al., 2013)

2.1. ANTECEDENTES

A partir del sismo de Northridge de 1994, se plantearon dudas acerca del diseño de estructuras de elementos prefabricados. En este evento se evidenció que las columnas y muros del sistema estructural de las edificaciones, tuvieron una adecuada respuesta ante un sismo de este tipo, y que, los sistemas de piso prefabricado colapsaron debido a que no tenían un análisis adecuado que tomara en cuenta el comportamiento frente a cargas laterales. En estos elementos se observaron evidencias de una respuesta diferente al de un diafragma rígido, que permitió grandes desplazamientos en áreas alejadas de los puntos de apoyo, producidos principalmente por la forma alargada en planta de la edificación, provocando mayores deformaciones a las calculadas en los diseños originales.

Desde este evento sísmico se han desarrollado estudios para la adopción de nuevos criterios de diseño de diafragmas prefabricados, los cuales han mejorado las consideraciones para el reforzamiento de estos elementos (Cleland et al., 2017). El procedimiento para el diseño de diafragma prefabricado debe contemplar la tipología de sistema a implementar, bien sea, viga doble T, losa alveolar, o vigueta-bovedilla, ya que, dependiendo del elemento seleccionado, su comportamiento concentrará los esfuerzos y variarán los mecanismos de transferencia de carga, de tal forma que, un análisis del sistema de piso puede llegar a plantear algunas variaciones dependiendo del comportamiento específico de cada tipología de elementos prefabricados, por lo que se debe tener el criterio necesario para determinar las condiciones de borde y equilibrio adecuados.

Aun así, los diafragmas prefabricados no presentan actualmente criterios de diseño normalizados, lo cual subsecuentemente impide recomendaciones y directrices apropiadas al diseño del sistema y sus conexiones.

No se debe implementar un diafragma prefabricado sin hacer un análisis adecuado de cómo resiste y distribuye las cargas laterales. El dar por hecho que un diafragma

se comporta rígido o semirrígido puede comprometer seriamente la integridad de la estructura ante solicitaciones de importancia. Tomando como referencia resultados de estudios anteriores, es claro que todos los sistemas no constituyen propiamente diafragmas rígidos, no obstante, en el caso de sistemas de vigueta-bovedilla, podría considerárseles razonablemente rígidos, en tanto se suponga una acción compuesta total con la loseta superior de concreto, vigueta y bovedilla, y estos sean elementos constituidos con una gran calidad y resistencia (Tena Colunga et al., 2013). Se recomienda igualmente por parte de manuales de diseño, la atención al reforzamiento necesario para atender el agrietamiento en la loseta superior de diafragmas tipo vigueta-bovedilla, esto debido a que se suponen cubiertos por acabados, y que su fisuramiento no representa un problema significativo, aunque, es importante darle la atención necesaria para el adecuado diseño que garantice la integridad y funcionalidad estructural. (ANIVIP, 2012)

2.2. NORMATIVIDAD LOCAL

En la NORMA COLOMBIANA SISMORESISTENTE-NSR10 (Ministerio de Vivienda, 2010), presenta consideraciones generales para el reforzamiento de los diafragmas prefabricados, sin llegar a profundizar en el detallado y metodologías en específico de los sistemas, en parte, por la dificultad que hay al generalizar criterios para la variedad de tipologías de estos elementos (vigas doble T, losas alveolares, sistemas vigueta-bovedilla), los cuales se comportan de forma diferente entre sí, además de tener una constante evolución en la presentación del producto que afecta su forma y comportamiento.

2.2.1. FUERZAS DE DISEÑO SÍSMICO

Según el comité ACI550.5-18 (ACI Committee 550, 2018), el nivel de demanda sísmica de un diafragma se define como bajo, moderado o alto y debe determinarse con base en la categoría sísmica de diseño, número de niveles, luz del diafragma y relación Ancho/Largo del diafragma.

Como se presenta, en la Figura 2, la fracción de la aceleración lateral para el diseño de los diferentes niveles de piso se asocian con la altura para edificaciones de tres niveles o más, y la fuerza de diseño depende de la masa, el factor de reducción y aceleración efectiva mostrada en la Figura 2, como se muestra en la ecuación 1 dada por ASCE 7-16, descrita en la sección 14.2.4 de los criterios de diseño de diafragmas (American Society of Civil Engineers, 2016):

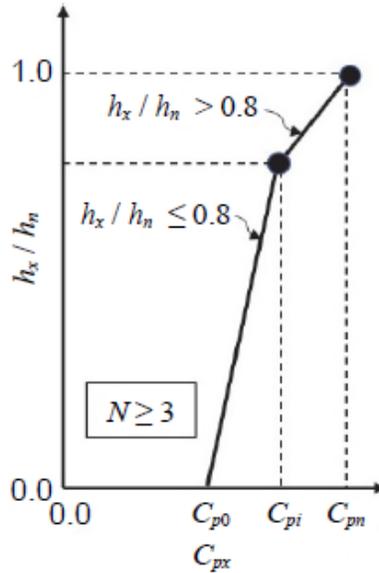


Figura 2: Coeficientes distribución de aceleraciones en los diafragmas según ASCE/SEI 7-16.

$$F_{px} = \frac{C_{px}}{R_s} w_{px} \geq 0.2 S_{DS} I_e w_{px} \quad (1)$$

En la NSR-10, en el capítulo A.8, se indica que los sistemas de piso, están sujetos a este numeral como elementos estructurales que no hacen parte del sistema principal de resistencia. Igualmente se especifican las consideraciones principales que debe tenerse en cuenta como criterio de diseño, y finalmente se indica el nivel de cargas a considerar para su diseño, a continuación, se muestran los artículos de la norma.

A.8.2 — FUERZAS HORIZONTALES DE DISEÑO

A.8.2.1 — ACELERACIÓN HORIZONTAL SOBRE EL ELEMENTO —

A.8.2.1.1 — Método de la fuerza horizontal equivalente —

$$a_i = A_s + \frac{(S_a - A_s) h_i}{h_{eq}} \quad h_i \leq h_{eq} \quad (A.8.2-1)$$

$$a_i = S_a \frac{h_i}{h_{eq}} \quad h_i \geq h_{eq}$$

A.8.2.2 — FUERZAS HORIZONTALES SOBRE EL ELEMENTO —

$$F_p = \frac{a_x g}{R_0} M_p \quad (A.8.2-2)$$

Aun así Barbosa y Carrillo, aclaran que las cargas sísmicas consideradas por la NSR-10, son significativamente menores que las aceleraciones requeridas en otras normas, incluyendo la norma americana vigente ASCE 7-10, el UBC-97, y proponen igualmente una modificación para obtener una estimación más acertada de las aceleraciones necesarias para elementos no estructurales y elementos estructurales que no hacen parte del sistema principal de resistencia (Barbosa et al., 2018).

2.2.2. CRITERIOS DE DISEÑO PARA CONCRETO PREFABRICADO

En el título C de la NSR-10, **CAPÍTULO C.16 — CONCRETO PREFABRICADO**, se muestran los aspectos generales para estos elementos, donde se habla acerca de la distribución de esfuerzos y su trayectoria **“C.16.3 — Distribución de fuerzas entre elementos”**, mencionando que esta debe ser continua tanto en los elementos como en las conexiones, y que, en donde se produzcan fuerzas de tracción, debe brindarse un reforzamiento continuo.

Adicionalmente, en el numeral **“C.16.5 — Integridad estructural”**, se habla de varias disposiciones sobre la integridad estructural de manera general para todas las estructuras prefabricadas. En particular reproducidas del comité 550 de la ACI (ACI Committee 550, 2001).

En síntesis, para elementos de concreto prefabricado, la NSR-10 se limita a brindar la filosofía de diseño, y generaliza disposiciones de reforzamiento para el diafragma prefabricado, brindando la capacidad mínima a tracción que debe tener la conexión con este. En esta norma no se definen restricciones en la geometría de los elementos que componen el piso, tampoco su máxima longitud, la dirección en la conformación del entramado de viguetas, su peralte mínimo, y los anclajes que se pueden implementar para las conexiones.

2.3. METODOLOGÍAS USADAS PARA EL DISEÑO DE DIAFRAGMAS DE PISO

En general se definen tres metodologías de análisis y diseño de sistemas de piso prefabricado:

1. **Viga de gran peralte:** Esta es comúnmente usada para pisos regulares, la simplificación de considerar el diafragma como una viga ancha, es adecuada para aquellas geometrías en donde la luz entre apoyos horizontales alcanza longitudes mayores a 4 veces el peralte del diafragma, con lo cual se garantiza un comportamiento teórico de viga simplemente apoyada o continua. En esta se presentan deformaciones y rotaciones diferentes en cada punto de su plano, y la rigidez de los elementos verticales es mayor que la del elemento horizontal de piso, el cual tiene un comportamiento de

diafragma flexible. Una guía de esto se presenta en el reglamento Uniform Building Code 1991, y lo define como aquel donde “la máxima deformación lateral del diafragma es más de dos veces la distorsión lateral del piso correspondiente” (M. E. Rodríguez & Blandón, 2003), tal como se presenta en la Figura 3.

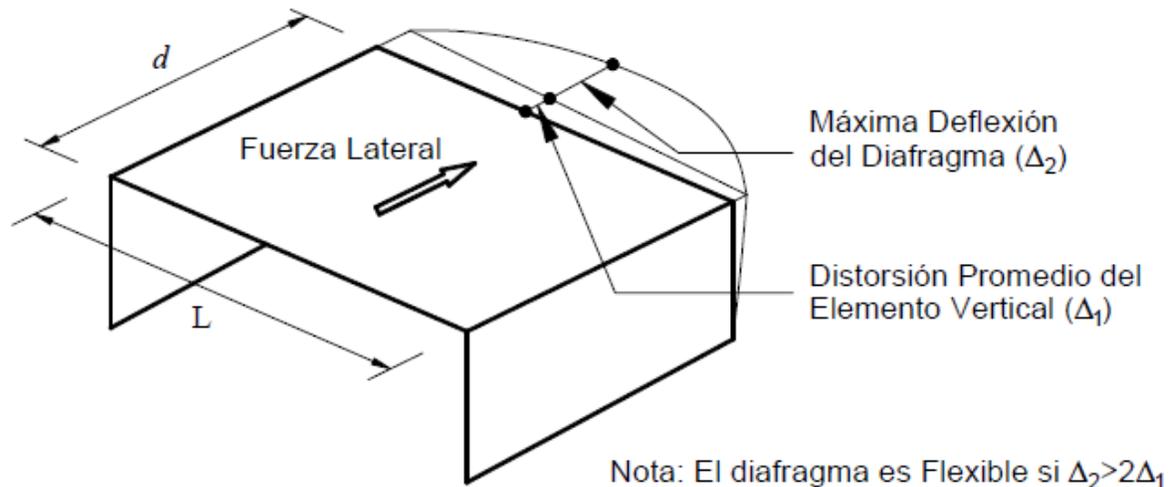


Figura 3: Diafragma flexible.(ANVIP, 2012)

Aun así este método no ofrece un claro comportamiento en las zonas de concentración de esfuerzos, tales como áreas cercanas a los elementos de resistencia principal, que reciben el mayor daño en eventos sísmicos, principalmente por la incompatibilidad de deformaciones con el diafragma (Bull, 2003).

2. Puntal y tirante: Este método se emplea para configuraciones geométricas de piso complejas, como la mostrada en la Figura 4. Es una metodología práctica que supone las cargas mediante distribución de fuerzas internas que satisfacen las condiciones de borde y equilibrio mediante la implementación de elementos a compresión denominados puntales y elementos a tracción denominados tirantes. Este método se ajusta mejor para configuraciones de planta irregulares que presentan concentraciones de esfuerzos a compresiones y tracción en sus esquinas y bordes, así mismo, presenta un carácter conservador, el cual dará una resistencia que estará del lado de la seguridad, lo que lo hace un método apropiado para el diseño de las estructuras (Flores, 2006).

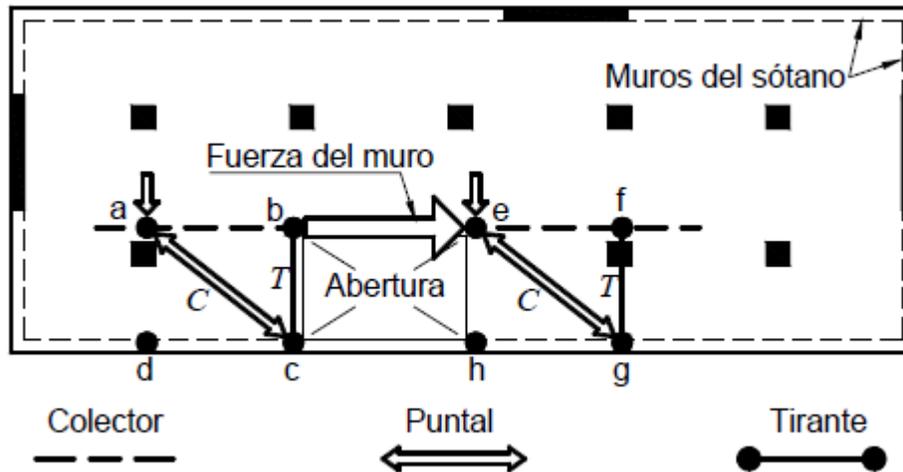


Figura 4: Método del puntal y tirante (ANIVIP, 2012)

3. Elementos finitos: Este método consiste en la idealización del diafragma de piso por medio del modelamiento, asociando en este sus propiedades geométricas y mecánicas, con lo cual llega a definir el ancho de franjas a tracción y compresión para el adecuado reforzamiento de la loseta superior vaciada en la obra.

2.4. ANTECEDENTES DE GUÍAS DE DISEÑO SÍSMICO DE DIAFRAGMAS DE CONCRETO PREFABRICADO

La "National Institute of Standards and Technology" "(Cleland et al., 2017)", recopila las publicaciones de varios autores respecto al comportamiento y criterios para el diseño de diafragma prefabricados, en las que se destacan: "Development of a seismic design methodology for precast diaphragms" (Conference & Engineering, 2004), al igual que "Ensayos ante cargas laterales cíclicas reversibles de un edificio prefabricado de concreto reforzado de dos niveles. Parte II: Evaluación del comportamiento de conexiones prefabricadas y del sistema de piso. Recomendaciones de diseño" (M. E. Rodríguez & Blandón, 2003), "Comportamiento de estructuras prefabricadas de concreto reforzado para edificaciones en zonas sísmicas, innovación y tendencias en su empleo" (M. Rodríguez, 2000).

Igualmente en Latinoamérica, hay publicaciones con guías para el diseño de diafragma prefabricados, como "Manual de diseño estructural de sistemas de piso o losa a base de viga pretensada y bovedilla para edificaciones en zonas sísmicas" publicada por la Asociación Nacional de Industriales de Viga Pretensada, ANIVIP A.C. (PRESFORZADOS MEXICANOS DE TIZAYUCA, 2013),

asociación que propuso hacer un documento en donde se aglutinaran los conocimientos de la academia y la experiencia de los productores, de autoría de Daniel Padilla R y Rafael Betancourt R (ANIVIP, 2012).

2.4.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIONES Y CRITERIOS DE DISEÑO

En el año 2003 se realizó una investigación para desarrollar una guía metodológica de diseño para diafragmas prefabricados, impulsada por la “Precast/Prestressed Concrete Institute” (PCI) que se ajustara a las distintas categorías de demanda sísmica (Robert B. Fleischman et al., 2005) (Kurama et al., 2018). Durante el desarrollo de la investigación se obtuvo la respuesta de los conectores de juntas internas a tensión y cortante.

Posteriormente, a través de los resultados obtenidos y aproximaciones numéricas empíricas, se desarrolló un enfoque de diseño, que se añadió a la ASCE/SEI 7-16. Igualmente esta metodología fue revisada y consignada en el comité 550 de la ACI (ACI Committee 550, 2015).

La guía “NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 13 Seismic Design of Precast Concrete Diaphragms A Guide for Practicing Engineers” (Cleland et al., 2017)(R. B. Fleischman et al., 205 C.E.)(Robert B. Fleischman et al., 2005), adoptó el mismo procedimiento de diseño de diafragmas en concreto prefabricado y es la guía más reciente que abarca los procedimientos de diseño más actualizados entorno al diafragma prefabricado.

2.4.2. TIPOLOGÍAS DE DIAFRAGMAS

Se definen dos tipologías para diafragmas prefabricados con loseta superior vaciado en sitio:

1. Compuesta (aquella en la cual la loseta superior de concreto o loseta superior y la unidad prefabricada actúan en conjunto como diafragma).
2. No-compuesta (aquella en la que la loseta superior actúa únicamente como diafragma).

Como se observa, en la Figura 5, los diafragmas compuestos con loseta superior, ligan los elementos prefabricados por medio de conexiones mecánicas o soldadas de aleta-aleta. Igualmente existen sistemas que no la utilizan e implementan conexiones mecánicas o soldadas entre sus juntas:

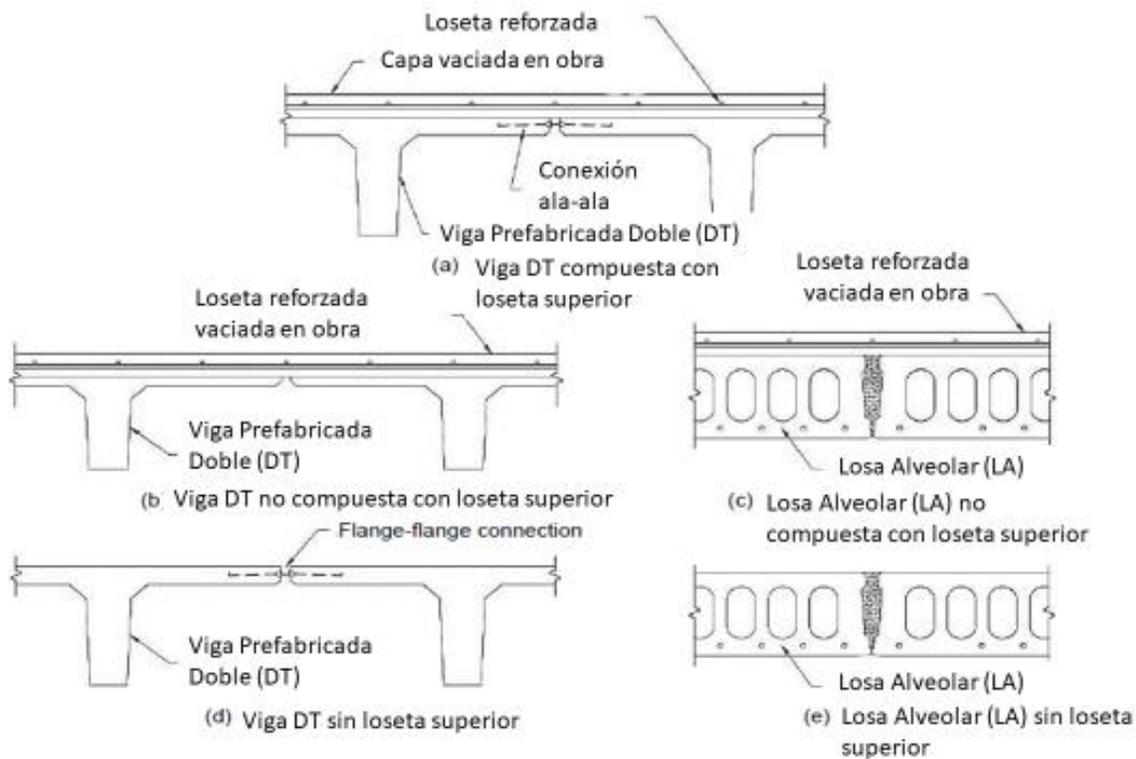


Figura 5: Tipologías típicas de diafragmas prefabricados .(Cleland et al., 2017).

La implementación de una u otra tipología de diafragma prefabricado, debe llevar a un fin común, en cualquier caso, ya que, se debe atender correctamente las tensiones de tracción-compresión y esfuerzos cortantes en las uniones de las juntas

2.4.3. CONEXIONES DE LAS JUNTAS DE ELEMENTOS DE DIAFRAGMA PREFABRICADO

El comité ACI550.5-18 (ACI Committe 550, 2018) presenta una metodología de diseño para las conexiones de juntas del diafragma prefabricado, dependiendo de su capacidad de disipar energía, estas se clasifican como EDO (Elastic Design Option-Permite un Bajo nivel de demanda sísmica o diseño sísmico moderado aumentado 15% los esfuerzos de diseño), BDO (Basic Design Option -Permite un Bajo nivel de demanda sísmica o diseño sísmico moderado o un alto nivel de diseño sísmico de los esfuerzos de diseño) o RDO (Reduce Design Option-Permite un Bajo nivel de demanda sísmica o diseño sísmico bajo de esfuerzos de diseño). La elección del tipo de conexión depende de las demandas sísmicas dadas en el diafragma.

Debido al comportamiento articulado del diafragma prefabricado en sus uniones, al presentarse un comportamiento inelástico, éste se concentra en las juntas de los

elementos, generando daños relevantes en las conexiones. Según la American Concrete Institute, los conectores de diafragma o refuerzo de articulación se clasifican como elementos de deformabilidad baja, media o alta (LDE, MDE o HDE) en función de su capacidad para proporcionar diversos grados de capacidad de deformación por tensión (ACI Committee 550, 2018).

La adecuada conexión interna de las juntas de los diafragmas prefabricados, es fundamental para transmitir las fuerzas inerciales de la estructura al sistema de resistencia lateral (ACI Committee 550, 2015). Como se menciona, un diafragma puede tener un vaciado de concreto sobre los elementos prefabricados, para formar una loseta superior, en esta se puede generar un refuerzo continuo para transmitir los esfuerzos entre los elementos prefabricados, tal como se muestra en la Figura 6:

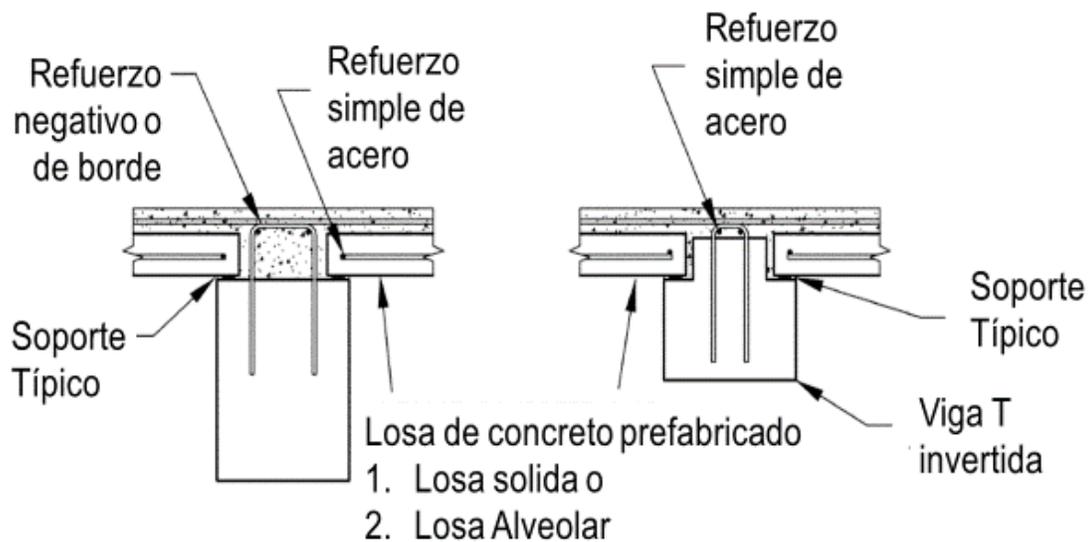


Figura 6: Conexión de junta continua con loseta de superior de concreto.

De igual manera existen diafragmas prefabricados en los que no se realiza el vaciado de la loseta superior y se dejan pasadores para la conexión por medios mecánicos como se muestra en la Figura 7. Estos implementan en las juntas, empalmes de refuerzo por medio de traslapeo de barras soldadas y a través del uso de uniones mecánicas. Hay una diferencia significativa en el comportamiento de las losas construidas en obra, respecto las losas prefabricadas, debido a que la junta de soporte del diafragma prefabricado tiende a reflejar agrietamiento, debido a una demanda importante de tensiones en el refuerzo que cruza esta junta (ACI Committee 550, 2015).

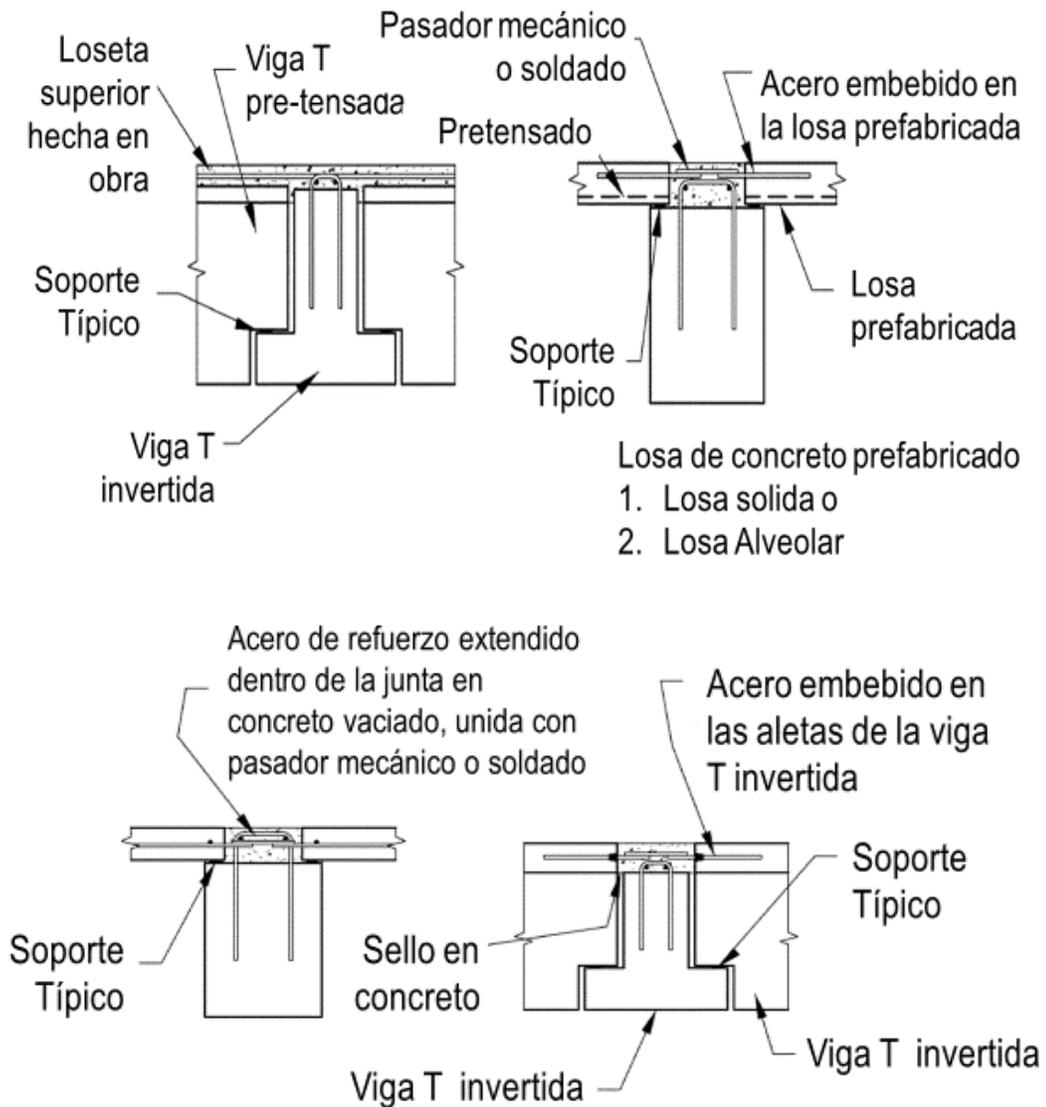


Figura 7: Conexión de junta con pasador mecánico.

2.4.4. TIPOS DE TRASLAPO DE REFUERZO, PARA DIAFRAGMAS PREFABRICADOS

En algunos códigos de diseño y construcción sismorresistente para concreto prefabricado, es permitido la implementación de empalmes de refuerzo por medio de traslapo, soldar el refuerzo y a través del uso de empalmes mecánicos. En varios casos los elementos estructurales prefabricados, se construyen e instalan emulando el comportamiento de elementos de concreto reforzado construido en sitio, especialmente en su conexión.

Las barras de refuerzo se pueden hacer continuas a lo largo de las regiones con esfuerzos a tensión críticas de los elementos de concreto prefabricado, de la misma manera que para el concreto vaciado en obra y con las mismas restricciones en cuanto al tipo de empalmes permitidos(ACI Committee 550, 2015).

Las juntas ilustradas en la Figura 8 y en la Figura 9, han sido usadas en construcciones de estructuras de concreto prefabricado, y han sido validadas mediante ensayos de laboratorio para conocer su comportamiento como aprobación en la implementación de edificios oficiales en los Estados Unidos (ACI Committee 550, 2015):

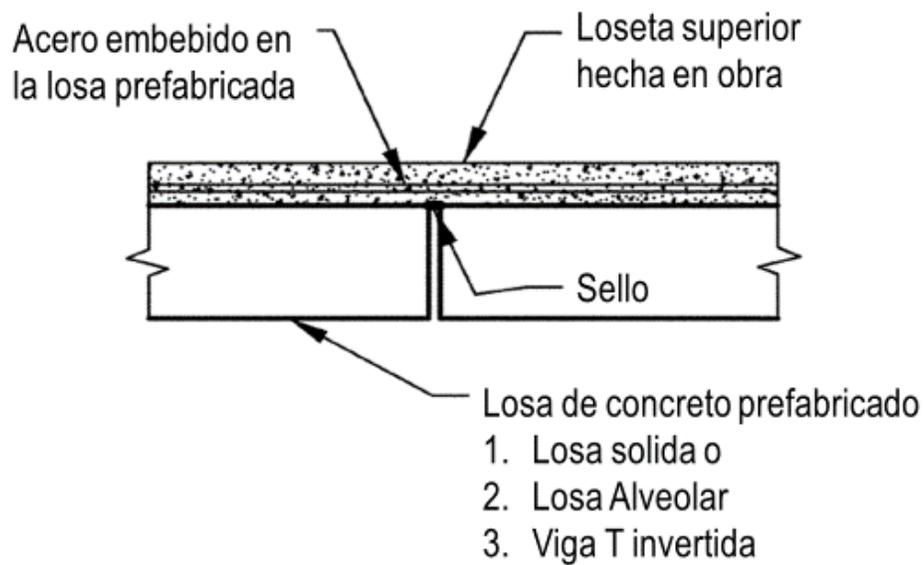


Figura 8: Junta de diafragma con loseta superior reforzada continua en la junta.(ACI Committee 550, 2015)

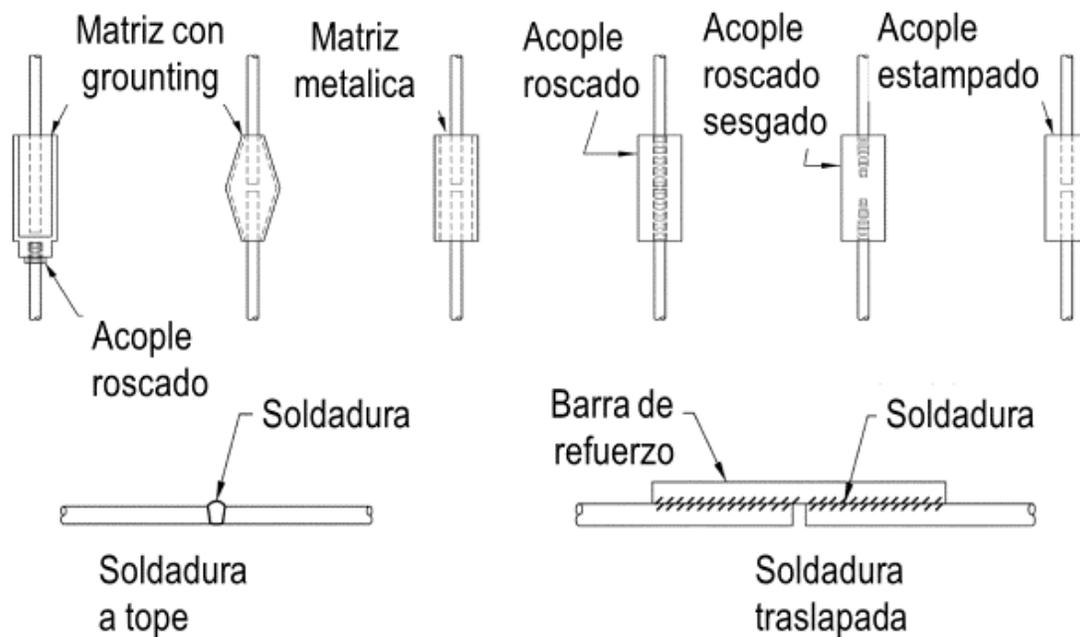


Figura 9: Conectores mecánicos y soldados(ACI Committee 550, 2015).

2.4.5. LOSETA SUPERIOR DE DIAFRAGMAS PREFABRICADOS

Actualmente existen manuales que adoptan criterios de diseño y cálculo de diafragmas prefabricados impulsados por fabricantes, especialmente en países en donde su implementación se encuentra ampliamente adoptada. Se destaca particularmente la ASOCIACION NACIONAL DE INDUSTRIALES DE VIGUETA PRETENSADA-ANIVIP MEXICO(ANIVIP, 2012), la cual presenta apartes importantes de buenas prácticas para el diseño de estos sistemas, puntualmente en los criterios de durabilidad y servicio, asociados al fisuramiento, y a sus dimensiones máximas.

Particularmente se recomienda lograr un ancho de grieta máximo de 0.30mm, además, en el caso de losas con espesores menores que 60 mm requerirá una cuantía mayor que 0.003.

Es de esperar que al aumentar la relación volumen/área del diafragma, las deformaciones asociadas a la contracción y cambios volumétricos del concreto disminuyan, ya que, a medida que aumenta el espesor del diafragma aumenta también la resistencia a la tracción(ANIVIP, 2012). Particularmente en la loseta superior de diafragmas prefabricados tipo vigueta-bovedilla, se ha observado en diferentes ensayos, que, presenta agrietamiento luego de ser sometida a cargas

cíclicas. Estas grietas están asociados a la restricción al movimiento que tiene la loseta superior, por los elementos de fijación en su extremo, por lo que estas generan deformaciones diferenciales internamente, y, los esfuerzos de tensión presentados exceden la capacidad de resistencia a la tracción en el concreto.

3. INFORMACIÓN DE LOS ENSAYOS

Los ensayos analizados corresponden a una serie de modelos representativos de diafragmas a escala natural de vigueta y bovedilla, sometidas a cargas horizontales cíclicas reversibles y cargas verticales, patrocinada por la Asociación Nacional de Industriales de Vigueta Pretensada-ANIVIP, y que se realizaron en el Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED, en el año 2008. En total se realizaron 7 modelos experimentales de los cuales, el presente trabajo analiza 3.

3.1. DESARROLLO DE ENSAYOS

3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE ENSAYO

Para estos ensayos se empleó el sistema de vigueta y bovedilla, de uno y dos paneles rectangulares de 2.10 m de ancho por 2.50 metros de largo, los cuales fueron perimetralmente confinados por vigas de 0.20m x 0.30m de sección. Estos ensayos se realizaron variando la orientación de las viguetas respecto a la dirección de aplicación de la carga lateral. Igualmente se realizó un ensayo sobre un diafragma de losa maciza de concreto reforzado de 0.12 m de espesor, con la finalidad de comparar los resultados.

En la Tabla 1, se presentan las características de los modelos que se analizan en este trabajo. En esta tabla “L” es el ancho del diafragma, “H” la altura libre del diafragma, “ t_{cc} ” corresponde al espesor de la placa maciza sobre las viguetas, y la orientación de viguetas se observa en la Figura 10:

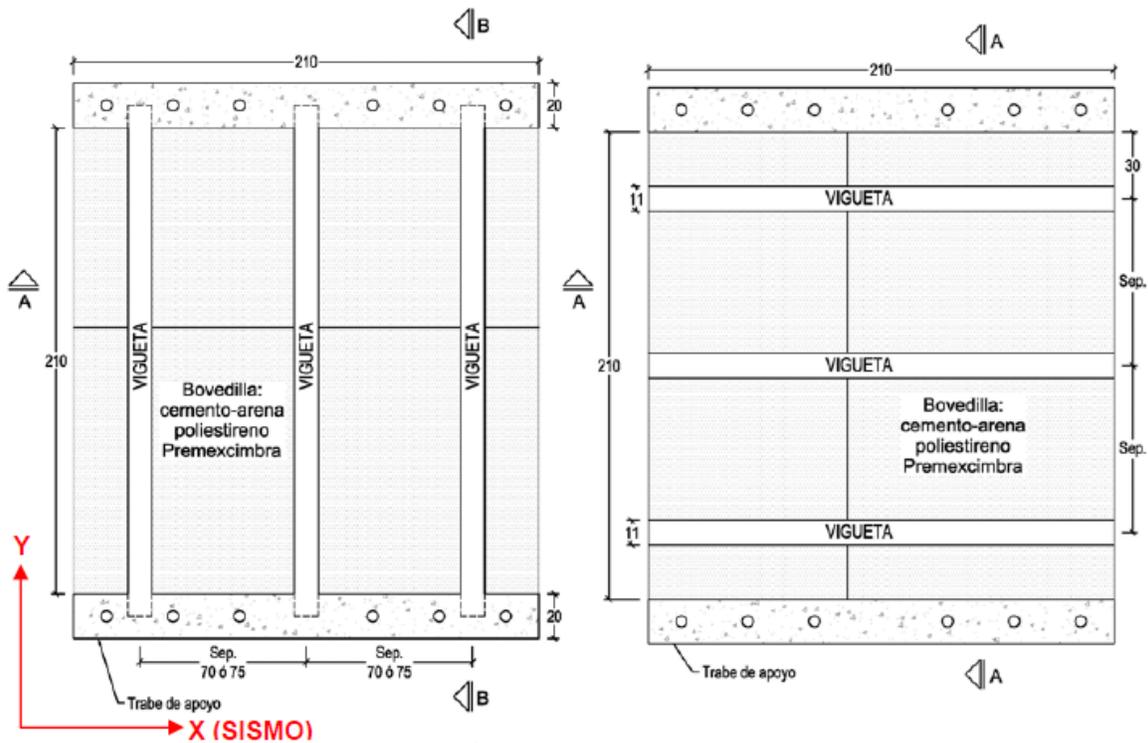
Tabla 1: Características de los modelos ensayados.

	Características				
	L (mm)	H(mm)	t_{cc} (mm)	Orientación de vigueta	Tipo de bovedilla
Modelo 1	2100	2500	45	Y	Arena - cemento
Modelo 2	2100	2500	45	X	Arena - cemento
Modelo 3	2100	2500	120	Losa maciza	

El presente trabajo analiza los ensayos presentados en la Figura 10, donde la Figura 10 a) y Figura 10 b) están constituidas por diafragmas de concreto con vigueta-

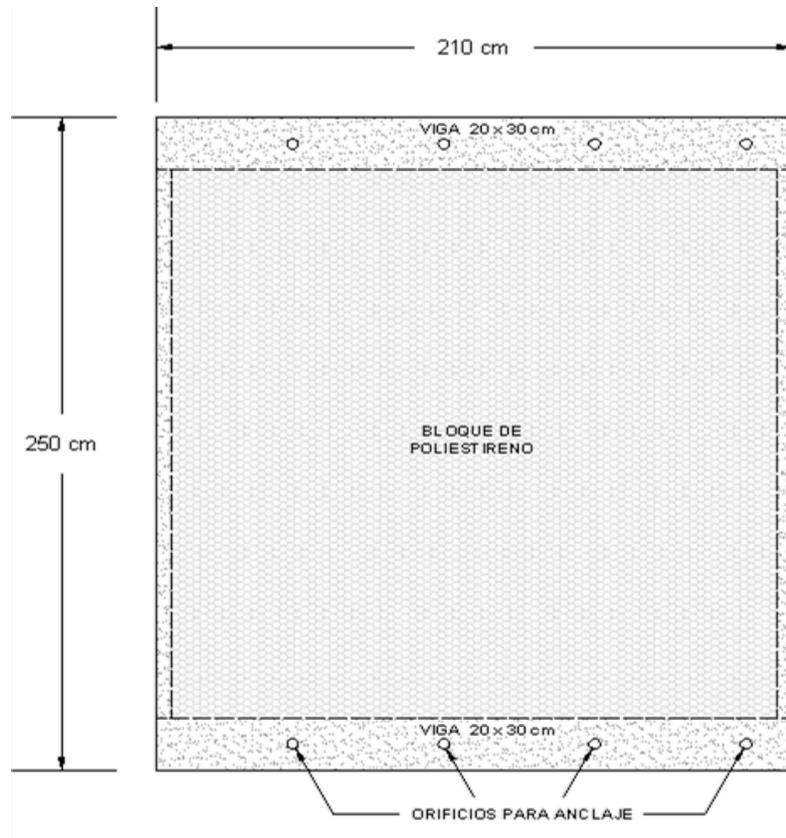
bovedilla y loseta superior, a la par que se experimentó con un diafragma de losa maciza de dimensiones 2.50m x 2.10m el cual se presenta en la Figura 10 c). La sección del diafragma pre-fabricado se muestra en la Figura 10-D, donde se observa la altura de 0.13m de la vigueta y 0.045m del espesor de la loseta.

Para la aplicación de cargas y la fijación del modelo se dispusieron dos vigas en los extremos de sección 0.20m x 0.30m, con dos barras de refuerzo de ½" superiores y dos barras de refuerzo ½" inferiores, con estribo de ½" cada 0.15m, teniendo en uno de sus extremos fijaciones cada 0.30m:

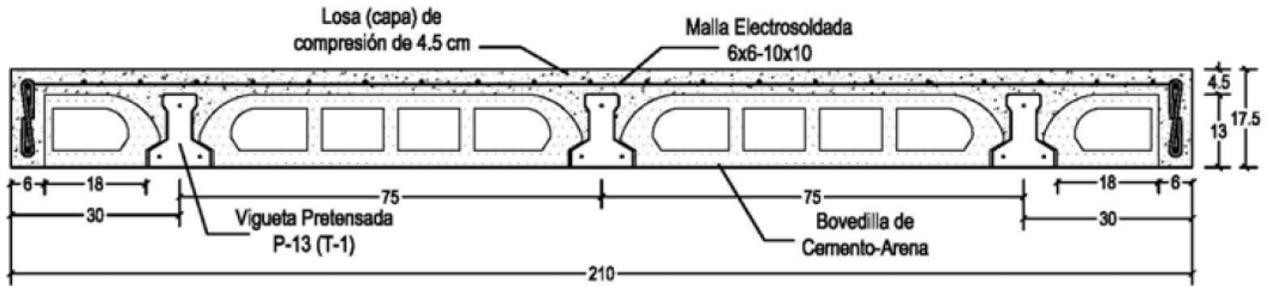


Modelo 1

b) Modelo 2



Modelo 3



Modelos 1 y 2

Sección transversal de modelos 1 y 2.

Figura 10: Configuración geométrica de los modelos de vigueta y bovedilla y losa maciza con sección típica. (Giulio A. León Flores, Oscar López Batiz, 2008)

3.1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

MODELO 1: Diafragma compuesto de vigueta y bovedilla de concreto, con las viguetas dispuestas de forma perpendicular a la dirección de aplicación de la carga de los gatos 1 y gato 2, la loseta superior es de 0.045m de espesor, malla

electrosoldada de 6"x6" de espaciamiento y calibre de 3.42 mm en ambas direcciones y con f_y igual a 600 MPa, confinada lateralmente por dos viguetas de .20mx .30m, en las cuales se apoyan las viguetas y bovedillas.

MODELO 2: Diafragma compuesta de vigueta y bovedilla en concreto, con viguetas dispuestas de forma paralela a la dirección de aplicación de las cargas de los gatos 1 y gato 2, la loseta superior es de 0.045m de espesor, malla electrosoldada de 6"x6" de espaciamiento y calibre de 3.42 mm en ambas direcciones y con f_y igual a 600 MPa, confinada lateralmente por dos viguetas de .20mx .30m.

MODELO 3: Diafragma de losa maciza de concreto reforzado, de 0.12 m de espesor, refuerzo inferior de 3/8" cada .25m, refuerzo superior de 3/8" cada .50m, confinada lateralmente por dos viguetas de .20mx .30m.

Las propiedades de los materiales se relacionan en la Tabla 2, donde f'_c corresponde a resistencia del concreto de las vigas de carga, losa y viguetas pre-esforzada y f_y es la resistencia a la fluencia del refuerzo longitudinal de la viga, losa y refuerzo transversal:

Tabla 2: Propiedades de los materiales.

ELEMENTO	MATERIAL
Concreto de vigas de carga y losa de compresión	$f'_c = 25$ MPa
Concreto de la vigueta pre-esforzada	$f'_c = 40$ MPa
Acero longitudinal en vigas y en losa maciza	$f_y = 412$ MPa
Acero de refuerzo en losas de vigueta y bovedilla	$f_y = 600$ MPa
Acero transversal en vigas	$f_y = 253$ MPa

En la Figura 11 se presenta una fotografía tomada durante el vaciado del modelo 1 de vigueta y bovedilla, en la cual se observa la escala del modelo.



Figura 11: Vaciado de concreto con modelo de vigueta y bovedilla en concreto.(ANIVIP, 2012) –información suministrada por el laboratorio).

3.1.3. INSTRUMENTACIÓN DE ENSAYOS

Los ensayos se realizaron para evaluar la rigidez y comparar el comportamiento de los modelos de diafragma de vigueta–bovedilla, respecto el modelo de diafragma de losa maciza, para ello, se emplea una instrumentación externa, y, se prescinde de medidores de deformación en el acero de refuerzo.

La instrumentación estudió la deformación general en el plano de los modelos, además, de la deformación perpendicular al plano de estos.

3.4.3.1. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

En uno de los extremos se implementó un recubrimiento de mortero de 15 mm en el apoyo de la viga perimetral de la losa, que se dejó fraguar durante 24 horas. Esta viga fue fijada por dos barras post–tensadas como se muestra en la Figura 12. En la viga del otro extremo, se colocaron 2 placas de teflón sobrepuestas, entre la losa de reacción del laboratorio y el modelo, para tener un movimiento libre en este extremo de los diafragmas. Igualmente se dispuso una placa metálica de 10”x10”x1”, en el extremo de la losa para distribuir homogéneamente la carga de los gatos hidráulicos.

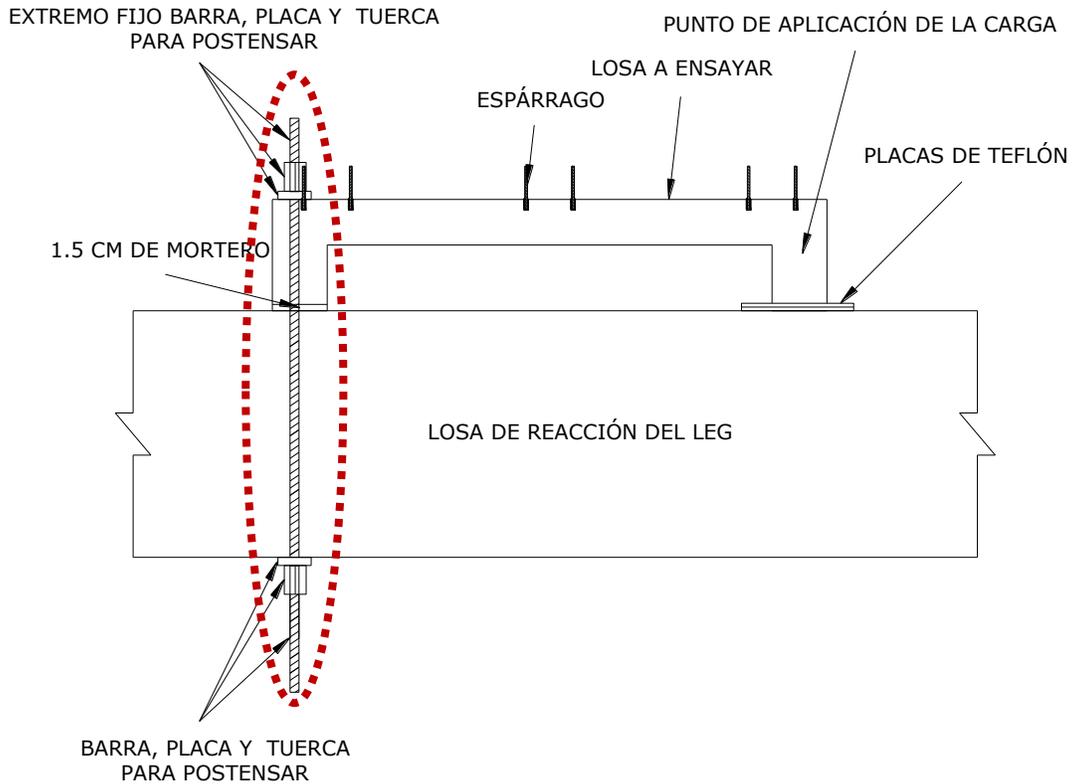


Figura 12: Corte longitudinal de los modelos pruebas flexión-cortante.

Se realizó una demarcación con una cuadrícula de 0.25m de largo y ancho, la cual tenía como punto (0,0), el centro de los modelos, para identificar adecuadamente la localización de los agrietamientos. Posteriormente se realizaron los anclajes con aditivo epóxico de los espárragos de 3/8" en la losa, a una profundidad de 300 mm, limpiados previamente. Ésta se dejó endurecer por 4 horas para instalar posteriormente los transductores para medir las deformaciones en cada modelo, como se muestra en la Figura 13:

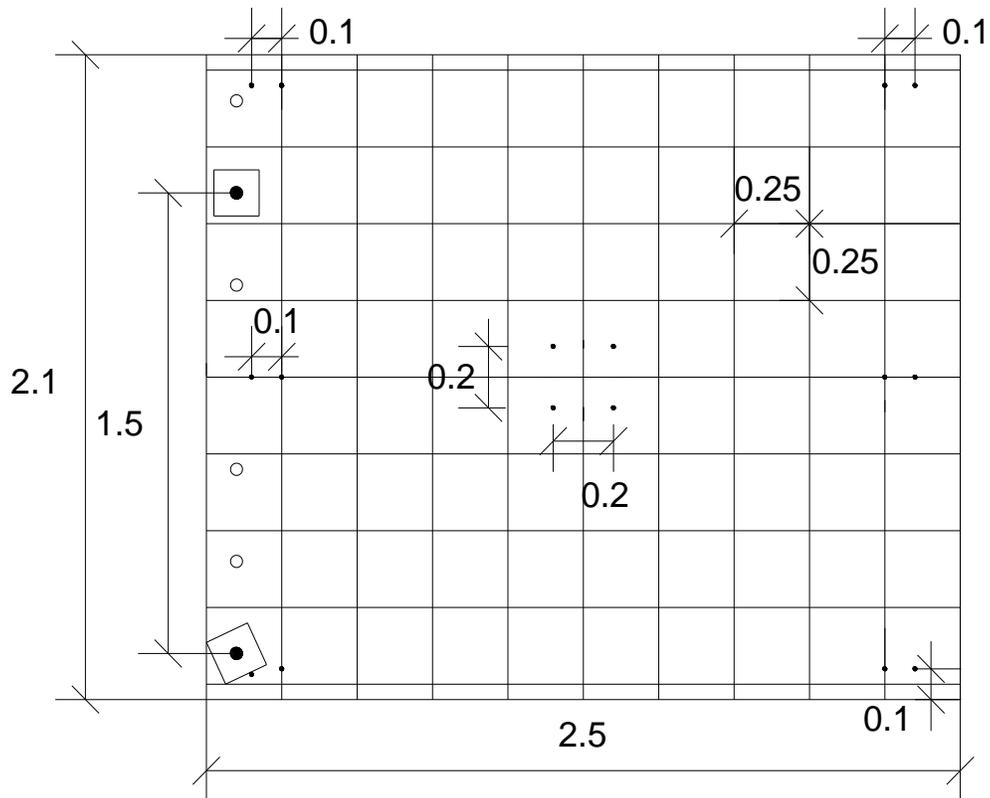


Figura 13: Esquema y medidas de la colocación de espárragos en los modelos.

3.4.3.2. GATOS HIDRÁULICOS DE CARGA

Se emplearon 3 gatos hidráulicos de 500kN: 2 gatos laterales en el extremo libre de movimiento de los modelos, en direcciones opuestas y colineales, fijados a través de vigas metálicas, que , a la vez se fijaron en la losa de reacción por medio de 4 barras postensadas a 300 kN, y un tercer gato en dirección perpendicular al plano del diafragma, aplicando las cargas en el centro de este, de tal manera que se simulara la degradación de rigidez, debido a las condiciones reales de cargas estáticas, e instalado por medio de un pórtico de vigas metálicas como los muestra la Figura 14:

VIGA DE ACERO FIJADA
A LA LOSA DE REACCIÓN DEL LEG

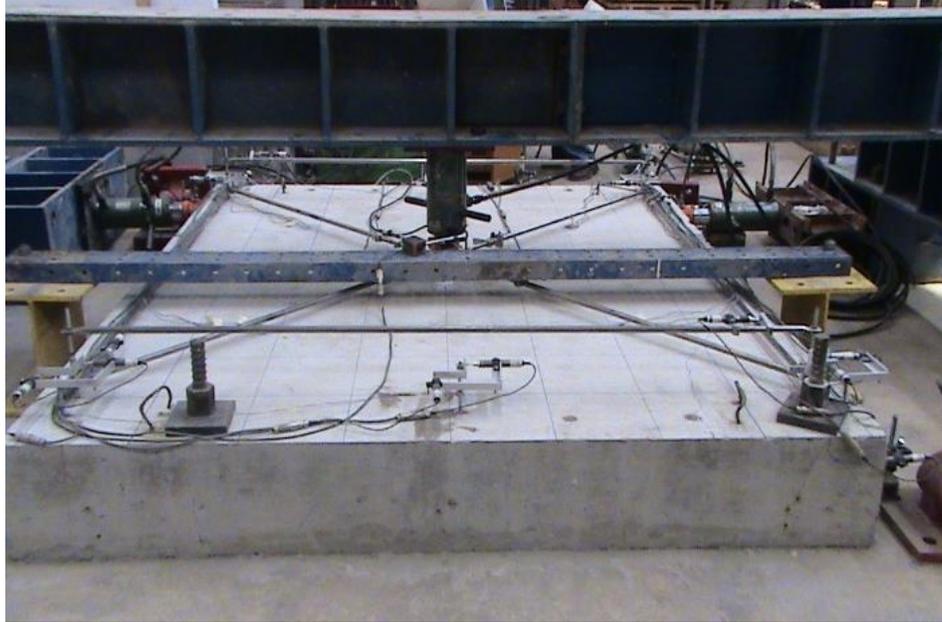
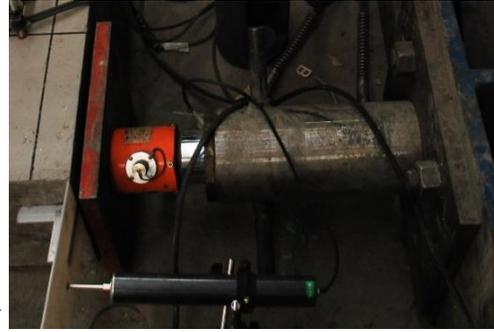
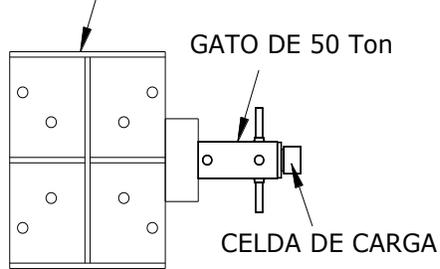


Figura 14: Dispositivo de aplicación de carga lateral.

En la Figura 15, se presenta el montaje del ensayo, en donde se aprecia los soportes fijos del diafragma de concreto en un extremo y los gatos de carga 1 y 2 en el otro extremo, además del gato 3 en el centro del diafragma. Igualmente se observan dos perfiles metálicos laterales que soportan los gatos 1 y 2, y el perfil metálico central que sirve para cargar el gato 3:

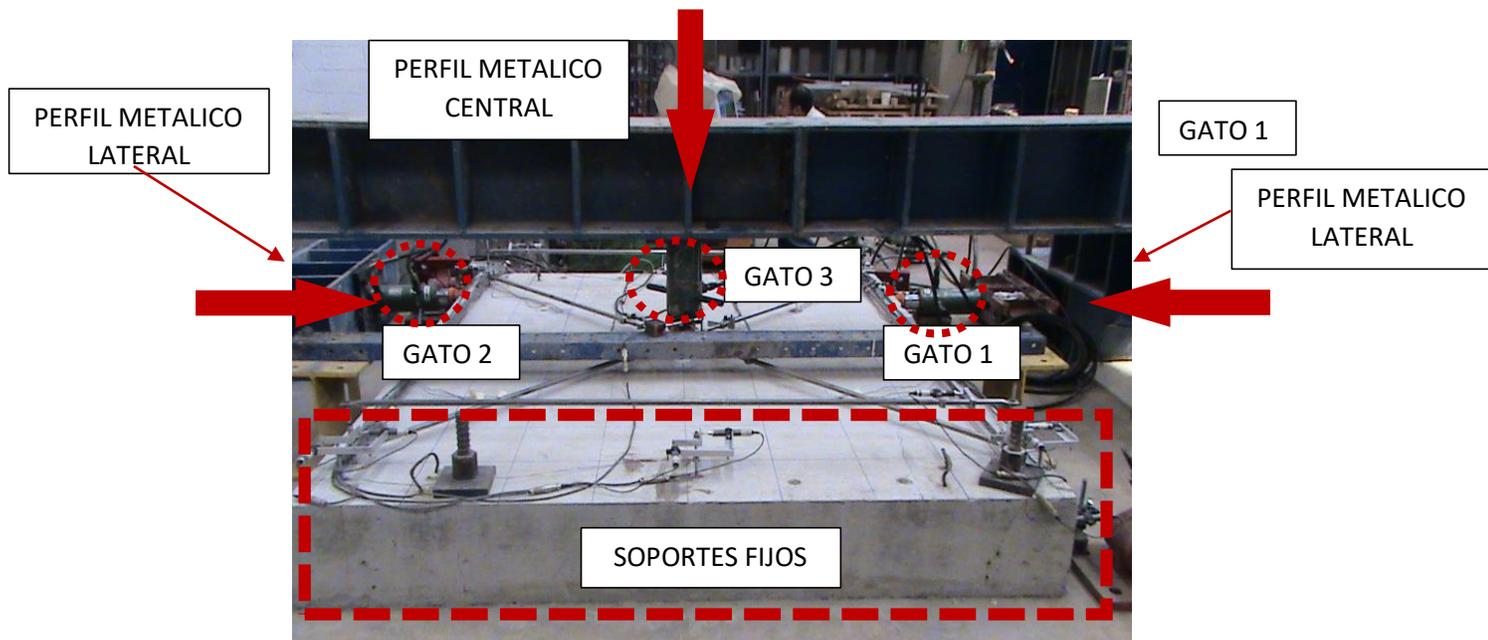


Figura 15: Esquema de carga de modelos.

3.4.3.2.1. CARGAS VERTICALES.

La aplicación de carga vertical se realizó en el centro del diafragma, como se ve en la Figura 16 y tuvo como finalidad medir la rigidez fuera del plano, cuando los modelos se encontraban sin agrietamientos, también permitió registrar el cambio de la rigidez fuera del plano, una vez que cambia la rigidez lateral (en el plano), al aplicarle los ciclos de carga lateral cíclica reversible.



Figura 16: Aplicación de carga vertical a los modelos.

3.4.3.2.2. CARGAS LATERALES

Se aplicaron cargas laterales con la finalidad de estudiar el comportamiento de los diafragmas ante estas acciones, y poder extrapolar al caso de los efectos dinámicos debidos a sismo o viento. En la Figura 17 se muestra el gato hidráulico lateral:



Figura 17: Aplicación de carga lateral a los modelos.

3.4.3.3. INSTRUMENTACIÓN EXTERNA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO

Como se muestra en la Figura 18, se fija un extremo del diafragma y en el extremo opuesto, se dispone los gatos de carga, además, de los medidores de deformación contiguos a estos gatos. La instrumentación externa contó con ocho transductores de desplazamiento lineal LVDTs (Linear Variable Differential Transducers) de 25mm denominados T3,T8,T11,T16,T17,T18,T19yT20, presentados en la

Figura 18:

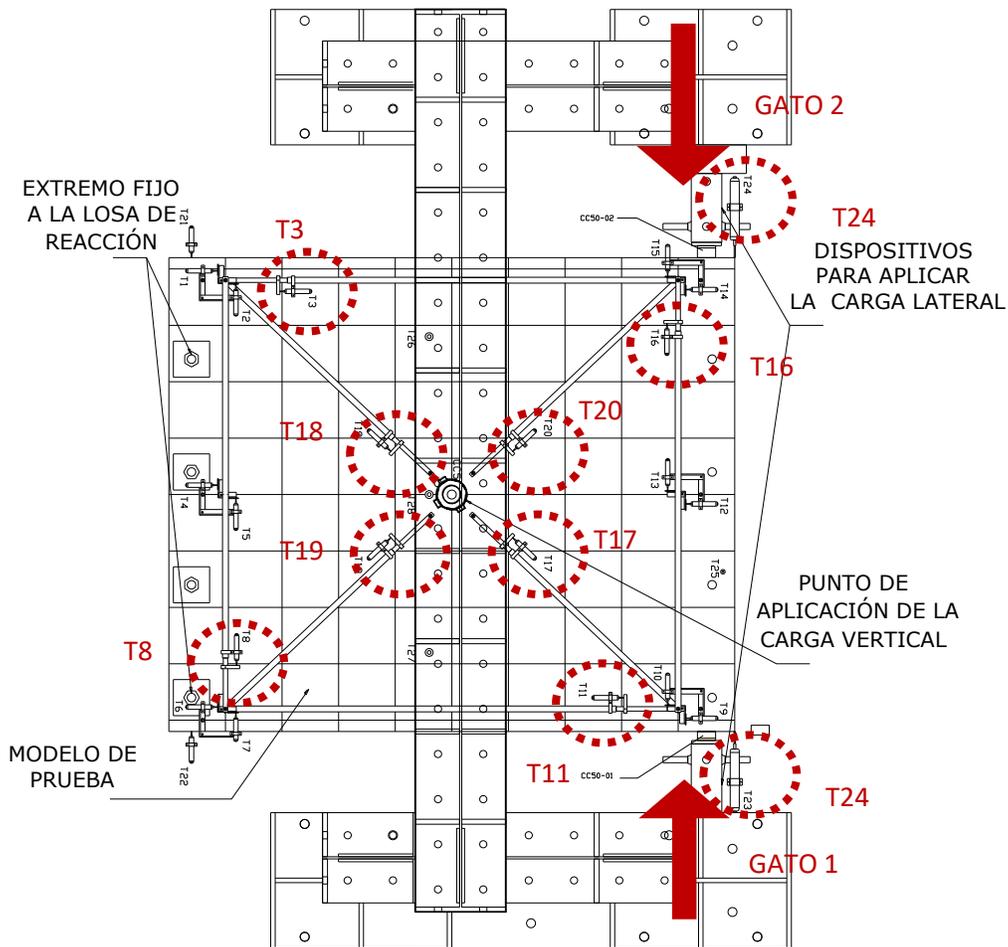


Figura 18: Prueba flexión-cortante. Representación esquemática del aparato de carga y dispositivo de instrumentación.

Estos transductores se acondicionaron por medio de perfiles cilíndricos de 5/8" sobrepuestos por tubos huecos de 3/4", prensados en sus extremos en una longitud de 40mm, consecuentemente se perforó y se insertó el esparrago de 3/8" metálico, fijados anteriormente al modelo, con el objetivo de dejar un extremo articulado y libre de rotación como se muestra en la Figura 19:

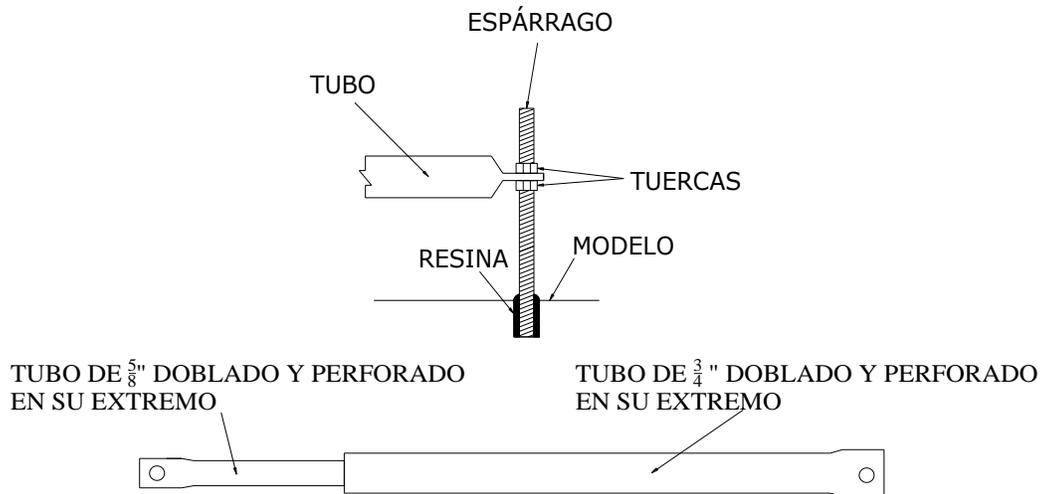


Figura 19: Esquema de tubos para colocar instrumentación.

Los transductores se instalaron por medio de placas de $\frac{1}{2}$ " de espesor, las cuales contaban con aberturas para introducir los tubos de $\frac{3}{4}$ " y de $\frac{5}{8}$ ", disponiendo un tornillo para apuntalar las placas a los tubos y así fijar la instrumentación, tal como se muestra en la Figura 20:

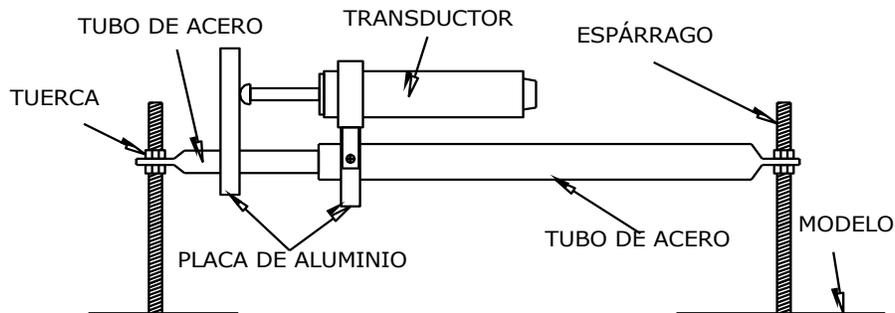


Figura 20: Colocación de la instrumentación sobre tubos de acero.

Los transductores se instalaron y fijaron en el tubo de $\frac{3}{4}$ ". En el tubo de $\frac{5}{8}$ " se instaló una placa de aluminio para restringir el movimiento del sensor del transductor, este registra tanto los movimientos positivos como negativos dados en el transductor.

Se instalaron igualmente 12 transductores más, denominados T1, T2, T4, T5, T6, T7, T9, T10, T12, T13, T14 y T15, como se muestra en la Figura 21:

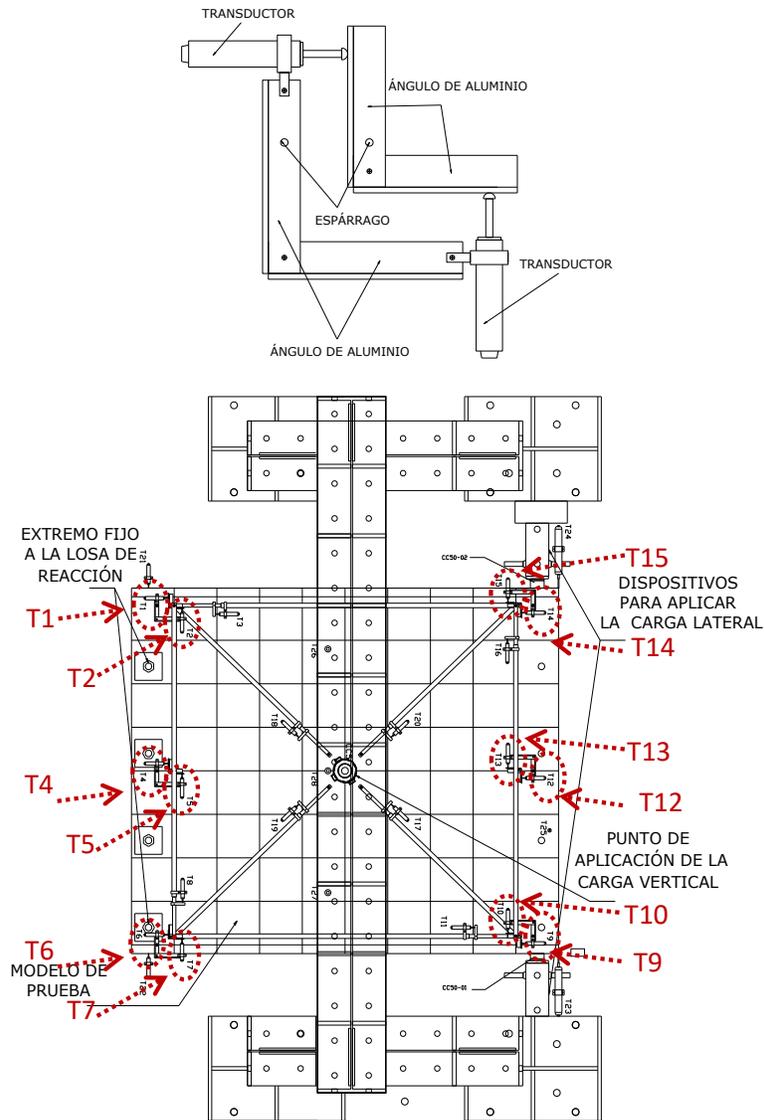


Figura 21: Esquema de ángulos de aluminio para colocar instrumentación.

Adicionalmente, se instalaron cuatro medidores externos en los modelos, dos de ellos de 25mm denominados T21 y T22 con el objeto de registrar posibles rotaciones de los modelos, y otros dos de 50mm denominados T23 y T24, presentados igualmente en la

Figura 18, ligados a los gatos de carga laterales tal como se muestra en la Figura 22:

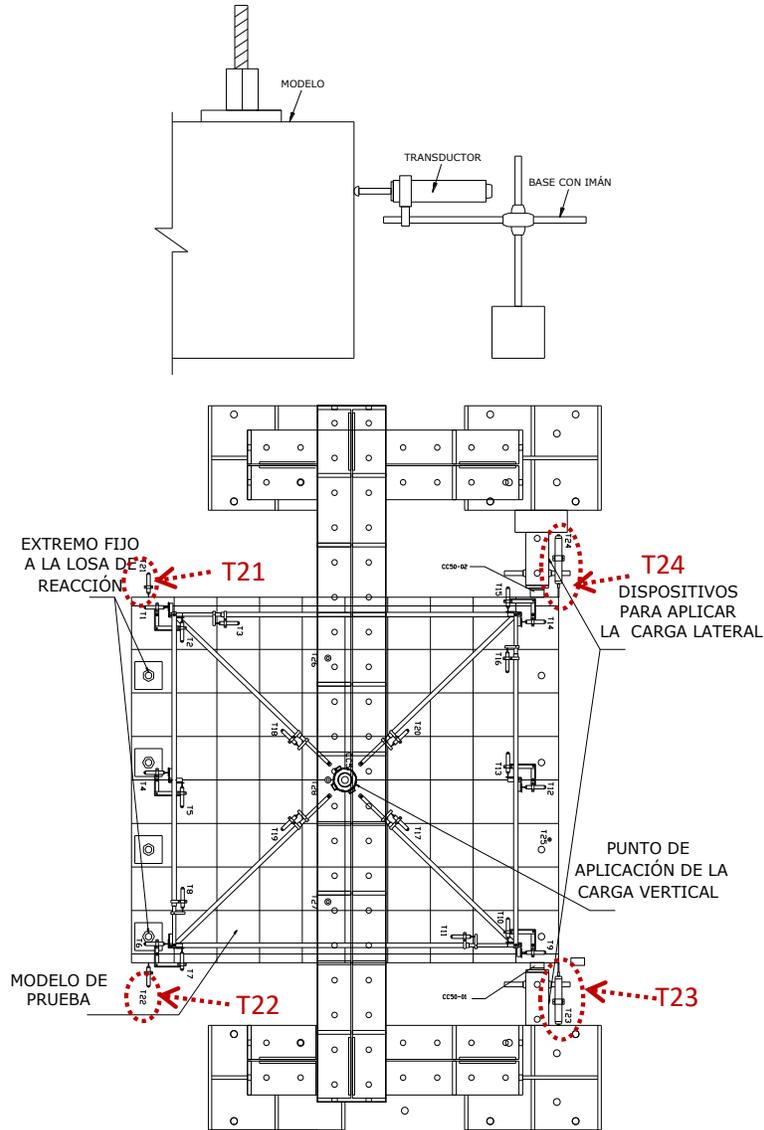


Figura 22: Vista lateral de colocación de instrumentación.

Cuatro transductores más de 50mm y uno de 25 mm denominados T25, T26, T27 y T28, se instalaron en dirección de registro perpendicular al plano de los modelos. Los tres transductores de 50mm tenían la finalidad de registrar las deflexiones asociadas a las cargas del gato vertical a los modelos, y el transductor de 25mm tenía la finalidad de medir si existía pandeo a la hora de aplicar las cargas laterales según se muestra en la Figura 23:

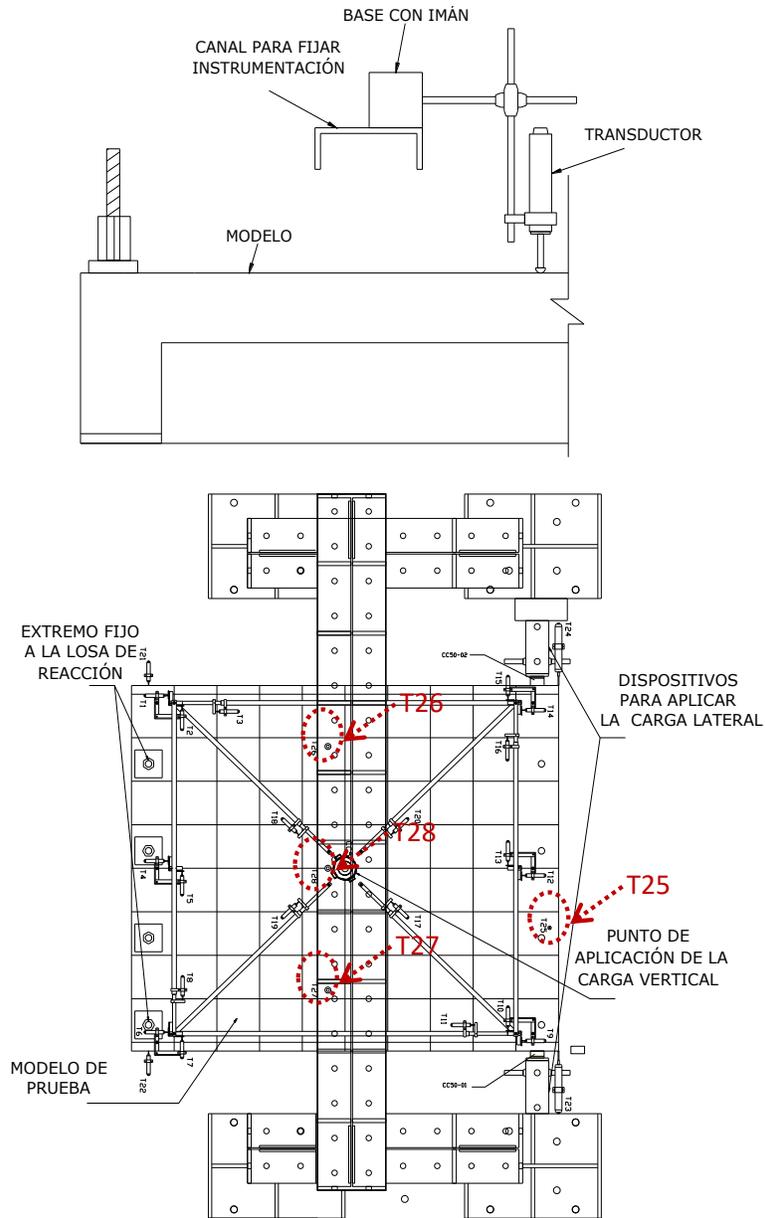
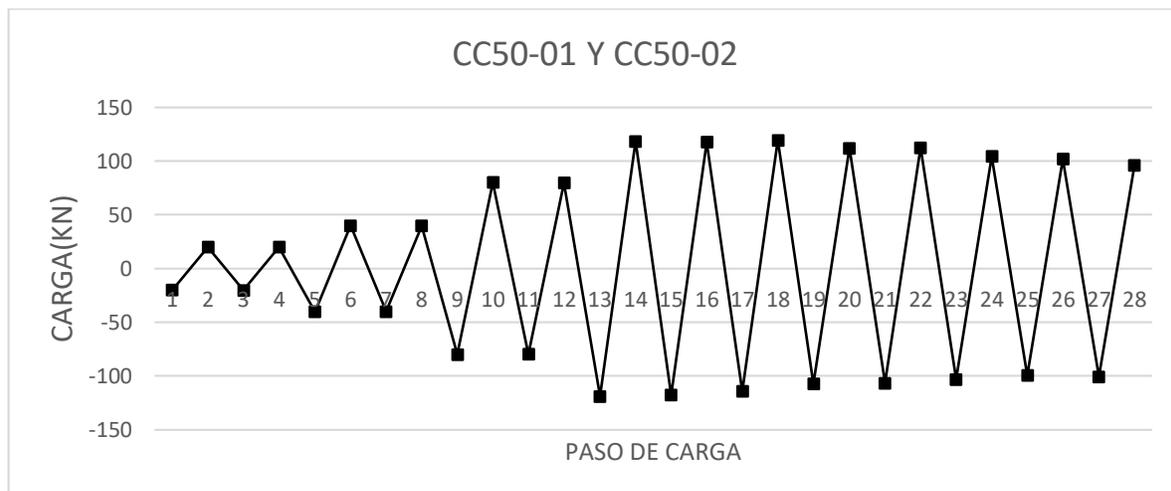


Figura 23: Esquema y fotografía de colocación de instrumentación y equipos de aplicación de carga.

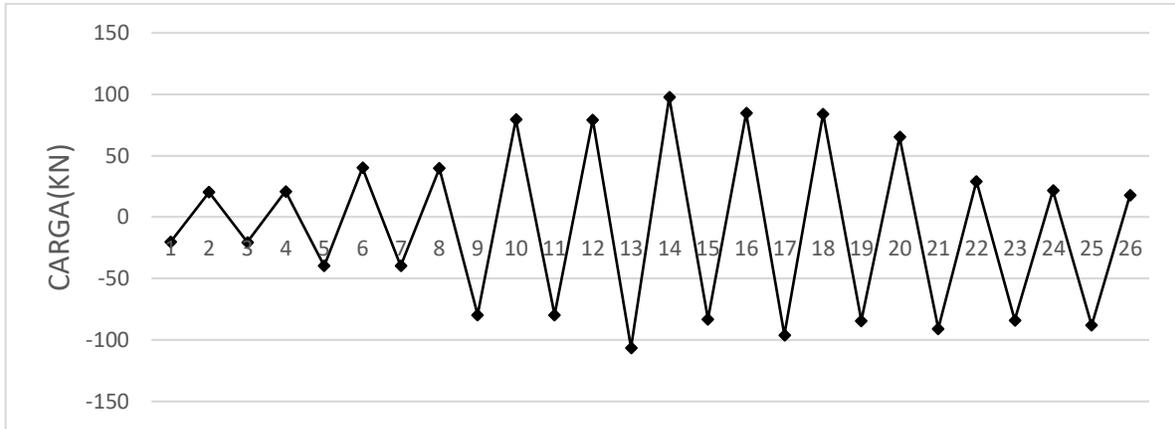
3.4.4. HISTORIA DE CARGA DE LA PRUEBA A FLEXIÓN-CORTANTE

La historia de carga para la prueba, fue cíclica reversible en el plano con los gatos 1 y 2, y para el gato 3, perpendicular al plano del modelo, sólo se le aplicó una carga monotónica (semi-ciclos de amplitud máxima de 20 kN), todas las cargas tanto verticales como horizontales se le aplicaron dos veces a cada modelo. Primero se aplicó una carga vertical, es decir, la carga perpendicular al plano del diafragma con incrementos de 5 kN hasta llegar a los 20 kN, luego se descargó completamente, posteriormente se aplicaron los ciclos de carga lateral hasta llegar a 40 kN, nuevamente se aplicaron los dos ciclos de carga vertical y se reanudo la aplicación de carga lateral hasta llegar a 80 kN.

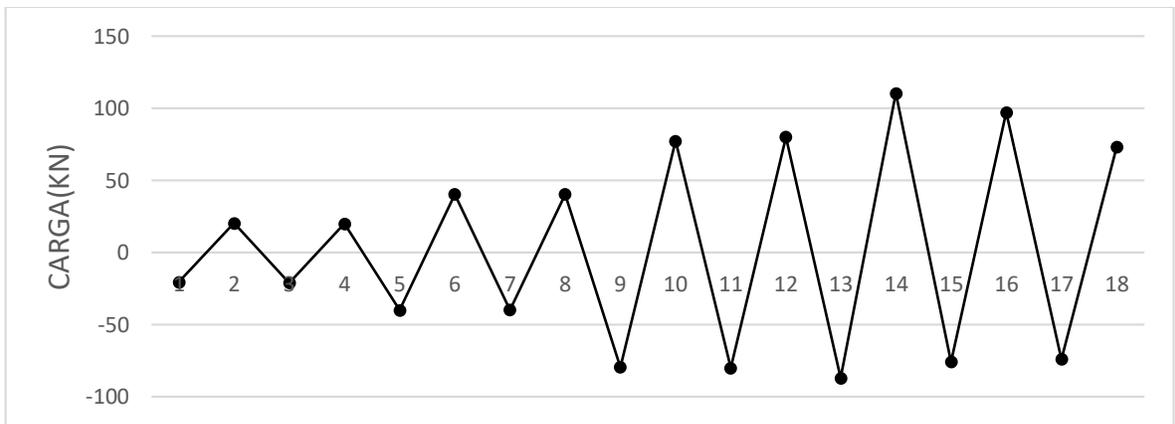
Se presenta el registro de cargas asociados a los gatos 1 y 2, siendo el registro del gato 1 positivos y el registro del gato 2 negativos. La Figura 24 a) corresponde al modelo 1 con diafragma prefabricado, la Figura 24 b) corresponde al modelo 2 igualmente con diafragma prefabricado, y la Figura 24 c) corresponde al modelo 3 del espécimen con losa maciza:



a) registro de carga de modelo 1



b) Registro de carga de modelo 2

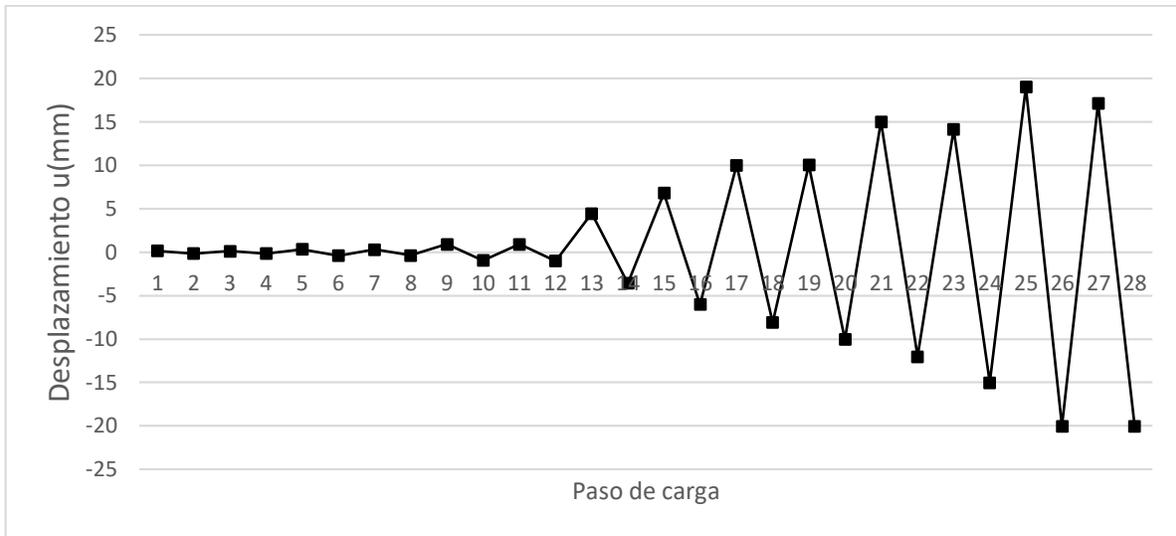


c) Registro de carga de modelo 3

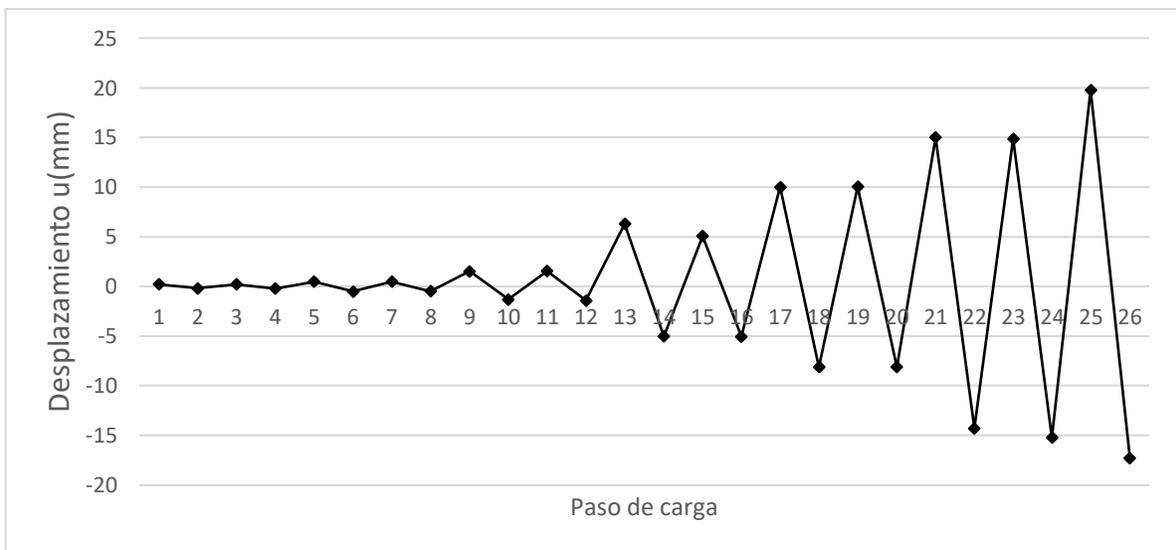
Figura 24: Historia de carga modelo 1, modelo 2 y modelo 3.

3.4.5. RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTO

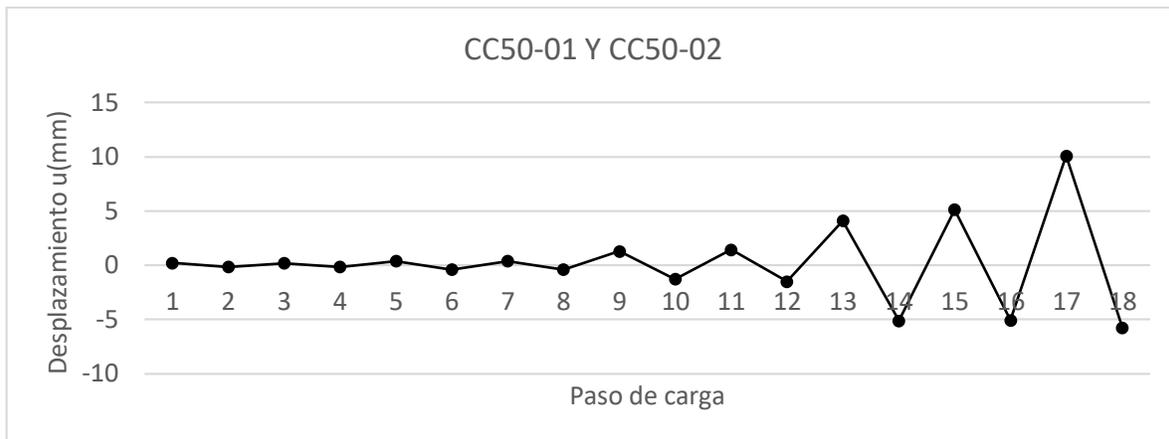
En la Figura 25, se presenta el protocolo de desplazamiento, ligadas a los transductores 23 y 24 respectivamente, en cada paso, con las cargas resultantes asociadas a los gatos 1 y 2 del modelo 1, modelo 2 y modelo 3:



A) Registro de desplazamiento paca cada paso de carga del modelo 1



B) Registro de desplazamiento paca cada paso de carga del modelo 2



C) Registro de desplazamiento para cada paso de carga del modelo 3

Figura 25: Desplazamiento asociado a cada ciclo de carga del modelo 1, modelo 2 y modelo 3.

4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Se presenta los resultados de la información obtenida de la instrumentación en los modelos ensayados y el comportamiento observado de los modelos ensayados:

4.1. CICLOS HISTERÉTICOS DE LOS MODELOS

Se presenta la comparación del comportamiento histerético de cada uno de los modelos respecto los transductores 3, 8, 11, 17, 18, 19, 20 y 24. La información analizada corresponde a información que no ha sido analizada, y, que la ANIVIP suministro para emplearla en los procesos de investigación, de los que hace parte este trabajo:

4.1.1. RESULTADOS TRANSDUCTOR 24

En la Figura 26, se muestra la ubicación del transductor 24, que permitió medir externamente los desplazamientos paralelos a la aplicación de las cargas mediante los gatos 1 y 2 :

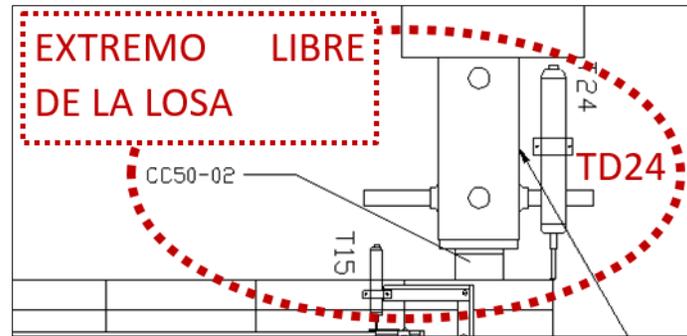


Figura 26: Ubicación transductor 24.

En la Figura 27, se muestran los ciclos histeréticos para los modelo 1, modelo 2 y modelo 3, asociados al transductor 24. Como se observa el modelo 1 tiene ciclos constantes, y, el punto de fluencia corresponde a una carga 80kN, con un desplazamiento de -0.73mm bajo la carga del gato 2, llegando a tener un desplazamiento máximo de 20mm asociado a una carga de 95kN. En el modelo 2, se observa ciclos constantes con un punto de fluencia asociado a una carga de 80KN, para un desplazamiento de -1.47mm , bajo la carga del gato 1, y, teniendo un desplazamiento máximo de 20mm asociado a una carga de 88kN. En el modelo 3, se observa ciclos menos constantes que el modelo 1 y similares al modelo 2, con un punto de fluencia asociado a una carga 80KN para un desplazamiento de -1.38mm , bajo la carga del gato 1, y teniendo un desplazamiento máximo de 21 mm asociado a una carga de 55kN:

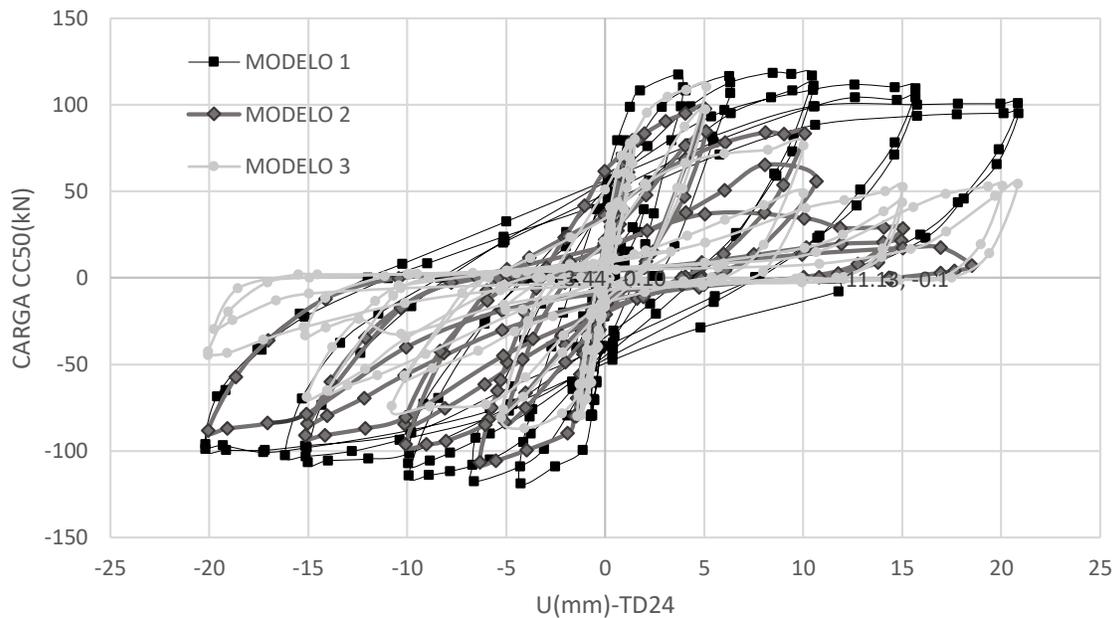


Figura 27: Ciclo histérico asociado al transductor 24 de los modelos.

4.1.2. RESULTADOS TRANSDUCTOR 3

Se muestra la ubicación del transductor 3, que permitió medir los desplazamientos internos de los puntos fijos, indicados en la Figura 28, adyacente a la superficie de aplicación de carga del gato 2 :



Figura 28: Ubicación transductor 3.

En la Figura 29, se muestran los ciclos histéricos para el modelo 1, modelo 2 y modelo 3, asociados al transductor 3. Como se observa, los modelos presentan ciclos donde la deformación es alrededor de 1mm, y el agrietamiento aparece

alrededor de los 2mm. En el modelo 1 se observa una deformación máxima de 1mm, para el modelo 2 se observa una deformación máxima de 5mm y para el modelo 3 una deformación máxima de 12mm, para esta franja del diafragma. Al comparar la deformación total del transductor 3 del modelo 3, respecto los modelos 1 y 2 de diafragma prefabricado, se encuentra que en el modelo 3, y el modelo 2, hay un agrietamiento similar en el paso 152 y 142 respectivamente, con una deformación de 1mm, y, desde este punto las deformaciones empiezan a aumentarse más abruptamente en el modelo 3.

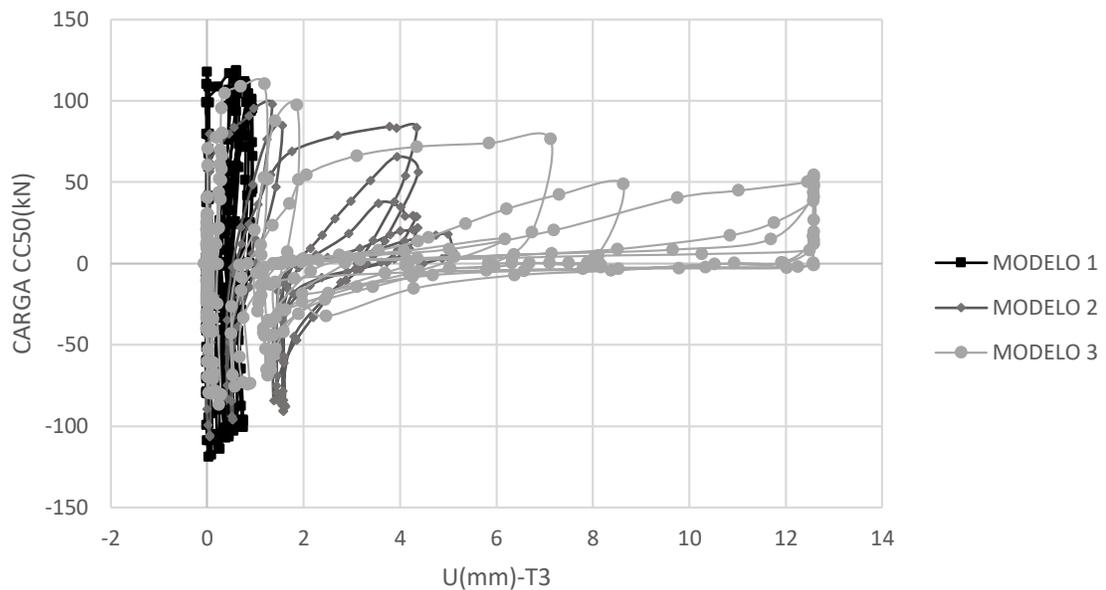


Figura 29: Ciclo histérico asociado al transductor 3 de los modelos.

Para mayor claridad se grafica la respuesta obtenida para el deformímetro 3 en el modelo 1, en el cual se observa en el paso 159 un agrietamiento del diafragma, que se referencia en la Figura 30, en donde se observa un incremento abrupto en la medición registrada, y, el cambio de un comportamiento elástico a plástico del diafragma.

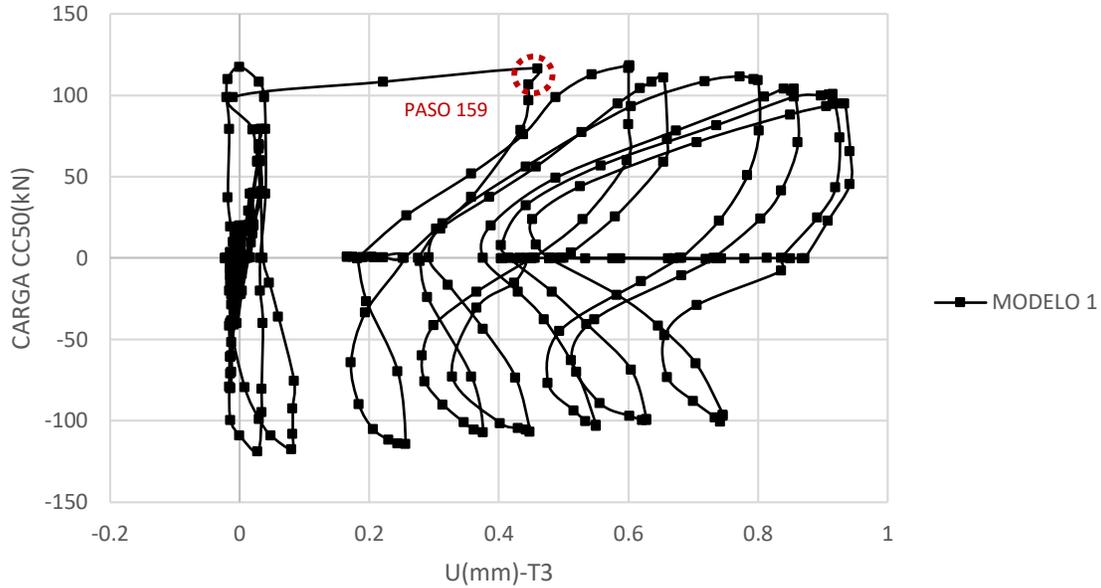


Figura 30: Ciclo histerético modelo 1 asociado al transductor 3.

Igualmente se grafica la respuesta del modelo 2, donde se observa inicialmente ciclos de carga y deformación elástica, y, a partir de la aparición de la grieta visible, en el paso 142, se observa un aumento abrupto de las mediciones de desplazamientos registradas, como se muestra en la Figura 31:

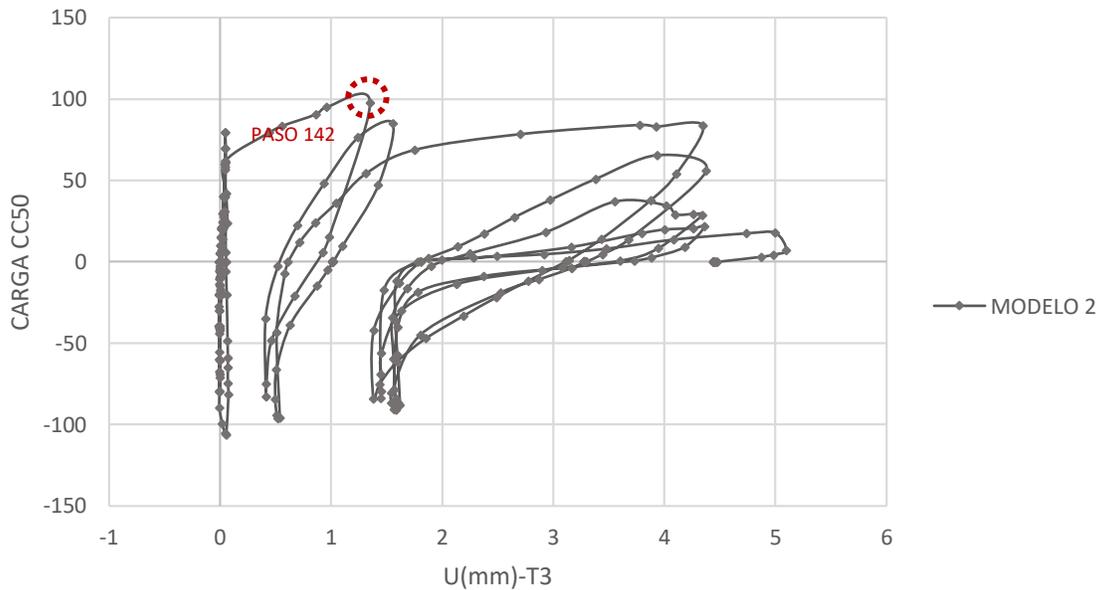


Figura 31: Ciclo histerético modelo 2 asociado al transductor 3.

Por último se grafica la respuesta del modelo 3 en la Figura 32, en este se referencia el paso de agrietamiento visible 152 , después de este paso las mediciones registradas aumentan abruptamente, siendo 230% mayor que la del modelo 1 :

:

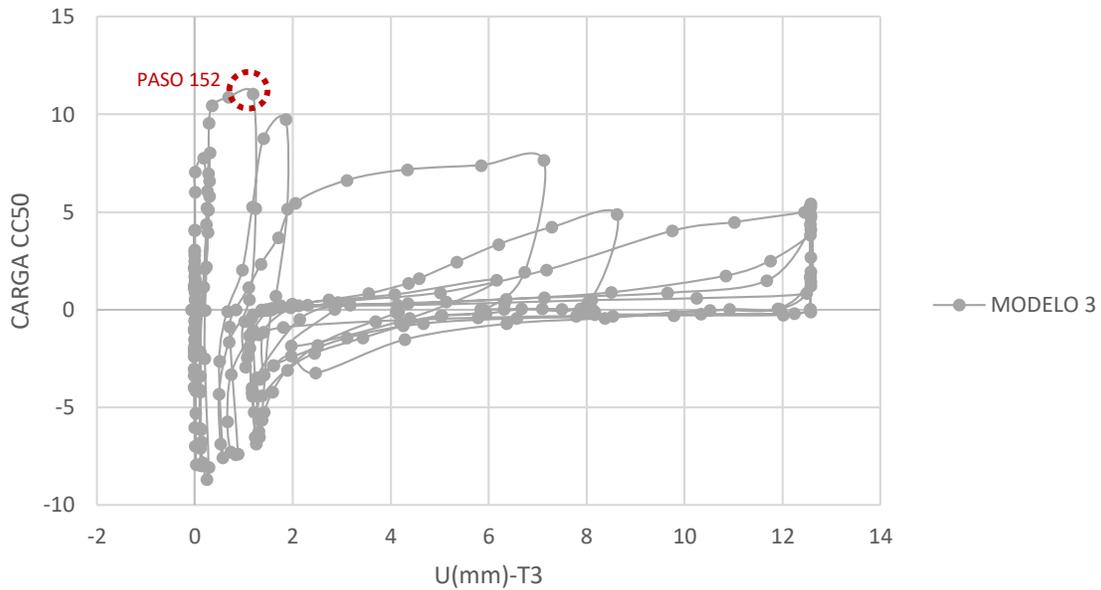
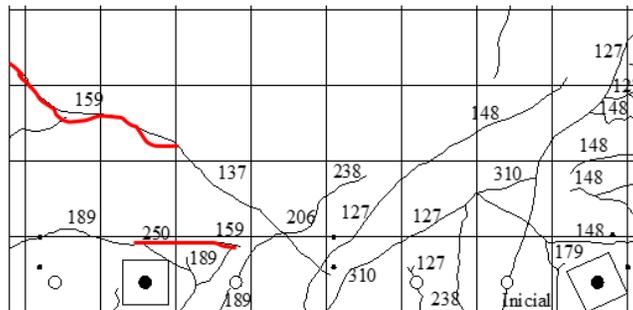


Figura 32: Ciclo histerético modelo 3 asociado al transductor 3.

En la Figura 33, se presenta a distribución de agrietamiento inicial visible entre el modelo 1, modelo 2 y modelo 3, asociado al transductor 3, en donde se observa una diferencia en la distribución de los agrietamientos internos.



a) Agrietamiento de modelo 1 prefabricada

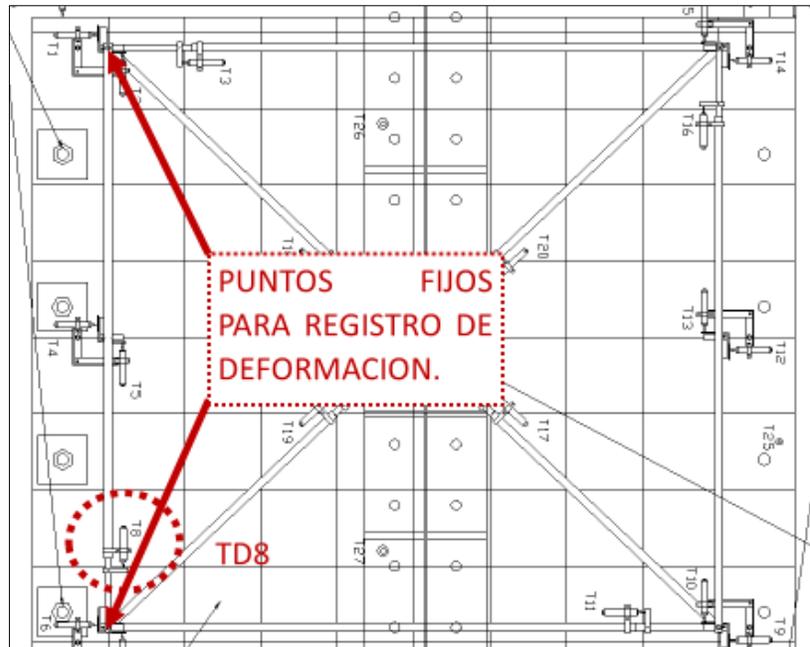


Figura 34: Ubicación transductor 8.

Los ciclos histéricos de los modelos asociados al transductor 8, se presentan en la Figura 35, estos son irregulares en todos los modelos, y, su deformación se da en el rango positivo, es decir, hay una elongación de esta franja. Se observa en el modelo 1 que la deformación máxima llega a 2mm, en el modelo 2 la deformación máxima llega a 3mm y en el modelo 3 la deformación máxima llega a 8mm:

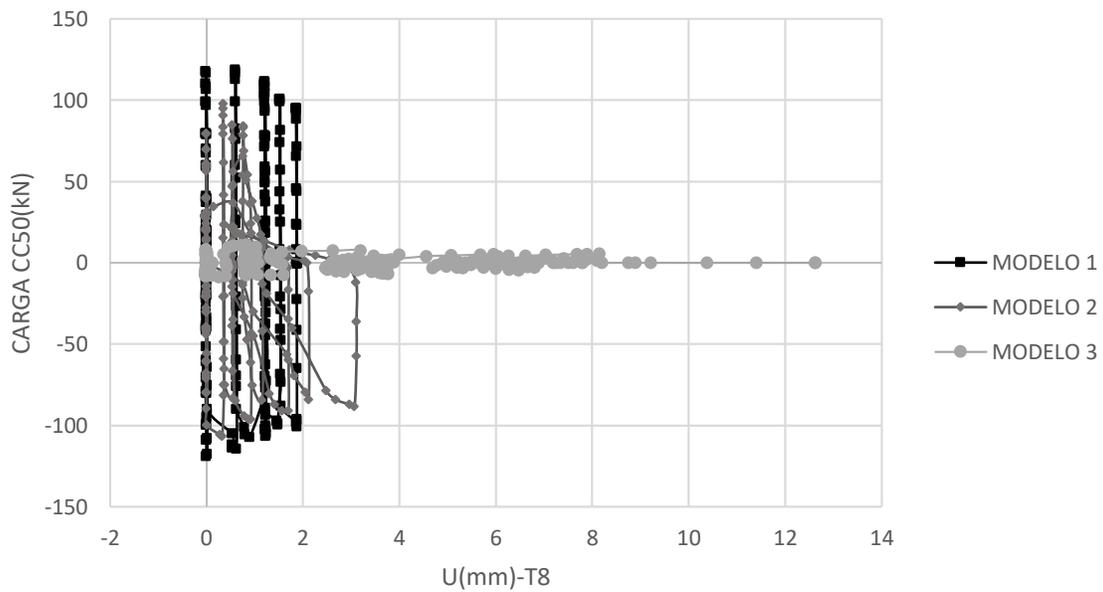


Figura 35: Ciclo histérico asociado a transductor 8 de los modelos.

4.1.4. RESULTADOS TRANSDUCTOR 11

Se muestra la ubicación del transductor 11 que permitió medir los desplazamientos internos de los puntos fijos indicados en la Figura 36, adyacente a la superficie de aplicación de carga del gato 1:



Figura 36: Ubicación transductor 11.

Los ciclos histeréticos de los modelos asociados al transductor 11 se presentan en la Figura 37, estos son irregulares en el modelo 3, contrario a lo observado en los modelos 1 y 2, las mediciones tienen un comportamiento en el rango elástico, hasta deformaciones de 0.5mm, a partir de este punto sucede el agrietamiento y un cambio abrupto en los modelos y se aumenta las deformaciones hasta 12mm.

La causa probable para que el modelo 3 no registre valores similares al modelo 1 y modelo 2, puede darse por la abertura de los puntos cercanos a la fijación del diafragma de losa maciza, registrado por el transductor 6, el cual presenta una deformación final de 13mm.

La deformación máxima presentada en el modelo 1 es de 6mm, la deformación máxima del modelo 2 es de 12mm, y la deformación máxima del modelo 3 es de 0.8mm:

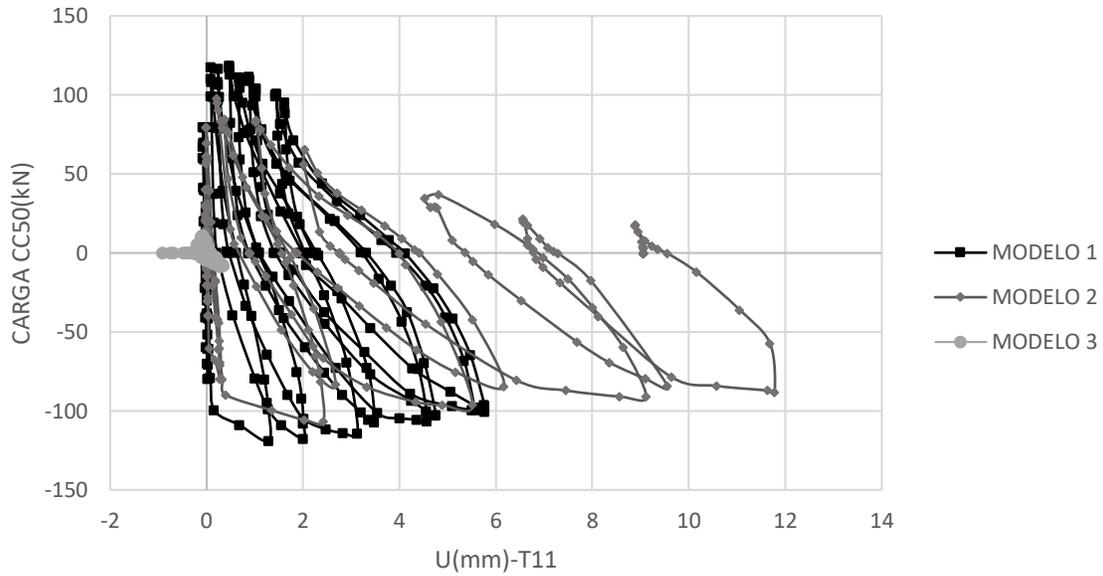


Figura 37: Ciclo histórico agrietamiento asociado a transductor 11 de los modelos.

Para mayor claridad se presenta la Figura 38 del modelo 1, donde se observa un agrietamiento visible de 1 mm en el paso 127, y un incremento abrupto en la medición registrada, y, el cambio de un comportamiento elástico a plástico del diafragma.

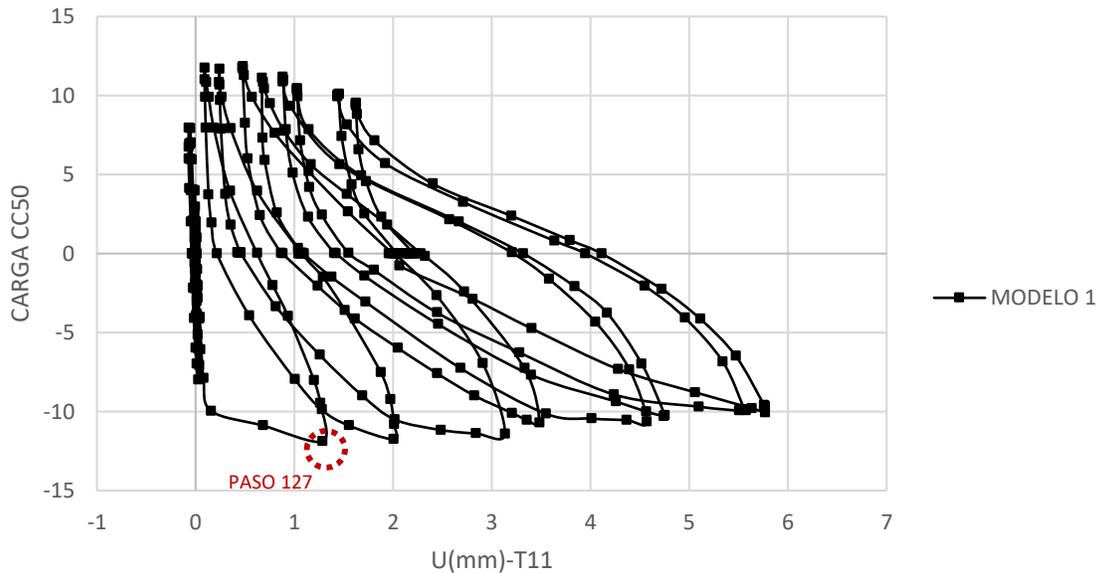


Figura 38: Ciclo histerético modelo 1 asociado al transductor 11.

Igualmente en el modelo 2, se observa la aparición de una grieta visible en el paso 126, la cual se refleja en el registro, con el cambio abrupto de las mediciones de la respuesta del diafragma en el paso 126, asociada a una deformación de 2.0mm, como se muestra en la Figura 39:

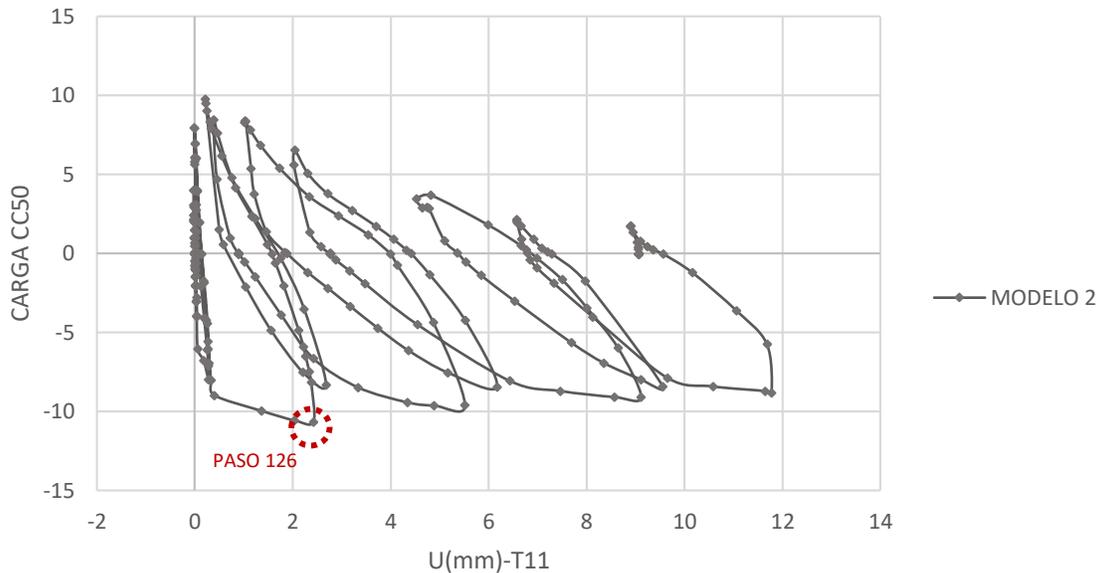


Figura 39: Ciclo histerético modelo 2 asociado al transductor 11.

Cabe anotar que, ante iguales ciclos de carga, y, para el mismo paso, se presentan deformaciones diferentes entre el modelo 1 y modelo 2, siendo, en el paso 126, de 1 mm en el modelo 1 y de 2 mm para el modelo 2.

En la Figura 40, se observa que el agrietamiento del modelo 3 es mucho menor respecto las deformaciones dadas para los modelos 1 y modelo 2, siendo 0.20mm la deformación asociada al agrietamiento del modelo 3 en el paso 144, y la máxima deformación registrada en todo el ciclo es de 0.80mm, lo cual porcentualmente representa el 10% de la deformación respecto el modelo 1 y el 5% respecto el modelo 2, tal como se observa en la Figura 40:

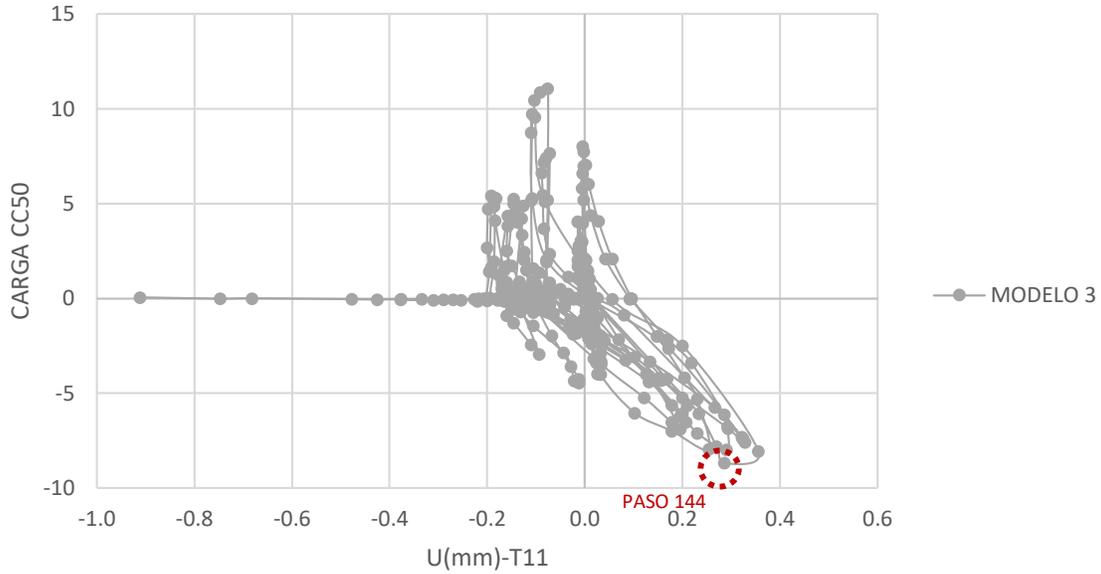
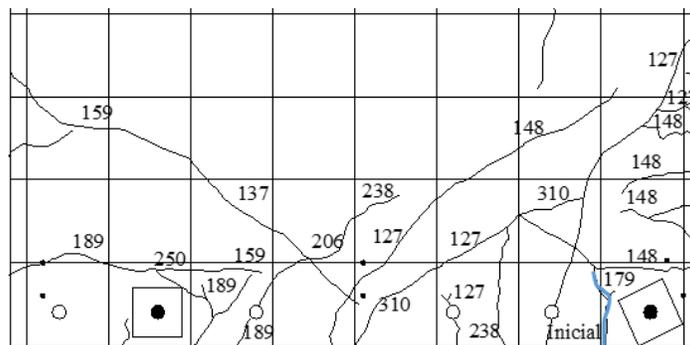


Figura 40: Ciclo histerético modelo 3 asociado al transductor 11.

Los agrietamientos iniciales visibles asociados al transductor 11 se comparan en las gráficas de la Figura 41, presentadas, para los modelos 1, modelo 2 y modelo 3 respectivamente, encontrando unos patrones de agrietamiento en un área de mayor influencia para el modelo 1 y de menor área en el modelo 3. Se observa una influencia de las viguetas y su dirección de disposición, en el agrietamiento de los diafragmas, siendo más grande el área de agrietamiento de las viguetas en la dirección perpendicular a la aplicación de cargas. Se observa que el agrietamiento, en el paso 126, se extiende en el modelo 1, en un área mayor respecto el modelo 2, en un 25% a 30%.



a) Agrietamiento de modelo 1 prefabricada

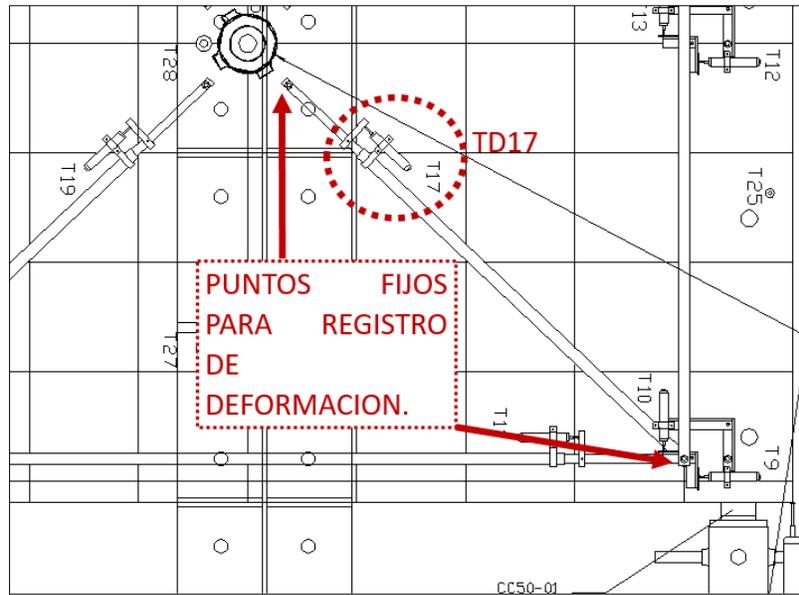


Figura 42: Ubicación transductor 17.

En la Figura 43, se presentan los ciclos histéricos obtenidos del transductor 17. Como se observa, el modelo 1 presenta mediciones hasta 0.2mm, donde se presenta un cambio súbito, y se registran mayores desplazamientos hasta su máximo desplazamiento de 1.4mm. En los modelos 2 y 3 se presenta ciclos irregulares y no registra valores representativos de su desplazamiento:

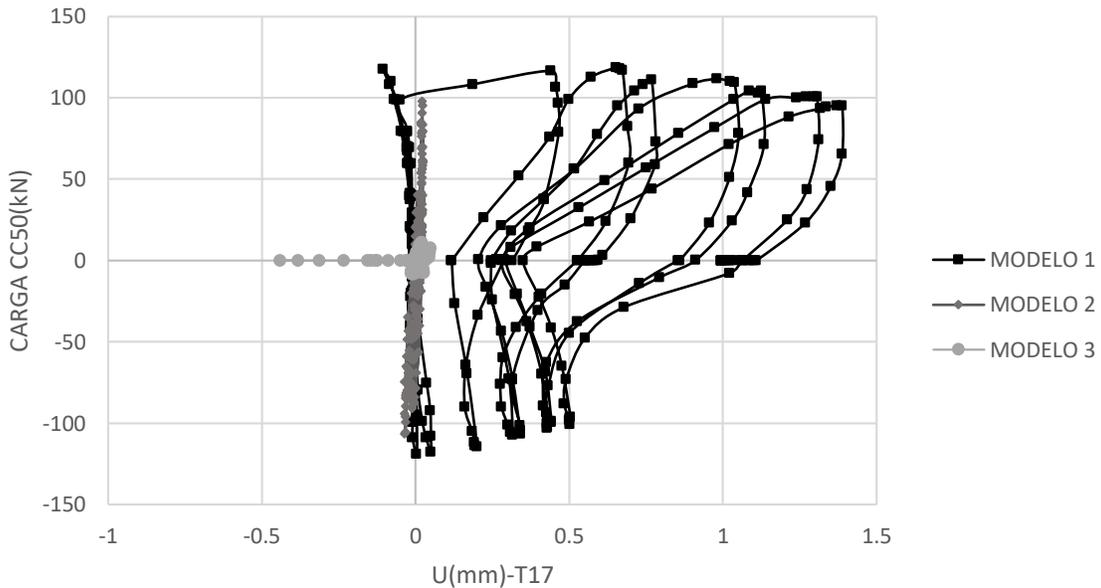


Figura 43: Ciclo histórico agrietamiento asociado a transductor 17 de los modelos .

4.1.6. RESULTADOS TRANSDUCTOR 18

En la Figura 44 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se ubica el transductor 18. Como se observa este mide diagonalmente las deformaciones asociadas a los diafragmas y sus puntos fijos se ubican en el centro del espécimen y en la esquina de fijación:

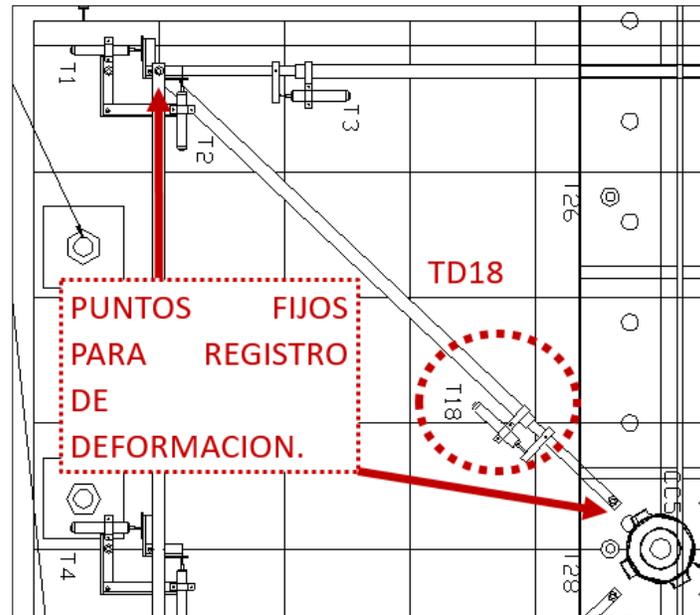


Figura 44: Ubicación transductor 18.

En la Figura 45, se presentan los ciclos histeréticos obtenidos del transductor 18. En el modelo 1 se observa ciclos irregulares y no se observa valores de desplazamientos importantes. La deformación máxima del modelo 2 es de 7mm y la deformación máxima del modelo 3 es de 14mm:

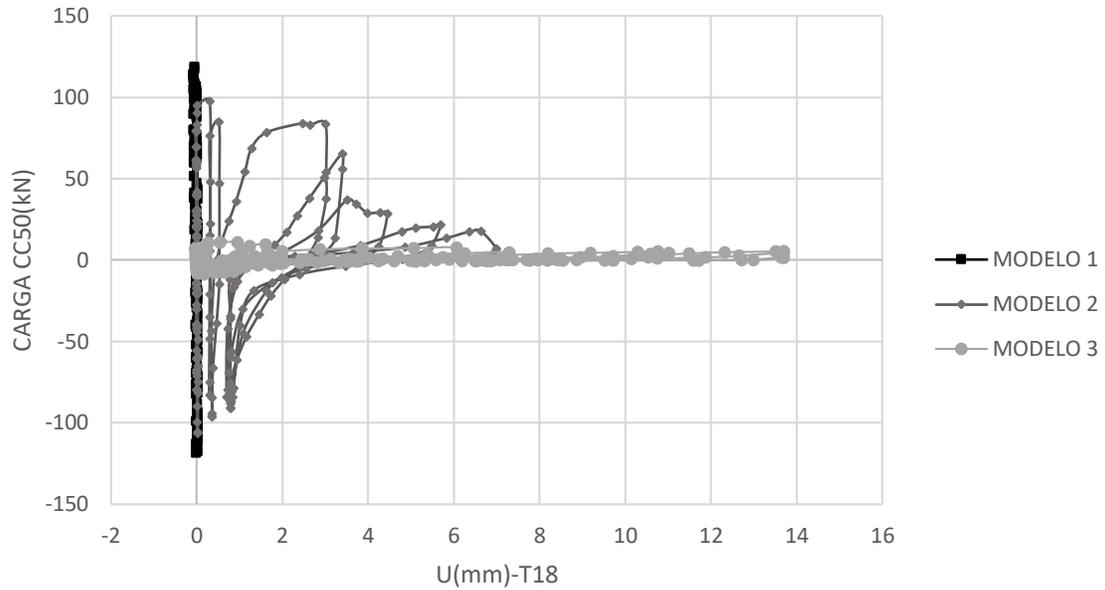


Figura 45: Ciclo histórico agrietamiento asociado a transductor 18 de los modelo.

4.1.7. RESULTADOS TRANSDUCTOR 19

En la Figura 46 se localiza el transductor 19. Como se observa este mide diagonalmente las deformaciones asociadas a los diafragmas y sus puntos fijos se ubican en el centro del espécimen y en la esquina de fijación:

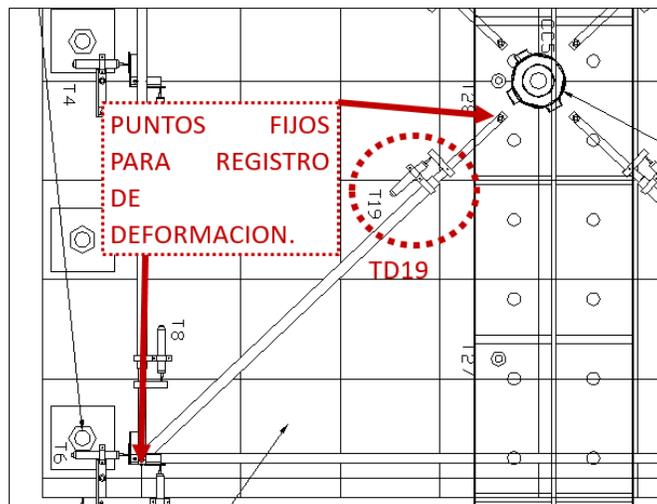


Figura 46: Ubicación transductor 19.

En la Figura 47, se presentan los ciclos histéricos obtenidos del transductor 19. Como se observa el modelo 1 tiene mediciones en el rango elástico hasta una deformación de 0.5mm, donde tiene un cambio súbito en los registros, siendo su máximo desplazamiento de 6mm. Igualmente, se observa que el modelo 2 presenta ciclos histéricos hasta registro de desplazamiento de 0.5mm, donde cambian su comportamiento súbitamente hasta un registro máximo de 12mm:

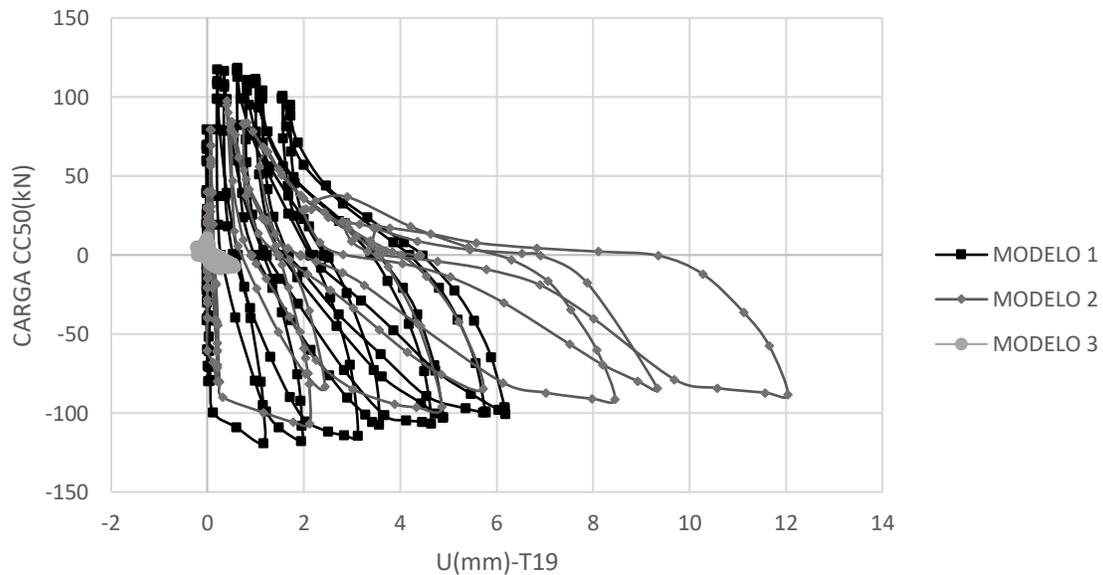
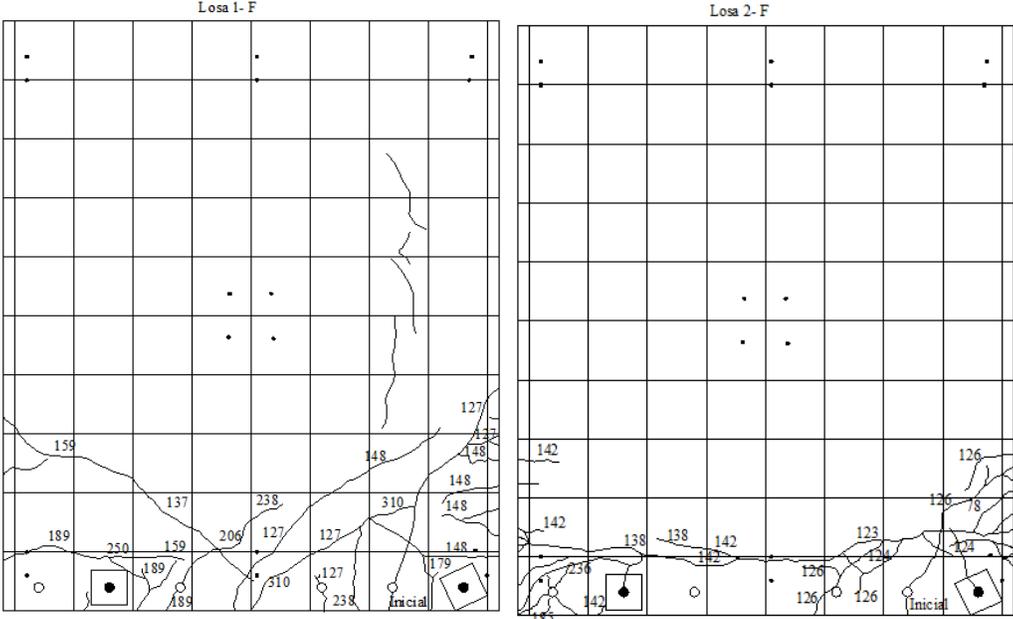


Figura 47: Ciclo histórico agrietamiento asociado a transductor 19 de los modelos.

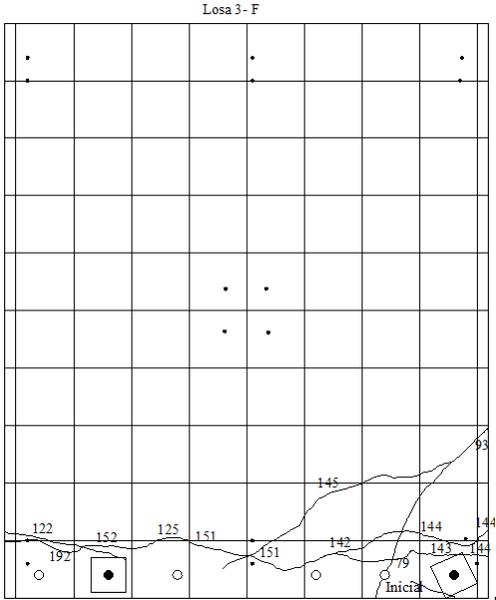
4.2. RESULTADOS DE AGRIETAMIENTO DE LOS MODELOS

En la Figura 48, se presenta el agrietamiento obtenido al final del ensayo para el modelo 1, modelo 2 y modelo 3, al ser sometida a la historia de cargas laterales y verticales descritas anteriormente. Se observa que el agrietamiento final de cada uno de los modelos se concentra en el costado fijo y difieren en cuanto a la

dirección y el área de influencia. Se observa que el agrietamiento es mayor en los modelos 1 y 2, de diafragma prefabricados, respecto el modelo 3 de losa maciza:



A) Agrietamiento final modelo 1 B) Agrietamiento final modelo 2



C) Agrietamiento final modelo 3

Figura 48: Agrietamiento final de los modelos.

En la Figura 49, se transpone la geometría de cada modelo con el agrietamiento final y la elongación máxima registrada de los transductores 3, 8, 11, 17, 18, 19 y 20.

Como se observa, las deformaciones máximas varían entre los modelos, y el agrietamiento en el modelo 2 y modelo 3 se concentra en la cara interna de la viga de confinamiento de 0.20x0.30.

Se resalta que se presenta un desplazamiento registrado por el transductor 6 del modelo 3, de 13mm, el cual sugiere una deformación adyacente a la fijación del diafragma.

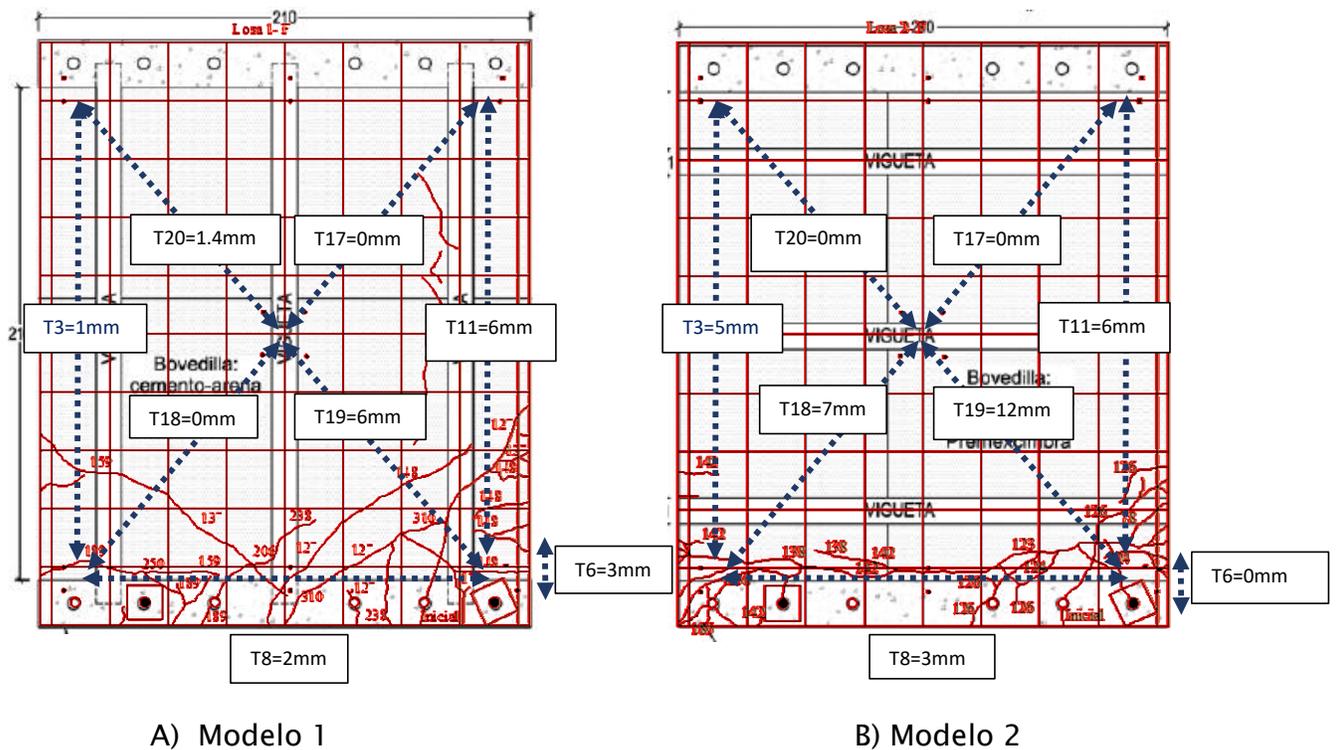
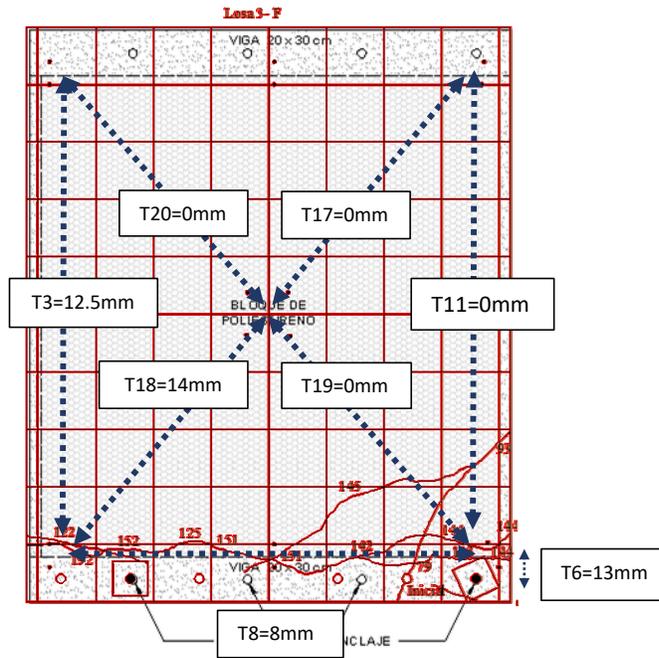


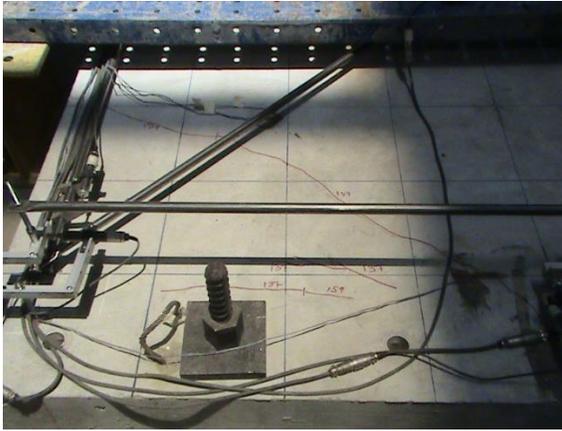
Figura 49: Elongación final de transductores 3, 8, 11, 17, 18, 19, 20 y agrietamiento final de los modelos ensayados.



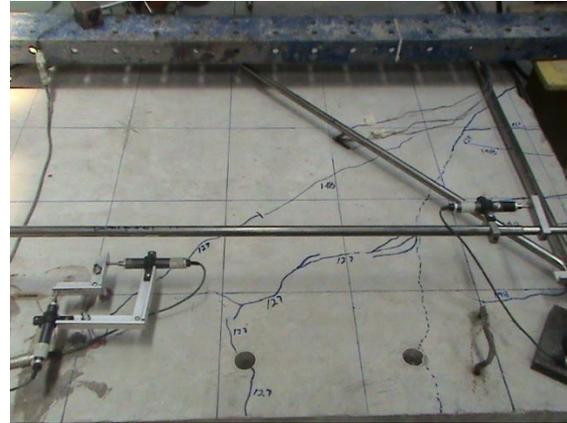
C) Modelo 3

Figura 49: Elongación final de transductores 3, 8, 11, 17,18,19,20 y agrietamiento final de los modelos ensayados.(continuación)

Se observa que, a medida que la rigidez de los modelos 1, 2 y 3 se degrada, el área de influencia del agrietamiento asociado es mayor en el modelo 1 y modelo 3, respecto el modelo 2 como se muestra en la Figura 50:



Modelo 1: Agrietamiento superior



Modelo 1: Agrietamiento superior

Figura 51: Agrietamiento en losetas superiores y bovedillas.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados observados y comentados en el capítulo 4. Se presenta el cálculo de la degradación de la rigidez, la comparación de la curvatura de los especímenes y las deformaciones por cortante y flexión.

5.1. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO HISTERETICO EN EL RANGO ELASTICO Y ENVOLVENTE

Lo modelos tienen un comportamiento elástico en los primeros pasos de carga, como se observa en la Figura 52, la pendiente del modelo 1 es levemente mayor respecto al modelo 2 y modelo 3, esto muestra una mayor rigidez del modelo 1 respecto a los otros dos tipos de estructuras:

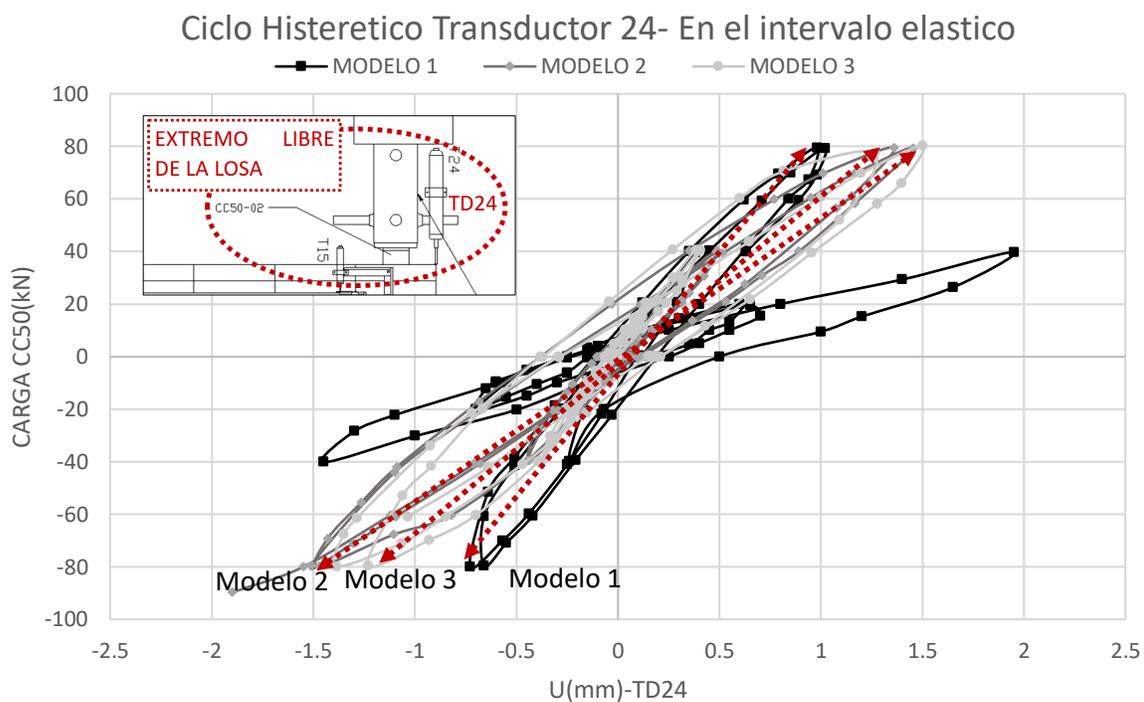


Figura 52: Ciclo histerético de modelo 1, modelo 2 y modelo 3.

Posteriormente en la Figura 53, se presenta la envolvente de los ciclos histeréticos para el modelo 1, modelo 2 y modelo 3, registrados a partir del transductor 24. Se especifica el punto de fluencia de los especímenes, donde se aprecia la similitud de valores de carga y de deformación con una pendiente en el rango elástico similar entre los modelos. La deformación del modelo 2 y modelo 3 son similares, y el modelo 1 presenta valores de deformación del 52% respecto el modelo 2. Como se observa la energía disipada por el modelo 1 es mayor respecto el modelo 2 y modelo 3.

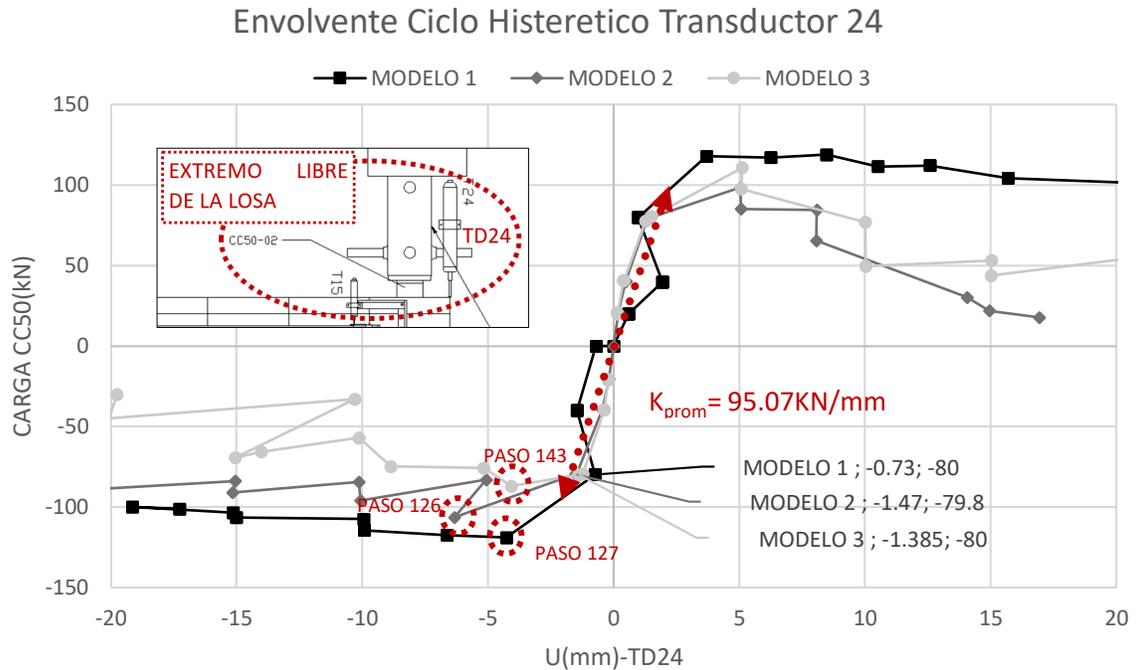
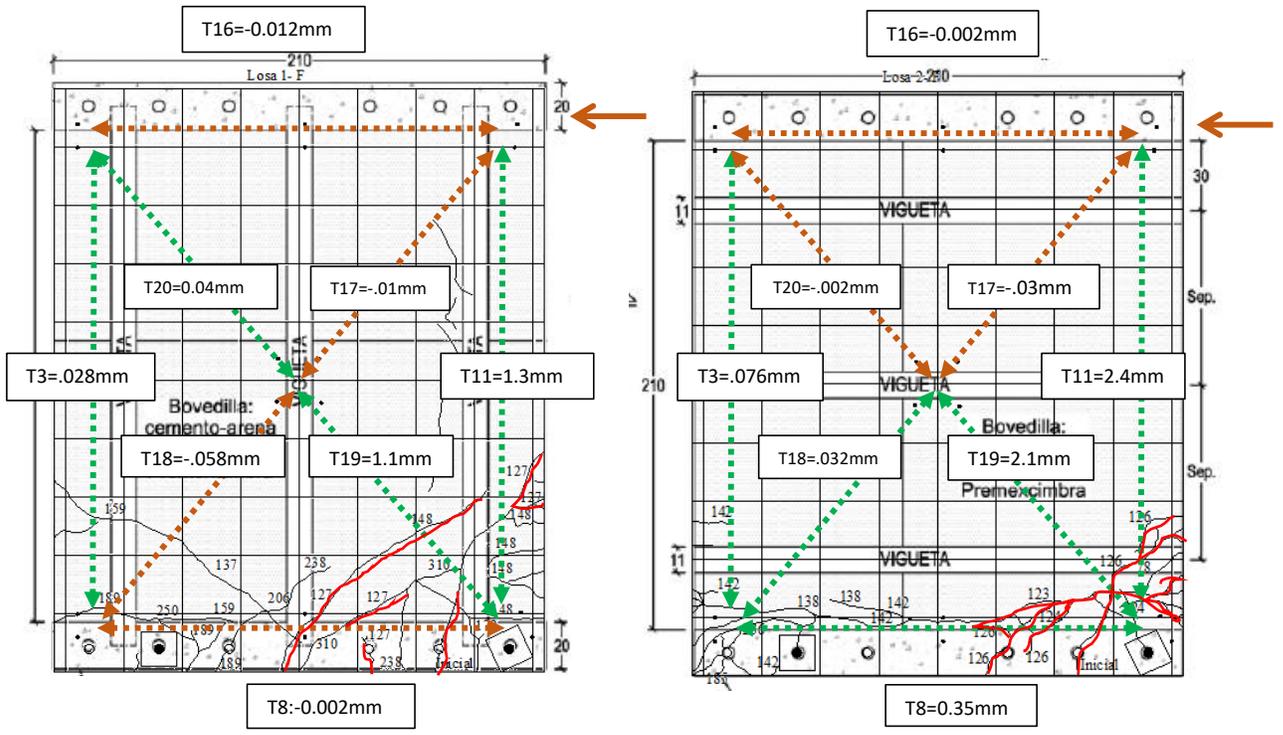


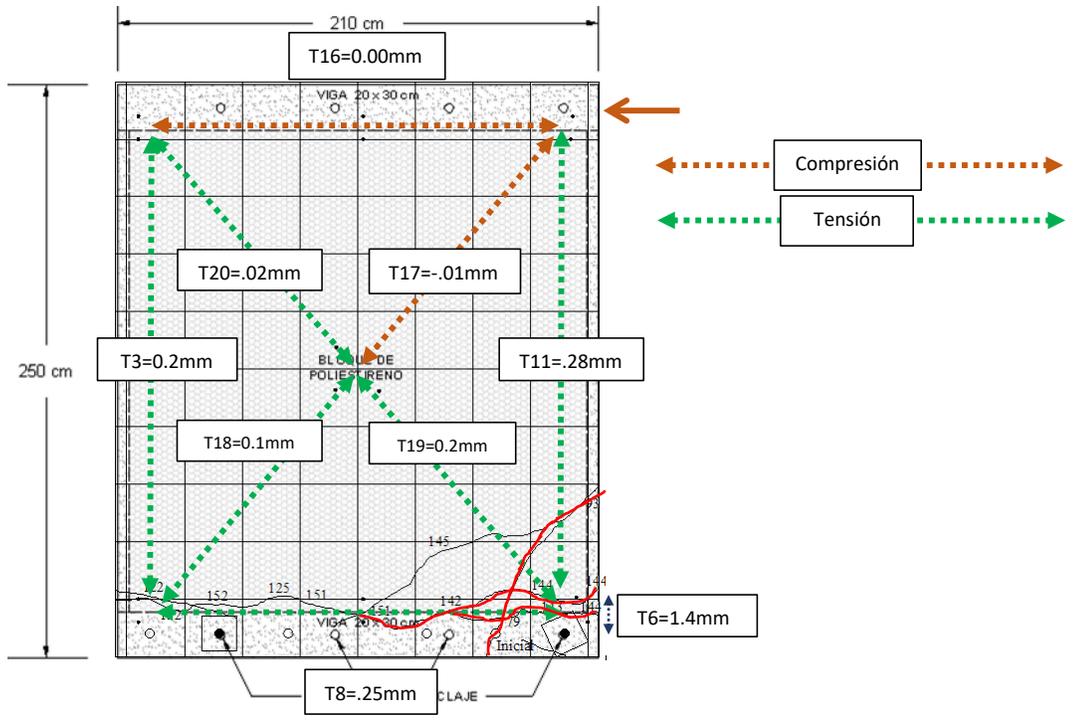
Figura 53: Envlovente de Ciclo Histerético - puntos de fluencia.

En la Figura 54 se muestra las condiciones del agrietamiento para el paso de carga en el cual los diafragmas entran en fluencia, e igualmente se presenta las deformaciones asociadas a este punto, para los transductores 3, 8, 11, 17, 18, 19 y 20, además, la deformación registrada en el modelo 3 del transductor 6, el cual se muestra como atípica dentro del comportamiento general observado en los diafragmas y sugiere un desprendimiento de la fijación del apoyo. Para diferentes configuraciones de viga-beredilla, se registran valores de deformación interna y externa diferentes, aunque las trayectorias de las deformaciones son iguales, para los diafragmas prefabricados se aprecia deformaciones internas que replantean la trayectoria de la conformación de franjas a tensión y compresión como se muestra:



A) Modelo 1

B) Modelo 2



C) Modelo 3

Figura 54: Deformación y agrietamiento en fluencia de modelos de diafragmas.

5.2. ANÁLISIS DE MOMENTOS CURVATURA DERIVADOS DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES DE LOS ENSAYOS

A partir de la expresión implementada por Carrillo (Carrillo et al., 2012) y Gómez Bernal (Gómez Bernal et al., 2015), se calcula la deformación total Δ_T de un muro, y es empleada para los diafragmas ensayados. Estas se pueden dividir en tres componentes: De cortante (Δ_c), Flexión (Δ_f) y deslizamiento (Δ_d):

$$\Delta_T = \Delta_c + \Delta_d + \Delta_f$$

Donde:

Δ_T =Desplazamiento relativo total

Δ_c =Desplazamiento relativo cortante

Δ_d =Desplazamiento relativo por deslizamiento

Δ_f =Desplazamiento relativo por flexión

Se presenta los resultados del análisis dado en el Anexo 1, al implementar las ecuaciones

.(2) y .(3) para cada paso de carga, en cada modelo de diafragma:

$$\Delta_c = \gamma H = \frac{\delta_2 D_2 - \delta_1 D_1}{2lh} H \quad .(2)$$

$$curvatura = \frac{1}{p} = \frac{3\Delta_f}{H^2} \quad .(3)$$

5.2.1. DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA DERIVADO DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES EN EL MODELO DIAFRAGMA 1

Al implementar la ecuación

.(2) y .(3) para cada paso de carga del modelo 1, se obtiene los valores de curvatura y momento, los cuales se grafican en la Figura 55:

curvatura=3 * desplazamient o/L^2	M (KN-m)
0	0
2.17E-02	47.64
2.17E-02	47.64
5.84E-02	95.52
5.84E-02	95.52
1.49E-01	190.56
1.49E-01	190.56
5.03E-01	283.46
8.95E-01	283.46
1.09E+00	272.98
1.41E+00	272.98
1.60E+00	253.92
2.08E+00	253.92
2.70E+00	238.20
2.70E+00	238.20

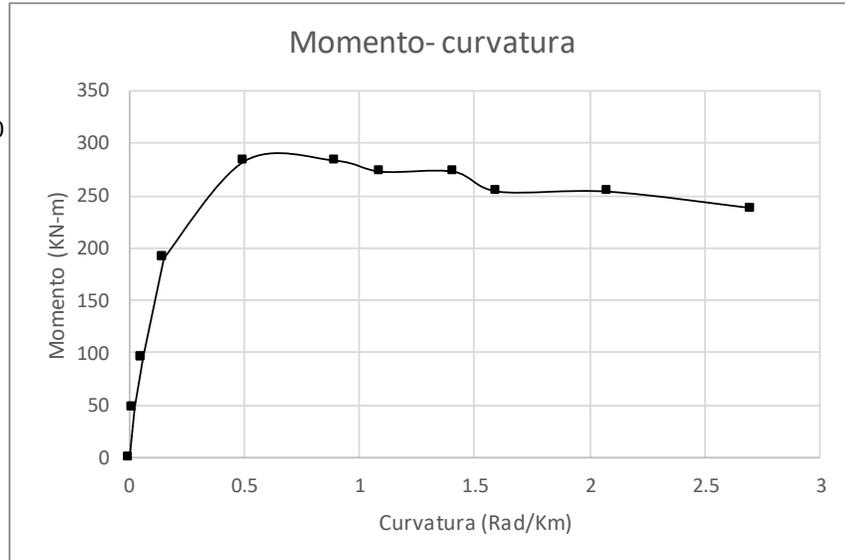


Figura 55: Momento curvatura modelo 1.

5.2.2. DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA DERIVADO DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES EN EL MODELO DIAFRAGMA 2

Al implementar la ecuación

.(2) y .(3) para cada paso de carga del modelo 2, se obtiene los valores de curvatura y momento, los cuales se grafican en la Figura 56:

curvatura=3 * desplazamient o/L^2	M (KN-m)
0	0
2.98E-02	48.83
3.38E-02	50.26
7.86E-02	96.47
7.76E-02	95.28
1.90E-01	189.61
2.03E-01	189.61
6.74E-01	234.63
6.45E-01	202.71
1.03E+00	201.28
8.98E-01	156.02
1.63E+00	72.17
1.53E+00	51.93
1.63E+00	42.40
1.63E+00	42.40

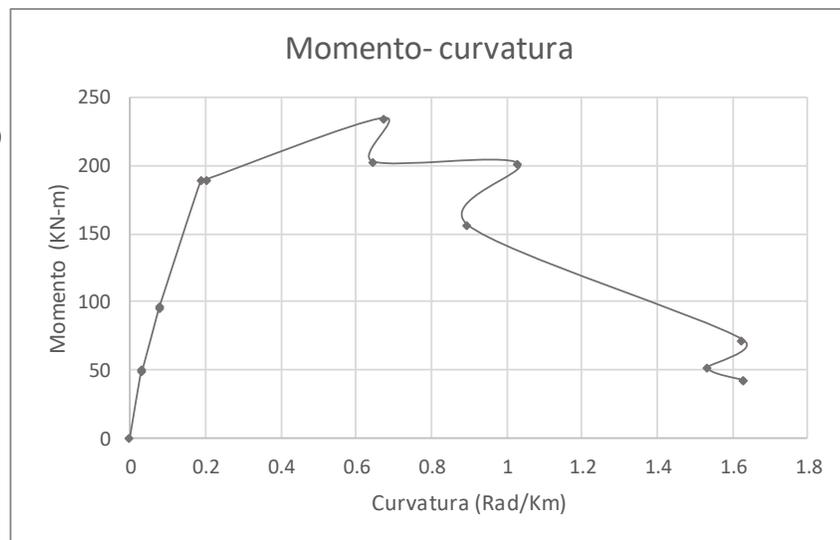


Figura 56: Momento curvatura modelo 2.

5.2.3. DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA DERIVADO DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES EN EL MODELO DIAFRAGMA 3

Al implementar la ecuación

(2) y (3) para cada paso de carga del modelo 3, se obtiene los valores de curvatura y momento, los cuales se grafican en la Figura 57:

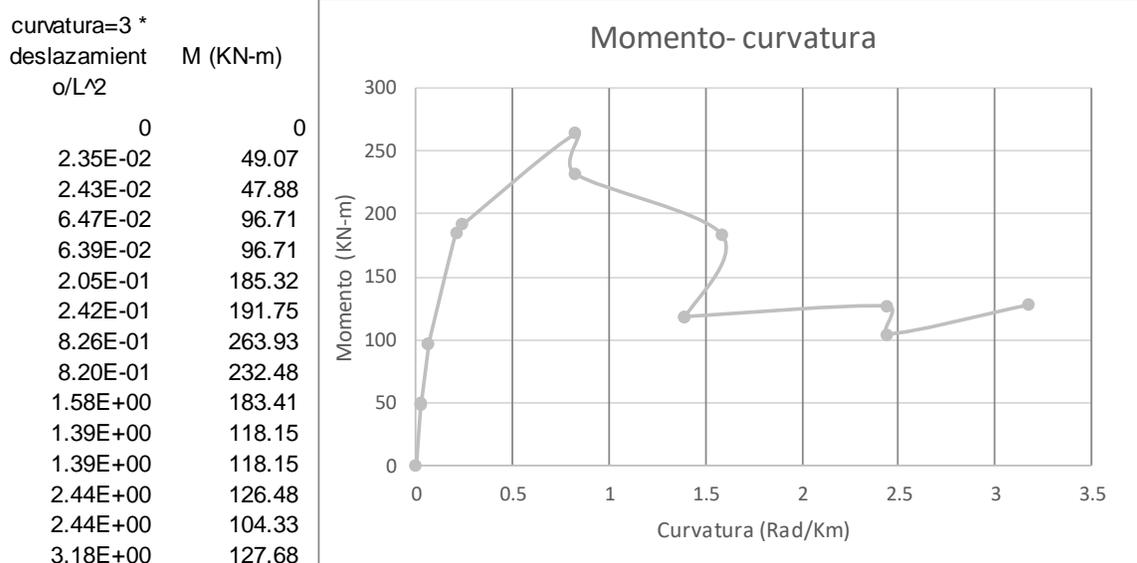


Figura 57: Momento curvatura modelo 3.

5.2.4. ANÁLISIS DE CURVATURA DERIVADA DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES ENTRE MODELOS DE DIAFRAGMA

Inicialmente los valores de curvatura entre los tres modelos son semejantes hasta valores de momento de 200 kN-m, lo que coinciden con un comportamiento elástico de los diafragmas. Se observa que el comportamiento del modelo 1 es el que mejor respuesta tiene ante las cargas horizontales, y, mayores valores de momento que registra a lo largo de todos los pasos de carga.

En la Figura 58, se especifica los puntos para los cuales los diafragmas se comportan elásticamente, posterior a estos puntos, empiezan a degradarse y tener un comportamiento plástico.

Se especifica, igualmente, el primer agrietamiento visible: en el modelo 1 $1.01373958 \frac{rad}{Km}$ en el paso 126 para un momento de 270kN-m, en el modelo 2

0.98455853 $\frac{rad}{Km}$ en el paso 127 para un momento de 202 kN-m, y, en el modelo 3 se registran con un valor de 1.53134213 $\frac{rad}{Km}$, para un momento de 207kN-m.

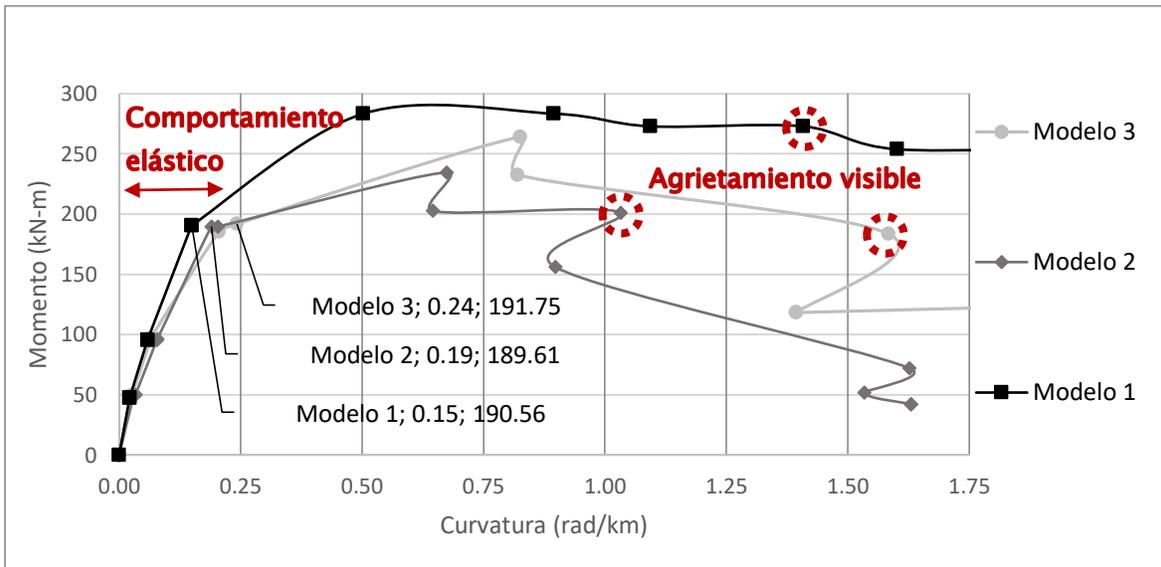


Figura 58: análisis de curvatura entre modelo 1, modelo 2 y modelo 3.

5.3. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN CON SOFTWARE DE ANÁLISIS DE SECCIONES RESPONSE

Se realizó un análisis ideal de los diafragmas ensayados, a partir del software estructural Response-2000 (Bentz, 2000a), el cual es un programa de análisis de secciones estructurales que calcula la resistencia y ductilidad de la sección de concreto reforzada sujeta a cortantes, momento y cargas axiales. Estas tres cargas se consideran simultáneamente, de tal manera que se encuentre la totalidad de las respuestas Carga-Deformación. En este, se tiene información de entrada y de salida, con una interfaz que presenta las gráficas asociadas a los datos ingresados, lo cual permite un chequeo ágil del comportamiento de secciones (Bentz, 2000b). En primera instancia se ingresan los valores asociados a la loseta superior de 45mm, de los modelos de diafragma prefabricado, como se muestra en la Figura 59:

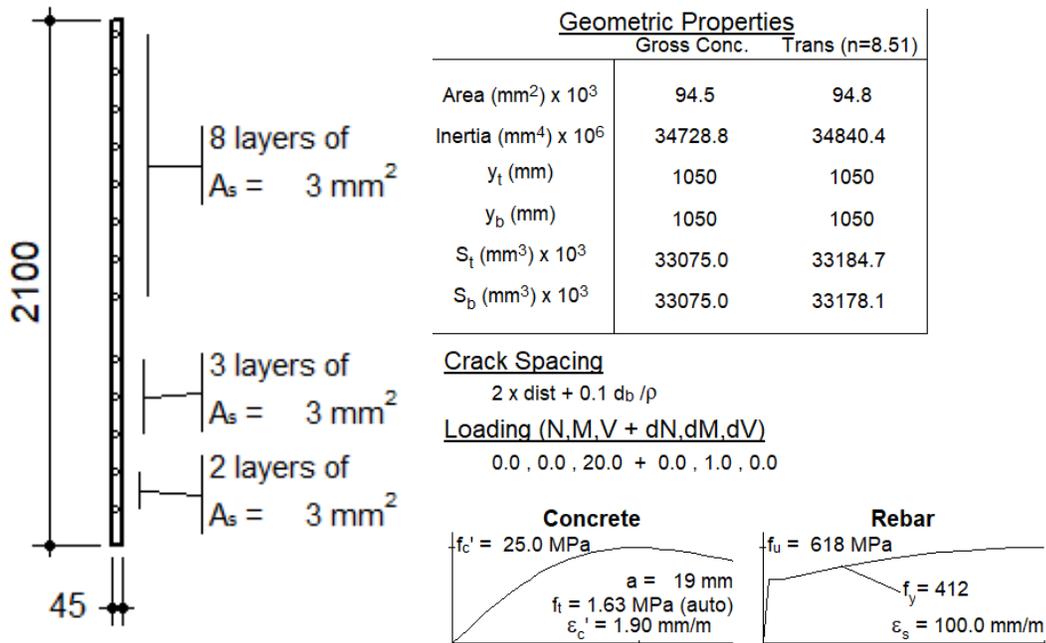


Figura 59: Datos de entrada loseta superior de 45mm de diafragmas prefabricados.

Se calcula la deformación del paso inicial sujeto a una carga horizontal de 20kN, con lo cual se obtiene el diagrama momento-curvatura teórico, con un momento máximo de 40kN-m, como se observa en la Figura 60. La resistencia teórica a momento asociada a la sección de la loseta superior del diafragma prefabricado, se reduce precipitadamente una vez alcanza su resistencia máxima de 44kN-m, asociado al primer paso de carga.

Como se observa el valor de la curvatura teórica es de 0.076 rad/km, lo cual representa el 8% de la curvatura experimental registrada, por deformaciones asociadas a flexión, para el paso de agrietamiento 126 de 20kN:

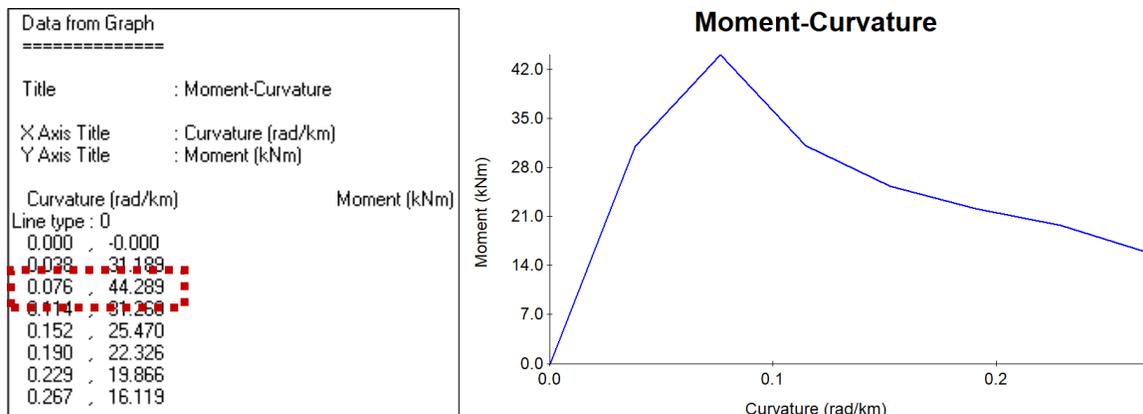


Figura 60: Momento-curvatura loseta superior de especímenes modelos de diafragma prefabricado. rad/km.

De igual manera se ingresaron los datos del modelo 3 en el programa Response, y Se presenta los datos de entrada en la Figura 61:

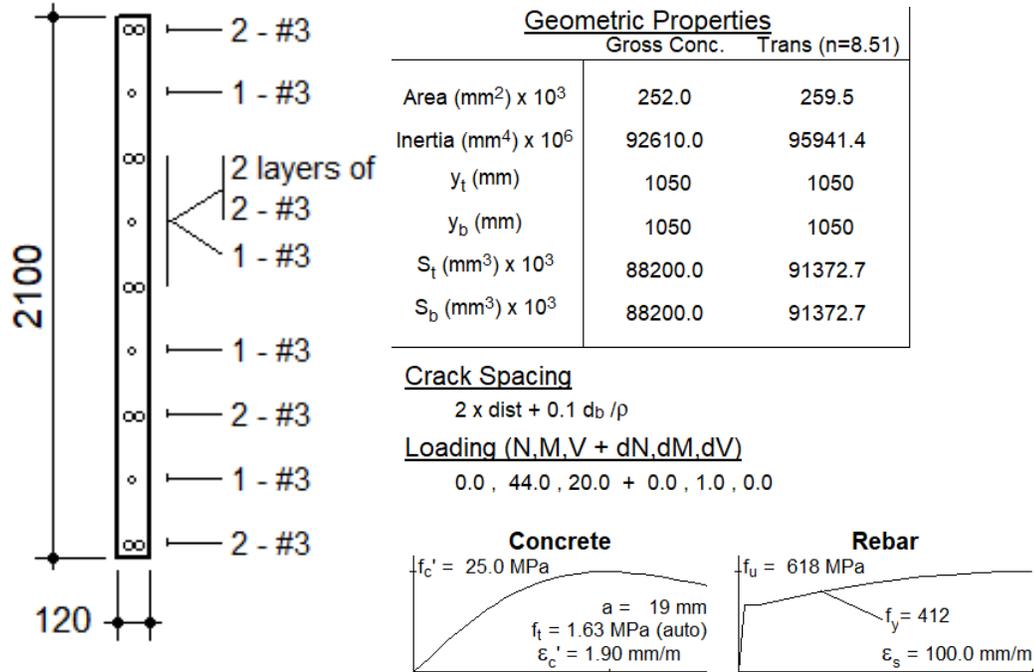


Figura 61: Datos de entrada de modelo 3.

En la Figura 62, se presenta el momento-curvatura asociada a la sección del modelo 3. Como se observa el valor de la curvatura teórica es de .229 rad/km, lo cual representa el 14% de la curvatura derivadas de los registros experimentales, por deformaciones asociadas a flexión, para el paso de agrietamiento 152 de 110kN:

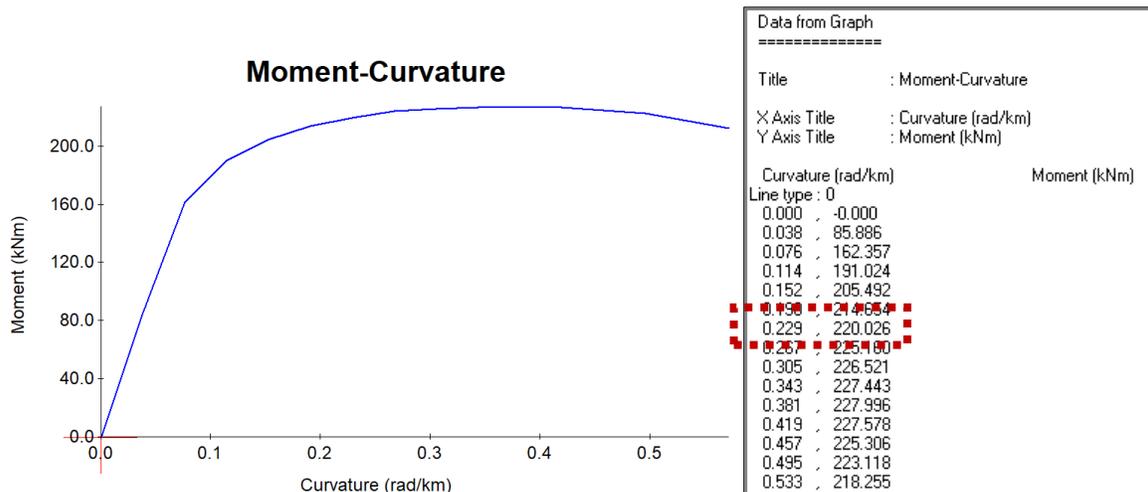


Figura 62: Momento-curvatura de modelo 3. rad/km.

Al observar el comportamiento de los valores teóricos obtenidos en el response2000, de la losa maciza de 120mm respecto los valores derivados de los registros experimentales del modelo 3, presentado en el numeral 5.2. “ANALISIS DE DESPLAZAMIENTOS Y CURVATURA TEORICOS”, se encuentra que es un límite superior al comportamiento de los modelos experimentales; contrario a lo que se presenta respecto los valores teóricos de la loseta superior de 45mm, obtenido en el Response 2000, ya que esos difieren totalmente, respecto los derivados de los modelos experimentales de diafragma prefabricado, lo que muestra realmente una capacidad mayor de deformación del modelo 1 y modelo 2, equiparable al modelo 3, como se muestra en la Figura 63:

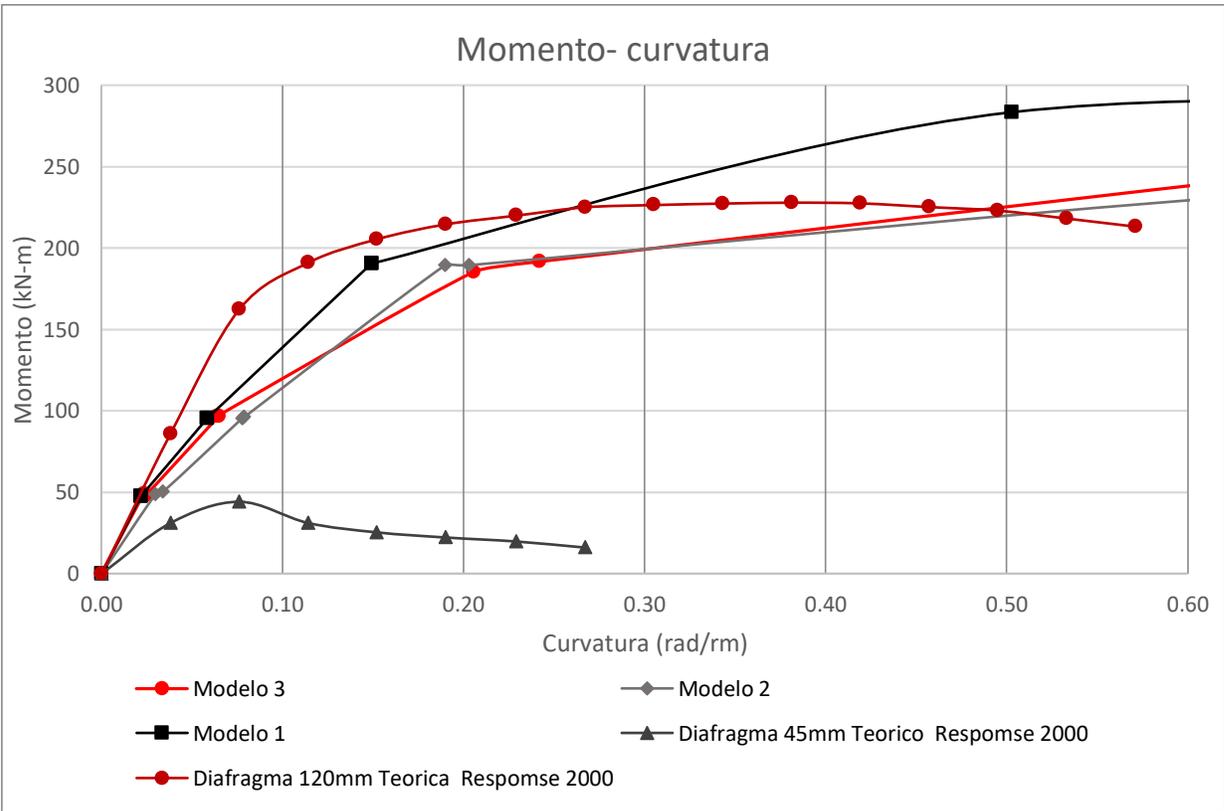


Figura 63: Momento-curvatura de los modelos teóricos y experimentales. rad/km.

El análisis permite suponer que, se ha registrado una distorsión de la resistencia de la sección, vinculada a los elementos tipo vigueta-bovedilla, y la variación de la loseta superior en el área de piso, lo que hace que la resistencia experimental de los modelos 1 y 2 sea mucho mayor a la teórica, siendo equiparable a la resistencia del modelo 3.

Si se compara el comportamiento teórico de la loseta superior de 45mm, obtenido en el Response 2000, respecto el comportamiento experimental de la gráfica de

momento-curvatura de los sistemas de diafragma prefabricado, para aquellos pasos de carga en donde el diafragma conserva deformaciones en el rango elástico, se visualiza que los modelos experimentales de diafragma prefabricado, tienen una mejor respuesta a la deformación por cargas en su plano, respecto el comportamiento teórico que se tiene, al considerar solo la loseta superior, tal como se muestra en la Figura 64:

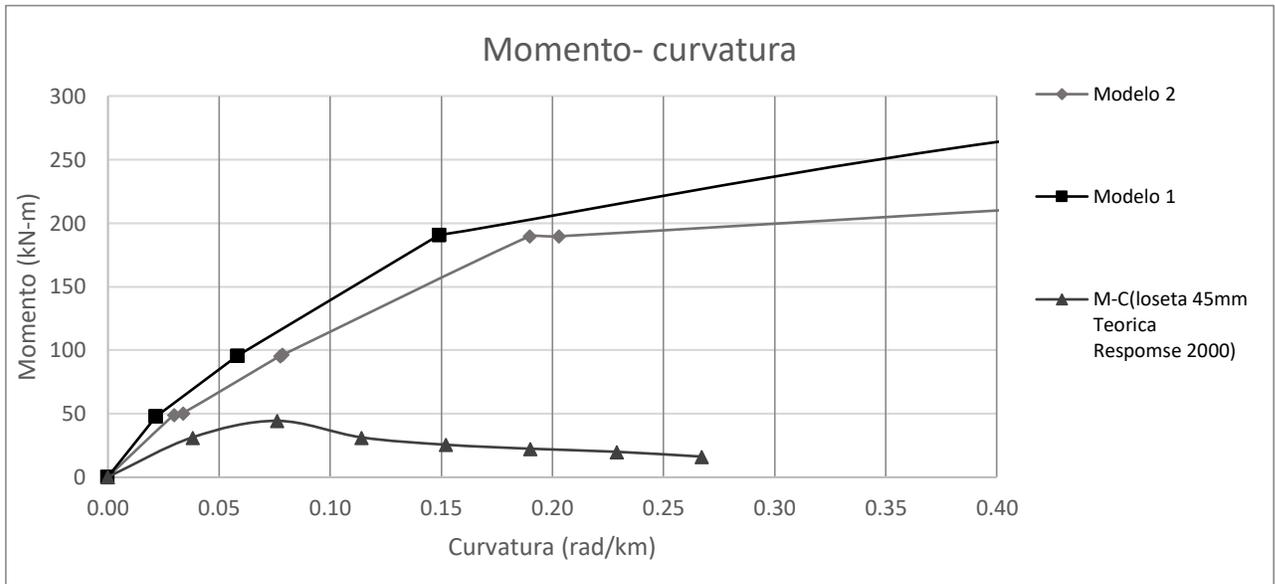


Figura 64: Momento-Curvatura teórico Response 2000 respecto ensayos modelos prefabricadas.

5.4. ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ EN EL PLANO DEL DIAFRAGMA

En la Figura 65 se muestran las curvas CARGAS-DEFORMACION de los modelos 1, 2 y 3, para los pasos de carga del 1 al 7, a partir de los registros de deformación asociados a los transductores ubicados cerca de los puntos de aplicación de carga lateral (transductor 23), en ellas se observa que entre una carga de 80kN y 120 kN, entre el paso 3 y 4, el comportamiento de los modelos es elástico, lo que permite suponer que la rigidez inicial es similar en este rango:

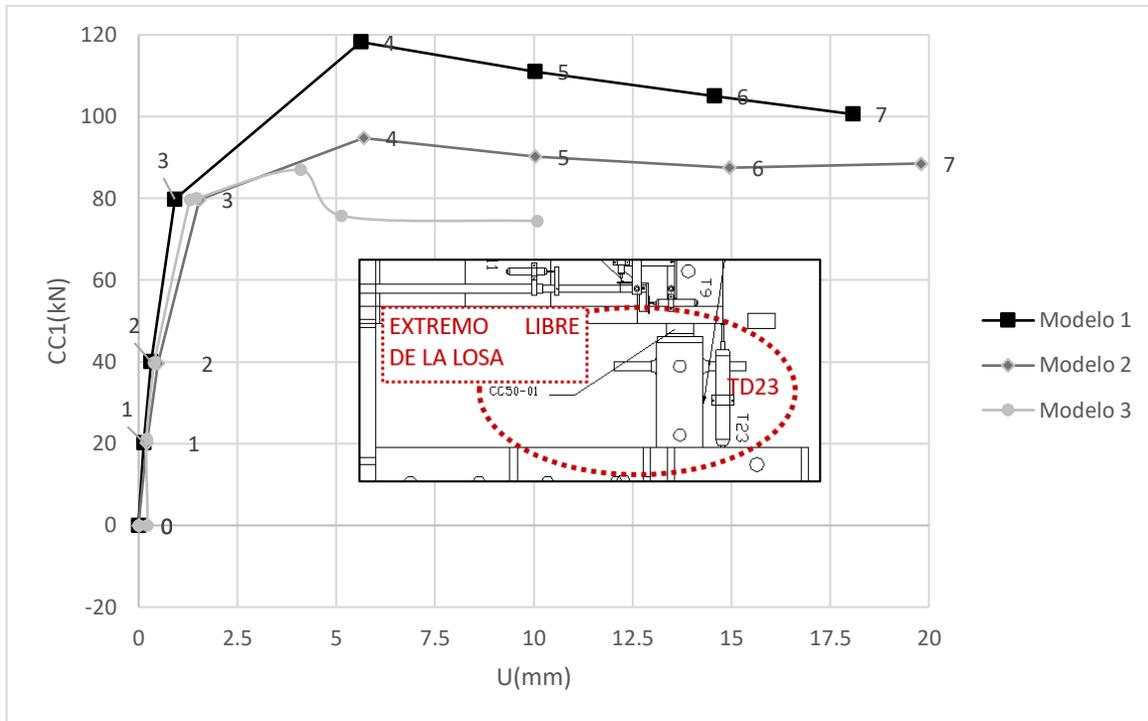


Figura 65: Relación de carga impuesta a los modelos vs deformaciones registradas transductor 23.

5.4.1. DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ TEÓRICA RESPECTO DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ EXPERIMENTAL

En la Figura 66, se observa cómo se degrada los valores derivados de la rigidez experimental del modelo 1, modelo 2 y modelo 3 a medida que avanza cada paso de carga, esta rigidez se obtiene como la relación entre la carga aplicada y el desplazamiento medido.:

- Se observa en el modelo 1, una reducción de la rigidez al 84% del valor inicial en el segundo paso, 57% en el tercer paso, del 14 % en el cuarto paso, hasta llegar en el séptimo paso a un valor del 4% de la rigidez inicial.
- En el modelo 2, se tiene una reducción de la rigidez al 83% del valor inicial en el segundo paso, 52% en el tercer paso, del 17% en el cuarto paso, hasta llegar en el séptimo paso a un valor del 5% de la rigidez inicial.
- Y en el modelo 3, se tiene un 100% del valor inicial de rigidez, en el segundo paso, la cual cae a un 52% en el tercer paso, posteriormente a un 18 % en el cuarto paso, hasta llegar en el quinto paso a un valor del 8% de la rigidez inicial.

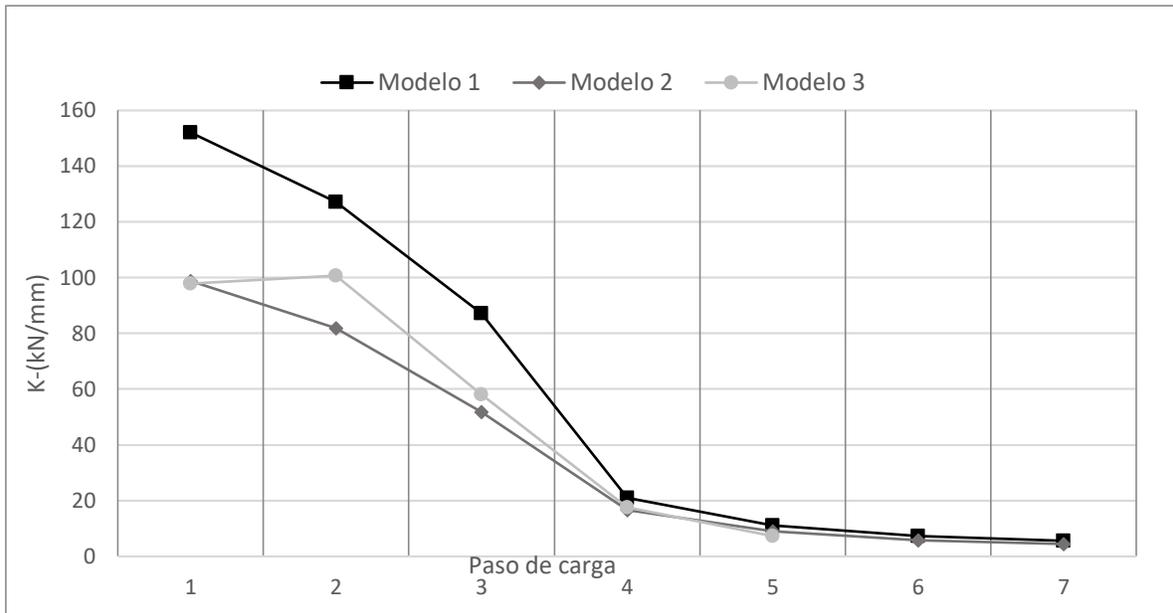


Figura 66: Degradación de la rigidez del modelo 1,2 y 3.

Al promediar la rigidez de los pasos de carga 1 al 4, en los cuales se tiene un comportamiento elástico de los modelos 1 y 2 de diafragma prefabricado (como se mencionó anteriormente en la Figura 65), se encuentra un mejor comportamiento en el modelo 1, con un promedio de rigidez de 97kN/m, respecto el modelo 2, con un promedio de 62kN/m, como se muestra en la Figura 67, esto supone una respuesta diferente, para disposiciones distintas en la dirección de las viguetas, teniendo una mejor respuesta el modelo 1 con la configuración de viguetas perpendicular a las cargas:

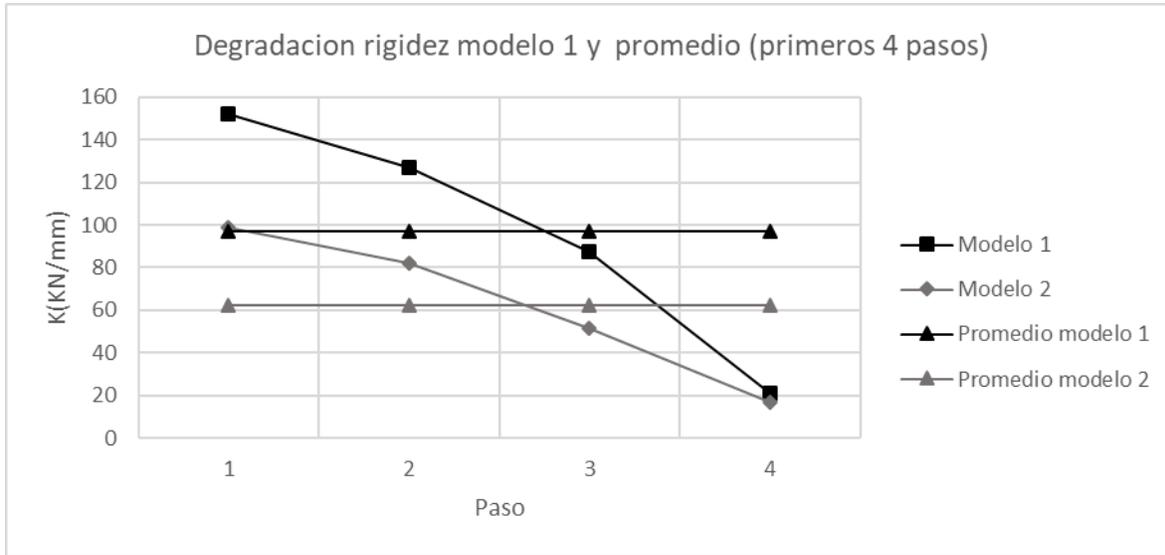


Figura 67: Degradación promedio de la rigidez del modelo 1 y 2.

En la Figura 68, se grafican los valores de rigidez derivados de los registros experimentales, en cada paso de carga de los modelos 1, 2 y 3, al mismo tiempo que se grafica la rigidez teórica, a partir de la ecuación (4), del diafragma de loseta superior de 45mm (correspondiente al espesor de la losa superior de los diafragma prefabricados) y el diafragma de losa maciza de 120mm (correspondiente al espesor del modelo 3), cuyos valores se presentan en la Tabla 3. Como se observa la rigidez de los modelos 1 y 2, es mayor que la rigidez teórica de la loseta de 45mm, pero estas se degradan a medida que avanza los pasos de carga, y, en el paso 4 de carga, se obtienen valores menores a los de la rigidez teórica, según la ecuación (4):

$$K_{teórica} = \left[\frac{h^3}{3E(I_f)} + ff \frac{h}{AG} \right]^{-1} \quad .(4)$$

Tabla 3: Valores de las diafragmas para el cálculo de la rigidez.

	h(mm)	t(mm)	L(mm)	A(mm ²)	I(mm ⁴)	E(MPa)	G(MPa)	K(N/mm)
diafragma 45 mm	2500	45	2100	75600	12155062500	23500	9400	69671
diafragma 120 mm	2500	120	2100	201600	32413500000	23500	9400	185788

La rigidez derivada de los registros experimentales del modelo 3, respecto a la rigidez teórica de la losa 120mm, a partir de la ecuación (4), tiene valores por debajo de los teóricos como bien se observa en la Figura 68 :

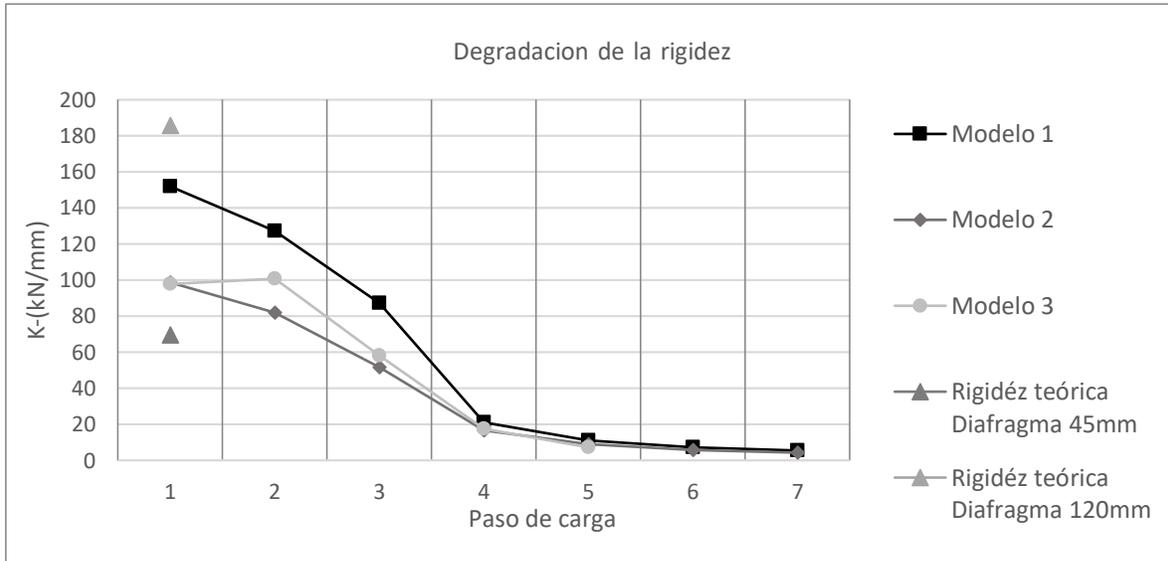


Figura 68: Rigidez experimental de los modelos 1, 2 y 3 y rigidez teórica de diafragmas de 45mm y 120mm de espesor.

En la Tabla 4 se relaciona la rigidez teórica del diafragma de la loseta de 45mm y la losa de 120mm, en el paso 1 al 100%, posteriormente se degrada a 75%, 50%, 25% y 10%:

Tabla 4: Valores asociados a la evaluación de la rigidez teórica vs rigidez experimental.

Paso	Rigidez teórica ajustando I_g Diafragma 45mm kN/mm	Rigidez teórica ajustando I_g Diafragma 120mm kN/mm	Ajuste de inercia de la sección
1	69.67	185.79	100%
2	52.25	139.34	75%
3	34.84	92.89	50%
4	17.42	46.45	25%
5	6.97	18.58	10%

En la Figura 69, se presenta la rigidez teórica relacionada anteriormente en la ecuación (4), ajustando y variando los valores de la sección agrietada de los modelos, gradualmente del 100% al 10%, tanto para el diafragma de 45mm (curva roja con marcadores de triangulo) como el diafragma de 120mm (curva azul con marcadores de triangulo). La degradación de la rigidez teórica tiende a representar el comportamiento de los valores de rigidez derivados de los registros experimentales, expresamente esto se refleja a medida que aumentan las cargas

sobre los modelos, siendo similar para el modelo 3 (línea gris claro de marcadores circulares), a partir del paso 2, y, del modelo 1 (línea gris con marcadores cuadrados) y 2 (línea gris oscuro con marcadores en rombo), a partir del paso 4, en donde el porcentaje considerado de la inercia de la sección es el 75% y el 25% respectivamente. Esto permite suponer, que, la rigidez presenta una degradación en el rango elástico entre el 75% al 25%:

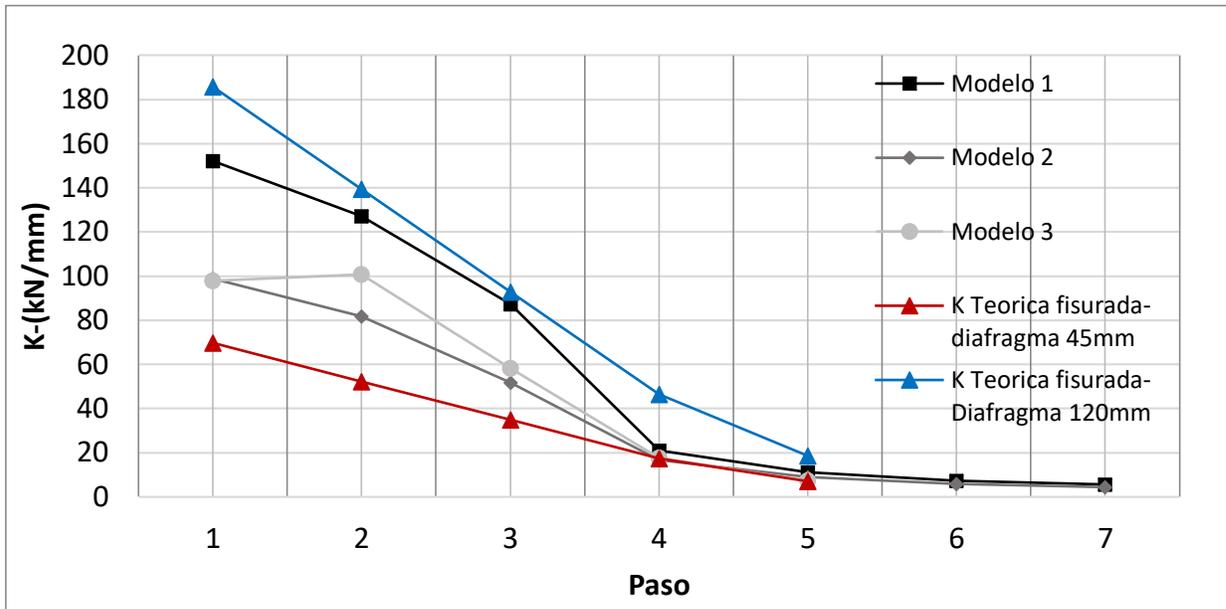


Figura 69: Rigidez teórica vs rigidez experimental.

5.4.2. ANÁLISIS DEFORMACIÓN DE LOS VALORES DERIVADOS DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES POR CORTANTE Y POR FLEXIÓN

A partir de los resultados experimentales del ensayo, y, de la ecuación implementada por Carrillo(Carrillo et al., 2012) y Gómez Bernal (Gómez Bernal et al., 2015), se puede obtener la deformación por cortante (Δ_c) y flexión (Δ_f) y su importancia en las deformaciones totales(Δ_T), para cada uno de los modelos ensayados:

$$\Delta_c = \gamma H = \frac{\delta_2 D_2 - \delta_1 D_1}{2 l h} H \quad .(6)$$

$$\Delta_f = \Delta_T - \Delta_c$$

Como tal se tiene que la influencia del esfuerzo cortante sobre los diafragmas es reducida y no es equiparable al aporte dado por las deformaciones por flexión:

MODELO 1:

En la Tabla 5 se presentan en la primera columna los pasos de carga de los ensayos, en la segunda columna las deformaciones experimentales totales del modelo 1, en la tercera las deformaciones diagonales internas del modelo 1, en la cuarta columna las deformaciones por cortante derivadas de los registros experimentales y la ecuación propuesta por Carrillo (Carrillo et al., 2012), y, en la quinta columna las deformaciones por flexión:

Tabla 5: Deformación experimental modelo 1 por cortante y flexión (mm).

PASO	$\Delta_{\text{modelo 1-T23}}$	$\Delta_{\text{modelo 1-T19}}$	$\Delta_{\text{modelo 1(cortante carrillo)}}$	$\Delta_{\text{modelo 1(flexión carrillo)}}$
	mm	mm	mm	mm
1	-0.160	-0.01	0.02	0.14
2	-0.160	-0.01	0.02	0.14
3	-0.385	-0.01	0.02	0.36
4	-0.385	-0.01	0.02	0.36
5	-0.960	-0.01	0.03	0.93
6	-0.960	-0.01	0.03	0.93
7	-3.560	0.21	0.42	3.14

En general las deformaciones por flexión son las más representativas dentro de las deformaciones totales del modelo 1. En promedio la deformación por cortante del modelo 1 experimental, hasta el paso 6 de carga, representa entre el 3% y el 15% de las deformaciones totales del diafragma. Esta relación tiende a aumentar a medida que aumenta los pasos de carga, como se muestra en la Figura 70:

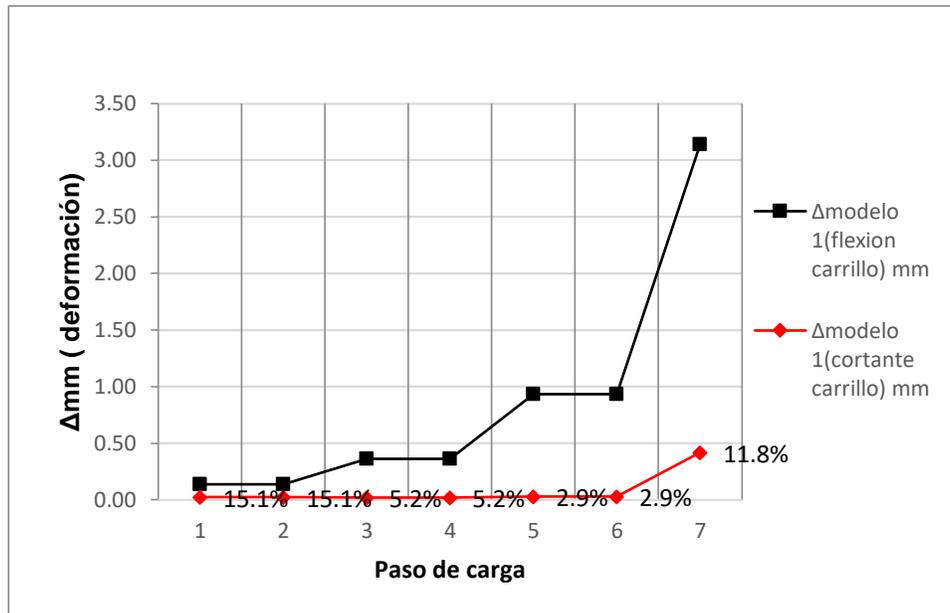


Figura 70: Deformación experimental modelo 1 por cortante y flexión (mm).

MODELO 2:

En la Tabla 6, se presentan en la primera columna los pasos de carga de los ensayos, en la segunda columna las deformaciones experimentales totales del modelo 2, en la tercera las deformaciones diagonales internas del modelo 2, en la cuarta columna las deformaciones por cortante derivadas de los registros experimentales y la ecuación propuesta por Carrillo (Carrillo et al., 2012), y, en la quinta columna las deformaciones por flexión:

Tabla 6: Deformación experimental modelo 2 por cortante y flexión (mm).

PASO	$\Delta_{\text{modelo 2-T23}}$	$\Delta_{\text{modelo 2-T19}}$	$\Delta_{\text{modelo 2(cortante carrillo)}}$	$\Delta_{\text{modelo 2(flexión carrillo)}}$
0	mm	mm	mm	mm
1	-0.190	0.002	0.00	0.19
2	-0.215	0.002	0.00	0.21
3	-0.495	0.002	0.00	0.49
4	-0.485	0	0.00	0.49
5	-1.315	0.064	0.13	1.19
6	-1.405	0.068	0.14	1.27
7	-5.010	0.398	0.80	4.21

En general las deformaciones por flexión son las más representativas dentro de las deformaciones totales del modelo 2. La deformación por cortante del modelo 2

experimental, hasta el paso 6 de carga, representa entre el 2% al 16% de las deformaciones totales del diafragma. El porcentaje de las deformaciones por cortante sobre el total, tiende a aumentar a medida que avanzan los pasos de carga hasta un 16% , como se visualiza en la Figura 71:

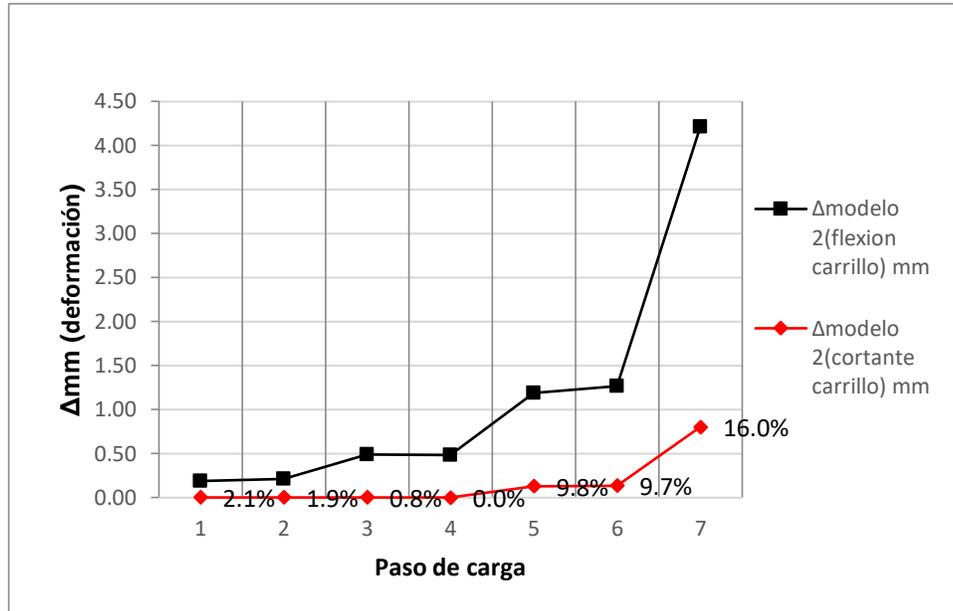


Figura 71: Deformación experimental modelo 2 por cortante y flexión (mm).

MODELO 3:

En la Tabla 7, se presentan en la primera columna los pasos de carga de los ensayos, en la segunda columna las deformaciones experimentales totales del modelo 3, en la tercera las deformaciones diagonales internas del modelo 2, en la cuarta columna las deformaciones por cortante derivadas de los registros experimentales y la ecuación propuesta por Carrillo (Carrillo et al., 2012), y, en la quinta columna las deformaciones por flexión:

Tabla 7: Deformación experimental modelo 3 por cortante y flexión (mm).

PASO	Δmodelo losa maciza-T23	Δmodelo losa maciza-T19	Δmodelo 3(cortante carrillo)	Δmodelo 3(flexión carrillo)
	mm	mm	mm	mm
1	-0.145	-0.145	0.29	0.15
2	-0.150	-0.15	0.30	0.15
3	-0.400	-0.4	0.80	0.40
4	-0.395	-0.395	0.79	0.40
5	-1.270	-1.27	2.55	1.28

6	-1.495	-1.495	3.01	1.51
7	-5.105	-5.105	10.27	5.16

En general las deformaciones por flexión son las más representativas dentro de las deformaciones totales del modelo 3. La deformación por cortante del modelo 3 experimental, representa el 11% al 3% de las deformaciones totales del diafragma. Como se observa, en la Figura 72, la deformación por cortante es mayor en el modelo 3 de diafragma de 120mm, contrario a los resultados anteriores de los modelos 1 y 2, de diafragma prefabricado:

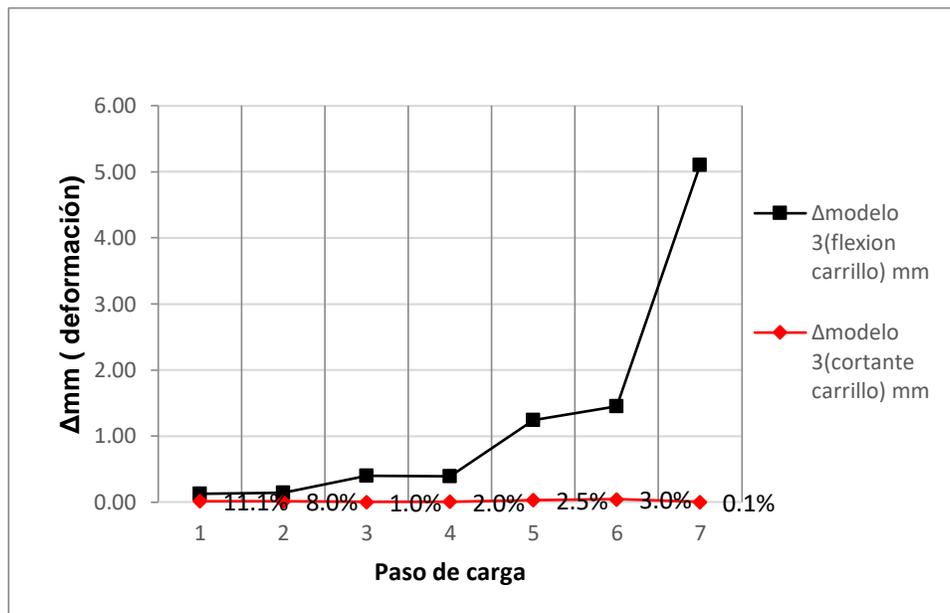


Figura 72: Deformación experimental modelo 3 por cortante y flexión (mm).

5.4.3. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN TEÓRICA RESPECTO LA DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN DERIVADA DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES

Se analiza la deformación por flexión teórica de la sección bruta y fisurada, respecto la deformación por flexión, derivada de los registros experimentales, con el fin de conocer a que porcentaje de la sección fisurada se acoplan los valores de las curvas.

La de formación teórica se obtiene implementado la ecuación para la deformación de una sección que se muestra en la ecuación .(5), derivada del anexo II:

$$\delta = \frac{PH^3}{3EI} + ff \frac{PH}{GA} \quad .(5)$$

$$\delta = \frac{4P}{Eb} \left(\frac{H}{l_w}\right)^3 + ff \frac{P}{Gb} \left(\frac{H}{l_w}\right)$$

Donde “P”, corresponde a la carga impuesta por el gato en cada paso, “H” corresponde a la altura total de los elementos, “E” corresponde al módulo de elasticidad del concreto, “I” la inercia de la sección de cada modelo evaluado, “f_f” el factor de forma, “G” el módulo de cortante, “A” el área de la sección, “b” el espesor del diafragma y “l_w” la longitud de la sección.

En la Tabla 8 y en la Figura 73, se presentan los datos de los transductores utilizados para encontrar las deformaciones por flexión, para el diafragma de 120mm(correspondiente al modelo 3) y el diafragma de 170mm (correspondiente a los diafragmas prefabricados de los modelos 1 y 2), con el fin de cuantificar las deformaciones teóricas asociadas a cada paso de carga, donde D2 y D1, representan la distancia entre los puntos fijos del transductor 18 y transductor 19, “l” como la longitud de la componente en Y de la longitud D1 y D2, “h” como la longitud de la componente en X de la longitud D1 y D2 y “H” como la altura total del modelo, “f_f” como el factor de forma, “E” el módulo de elasticidad del concreto, “G” El módulo de cortante, “b”, el espesor del diafragma” y “l_w” la longitud del diafragma en la componente Y:

Tabla 8: Datos geométricos constates en los modelos.

Datos geométricos de los modelos		
D₂(mm)=	1245	
D₁(mm)=	1245	
l(mm)=	855	
h(mm)=	905	
H(mm)=	2100	
Loseta superior 45mm		
f_f=	1.2	Adimensional
E=	23500	MPa
G=	9400	MPa
b=	170	mm
l_w=	2100	mm
H=	2500	mm
Losa maciza 120mm		
f_f=	1.2	Adimensional
E=	23500	MPa

G=	9400	MPa
b=	120	mm
I_w=	2100	mm
H=	2500	mm

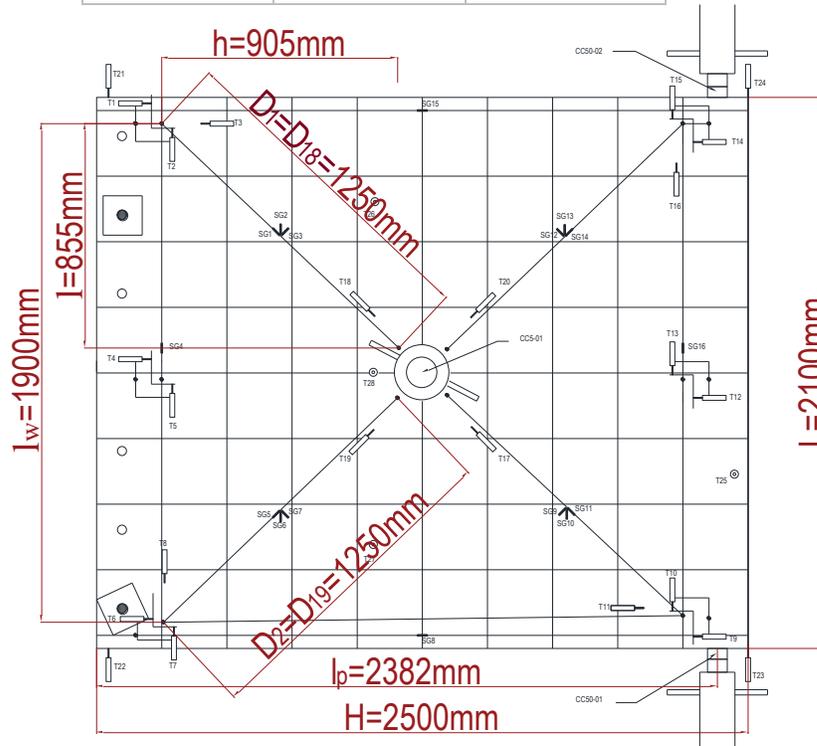
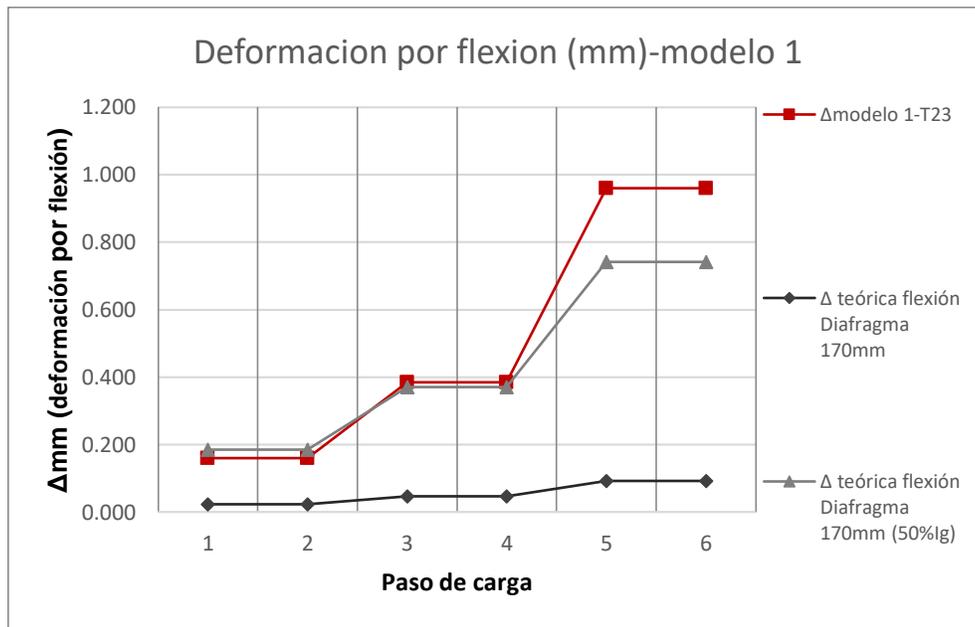


Figura 73: Datos de entrada para la obtención de la deformación a flexión, derivada de los registros experimentales.

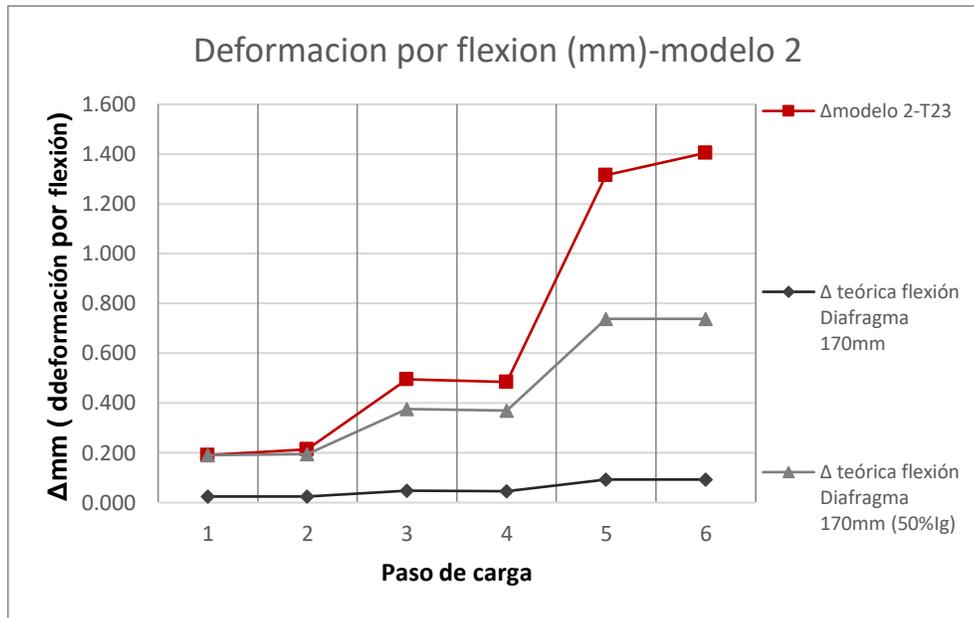
Se presenta en la Tabla 9 y la Figura 74, los valores de las deformaciones por flexión de los registros de ensayo (línea roja con marcadores cuadrados), y deformaciones por flexión teóricas según la ecuación.(5) la sección fisurada al 50% para el modelo 1, modelo 2 y modelo 3. Como se observa la deformación teórica fisurada al 50% se acopla a la deformación experimental registrada hasta el paso 6 para los modelos 1 y 2 de diafragma prefabricado, y la deformación teórica sin fisurar se mantiene muy lejana a los datos experimentales, como se presenta en la Figura 74, esto permite suponer que es adecuado fisurar la sección del diafragma al aplicar alguna metodología de diseño como viga de gran peralte, puntal tirante o elementos finitos, en aras de obtener valores más ajustados a la realidad:

Tabla 9: Δf derivada de los registros experimentales y Δf teórica fisurada al 50% de modelo 1, modelo 2 y modelo 3.

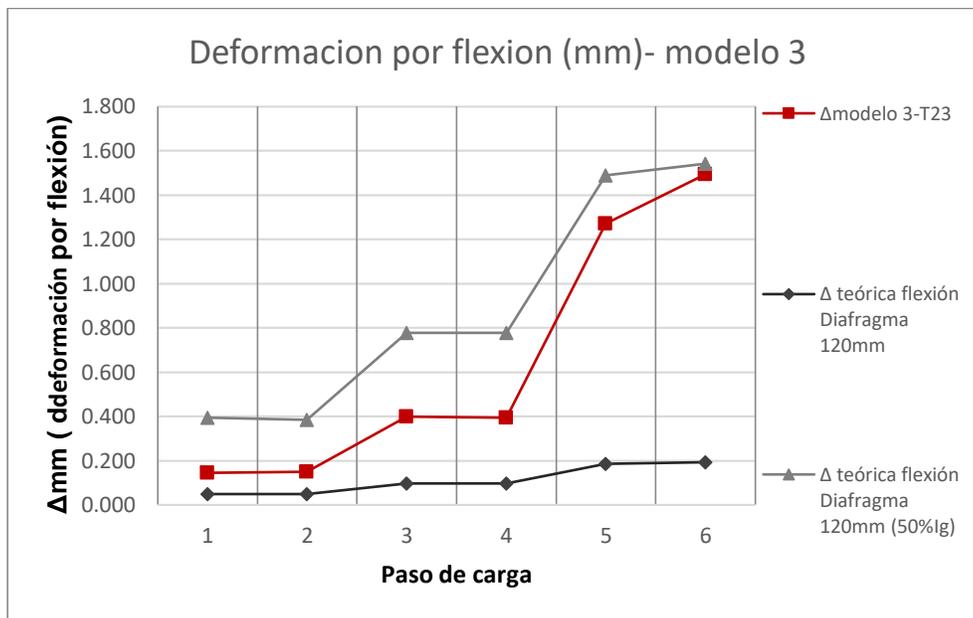
PASO	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
	Δ modelo 1 (flexión carrillo)	Δ teórica flexión Diafragma 45mm (50%lg)	Δ modelo 2 (flexión carrillo)	Δ teórica flexión Diafragma 45mm (50%lg)	Δ modelo 3 (flexión carrillo)	Δ teórica flexión Diafragma 45mm (50%lg)
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	0.14	0.26	0.19	0.19	0.13	0.39
2	0.14	0.26	0.21	0.20	0.14	0.38
3	0.36	0.53	0.49	0.38	0.40	0.78
4	0.36	0.53	0.49	0.37	0.39	0.78
5	0.93	1.06	1.19	0.74	1.24	1.49
6	0.93	1.06	1.27	0.74	1.45	1.54



A) MODELO 1



B) MODELO 2



C) MODELO 3

Figura 74: Deformación experimental y teórica modelo 1, modelo 2 y modelo 3.

5.5. ANÁLISIS MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Como se mencionó anteriormente, los ensayos utilizaron viguetas y bovedillas de un panel cuadrado de 2.10 m de ancho por 2.50 m de largo, con espesor 0.17m,

los cuales fueron perimetralmente confinados por vigas de 0.20x0.30 m de dimensión, conteniendo elementos del tipo vigueta bovedilla orientados, tanto en el sentido paralelo de cargas, como perpendicularmente.

El peralte de la vigueta corresponde a 130mm y la loseta superior es de 45mm de espesor.

El módulo de elasticidad del concreto corresponde a la norma colombiana:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$$

Concreto de vigas de carga y losa de compresión

$$f'_c = 25 \text{ MPa}$$

$$E_c = 23.500 \text{ MPa}$$

Concreto de la vigueta pre-esforzada

$$f'_c = 40 \text{ MPa}$$

$$E_c = 29.725 \text{ MPa}$$

5.5.1. CONSIDERACIONES PARA LA MODELACIÓN EN ELEMENTOS FINITOS EN EL RANGO ELASTICO

El análisis por elementos finitos se modeló por medio del software Sap2000, utilizando el elemento tipo shell-thick para la losa, en la cual se introdujeron las propiedades geométricas y mecánicas de los modelos:

Se consideró primero las secciones brutas del diafragma de 45mm, correspondiente a la loseta superior de los modelos 1 y 2, posteriormente, se considera el diafragma de 120mm, correspondiente al espesor del modelo 3, y por último se simulo el sistema de diafragma prefabricado con los elementos de vigueta-bovedilla, ajustando su sección transformada de acuerdo a su módulo de elasticidad y sección geométrica e implementado el elemento tipo Shell-thick, para ser más exactos con el modelado ortotrópico, como se muestra en el anexo III. (Chinchilla Portillo, 2012). Se consideró las dos disposiciones propuestas en los ensayos del modelo 1 y modelo 2. Igualmente se consideró el comportamiento ortogonal de las

propiedades de los elementos y se ajustó los ejes locales de los elementos según el material.

Los modelos se muestran en la Figura 75 y en la Figura 76:

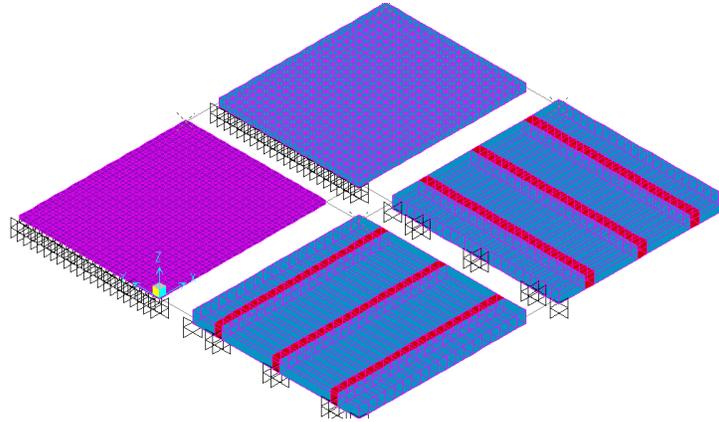


Figura 75: Vista 3D-MEF

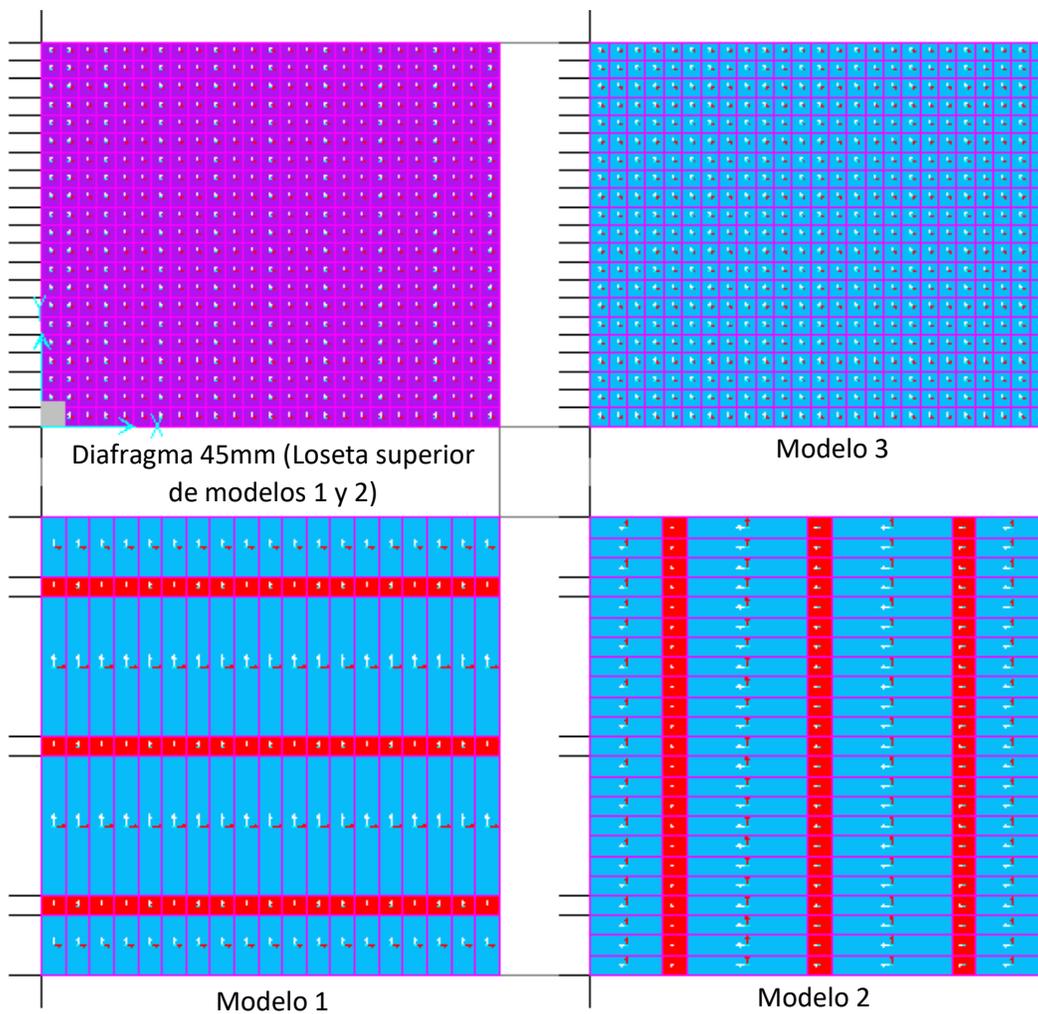


Figura 76: Disposición de los elementos tipo shell-thick. Diafragma 45mm, modelo 1, modelo 2 y modelo 3.

5.5.2. ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTO ENTRE MODELO DE ELEMENTOS FINITOS Y VALORES DERIVADOS DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES

Se aplicó la magnitud de cada paso de carga, esto es, 20 kN, 40 kN, 80 kN y 120 kN en el extremo de los 4 diafragmas, tal como se implementó en el ensayo, para posteriormente analizar las deformaciones asociadas a estas cargas.

Los desplazamientos resultantes en la dirección “Y” son los presentados en la Tabla 10, en la columna “U2”. Como se observa la deformación asociado al diafragma de 45 mm, es 267% mayor que el modelo 3, contrario a lo presentado en los modelos 1 y 2, de diafragma prefabricado, que presentan 119% y 178% del desplazamiento del modelo 3, para condiciones de carga iguales. La modelación por MEF, muestra una vez más, un mejor comportamiento del diafragma vigueta bovedilla, cuando las excitaciones son perpendiculares a la dirección de las viguetas:

Tabla 10: Desplazamientos de MODELOS modelados. mm.

DIAFRAGMA	PASO CARGA	U1	U2	%
		mm	mm	($\Delta_i/\Delta_{\text{macizo}}$)
MODELO 1	CARGA 20 kN	-0.021636	0.078287	119%
MODELO 2	CARGA 20 kN	-0.045405	0.116923	178%
MODELO 3	CARGA 20 kN	-0.026833	0.065604	100%
DIAFRAGMA 45mm (Loseta superior Modelos 1 y 2)	CARGA 20 kN	-0.071555	0.174944	267%
MODELO 1	CARGA 40 kN	-0.043272	0.156573	119%
MODELO 2	CARGA 40 kN	-0.090809	0.233846	178%
MODELO 3	CARGA 40 kN	-0.053666	0.131208	100%
DIAFRAGMA 45mm (Loseta superior Modelos 1 y 2)	CARGA 40 kN	-0.143109	0.349889	267%
MODELO 1	CARGA 80 kN	-0.086545	0.313146	119%
MODELO 2	CARGA 80 kN	-0.181619	0.467691	178%
MODELO 3	CARGA 80 kN	-0.107332	0.262417	100%
DIAFRAGMA 45mm (Loseta superior Modelos 1 y 2)	CARGA 80 kN	-0.286218	0.699778	267%
MODELO 1	CARGA 120 kN	-0.129817	0.469719	119%
MODELO 2	CARGA 120 kN	-0.272428	0.701537	178%
MODELO 3	CARGA 120 kN	-0.160998	0.393625	100%
DIAFRAGMA 45mm (Loseta superior Modelos 1 y 2)	CARGA 120 kN	-0.429327	1.049667	267%

Como se observó en el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, al considerar la sección fisurada al 50% de la Inercia, se obtienen deformaciones más acopladas, en los modelos 1,2 y 3 a los datos derivados de los registros experimentales, como se observa en la Tabla 11, en la cual se presenta los pasos de

carga 1 al 3, correspondientes a los pasos en los cuales los diafragmas tuvieron una respuesta en el rango elástico, en la segunda, tercera y cuarta columna la deformación asociada a los datos experimentales del modelo 1, modelo 2 y modelo 3 respectivamente, en la quinta, séptima y novena, columna los valores de deformación dados en el MEF, en la columna once y trece, la deformación dados en el MEF, afectando la sección al 50% de la inercia de la sección del modelo 1 y modelo 2 respectivamente :

Tabla 11: Relación desplazamientos experimentales vs ideal en MEF con sección fisurada al 50%.

PASO	Δ modelo 1	Δ modelo 2	Δ modelo 3	MEF-modelo 1 (mm)	%	MEF-modelo 2 (mm)	%	MEF-modelo 3 (mm)	%	MEF-modelo 1 (mm)-50%I _g	%	MEF-modelo 2 (mm)-50%I _g	%
	mm	mm	mm	0.14	86%	0.17	88%	0.08	55%	0.19	120%	0.23	122%
1	0.16	0.19	0.145	0.27	71%	0.33	67%	0.16	40%	0.38	100%	0.46	94%
2	0.385	0.495	0.4	0.55	57%	0.67	51%	0.32	25%	0.77	80%	0.93	71%
3	0.96	1.315	1.27	0.82	23%	1.00	20%	0.47	9%	1.15	32%	1.39	28%

En la Figura 77, se presenta la comparación gráfica con las sección fisurada al 50%, y se observa que los valores de deformación por MEF, de los modelos 1 y modelo 2, acoplan mejor a los valores de deformación de los ensayos, entre los pasos de carga 1 al 4, en el cual los modelos experimentales presentan un comportamiento elástico.

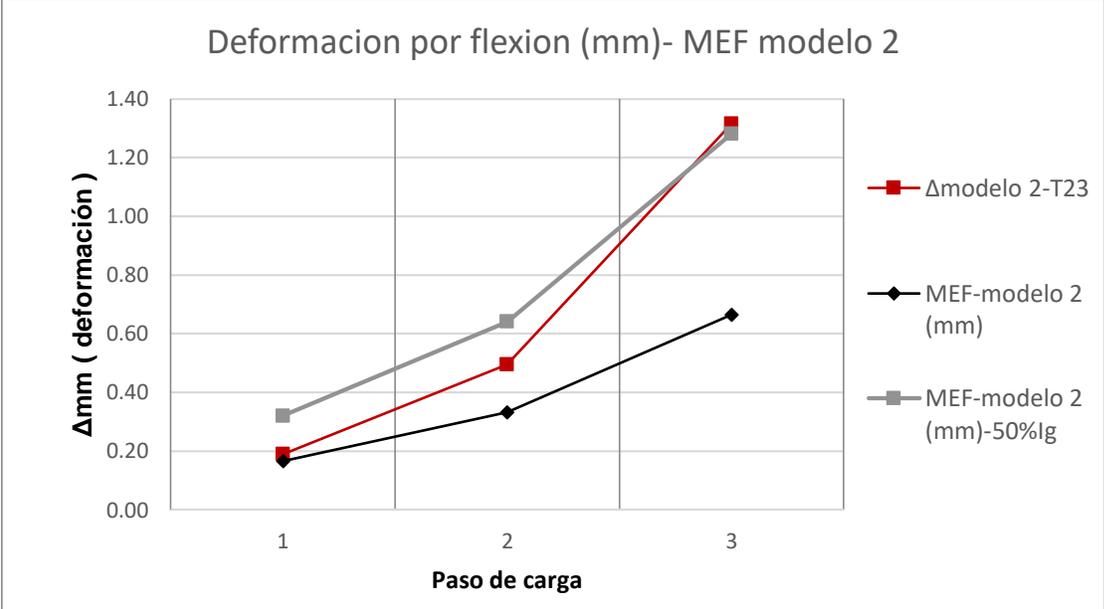
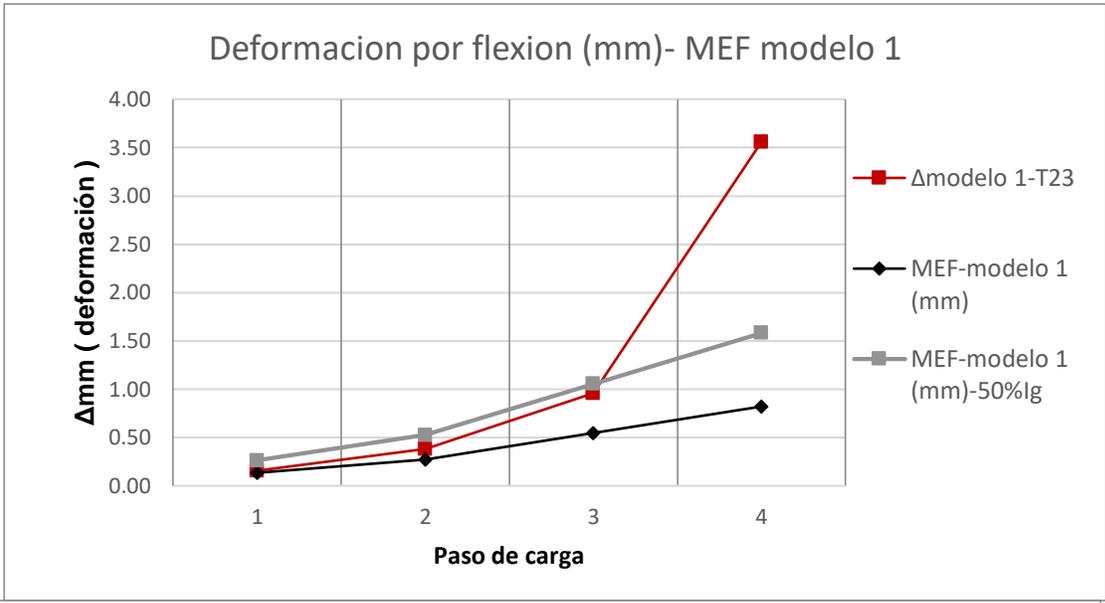


Figura 77: Comparación de las deformaciones derivada de los datos experimentales vs deformaciones por Modelo de Elementos Finitos (MEF) con 50% de la sección fisurada.

5.5.3. ESFUERZOS ASOCIADOS EN EL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Se presenta los esfuerzos de tensión y compresión asociados al MEF del modelo 3 (losa maciza de 120mm) para el paso de carga 3, en el rango elástico donde llega a su punto de fluencia. Como se observa en la Figura 78 las franjas a compresión y tensión no llegan a ser totalmente similares, especialmente en la longitud de la franja a compresión, y la concentración de estos en ciertas áreas en particular:

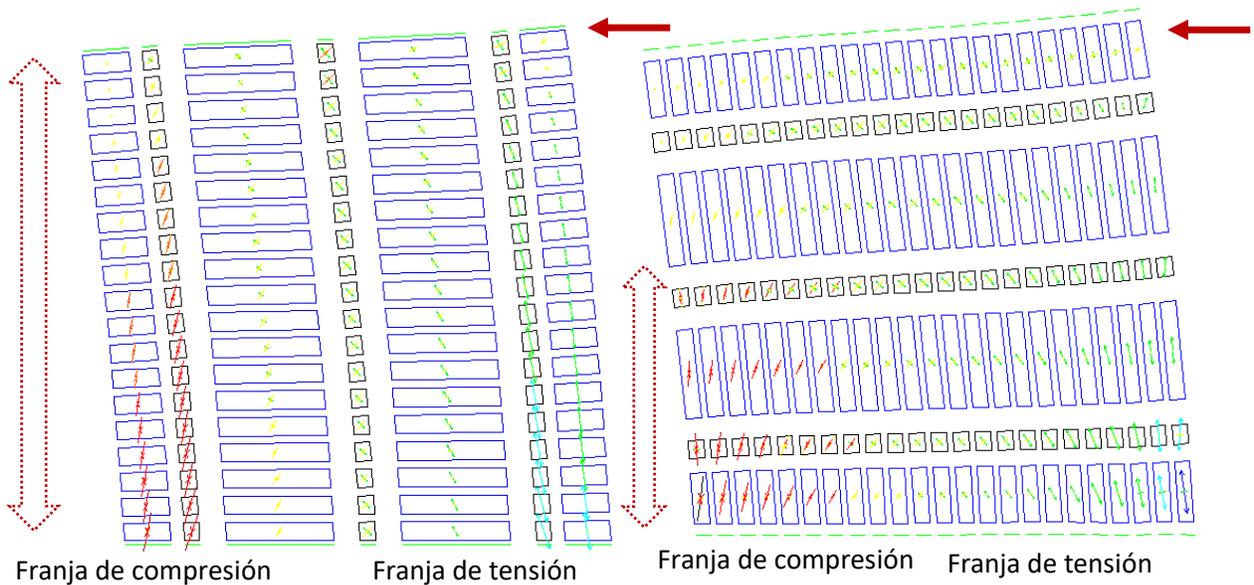


Figura 78: Diagrama de esfuerzos a compresión y tensión modelo 1 y modelo 2 MEF

5.5.4. MODELO DE PUNTAL Y TIRANTE

A partir del montaje del ensayo se desarrolla un modelo de puntal y tirante asociado a las franjas a compresión y tensión registradas en el paso de carga, en el cual se da el agrietamiento visible presentado en la Figura 79:

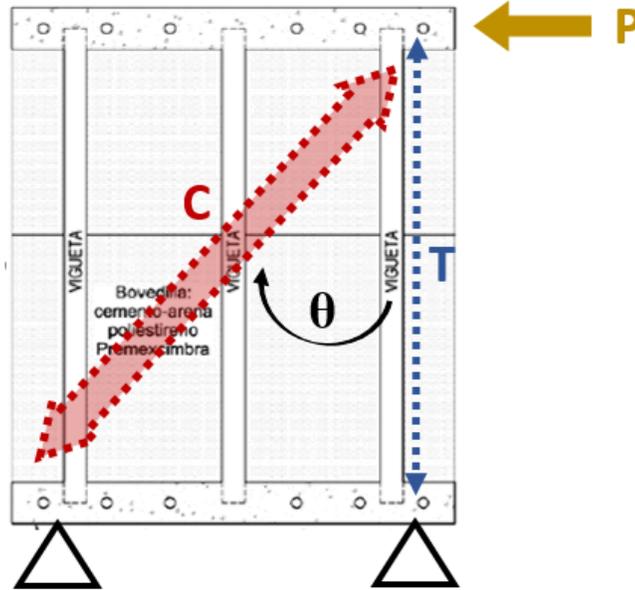


Figura 79: Estimación de respuesta en modelo puntal tirante.

$$C = P \text{ Sen}\theta \rightarrow \text{Carga de compresion asociada a carga lateral}$$

$$T = P \text{ Tan}\theta \rightarrow \text{Carga de tension asociada a carga lateral}$$

Los valores de cargas asociadas a esta estimación se presentan en la Tabla 12:

Tabla 12: Cargas de tensión y compresión a asociados al modelo de puntal y tirante.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Paso de carga	127	126	143
P(kN)	119	106.5	87
θ (Grados)	43	43	43
C (kN)	81.72	73.14	59.75
T(kN)	112.43	100.62	82.19

Se calcula la tensión admisible del refuerzo equivalente en un ancho de 0.50m, según la franja de agrietamiento dado en los modelos ensayados, como se muestra Figura 80:

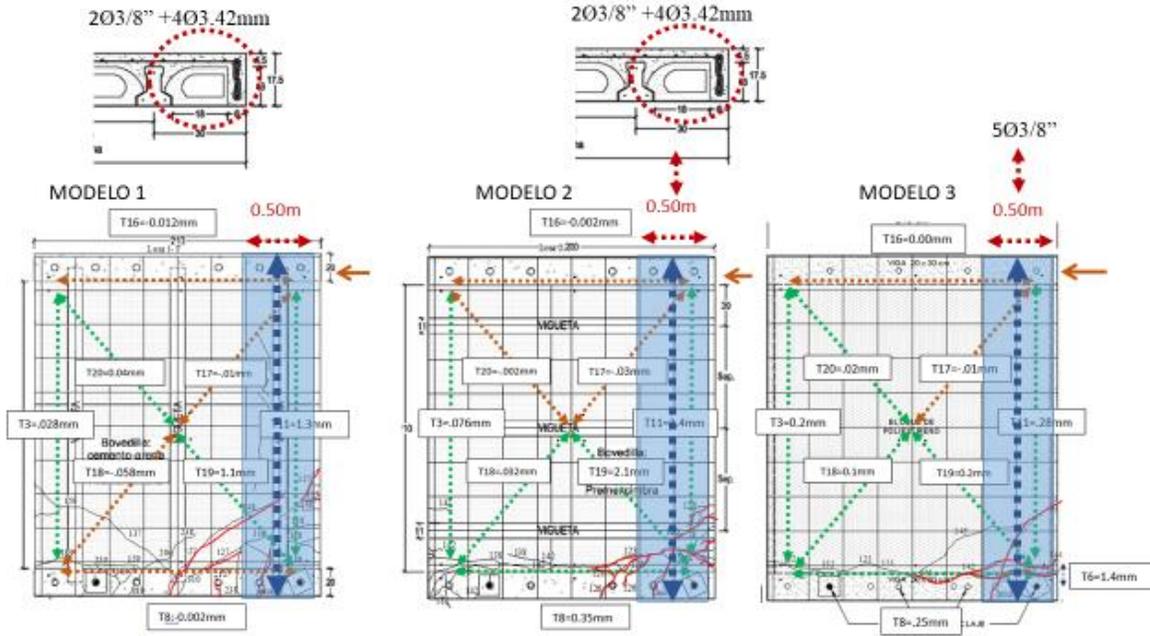


Figura 80: Franja a tensión.

El análisis muestra que los valores de tensión registrados para el paso de carga de agrietamiento, representan en el caso del modelo 1 y modelo 2, en promedio, 98% del valor de tensión admisible. Para el caso del modelo 3, se tiene que el valor de carga del tensor representa 54%. Al despejar el valor de P, asociado a las cargas teóricas admisibles, se tiene igualmente valores muy similares a los teóricos, en el caso del modelo 1 y modelo 2, con $P_{Adm-Teórico}=115kN$, correspondiente a pasos de cargas en el rango elástico del diagrama.

Los valores derivados de carga para la franja a tensión son similares en el caso del modelo 1 y modelo 2, lo que permite inferir que la disposición de las viguetas y su refuerzo, no influyen en la forma como el diafragma atiende las sollicitaciones laterales

El acero requerido para atender las cargas de tensión derivadas del ensayo, son igualmente mucho mayores, en el caso del modelo 1 y modelo 2, para un f_y de 600MPa.

Las tensiones admisibles del refuerzo asociado a estas franjas, se presenta en la Tabla 13, donde f_y es la resistencia a la tracción del refuerzo del firme, A_s el área

del acero en la franja considerada, T_{adm} la tensión admisible teórica, $T_{registrado}$ el valor experimental registrado:

Tabla 13: Tensión admisible, según refuerzo en la franja de tensión.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
f_y (MPa)	600	600	420
A_s (mm²)	181	181	360
T_{adm} (kN)	108.45	108.45	151.20
$T_{registrado}$ (kN)	112.43	100.62	82.19
T_{adm} / T_{reg} (%)	104%	93%	54%
$P_{adm-Teórico}$ (kN)	115	115	160
$A_{s-requerido}$(mm²)	187	168	196

5.6. METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA DIAFRAGMAS PREFABRICADOS

El diseño del diafragma considera 2 pasos en su diseño:

1. Transmisión de cargas verticales al sistema de resistencia vertical.
2. Transmisión de cargas laterales al sistema de resistencia sísmica.
 - a. El diseño del diafragma de piso debe enfocarse para que se comporten elásticamente al ser sometidos a cargas laterales.

A partir de metodologías existentes, normatividad y el presente estudio de los ensayos se tiene los siguientes pasos de diseño:

- b. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA A ANALIZAR
- c. ANÁLISIS DE CARGAS DE DISEÑO
- d. ALTURA DE DIAFRAGMA
- e. ESPESOR DE LA LOSETA SUPERIOR
- f. ALTURA DEL PERFIL DE VIGUETA
- g. CONEXIONES Y APOYO
- h. REFORZAMIENTO DE LOSETA
- i. ANÁLISIS POR CARGAS LATERALES DE LOS DIAFRAGMAS
- j. DISEÑO DE ELEMENTOS POR EL MÉTODO DE PUNTAL-TIRANTE APÉNDICE C-A NSR-10
- k. CAPACIDAD DE PUNTAL
- l. CAPACIDAD DE TIRANTE

5.6.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA A ANALIZAR

A partir del sistema de diafragma ensayado, se presenta el siguiente procedimiento de diseño, tomando como ejemplo una edificación de 4 losas con una configuración en planta de 4 paneles de 2.10m x 2.50m, cada uno, para la tipología de diafragmas ensayados, es decir, Vigüeta-bovedilla en dirección X y Y, y losa maciza de 120mm. La modelación y el análisis tuvo en cuenta elementos tipo Shell, bajo los parámetros presentados en el ANEXO III, considerando la vigüeta y bovedilla. Estos están sustentado por un sistema de pórticos en sus dos direcciones, con vigas perimetrales de 0.20m x 0.30m, sin ser restringidas a la torsión generadas por los diafragmas, y soportados en sus ejes por columnas de 0.40m x 0.40m, con una altura de entrepiso de 2.50m como se muestra en la Figura 81. El uso del sistema se estipula como residencial y se ubica en el municipio de Ciudad Bolívar, del departamento de Antioquia, Colombia. La resistencia del concreto $f'_c=25\text{MPa}$ y del acero $f_y=490\text{MPa}$, para el diafragma prefabricado y $f_y=420\text{MPa}$, para el diafragma losa maciza de 120mm:

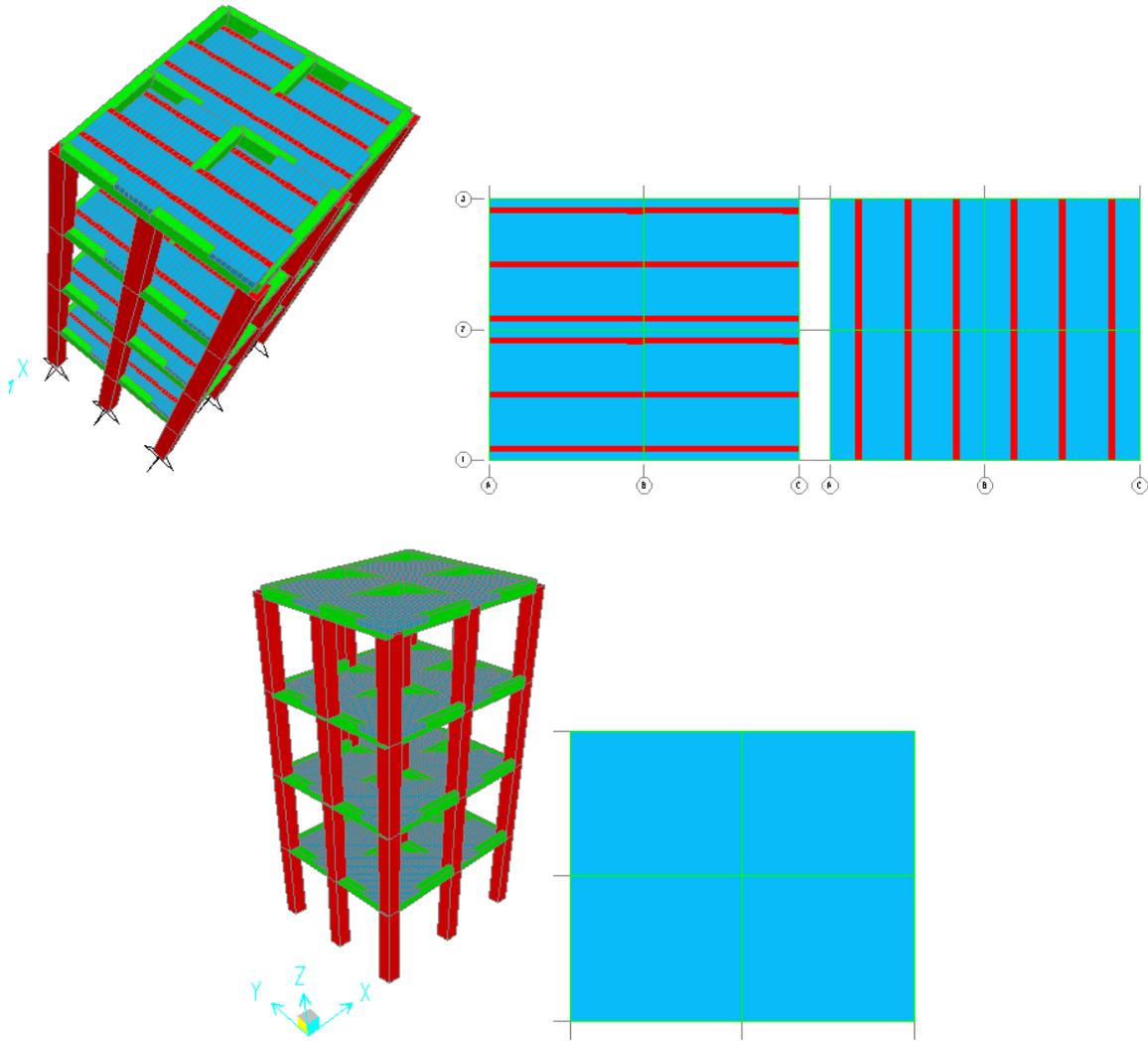


Figura 81: MEF de 4 niveles con diafragmas en Vigueta-Bovedilla.

5.6.2. ANÁLISIS DE CARGAS DE DISEÑO

Las cargas de diseño se asumen según el TITULO B de la NSR-10, en el caso de cargas verticales:

DIAFRAGMAS DE VIGUETA Y BOVEDILLA

Tabla 14: Análisis de cargas actuantes en cada nivel de diafragma prefabricado.

ANÁLISIS DE CARGA	CARGA(kN/m ²)	AREA(m ²)	PESO(kN)	
CARGA MUERTA				
VIGA 20X30			54.14	Peso de la viga por nivel
COLUMNA 40X40			86.40	peso de la columna por nivel

DIAFRAGMA VIGUETA-BOVEDILLA	2.5	21	52.50	peso de la los por nivel
DIVISIONES	3	21	63.00	Tabla B.3.4.3-1
ACABADOS	1.6	21	33.60	Tabla B.3.4.3-1
DIAFRAGMA DE VIGUETA BOVEDILLA			289.64	CARGA MUERTA TOTAL
CARGA VIVA				Tabla B.4.2.1-1
RESIDENCIAL	1.8	21	37.80	
CARGA TOTAL NIVEL			327.44	CARGA DE SERVICIO TOTAL

DIAFRAGMAS DE LOSA MACIZA DE 120mm

Tabla 15: Análisis de cargas actuantes en cada nivel de diafragma de losa maciza.

ANALISIS DE CARGA	CARGA(kN/m ²)	AREA(m ²)	PESO(kN)	
CARGA MUERTA				
VIGA 20X30			54.14	Peso de la viga por nivel
COLUMNA 40X40			86.40	peso de la columna por nivel
DIAFRAGMA LOSA MACIZA 120mm	2.88	21	60.48	peso de la los por nivel
DIVISIONES	3	21	63.00	Tabla B.3.4.3-1
ACABADOS	1.6	21	33.60	Tabla B.3.4.3-1
DIAFRAGMA DE LOSA MACIZA 120mm			297.624	CARGA MUERTA TOTAL
CARGA VIVA				Tabla B.4.2.1-1
RESIDENCIAL	1.8	21	37.80	
CARGA TOTAL NIVEL			335.42	CARGA DE SERVICIO TOTAL

5.6.3. ALTURA DE DIAFRAGMA

Según el manual de la ANIVIP(ANIVIP, 2012), el espesor efectivo de losa se obtiene a través de:

$$h \geq \frac{L}{25} \rightarrow \text{para nuestro caso } L = 2.5m \text{ ó } 2.1m, \text{ en donde } h = 0.10m \text{ o } 0.084m$$

Si se considera igualmente el numeral “C.9.5.2 — Elementos reforzados en una dirección (no pre esforzados)” de la NSR-10(Ministerio de Vivienda, 2010), en la tabla C.9.5(c), se especifica el siguiente valor para vigas o losas nervadas en una dirección y simplemente apoyadas:

$$h \geq \frac{L}{16} \rightarrow \text{para nuestro caso } L = 2.5\text{m ó } 2.1\text{m, en donde } h = 0.16\text{m o } 0.13\text{m}$$

El título C, en sus capítulos C.16 y C.17, no restringe la altura del diafragma propiamente a un espesor. Por lo cual se adopta un intervalo entre: $\frac{L}{25} \geq h \geq \frac{L}{16}$, para diafragmas prefabricados en una dirección y con una longitud menor a 6mts.

5.6.4. ESPESOR DE LA LOSETA SUPERIOR

Según el manual de la ANIVIP(ANIVIP, 2012), en su sección 3.4.3. el espesor debe tener en cuenta la TABLA 3.1(Recomendaciones de la Norma Oficial Mexicana de Vigueta y Bovedilla NMX-C-406-ONNCCE-2014 y la Tabla 3.2 (Recomendaciones de las NTCC-2004)

Tabla 16: Recomendaciones de espesores para loseta superior (Losa Topping).(ANIVIP, 2012)

Tabla 3.2 Recomendaciones de las NTCC (Adaptado de las NTCC, 2004)	
Espesor del firme, e (mm)	Claro, L (m)
$e \geq 30$	$L < 6$
$e \geq 60$	$L \geq 6$

Tabla 3.1 Recomendaciones de la NMX-C-406-1997			
Espesor del firme, e (mm)	Claro, L (m)	Altura de la estructura, H (m)	Observaciones
$e \geq 60$	$L \leq 4$	$H \leq 13$	Estructura a base de muros
$e \geq 60$	$4 < L \leq 5.5$	$H > 13$	Revisar el comportamiento de diafragma rígido ante cargas laterales
$e \geq 60$	$5.5 < L \leq 8$	$H > 13$	
$e \geq 60$	$L > 8$	$H > 13$	

La normativa colombiana(Ministerio de Vivienda, 2010) sugiere en su capítulo C, en el numeral “C.7.7.1 — Concreto construido en sitio (no pre-esforzado)”, un recubrimiento del refuerzo para losas no menor de 20mm, para barras menores a un diámetro de 1-3/8”, lo que permite obtener espesores de 40mm. En el caso de análisis se tiene un espesor de 4.5mm.

5.6.5. ALTURA DEL PERFIL DE VIGUETA

La altura del perfil a utilizar debe ser tal que resista las combinaciones gravitacionales de carga y se ajuste al espesor de losa h , para controlar las deflexiones permisibles. Se debe considerar 2 estados de carga:

1. CARGAS CONSTRUCTIVAS (SISTEMA APUNTALADO)
2. CARGAS DE SERVICIO

Para esto se debe realizar un análisis con las áreas aferentes de la vigueta, bajo las cargas analizadas, obteniendo los momentos flectores y cortantes últimos bajo las combinaciones de carga del título B, capítulo B.2. La capacidad de la vigueta varía de acuerdo al proveedor del elemento, por lo cual, es recomendable referirse a la ficha técnica del elemento prefabricado y su capacidad para las cargas vs luz(m) analizadas para cada caso particular. En el caso de estudio, para resistir las cargas verticales, se tiene una configuración de viguetas con separación de 0.75m y peralte de 0.13m, como se muestra en la Figura 82. :

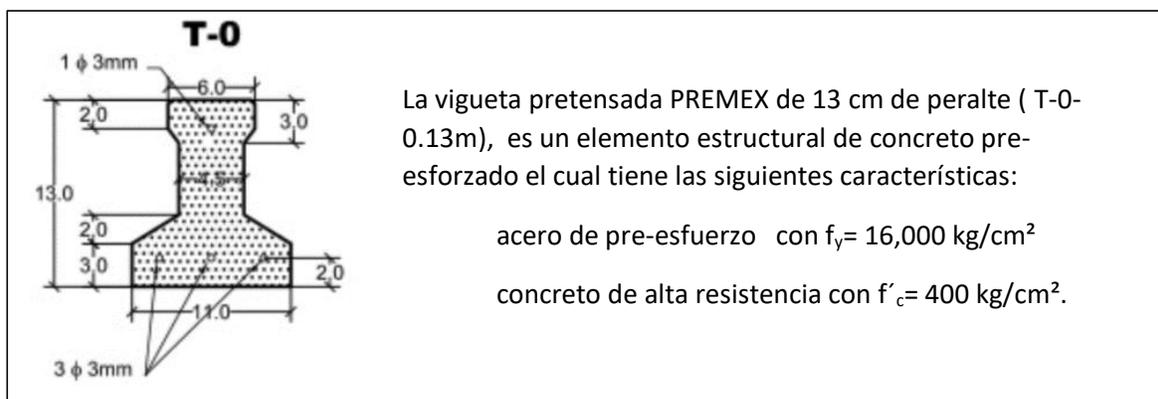


Figura 82: Sección de perfil P-13(PRESFORZADOS MEXICANOS DE TIZAYUCA, 2013):

Tabla 17: Abaco para el chequeo de resistencia de las viguetas para Momento y Cortante. (PRESFORZADOS MEXICANOS DE TIZAYUCA, 2013)

TABLAS DE MOMENTOS RESISTENTES POSITIVOS Y NEGATIVOS DE FORJADOS EN DIFERENTES PERALTES PARA LAS VIGAS: T-0, T-4 Y T-5									
FLEXIÓN POSITIVA (por m.)					FLEXIÓN NEGATIVA (por m.)				
Sistema	Tipo viga	Momento último kgm/m	Momento de trabajo kgm/m	Rigidez m ² kg/m	Refuerzo superior por nervio	Momento último mkg/m secc. tipo	Momento de fisuración mkg/m	Rigidez m ² kg/m	Cortante último kg/m
(13+4) 70	0	781	545	375000	1φ1 1/2" + 1φ3/8" 2φ1/2"	1206 1397			2126 2126
	4	1523	950	375000	1φ5/8" + 1φ3/8" 1φ5/8" + 1φ1/2"	1687 1860	794	375000	2126 2126
	5	1946	1225	375000	3φ1/2" 2φ5/8"	2001 2144			2126 2126

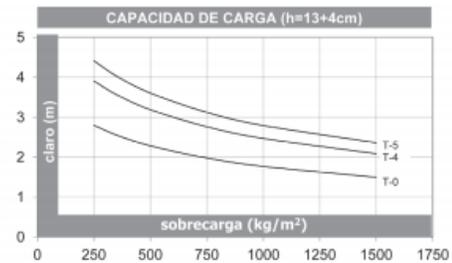
TABLAS Y GRÁFICAS DE CARGA

TABLA DE CARGAS (h=13+4cm) P.P.=250kg/m²
BOVEDILLA DE CEMENTO-ARENA

SOBRECARGA UTIL = Carga Viva + Acabados (kg/m²)

TIPOS	250	350	500	750	1000	1500
T-0	2.79	2.55	2.28	1.98	1.77	1.49
T-4	3.90	3.56	3.19	2.76	2.47	2.09
T-5	4.41	4.03	3.60	3.12	2.79	2.36

CLARO (m)



5.6.6. CONEXIONES Y APOYO

El numeral C.16.6.2.2 de la NSR-10 especifica:

“A menos que se muestre por medio del análisis o ensayos que el comportamiento no se ve afectado, debe cumplirse con (a) y (b):

(a) Cada elemento y su sistema de apoyo debe tener dimensiones de diseño seleccionadas de manera que, después de considerar las tolerancias, la distancia desde el borde del apoyo al extremo del elemento prefabricado en la dirección de la luz sea al menos $n \cdot 180$, pero no menos que:

Para losas sólidas o alveolares (hollow-core): **50 mm**

Como se observó en los ensayos realizados los apoyos de las viguetas tuvieron un comportamiento adecuado para cargas laterales con un apoyo de 100mm, por lo que es recomendable llevar este apoyo entre 50mm a 100mm, como muestra la Figura 83 :

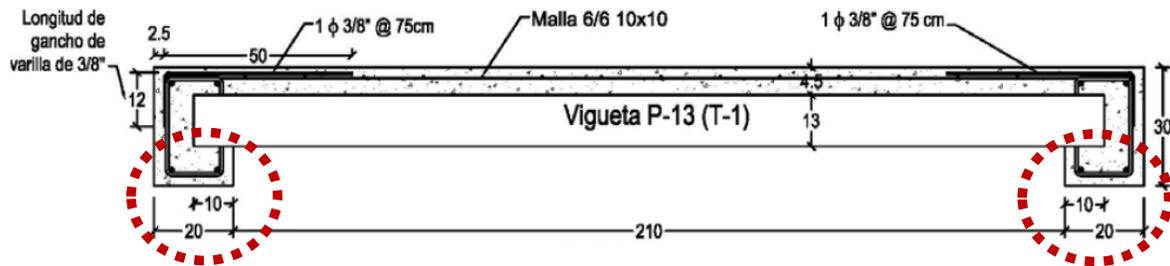


Figura 83: Sección transversal de los modelos 1 y 2. Apoyo de 10 cms.

5.6.7. REFORZAMIENTO DE LOSETA

El reforzamiento de la loseta superior, está dirigido a atender esfuerzos retracción y temperatura. La NSR-10, en su numeral C.7.12.2.1 estipula una cuantía de 0.0018 para barras de 420MPa. Para una loseta de 4.5mm podría proveerse la siguiente cuantía de acero:

$$0.0018 * 1000mm * 45mm = 81 \rightarrow 84mm^2 (As \text{ Malla } D - 84)$$

El manual de la ANIVIP, se sugiere que a medida que aumenta el espesor de losa disminuye el tamaño de grieta y que valores de loseta menores de 60mm la cuantía de acero es relevante (ANIVIP, 2012), en alineación al objetivo final de la loseta: durabilidad y apariencia. Igualmente afirma que el uso de cuantías menores de 0.002 en diferentes sistemas de piso conduce a tamaños de grietas mayores que 0.3mm, lo que produce problemas de durabilidad y mala apariencia del sistema, así como la incomodidad del usuario. En la Tabla 18, se estipula las cuantías necesarias para atender sugerida por el manual ANIVIP (Gilbert, 2001)

Tabla 18: Cuantía para control de retracción(Gilbert, 2001)(ANIVIP, 2012).

Cuantías requeridas en losas de concreto reforzado para sistemas de piso ($f_c=4200 \text{ kg/cm}^2$)

Condición	Observación	Cuantía
No Restringido	No expuesto a la intemperie	0.0025
No Restringido	Expuesto a la intemperie	0.0035
Restringido	Concreto Normal*	0.0050
Restringido	Concreto alta resistencia (500 kg/cm^2 o mayor)*	0.0070

* Expuesta o no a la intemperie

Cuantías requeridas en losas de concreto reforzado para sistemas de piso ($f_c=5000 \text{ kg/cm}^2$)

Condición	Observación	Cuantía
No Restringido	No expuesto a la intemperie	0.0021
No Restringido	Expuesto a la intemperie	0.0030
Restringido	Concreto Normal*	0.0045
Restringido	Concreto alta resistencia (500 kg/cm^2 o mayor)*	0.0060

* Expuesta o no a la intemperie

Para una loseta de 4.5mm podría proveerse la siguiente cuantía de acero:

$$0.0030 * 1000\text{mm} * 45\text{mm} = 135 \rightarrow 135\text{mm}^2(\text{As Malla } D - 131)$$

5.6.8. ANÁLISIS POR CARGAS LATERALES DE LOS DIAFRAGMAS

Los parámetros sísmicos asociados al sitio de estudio se extraen del apéndice A-4:

Tabla 19: Especificaciones sísmicas Título A-NSR-10.

Especificaciones Sísmicas			
Av	0.30	Fig. A.2.4-1	coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva
Aa	0.25	Fig. A.2.4-2	coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva
Fv	1.80	Tabla A.2.4-4	coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de
Fa	1.30	Tabla A.2.4-3	coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de
Suelo tipo =	D	Tabla A.2.4-1 -Clasificación de los perfiles de suelo	
Nivel de importancia	I	1	A.2.5.1.4

Tabla 20: Periodo fundamental según capítulo A.4-NSR-10.

PERIODO FUNDAMENTAL APROXIMADO			A.4.2 NSR 10		
Ta	0.373	A.4.2.2			
Ct=	0.047	Tabla A.4.2-1			
α	0.9	Tabla A.4.2-1	Coeficiente Tyabal A 4.2-1		
hn=	10.00	Altura desde la base al piso más alto del edificio(m)			
El valor de T no puede exceder CuTa , donde Cu se calcula por medio de la ecuación A.4.2-2 y Ta se calcula de acuerdo con A.4.2-3.					
Cu=	1.102	Cu no debe ser menor de 1.2.			
T=	0.41				

Tabla 21: Valor de Sa. Capítulo A.4-NSR-10.

FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE DISEÑO:					
Sa:	Máxima aceleración horizontal de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad				
Vr máximo (si T<Tc)					
Tc=	0.80	(A.2.6-2)			
Sa:	0.81	(A.2.6-3)	$S_a = 2.5A_a F_a I$	$T_C = 0.48 \frac{A_v F_v}{A_a F_a}$	
Vr mínimo (si T>TL)					
TL=	4.32	(A.2.6-4)			
Sa:	16.54	(A.2.6-5)	$T_L = 2.4F_v$	$S_a = \frac{1.2A_v F_v T_L I}{T^2}$	
Sa=	0.81			valor tomando	

Se realizó un análisis de cargas según el título A, capítulo A.8, ecuación (A.8.2-1) y (A.8.2-2):

Tabla 22: Cargas sobre diafragmas de piso del caso en estudio. (KN).

Nivel	h _{piso} (m)	h _i (m)	a _i =	Ro=	M _p (Kg/m)	F _p (kN)=	Carga por panel (kN)
Losa 1	2.5	2.5	0.438	1	29525.38	126.72	31.68
Losa 2	2.5	5	0.625	1	29525.38	181.03	45.26
Losa 3	2.5	7.5	0.813	1	29525.38	235.34	58.83
Losa 4	2.5	10	1.083	1	29525.38	313.78	78.45

Las cargas se aplican en el centro de panel. Como se muestra, la cargas en el sitio de estudio son mayores a ciudades como Medellín o Barranquilla y son equiparables a la metodología dada por la ASCE 7-10(American Society of Civil Engineers, 2016):.

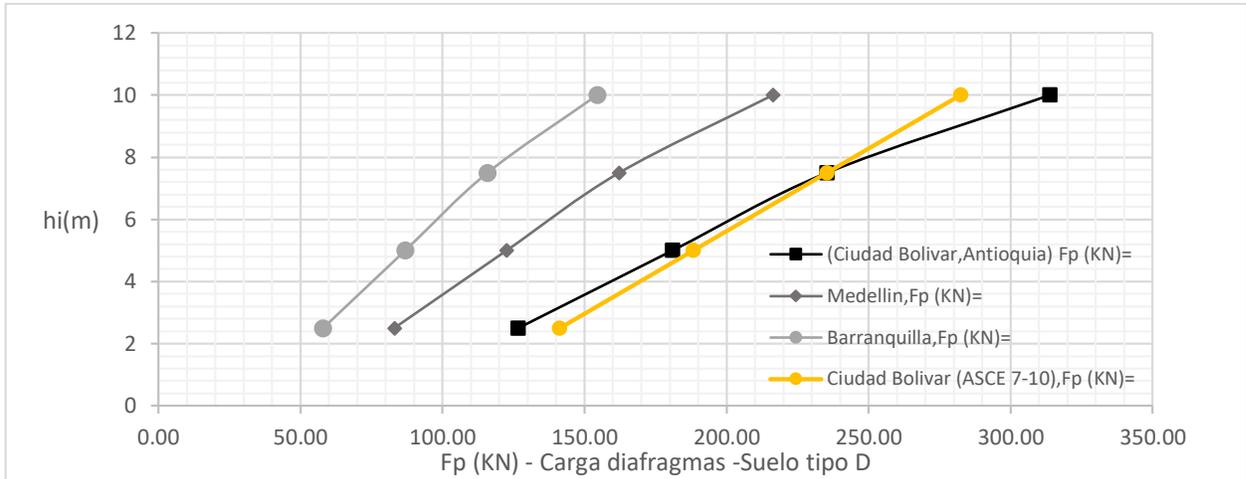


Figura 84: Cargas por fuerzas horizontales en elementos estructurales que no hacen parte del sistema principal de resistencia.

Las cargas obtenidas por nivel se distribuyen en los cuatro paneles por igual, tanto en la dirección X como la Y como muestra la Figura 85, correspondiente al nivel 4 con 78.45 kN por panel :

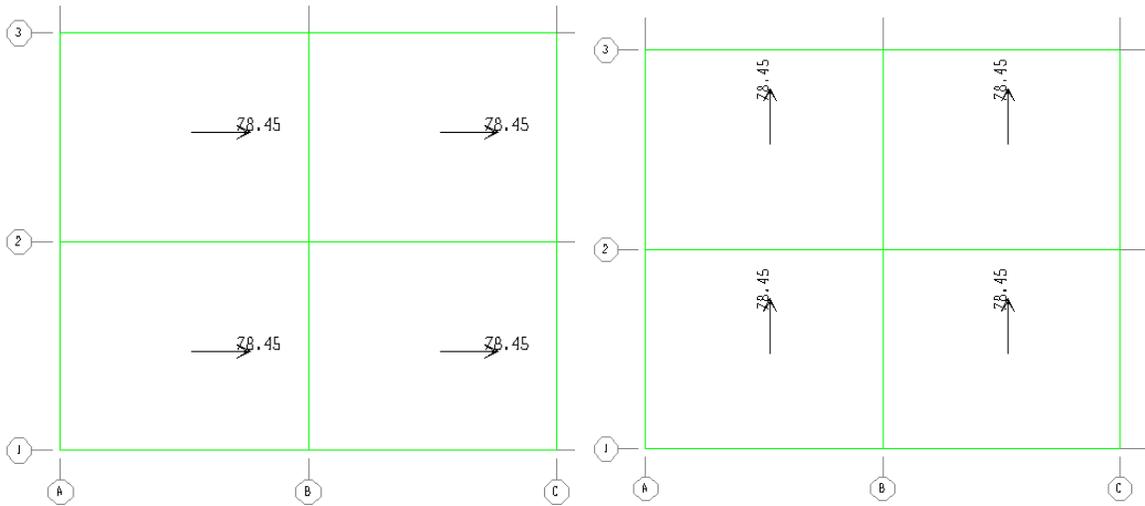
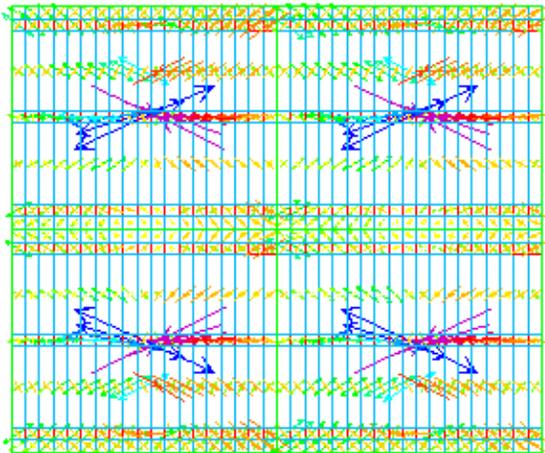


Figura 85: Concentración de cargas en los diafragmas en dirección X y Y. (kN)

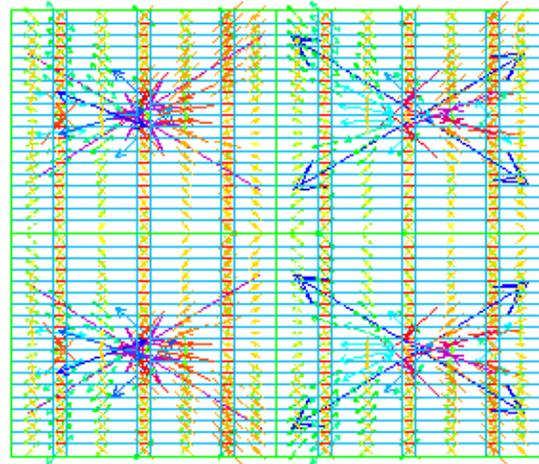
5.6.9. ANÁLISIS POR CARGAS LATERALES DE LOS DIAFRAGMAS

Las fuerzas internas por las cargas laterales en dirección X y dirección Y, se presentan en la Figura 86 y en la Figura 87. Se observan los esfuerzos a tensión con flechas verdes y azules y los esfuerzos a compresión en colores rojo y naranja:

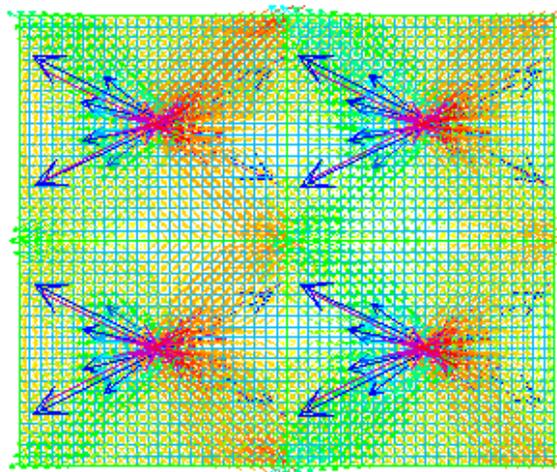
FUERZAS EN LA DIRECCION X



A) diafragma V-B dirección X



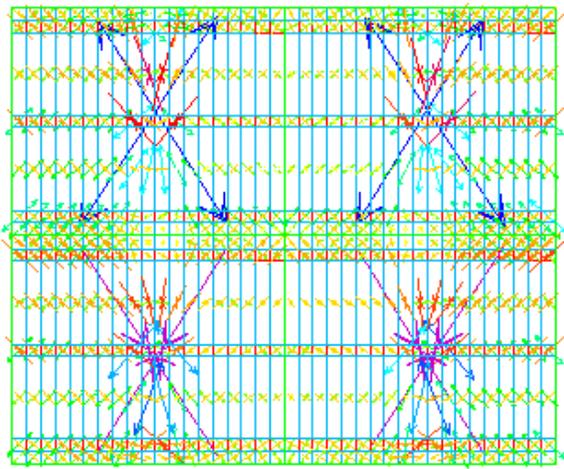
B) diafragma V-B dirección Y



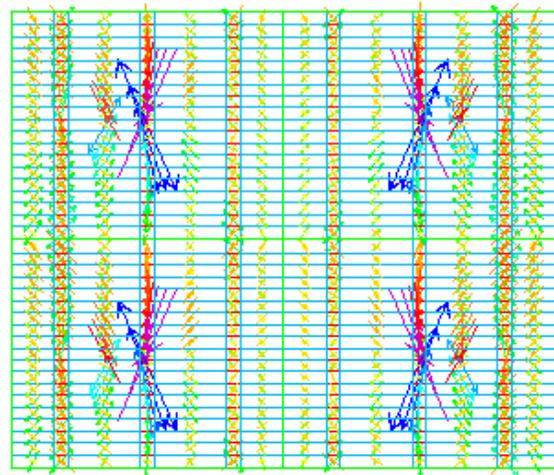
C) Diafragma losa maciza 120mm.

Figura 86: Fuerzas internas sobre los modelos bajo cargas en la dirección X.

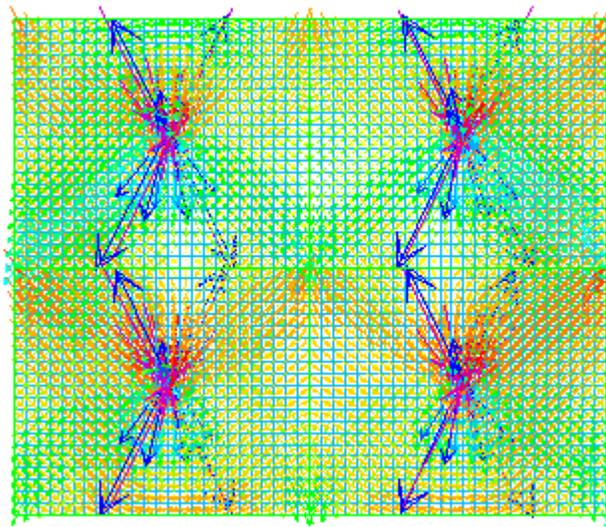
FUERZAS EN LA DIRECCION Y



A) diafragma V-B dirección X



B) diafragma V-B dirección Y



C) Diafragma losa maciza 120mm.

Figura 87: Fuerzas internas sobre los modelos bajo cargas en la dirección Y.

5.6.10. DISEÑO DE ELEMENTOS POR EL MÉTODO DE PUNTAL-TIRANTE
APÉNDICE C-A NSR-10.

Para la implementación de los elementos se definen nodos, elementos tipo tirante y puntal según el apéndice C-A de la NSR-10, estos se definen de acuerdo a la distribución de tensiones máximas dentro del MEF, que satisfaga las condiciones de borde. El modelo de cercha debe ser capaz de transferir todas las cargas mayoradas hacia los apoyos o regiones-B adyacentes y el ángulo, entre los ejes de cualquier puntal y de cualquier tensor entrando en un solo nodo no debe ser menor de 25° (Ministerio de Vivienda, 2010). La Figura 88 muestra la cercha adoptada para el sistema de puntales y tirantes:

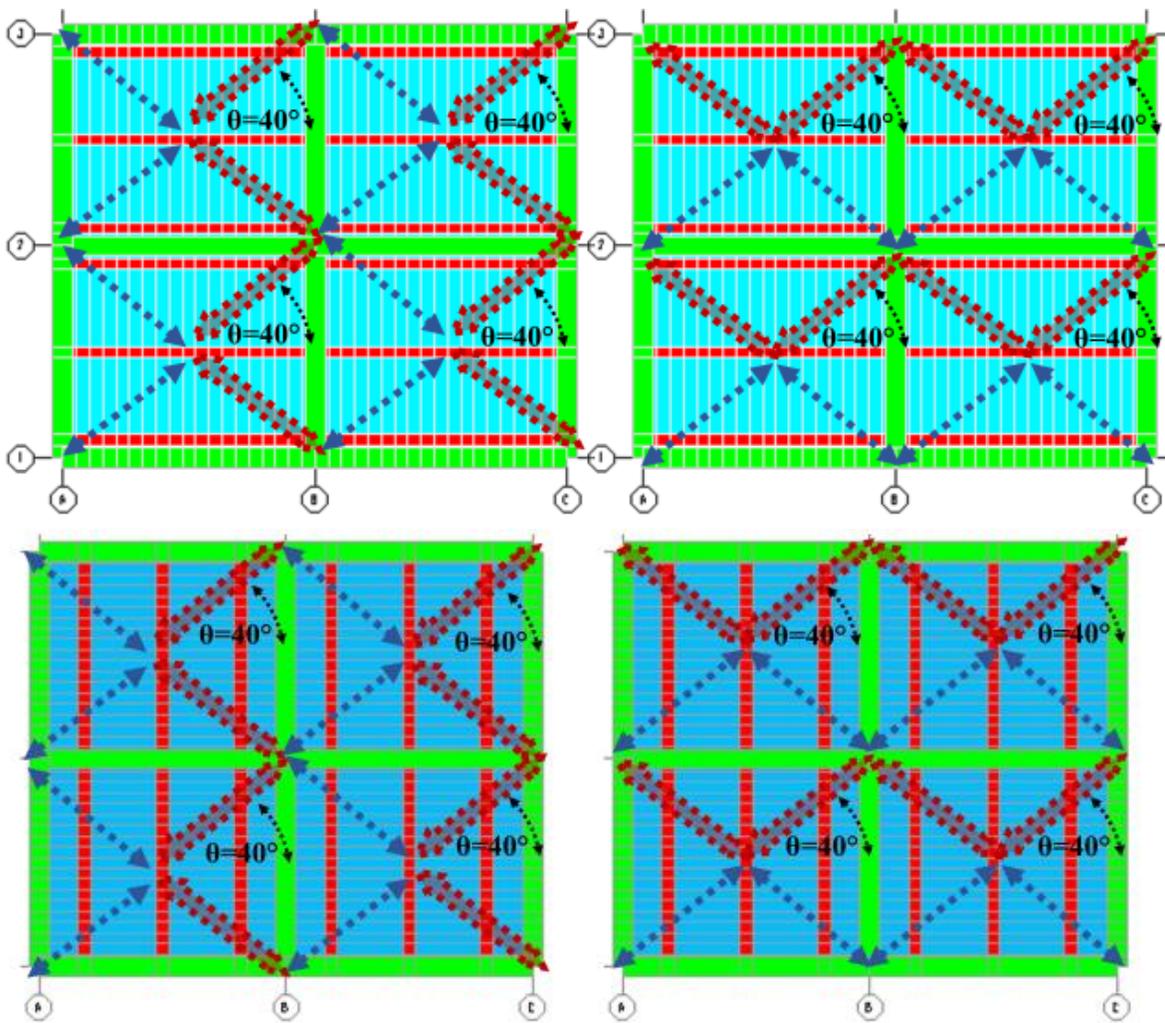


Figura 88: Cercha de puntal-tirante.

5.6.10.1. CAPACIDAD DE PUNTAL

La Proyección de las dimensiones de la columna permite obtener el ancho virtual que tendrá el puntal como muestra la Figura 89:

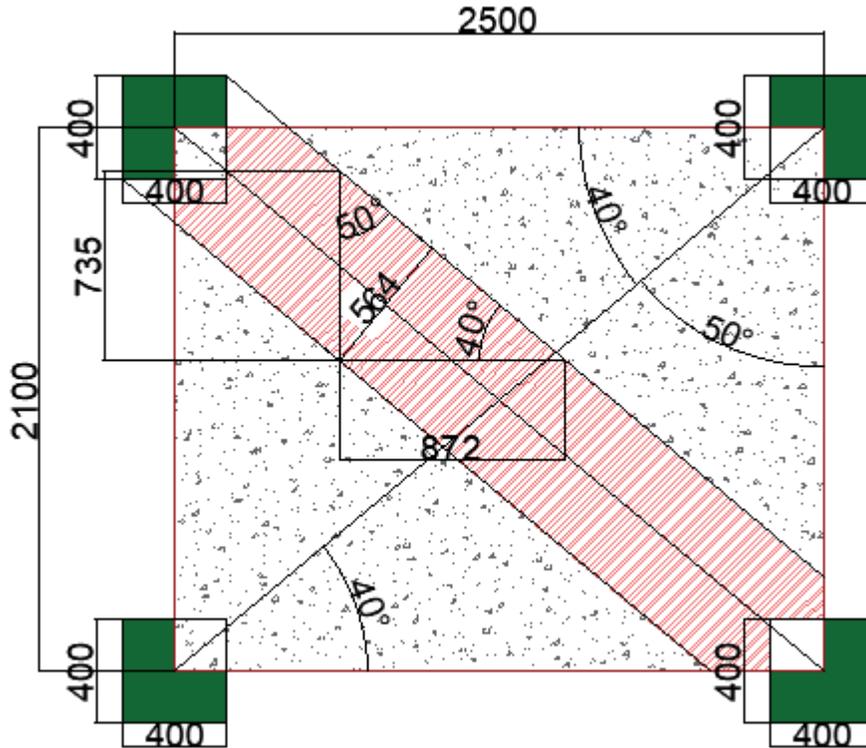


Figura 89: Ancho de puntal.

Según el numeral C-A.3.1 del apéndice A en el Título C: La resistencia nominal a la compresión de un puntal sin refuerzo longitudinal, F_{ns} , debe tomarse como el menor valor de $F_{ns} = f_{ce}A_{cs}$ (C-A-2) en los dos extremos del puntal, donde $f_{ce} = 0.85\beta_s f'_c$ y A_{cs} es el área de la sección transversal en un extremo del puntal, y, f_{ce} es el menor valor entre (a) y (b):

- la resistencia efectiva a la compresión del concreto en el puntal dado en C-A.3.2,
- la resistencia efectiva a la compresión en el concreto en la zona nodal dada en C-A.5.2.

La situación que plantea la edificación en este caso particular se acopla a la opción (a).

Según el numeral C-A.2.6, $\phi F_n > F_u$, lo cual se cumple para el caso en estudio como muestra la Tabla 23, en la cual se especifica las cargas de compresión F_u de los puntales para las direcciones de análisis X y Y, siendo θ el ángulo de inclinación de

elemento tipo puntal, “ w_p ” y “ l_p ” son las dimensiones de las columnas, “ e ” es el espesor de la loseta superior, A_{sc} es el área del puntal proyectada por el ancho de las columnas y F_{ns} es la capacidad del puntal de resistir las cargas siendo más de 800% de las cargas impuestas:

Tabla 23: Análisis de capacidad de puntal para el diafragma.

Análisis de puntal											
Esfuerzo actuante			Geometría				Capacidad a compresión				
ELEMENTOS	F_u (KN)=	θ°	Ancho w_p (mm)	Largo l_p (mm)	e (mm)=	A_{cs} (mm ²)=	f'_c (Mpa)=	f_{ce} (Mpa)=	\emptyset	F_{ns} (KN)=	%
Puntal Dir x	-50.42	40	400	400	45	25359.0	25	21.25	0.9	485	962%
Puntal Dir y	-60.09	50	400	400	45	25359.0	25	21.25	0.9	485	807%

5.6.10.2. CAPACIDAD DE TIRANTE

El acero seleccionado inicialmente para la loseta, para controlar los esfuerzos de retracción y temperatura ha sido D-131, con un área de 131 mm²/m, según numeral 5.6.7 REFORZAMIENTO DE LOSETA

Según el numeral C-A.4.1 — La resistencia nominal de un tensor, F_{nt} , debe calcularse como $F_{ns} = A_{ts}f_y + A_{tp}(f_{se} + \Delta f_p)$ (C-A-6), donde $f_{se} + \Delta f_p$ no debe exceder f_{py} , y A_{tp} es igual a cero para los elementos no pre esforzados.

Para este caso se tomará las componentes de fuerza de los tirantes y se diseñará el refuerzo en dos direcciones ortogonales, de tal manera que satisfaga las sollicitaciones de estos esfuerzos.

Al igual para los puntales, $\emptyset F_n > F_u$, en la cual se especifica las cargas de tensión F_u de los puntales para las direcciones de análisis X (F_{uh}) y Y (F_{uv}), siendo θ el ángulo de inclinación de elemento tipo tirante, “ w_p ” y “ l_p ” son las dimensiones de las columnas, “ b_v ” el ancho aferente en dirección Y, “ b_h ” el ancho aferente en dirección X, A_{tsv} y A_{tsh} el área de acero en el ancho aferente en la dirección Y y en la dirección X, y F_{nsv} y F_{nsh} es la capacidad a tensión en la dirección Y y X respectivamente. como se observa inicialmente la capacidad del acero para retracción y temperatura D-131, no es suficiente, teniendo un porcentaje de 92% de la sollicitación en la dirección Y:

Tabla 24: Primer análisis de capacidad de tirante para el diafragma.

Análisis de tirante																
Esfuerzo actuante				Geometría						Capacidad a tensión						
ELEMENTOS	F_u (KN)=	θ°	F_{uv} (Mpa)	F_{uh} (Mpa)	Ancho w_p (m)	Largo l_p (mm)	b_v (mm)=	b_h (mm)=	A_{sv} (m)	A_{sh} (mm ²)	f_y (Mpa)=	\emptyset	F_{nsv} (Mpa)	%	F_{nsh} (Mpa)	%
Tirante Dir x	50.42	40	39	32	400	400	736	877	96	115	490	0.9	42	110%	51	156%
Tirante Dir y	60.09	50	39	46	400	400	877	736	115	96	490	0.9	51	131%	42	92%

Para atender la tensión en el ancho aferente las cargas del tirante, es necesario aumentar el refuerzo de la loseta, por lo cual se adopta una malla D-158. Con esto se tiene la capacidad necesaria para atender estas cargas a tensión, además de cumplir, las cargas por retracción y temperatura, como muestra la Tabla 25 :

Tabla 25: Segundo análisis de capacidad de tirante para el diafragma

Análisis de tirante																
ELEMENTOS	Esfuerzo actuante				Geometría						Capacidad a tensión					
	F _u (KN)=	θ°	F _{uv} (Mpa)	F _{uh} (Mpa)	Ancho w _p (m)	Largo l _p (mm)	b _v (mm)=	b _h (mm)=	A _{tsv} (m)	A _{tsb} (mm ²)	f _y (Mpa)=	Ø	F _{rsv} (Mpa)	%	F _{rsh} (Mpa)	%
Tirante Dir x	50.42	40	39	32	400	400	736	877	116	139	490	0.9	51	133%	61	188%
Tirante Dir y	60.09	50	39	46	400	400	877	736	139	116	490	0.9	61	158%	51	111%

5.7. RECOMENDACIONES

Las principales situaciones que se debe abordar de cara a continuación en el estudio e investigación de los sistemas de piso prefabricado, consisten en los siguientes puntos:

5.7.1. ENSAYOS DADOS BAJO CONDICIONES LOCALES

Aunque el desarrollo del presente documento permite obtener resultados importantes para el estudio en el análisis y diseño de diafragmas prefabricados, es necesario realizar los procedimientos efectuados en el laboratorio del CENAPRED, bajos las condiciones del medio colombiano. Para ello es necesario plantear investigaciones con ensayos sobre diafragmas prefabricado, que adapten los elementos y procesos constructivos utilizados en el medio local.

5.7.2. COMPORTAMIENTO DE LAS DEFORMACIONES DE CORTANTE Y FLEXION

Debido a que las deformaciones por cortante han sido menores respecto las deformaciones por flexión, es necesario profundizar en las razones por las se presenta esta situación en los diafragmas al someterlos a cargas en su plano, de tal manera que se compruebe los esfuerzos que predominan en las deformaciones del sistema.

6. CONCLUSIONES

En esta investigación se analizó la información de ensayos en laboratorio, aplicando cargas laterales cíclicas reversibles, a tres modelos de losas de concreto, una maciza y dos prefabricadas, con base en vigueta y bovedilla, empleando características comúnmente utilizadas por la industria de la construcción para este tipo de elementos. Las conclusiones a las que se llegó al evaluar el comportamiento ante cargas laterales son las siguientes:

1. En este estudio se evidencia la ausencia de un adecuado procedimiento racional ante cargas laterales para el análisis y diseño en la normatividad vigente, Norma Colombiana de Construcciones Sismo resistentes NSR-10, para sistemas de piso prefabricado, específicamente para sistemas asociados de vigueta-bovedilla. Se evidencia la necesidad de incorporar dentro de esta normatividad la filosofía para diseño en el intervalo elástico de estos sistemas, y la implementación de las adecuadas conexiones, así como las consideraciones para que tengan un adecuado comportamiento como diafragma.
2. El análisis de resultados muestra que el sistema de viguetas y bovedilla tiene un comportamiento similar al de una losa maciza equivalente, es por ello que es importante considerar los efectos que tienen la vigueta y bovedilla dentro del sistema de loseta, y la resistencia adicional que le confieren, específicamente en la modulación de las franjas de tensión y compresión.
3. La rigidez en el intervalo elástico, y la energía disipada por los diafragmas prefabricados en el intervalo plástico, es similar al modelo 3 de losa maciza.
4. De los resultados en la comparación del comportamiento de la losa de 120mm con una de 45mm, se deduce que considerar, para los sistemas prefabricados, que el diafragma es solo la capa superior correspondiente a la loseta vaciada en sitio, subestima la capacidad del diafragma completo y su respuesta ante cargas en su plano.
5. En los ensayos realizados no se observó una pérdida de apoyo en las viguetas de los diafragmas prefabricados, el agrietamiento observado en esta zona fue menor que el presentado por la losa maciza.
6. Es necesario tener en cuenta los agrietamientos y deformaciones que impone el sistema de resistencia principal al diafragma prefabricado, especialmente para que este permanezca en el intervalo elástico, ya que, es susceptible a

sufrir daños en sus componentes. En este sentido el agrietamiento observado permite concluir que las viguetas representan un amarre en la conexión con los elementos de confinamiento, ya que, las deformaciones registradas en las fijaciones, fueron mayores en la losa maciza respecto los diafragmas prefabricados, en donde las viguetas cortaban la trayectoria de las fisuras presentadas.

7. Se observó que la resistencia del diafragma no se ve afectado por la dirección de las viguetas del diafragma. La diferencia se presenta en los valores de rigidez de los pasos iniciales registrados, donde existe una rigidez por parte del modelo 1 (viguetas perpendiculares a las cargas) 50% mayor al modelo 2 (viguetas paralelas a las cargas).
8. Los análisis realizados mostraron que las deformaciones debidas al cortante no fueron relevantes en los modelos ensayados.
9. Se analizaron losas de igual espesor: maciza (en elementos finitos) y prefabricada (ensayos experimentales) de 170mm. Se encontró que el comportamiento teórico de las losas macizas era similar al de los resultados de los ensayos de las losas prefabricadas fisurando la sección al 50%.
10. Los análisis realizados con elementos finitos mostraron una correlación aceptable con los ensayos experimentales, cuando la modelación se realizaba con elementos tipo Shell, fisurando la sección al 50%.
11. La metodología aquí presentada considera los pasos que se encuentran en literatura de diferentes países, y se unifica para un mejor desarrollo practico,

I. ANEXO I: CALCULO DE DEFORMACIONES Y CURVATURA
EXPERIMENTALES POR CORTANTE Y FLEXION

A partir de la expresión implementada por Carrillo (Carrillo et al., 2012) y Gómez Bernal(Gómez Bernal et al., 2015), se calcula la deformación a flexión, cortante como se muestra en la Figura 90 :

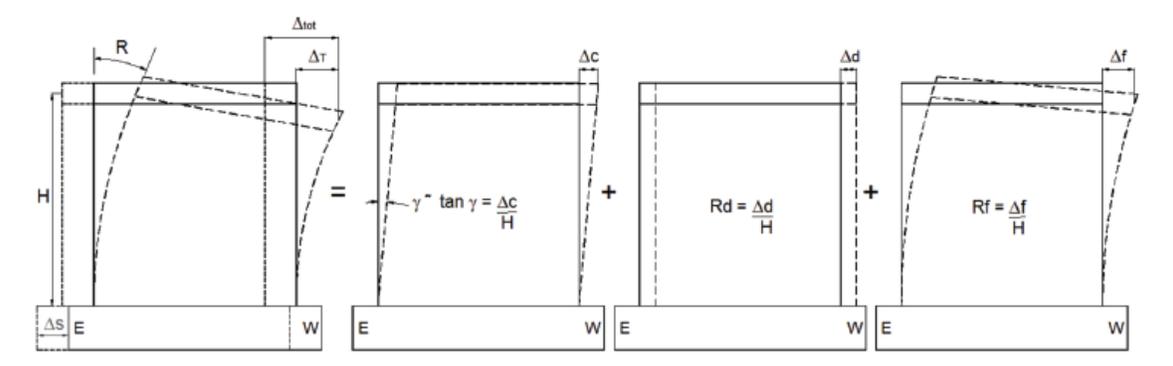


Figura 90: Desplazamiento interno asociado al comportamiento de un muro analizado por carrillo(Carrillo et al., 2012).

$$\Delta_T = \Delta_c + \Delta_d + \Delta_f$$

Donde

Δ_T =Desplazamiento relativo total

Δ_c =Desplazamiento relativo cortante

Δ_d =Desplazamiento relativo por deslizamiento

Δ_f =Desplazamiento relativo por flexión

En la Figura 91, se presenta la localización de los dispositivos asociado al ensayo analizado por Carrillo, en el cual, se acentúa la localización de los sensores diagonales D1 y D2:

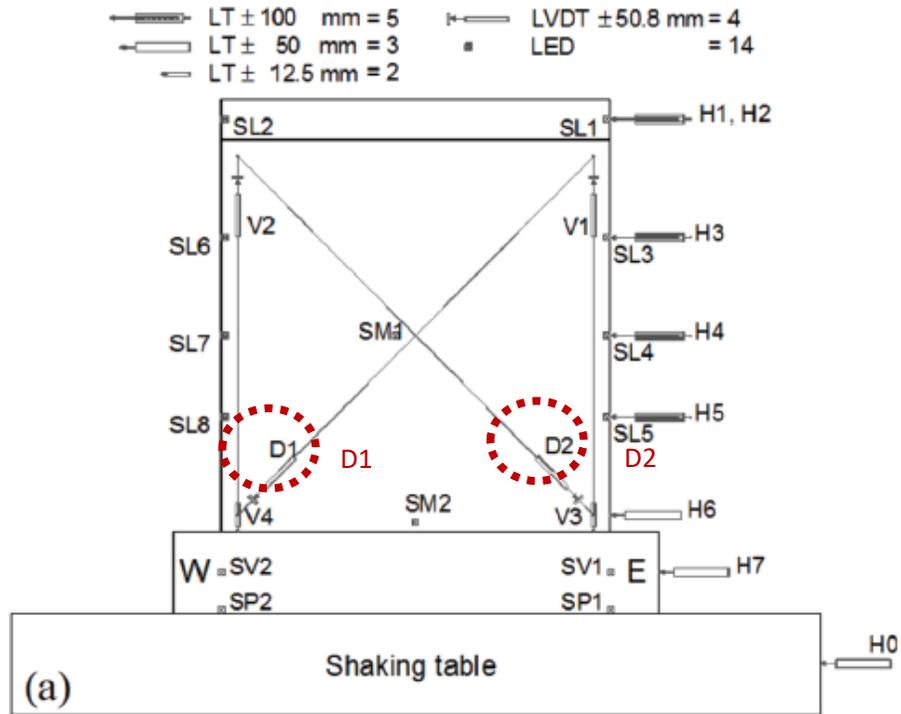


Figura 91: dispositivos asociados a experimento analizado por carrillo (Carrillo et al., 2012).

Como se observa en la ecuación (6), los dispositivos emplazados en el ensayo analizado por carrillo, permiten hallar la deformación aportada por los esfuerzos cortantes, dentro del modelo, a partir de la mecánica de materiales, teniendo como referencia el cambio de longitud de dos puntos fijos de esquinas opuestas del panel:

$$\Delta_c = \gamma H = \frac{\delta_2 D_2 - \delta_1 D_1}{2lh} H \quad .(6)$$

Donde γ es la deformación por cortante en el panel, δ_1 y δ_2 son el registro de deformaciones registrados por los transductores diagonales, D_1 y D_2 son las longitudes diagonales iniciales entre los puntos fijos, y "l" y "h", son la longitud y altura del panel diagonal. En los modelos de diafragmas estudiados, la disposición, valores de las variables a utilizar y de los sensores del ensayo se presenta en la Figura 92:

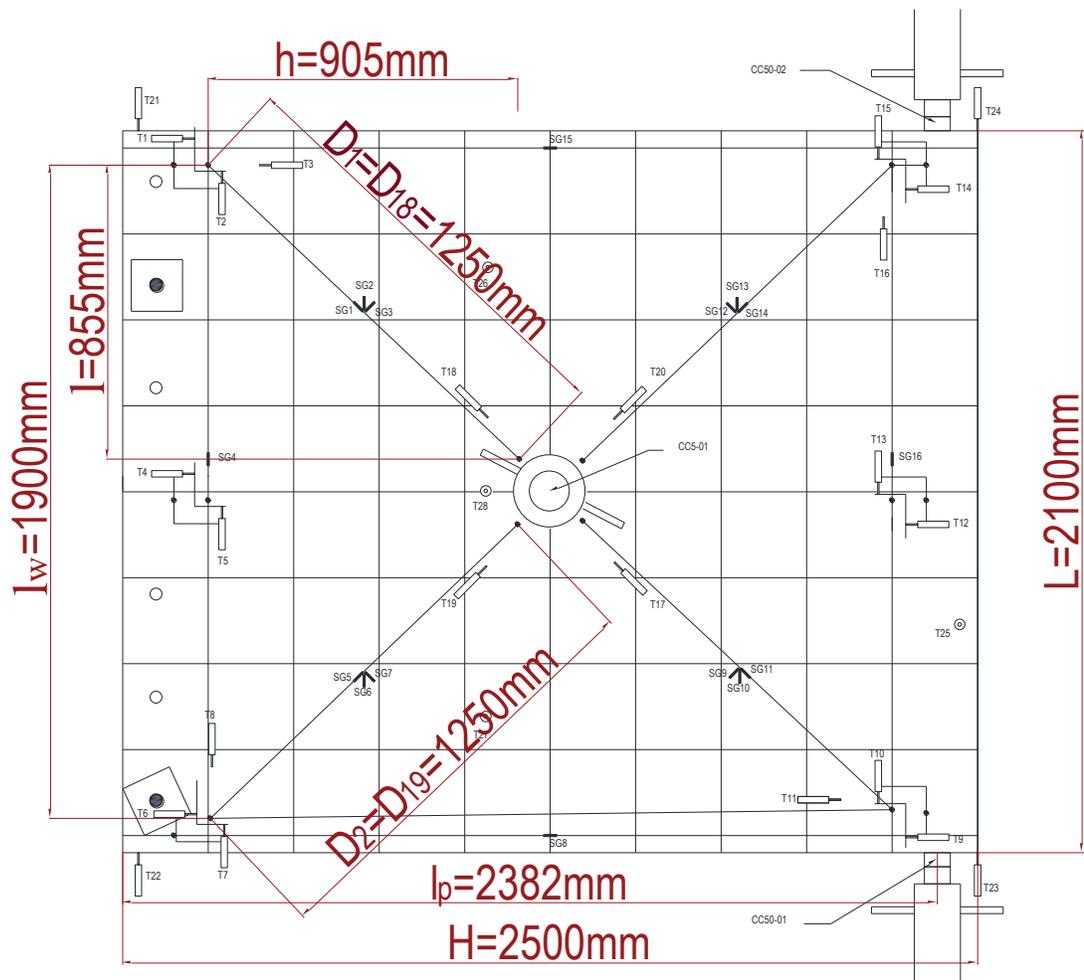


Figura 92: Distancias asociadas a los transductores y dimensiones del diafragma.

El esquema de deformaciones asociados a esfuerzos cortantes se presenta en la Figura 93:

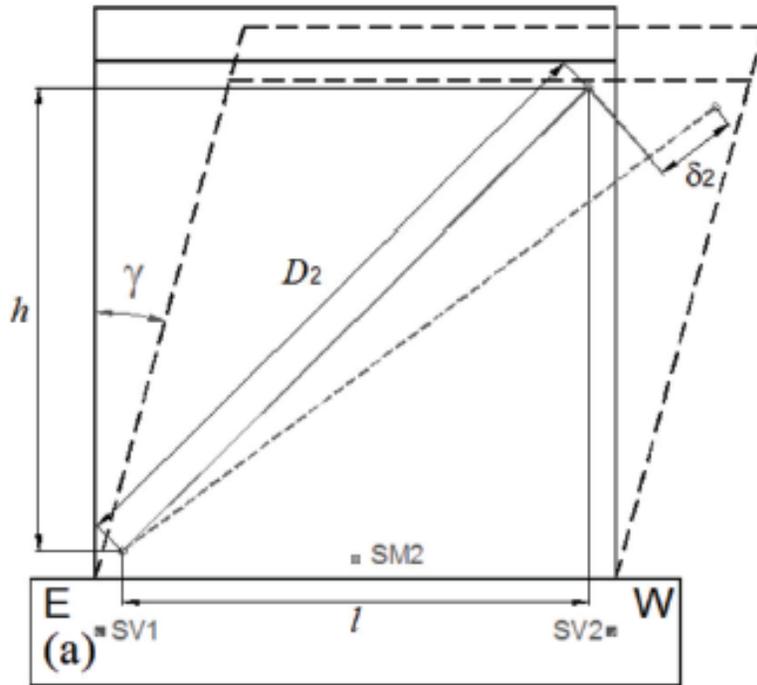


Figura 93: Esquema de la deformación asociada a la cortante.

Igualmente se debe tener en cuenta que en el caso de estudio no hay deslizamiento relativo de la placa respecto a las fijaciones.

$$\Delta_d = \Delta_{base} - \Delta_{viga} = 0$$

La ecuación utilizada para obtener la deformación por flexión experimental está dada por, $\Delta_f = \Delta_T - \Delta_c$. Al obtener la deformación por flexión se puede implementar la ecuación por curvatura y aplicarla para cada paso de carga:

$$\Delta_f = \frac{PH^3}{3EI} = \frac{PH}{EI} \times \frac{L^2}{3} \rightarrow \frac{1}{p} = \frac{M}{EI} = \frac{PH}{EI} \quad .(7)$$

$$\Delta_f = \left(\frac{1}{p}\right) \frac{H^2}{3}$$

$$curvatura = \frac{1}{p} = \frac{3\Delta_f}{H^2}$$

6.1. DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA EXPERIMENTAL MODELO 1

En el modelo 1 la fluencia ocurre en el paso 127, y los datos asociados a este paso se presenta a continuación:

$$\delta_{18} = -0.058mm, D_{18} = 1245mm, \delta_{19} = 1.16mm, D_{19} = 1245mm, l = 855m, h = 905mm, H = 2500mm$$

Reemplazando estos valores en la ecuación .(6):

$$\Delta_c = \gamma H = \frac{\delta_2 D_2 - \delta_1 D_1}{2lh} H = \frac{(1.16)(1245) - (-0.058)(1245)}{2(855)(905)} 2500$$

(despreciamos las deformaciones del transductor D19)

$$\Delta_c = \gamma H = \frac{(1.16)(1245)}{2(855)(905)} 2500 = 2.333\text{mm}$$

Teniendo en cuenta el desplazamiento total del diafragma:

$$\Delta_{T\text{paso}127} = 4.445\text{mm}$$

Por lo cual el desplazamiento relativo por flexión :

$$\Delta_f = \Delta_T - \Delta_c = 4.445\text{mm} - 2.333\text{mm} = 2.112\text{mm}$$

La curvatura asociada a este paso es la siguiente:

$$\Delta_f = \left(\frac{1}{p}\right) \frac{H^2}{3} \rightarrow \text{curvatura} = \frac{1}{p} = \frac{3\Delta_f}{H^2} = \frac{3(2.112\text{mm})}{(2100\text{mm})^2} = 1.01373958 \frac{\text{rad}}{\text{km}}$$

Al implementar la ecuación .(6) y .(7) para cada paso de carga del modelo 1, se obtiene los valores de curvaturas y momentos, los cuales se grafican en la Figura 94:

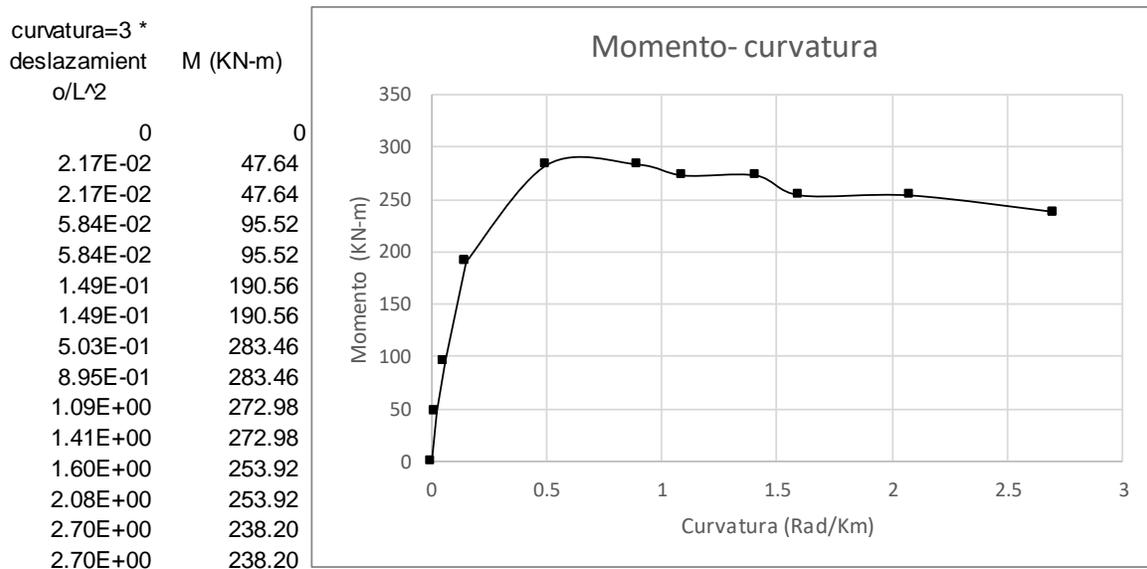


Figura 94: Momento curvatura modelo 1.

6.2. DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA EXPERIMENTAL MODELO 2

En el modelo 2 la fluencia ocurre en el paso 126, y los datos asociados a este paso se presenta a continuación:

$$\delta_{18} = -0.028mm, D_{18} = 1245mm, \delta_{19} = 2.12mm, D_{19} = 1245mm, l = 855mm, h = 905mm, H = 2100mm$$

Reemplazando estos valores en la ecuación .(6):

$$\Delta_c = \gamma H = \frac{\delta_2 D_2 - \delta_1 D_1}{2lh} H = \frac{(2.12)(1245) - (-0.028)(1245)}{2(855)(905)} 2500$$

(despreciamos las deformaciones del transductor D18)

$$\Delta_c = \gamma H = \frac{(2.12)(1245)}{2(855)(905)} 2500 = 4.264mm$$

Teniendo en cuenta el desplazamiento total del diafragma:

$$\Delta_{T_{paso127}} = 6.315mm$$

Por lo cual el desplazamiento relativo por flexión :

$$\Delta_f = \Delta_T - \Delta_c = 6.315mm - 4.264mm = 2.051mm$$

La curvatura asociada a este paso es la siguiente:

$$\Delta_f = \left(\frac{1}{p}\right) \frac{H^2}{3} \rightarrow curvatura = \frac{1}{p} = \frac{3\Delta_f}{H^2} = \frac{3(2.734mm)}{(2500mm)^2} = 0.98455853 \frac{rad}{km}$$

Al implementar la ecuación .(6) y .(7) para cada paso de carga del modelo 2, se obtiene los valores de curvaturas y momentos, los cuales se grafican en la Figura 95:

curvatura=3 * desplazamient o/L^2	M (KN-m)
0	0
2.98E-02	48.83
3.38E-02	50.26
7.86E-02	96.47
7.76E-02	95.28
1.90E-01	189.61
2.03E-01	189.61
6.74E-01	234.63
6.45E-01	202.71
1.03E+00	201.28
8.98E-01	156.02
1.63E+00	72.17
1.53E+00	51.93
1.63E+00	42.40
1.63E+00	42.40

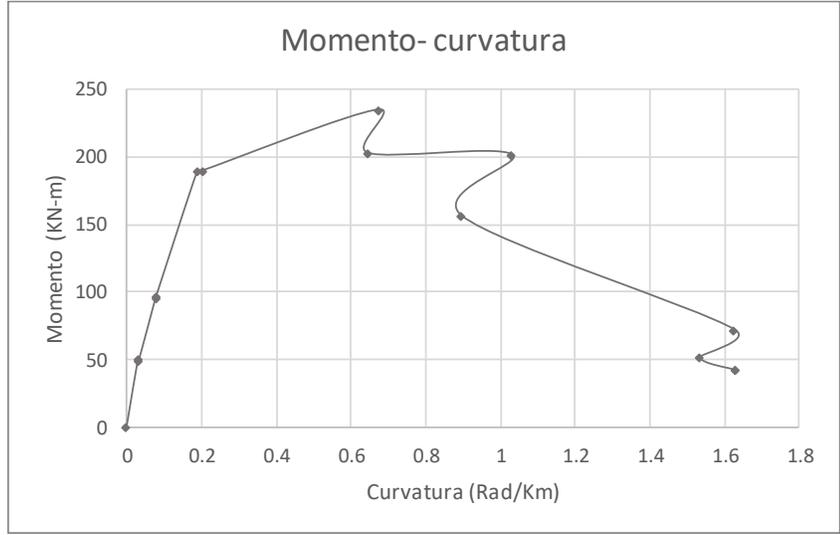


Figura 95: Momento curvatura modelo 2.

6.3. DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA EXPERIMENTAL MODELO 3

En el modelo 3 la fluencia ocurre en el paso 144, y los datos asociados a este paso se presenta a continuación:

$$\delta_{18} = -0.952mm, D_{18} = 1245mm, \delta_{19} = 0.002mm, D_{19} = 1245mm, l = 855mm, h = 905mm, H = 2500mm$$

Reemplazando estos valores en la ecuación .(6):

$$\Delta_c = \gamma H = \frac{\delta_2 D_2 - \delta_1 D_1}{2lh} H = \frac{(0.002)(1245) - (-0.952)(1245)}{2(855)(905)} 2500$$

(despreciamos las deformaciondel transdctor D18)

$$\Delta_c = \gamma H = \frac{(0.952)(1245)}{2(855)(905)} 2500 = 1.915mm$$

Teniendo en cuenta el desplazamiento total del diafragma:

$$\Delta_{T\text{paso152}} = 5.105mm$$

Por lo cual el desplazamiento relativo por flexion :

$$\Delta_f = \Delta_T - \Delta_c = 5.105mm - 1.915mm = 3.190mm$$

La curvatura asociada a este paso es la siguiente:

$$\Delta_f = \left(\frac{1}{p}\right) \frac{H^2}{3} \rightarrow curvatura = \frac{1}{p} = \frac{3\Delta_f}{H^2} = \frac{3(3.190mm)}{(2500mm)^2} = 1.53134213 \frac{rad}{km}$$

Al implementar la ecuación .(6) y .(7) para cada paso de carga del modelo 3, se obtiene los valores de curvaturas y momentos, los cuales se grafican en la Figura 96:

curvatura=3 * deslazamient o/L^2	M (KN-m)
0	0
2.35E-02	49.07
2.43E-02	47.88
6.47E-02	96.71
6.39E-02	96.71
2.05E-01	185.32
2.42E-01	191.75
8.26E-01	263.93
8.20E-01	232.48
1.58E+00	183.41
1.39E+00	118.15
1.39E+00	118.15
2.44E+00	126.48
2.44E+00	104.33
3.18E+00	127.68

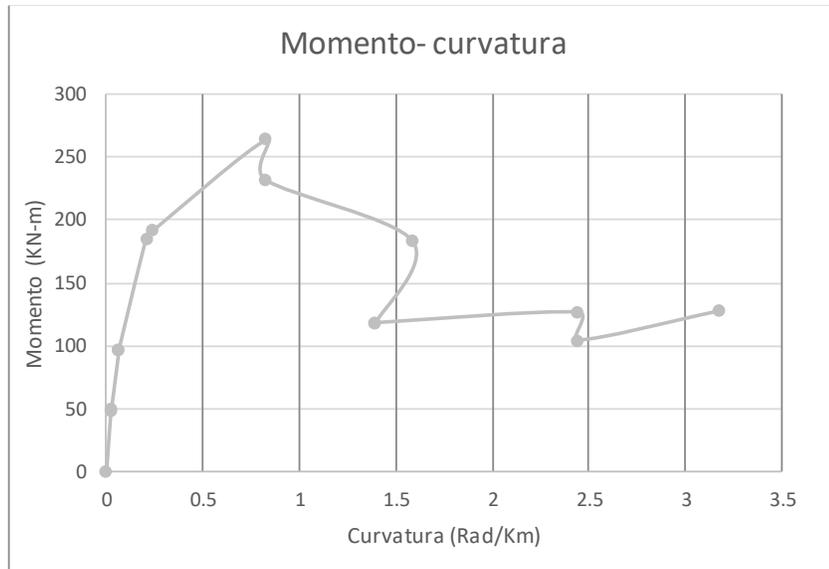


Figura 96: Momento curvatura modelo 3.

7. ANEXO II. TEORIA DE RIGIDEZ ASOCIADA AL PANEL DE DIAFRAGMA

Se asocia la rigidez teórica presentada en la ecuacion 6 a cada uno de los modelos:

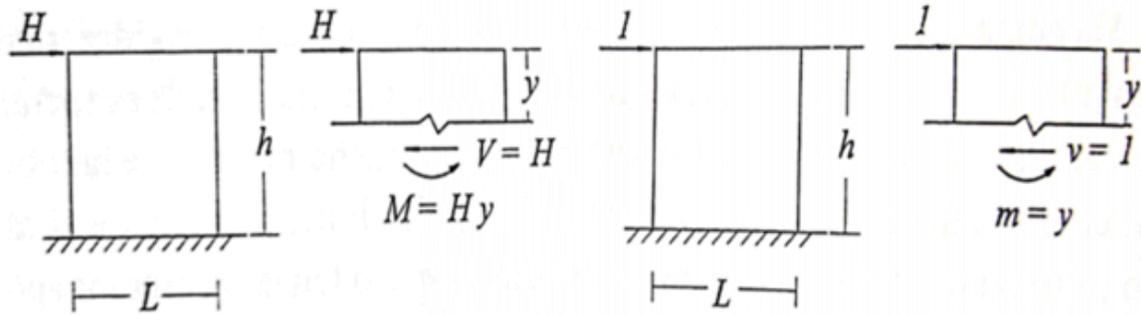
$$K_{teórica} = \left[\frac{h^3}{3EI} + \frac{h}{(f_f A)G} \right]^{-1} \quad .(8)$$

Donde

- K_{teórica}: Rigidez teórica del diafragma
- h: Altura de la sección
- E: Módulo de elasticidad de la sección
- I: Momento de inercia de la sección
- A: Área de la sección
- f_f: factor de forma de la sección
- G: Módulo de cortante de la sección

Los pisos actúan como diafragmas distribuyendo las fuerzas de corte a los muros de acuerdo con su rigidez, en el caso de los muros, la rigidez longitudinal es mucho mayor a la rigidez transversal, al igual que en lo diafragmas prefabricados, además de su rigidez torsional, por lo cual los muros trabajan con cargas en su plano y son conocidos como muros de corte.

La rigidez, K, se define como la acción (fuerza o momento) que produce un desplazamiento relativo unitario (Caori Patricia Takeuchi Tam, 2013). Para determinar la rigidez del sistema se considera empotrado en un extremo como voladizo, en este sentido se puede inferir que el comportamiento en cuanto a las viguetas que se disponen perpendicular a las cargas horizontales, al igual que las bovedillas intermedias, se tiene un sistema a flexión pura cuya rigidez está dado por la siguiente expresión:



$$\Delta = \frac{1}{EI} \int_0^h M m dy + \frac{k_f}{GA} \int_0^h V v dy$$

$$\Delta = \frac{1}{EI} \int_0^h H y y dy + \frac{k_f}{GA} \int_0^h H 1 dy$$

$$\Delta = \frac{H y^3}{3EI} + \frac{k_f H y}{2GA}$$

$$\Delta = \frac{H h^3}{3EI} + \frac{k_f H h}{GA}$$

.(9)

$$K_{teórica} = \left[\frac{h^3}{3EI} + \frac{h}{(f_f A)G} \right]^{-1}$$

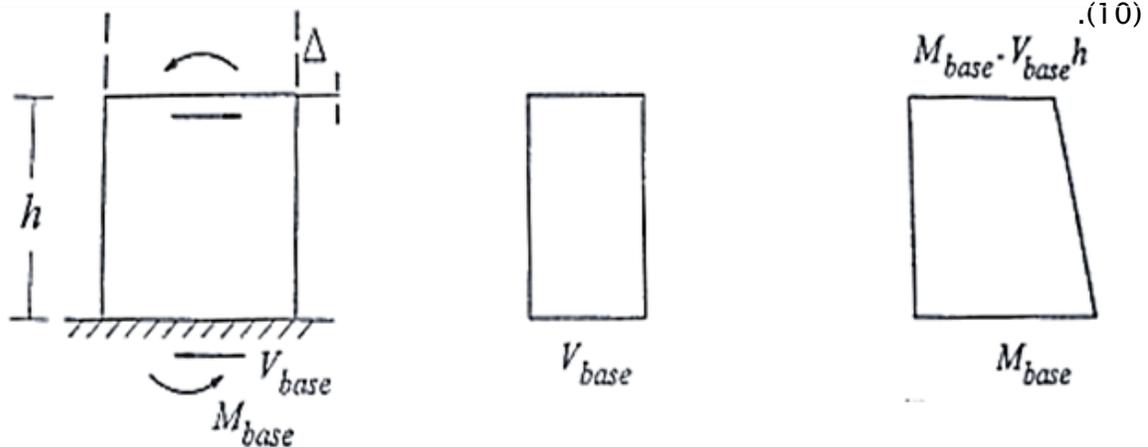
Donde el factor k_f es igual a 1.2 para secciones rectangulares y se aproxima a 1.0 para secciones con aletas.

La ecuación .(9) desplazamiento y rigidez, es válida solamente para carga concentrada en la parte superior. Para otras distribuciones de carga las formulas serian diferentes y se podrían calcular de manera similar.

Para el cálculo más preciso de la deflexión y rigidez al nivel de un piso habría que considerar el cortante y el momento acumulados en el nivel. Por ejemplo, para un

muro, considerando la cortante en el piso y el momento con variación lineal, la deflexión se representa mejor con la ecuación .(10):

$$\Delta = \frac{M_{base} h^2 / 2 - V_{base} h^3 / 6}{EI} + \frac{5k_f V_{base} h}{2GA}$$



Sin embargo, al igual que para los muros, si el diafragma presenta discontinuidad, como por ejemplo abertura de fosos de buitrone, ya no es tan fácil calcular el desplazamiento relativo y por tanto la rigidez.

El comportamiento y el modo de falla de un diafragma depende de muchos factores, entre estos las propiedades de los materiales que lo conforman (unidad bovedilla y vigueta), la cantidad, distribución, y propiedades del refuerzo longitudinal y transversal, la geometría del diafragma y las solicitaciones a los que está expuesto.

Los diseños de los modelos de diafragmas prefabricados deben asegurar que esta tenga suficiente ductilidad, por tanto, se debe evitar que se presenten fallas de deslizamiento en la junta horizontal, de corte, de aplastamiento prematuro o pérdida de anclaje.

Se ha encontrado experimentalmente que tanto el refuerzo vertical como el horizontal son efectivos para controlar las fisuras. Tan importante como es la cantidad del refuerzo lo es su distribución (Caori Patricia Takeuchi Tam, 2013). Es por esto que la normatividad vigente provee una mayor cantidad de proporción de acero de refuerzo en los extremos y juntas de placas de diafragma prefabricado.

8. ANEXO III: TRANSFORMACION DE LA VIGUETA

La transformación de la vigueta a un elemento sólido con geometría regular, se llevó a cabo únicamente considerando el concreto tanto de la vigueta, como del firme de compresión, despreciando el acero de pre-esfuerzo y refuerzo del sistema. La transformación propuesta es válida para reproducir el comportamiento de dicho sistema en el intervalo elástico, que es donde se realizaron los estudios.(Chinchilla Portillo, 2012). Los módulos de elasticidad en cada una de las tres direcciones, se obtiene proponiendo un espesor de flexión.

Para modelar la vigueta y la bovedilla se realizó la transformación de las propiedades de la sección de los elementos del sistema de diafragma prefabricado por medio de la sección transformada, adecuado para el rango elástico.

$$E_s I_s = E_{st} I_{st} \text{ (relacion 1)}$$

$$G_s A_s = G_{st} A_{st} \text{ (relacion 2)}$$

$$E_s V_s = E_{st} V_{st} \text{ (relacion 3)}$$

$$G_s V_s = G_{st} V_{st} \text{ (relacion 4)}$$

8.1.1. OBTENCIÓN DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD

En la Figura 97 y Figura 98, se analiza la sección transformada de la franja de la vigueta:

SECCION

$f'_{c_{vigueta}} = 40 \text{ Mpa}$

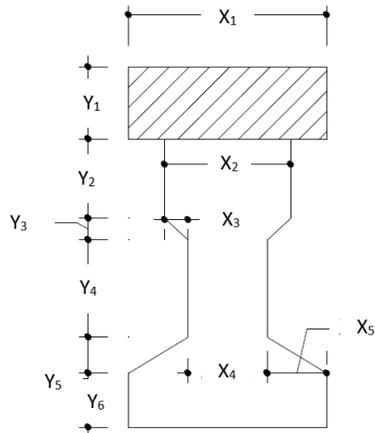
$f'_{c_{concreto}} = 25 \text{ Mpa}$

$E_{vigueta} = 29725.41 \text{ Mpa}$

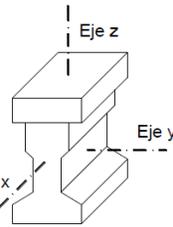
$E_{concreto} = 23500 \text{ Mpa}$

$n = 0.791$

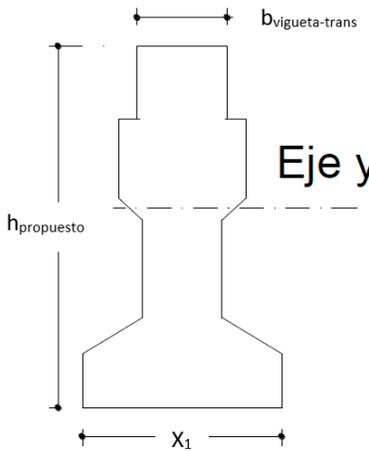
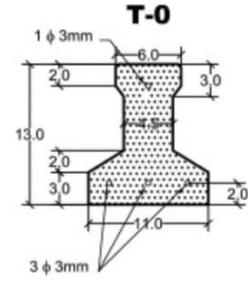
Propiedades de la seccion



$X_1 =$
 $X_2 =$
 $X_3 =$
 $X_4 =$
 $X_5 =$



$Y_1 = 45 \text{ mm}$
 $Y_2 = 20 \text{ mm}$
 $Y_3 = 10 \text{ mm}$
 $Y_4 = 50 \text{ mm}$
 $Y_5 = 20 \text{ mm}$
 $Y_6 = 30 \text{ mm}$



$h_{propuesto} = 175 \text{ mm}$
 $b_{vigueta-trans} = 87 \text{ mm}$
 $A_{st} = 12740 \text{ mm}^2$
 $E_{st} = 29725.41 \text{ Mpa}$
 $y_{st} = 84 \text{ mm}$
 $I_{st} = 40718707 \text{ mm}^4$
 $L_{propuesto} = 110 \text{ mm}$
 $I_{sx} = 49127604 \text{ Mpa}$
 $E_{sx} = 24637 \text{ Mpa}$

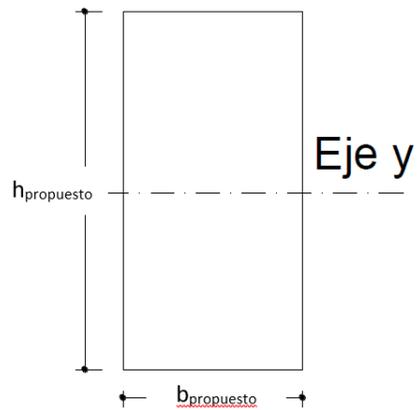


Figura 97: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la vigueta.

Para la obtención del módulo de elasticidad EY , se utiliza la inercia alrededor del eje z , y se realiza un procedimiento similar al anterior.

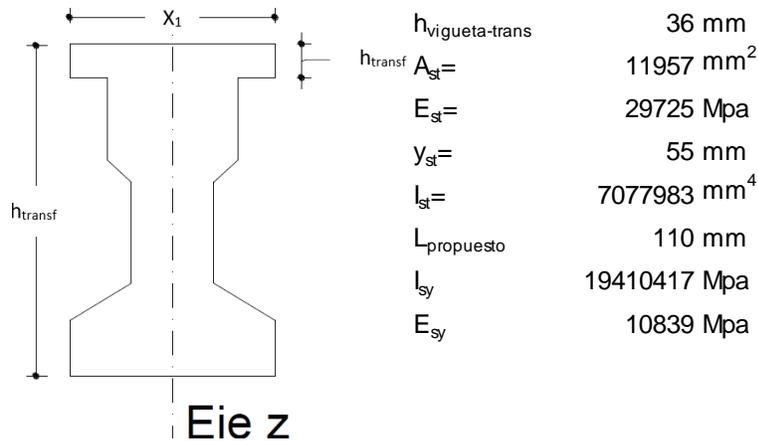


Figura 98: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la vigueta.

Para la obtención de EZ, se utilizó la relación 3:

L_2	110 mm
V_{st}	1315270 mm ³
V_s	2117500 mm ³
E_{sz}	18464 Mpa

8.1.2. OBTENCIÓN DE LOS MÓDULOS DE RIGIDEZ A CORTE

Los módulos de rigidez al corte en cada una de las tres direcciones, se obtiene relacionando las áreas de corte tanto de la sección formada por el firme de compresión y la vigueta, y la del sólido propuesto como se muestra en la Figura 99:

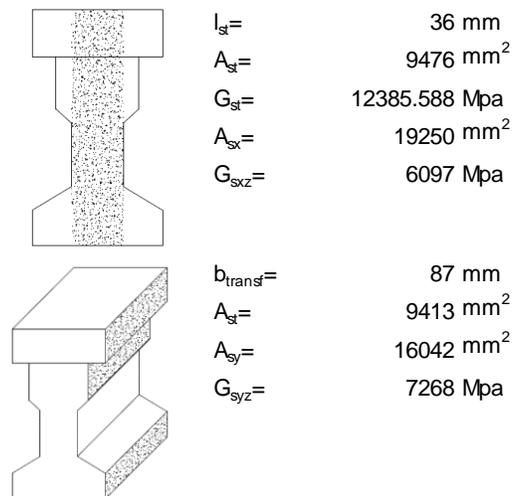


Figura 99: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la vigueta módulo de cortante.

Análogamente a este procedimiento se obtuvieron las propiedades de la bovedilla, como se muestra en la Figura 100, Figura 101 y Figura 102:

SECCION

$f'_{C_{Bovedilla}} =$	25 Mpa	
$f'_{C_{concreto}} =$	25 Mpa	
$E_{bovedilla} =$	18750 Mpa	(D.5.2-2)
$E_{concreto} =$	23500 Mpa	
$n =$	1.253	

Propiedades de la seccion

$b_{1\text{ancho real}} =$	750 mm		
$h_{1\text{alturareal}} =$	45 mm	$X_2 =$	60 mm
		$X_3 =$	-265 mm
		$X_5 =$	80 mm

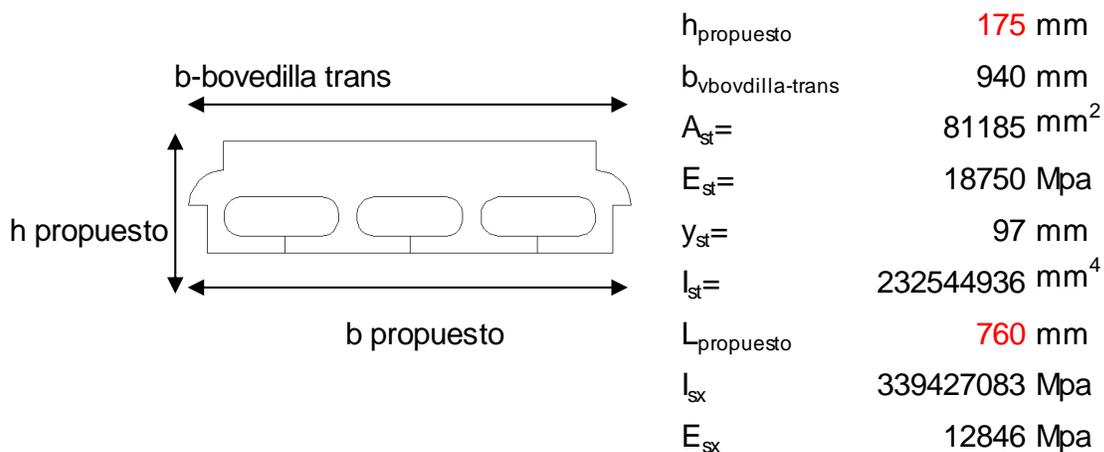
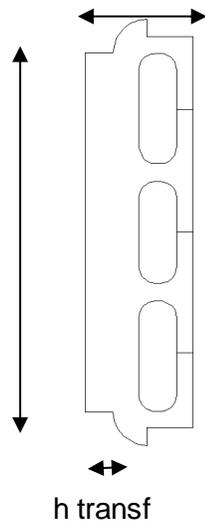


Figura 100: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la bovedilla Modulo de elasticidad.



$h_{\text{vbovedilla-trans}}$	56 mm
$A_{st} =$	81236 mm ²
$E_{st} =$	18750 Mpa
$y_{st} =$	349 mm
$I_{st} =$	2878075127 mm ⁴
$L_{\text{propuesto}}$	110 mm
I_{sy}	6401733333 Mpa
E_{sy}	8430 Mpa

$L_2 =$	110 mm
$V_{st} =$	8935994.2 mm ³
$V_s =$	14630000 mm ³
$E_{sz} =$	11452 Mpa

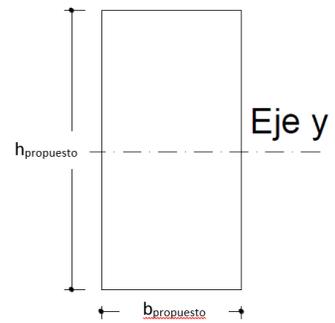
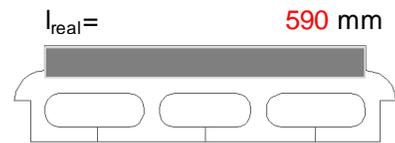


Figura 101: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la bovedilla.

Obtención de los módulos de rigidez a corte

$I_{st} =$	739 mm
$A_{st} =$	33276 mm ²
$G_{st} =$	7813 Mpa
$A_{sx} =$	133000 mm ²
$G_{sxz} =$	1955 Mpa



$b_{\text{transf}} =$	138 mm
$A_{st} =$	6204 mm ²
$A_{sy} =$	16042 mm ²
$G_{syz} =$	3021 Mpa

Figura 102: Calculo de propiedades mecánicas transformadas de la bovedilla módulo de cortante.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI Committee 550. (2001). *Design Recommendations for Precast Concrete Structures*. 96(Reapproved), 1–8.
- ACI Committee 550. (2015). ACI 550.1R–09 Guide to Emulating Cast-in-Place Detailing for Seismic Design of Precast Concrete Structures. *American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA*, 28, 0–15.
- ACI Committee 550. (2018). ACI 550 5–18.pdf. *American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA*, 1–24.
- American Society of Civil Engineers. (2016). ASCE STANDARD ASCE/SEI 7–16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. In *ANSI/ASCE Standard* (Issue 7 98).
<https://doi.org/10.1061/9780872629042>
- ANIVIP. (2012). Propuesta para diseño sísmico de sistemas de piso. *Pretensada, Vigueta Internacional, Primer Simposio Prefabricada, Losa Sísmica, Zonas Anivip, Diafragmas*, 1–17.
- Barbosa, R., Álvarez, J., & Carrillo, J. (2018). *Aceleraciones de piso para diseño de elementos no estructurales y estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica de edificios*. 17, 99–119.
<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a5>
- Bentz, E. C. (2000a). *Appendix A : Program Manuals Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members*. 1–86.
- Bentz, E. C. (2000b). *Response-2000*.
<http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/r2k.htm>
- Bull, D. (2003). *Understanding the Complexities of Designing Diaphragm in Buildings for Earthquakes* (N. Z. S. for E. Engineering (ed.); p. 19). New Zeland Society for Earthquake Engineering.
- Caori Patricia Takeuchi Tam. (2013). *Diseño de vigas y muros en mampostería reforzada* (E. U. N. de Colombia (ed.); Primera ed).
- Carrillo, J., Alcocer, S. M., & González, G. (2012). Deformation analysis of concrete walls under shaking table excitations. *DYNA (Colombia)*, 79(174), 145–155.
- Chinchilla Portillo, K. L. (2012). *EVALUACIÓN DE LA FLEXIBILIDAD DE DIAFRAGMA EN SISTEMAS DE PISO UTILIZADOS EN EDIFICIOS URBANOS* (Vol. 1).

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

- Cleland, N. M., Naito, C. J., & Ghosh, S. K. (2017). *NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 13 Seismic Design of Precast Concrete Diaphragms A Guide for Practicing Engineers* (Issue 13).
- Conference, W., & Engineering, E. (2004). *13 th World Conference on Earthquake Engineering DEVELOPMENT OF A NETWORK PLATFORM FOR. 3048*.
- Fleischman, R. B., Ghosh, S. K., Naito, C. J., Wan, G., Restrepo, J. I., Schoettler, M., Sause, R., & Cao, (2005 C.E.). Seismic Design Methodology for Precast Concrete Diaphragms part 2: Research program. *PCI Journal*, 31.
- Fleischman, R. B., Restrepo, J. I., Naito, C. J., Sause, R., Zhang, D., & Schoettler, M. (2013). Integrated analytical and experimental research to develop a new seismic design methodology for precast concrete diaphragms. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 139(7), 1192–1204.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000734](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000734)
- Fleischman, Robert B., Restrepo, J., Ghosh, S. K., Naito, C. J., & Sause, R. (2005). Seismic design methodology for precast concrete diaphragms part 1: Design framework. *PCI Journal*, 50(5), 68–83.
<https://doi.org/10.15554/pcij.09012005.68.83>
- Flores, G. A. L. (2006). *DISEÑO SÍSMICO DE SISTEMAS DE PISO EN EDIFICIOS PREFABRICADOS DE CONCRETO REFORZADO*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Gilbert, R. I. (2001). Shrinkage, cracking and deflection – The serviceability of concrete structures. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 1, 15–37.
- Gómez Bernal, A., Manzanares Ponce, D., Vargas Arguello, O., Arellano Méndez, E., Juárez García, H., & González Cuevas, O. (2015). Estudio experimental y numérico de un prototipo losa-muro de transferencia. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 6(2), 30–47.
- Kurama, Y. C., Sritharan, S., Fleischman, R. B., Restrepo, J. I., Henry, R. S., Cleland, N. M., Ghosh, S. K., & Bonelli, P. (2018). Seismic-Resistant Precast Concrete Structures: State of the Art. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 144(4), 1–18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001972](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001972)
- Ministerio de Vivienda, C. y T. (2010). NSR-10, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. In *Diario Oficial* (p. 444).

- PRESFORZADOS MEXICANOS DE TIZAYUCA, S. . D. C. V. (2013). *Manual de Vigüeta y Bovedilla* (p. 104).
https://www.premex.com.mx/uploads/1/6/2/4/16245520/manualtecnicopr emex_10oct.pdf
- Rodríguez, M. (2000). Comportamiento De Estructuras Prefabricadas De Concreto Reforzado Para Edificaciones En Zonas Sísmicas , Innovaciones Y Tendencias En Su Empleo*. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 34(63), 1.
<https://doi.org/10.18867/ris.63.235>
- Rodríguez, M. E., & Blandón, J. J. (2003). Ensayes ante cargas laterales cíclicas reversibles de un edificio prefabricado de concreto reforzado de dos niveles. Parte II: evaluación del comportamiento de conexiones prefabricadas... . *Revista de Ingeniería Sísmica*, 68, 93-118.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61806804>
- Rodriguez, M. E., Leon, G., & Cabrera, H. B. (2013). *Investigación y desarrollo Estudio del comportamiento de un edificio prefabricado de concreto de tres niveles en mesa vibradora* (UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (ed.); 1ra. ed.). Instituto de Ingeniería, Ciudad universitaria.
- Tena Colunga, A., Chinchilla Portillo, K. L., & Juárez Luna, G. (2013). Evaluación De La Flexibilidad Elástica De Sistemas De Piso Utilizados En Edificios Urbanos. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 165(89), 134-165.
<https://doi.org/10.18867/ris.89.167>