



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE LA RESPUESTA NUMÉRICA DE LOSAS ACOPLADAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADO CON FIBRAS DE PVA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MARIÓN ALEJANDRA PINTO REVECO

PROFESOR GUÍA:
FABIÁN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

ESTE TRABAJO HA SIDO FINANCIADO POR:
PROYECTO FONDECYT N° 1200709

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: MARIÓN ALEJANDRA PINTO REVECO
FECHA: ABRIL 2021
PROF. GUÍA: FABIÁN ROJAS BARRALES

ESTUDIO DE LA RESPUESTA NUMÉRICA DE LOSAS ACOPLADAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADO CON FIBRAS DE PVA

Históricamente la construcción de edificios de gran altura, estructurados en base a muros acoplados por losas ha mostrado ser una solución eficiente ante esfuerzos horizontales generados por cargas sísmicas. Sin embargo, las zonas en torno a los extremos de muros en aperturas como puertas son puntos de tensiones críticas donde las altas concentraciones de esfuerzos se manifiestan visualmente como fracturas del hormigón. El aumento en los estándares de calidad de las construcciones y la búsqueda de mayor seguridad y confiabilidad de las estructuras plantea como objetivo el estudio de alternativas que permitan la mejora en resistencia y ductilidad del material localmente en estas zonas.

En ese contexto, el presente trabajo de título tiene como objetivo estudiar el uso de hormigón con adhesión de fibras de PVA (Polyvinyl Alcohol) en losas de acoplamiento, desde el punto de vista teórico/numérico del sistema estructural.

Para ello, se estudiarán los sistemas estructurales típicos chilenos en cuanto a su dimensionamiento y detallamiento con el propósito de generar modelos representativos de la construcción nacional. Por otra parte, para representar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de PVA, serán recopilados y analizados datos experimentales disponibles de ensayos a compresión y tracción de probetas, a partir de los cuales se modelan las leyes constitutivas del hormigón reforzado, las que posteriormente son utilizadas como datos de entrada en los modelos numéricos no lineales de muros rectos y muros T acoplados. Una vez definido y estudiado un modelo base, se realiza un estudio paramétrico para determinar la influencia de la cuantía longitudinal de acero, longitud del ala en muros T, ancho de losa, porcentaje de fibra y tamaño del árido en el comportamiento de la losa.

Los resultados finales sugieren que la incorporación de fibras en mezclas con arena fina y grava puede mejorar la capacidad, aumentar el momento de fluencia y ductilidad del sistema, además de reducir las rotaciones en la losa, reduciendo la propagación de fracturas en la zona crítica.

*A mis padres, hermanas
y a David, por su incondicional apoyo,
comprensión y compañía en este largo camino...*

... y a mi tata, un abrazo al cielo...

Tabla de contenido

Tabla de contenido	iii
Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vii
Capítulo 1 – Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Particulares.....	2
1.3. Metodología	3
1.4. Alcances.....	4
Capítulo 2 – Revisión Bibliográfica	5
2.1. Efecto de la adhesión de Fibras de Polyvinyl Alcohol (PVA) en las propiedades del Hormigón.....	5
2.1.1. Fibras de Refuerzo y su aplicación en Hormigones.....	5
2.1.2. Fibras de PVA y su efecto sobre las propiedades del Hormigón	9
2.1.3. Fibras de PVA - KURALON™	13
2.2. Losas de Acoplamiento de Hormigón Armado	14
2.3. SAFE-TB.....	20
2.3.1. Ley Constitutiva del Hormigón	21
2.3.2. Ley Constitutiva del Acero.....	24
2.4. Tipología de losas en Chile.....	26
Capítulo 3 – Modelo constitutivo del PVA-FRC.....	30
3.1 Análisis de Datos Preliminares.....	30
3.2 Ajuste del Modelo constitutivo del PVA-FRC.....	39
3.2.1 Modelo constitutivo del PVA-FRC sometido a compresión	39
3.2.2 Modelo constitutivo del PVA-FRC sometido a tracción	41
Capítulo 4 – Modelo Numérico.....	43
4.1. Dimensiones y cuantías.....	43
4.2. Descripción del modelo SAFE-Toolbox	45

4.3. Parámetros de estudio y resultados del modelo base.	48
4.3.1. Respuesta Global	48
4.3.2. Esfuerzos Transmitidos	50
4.3.3. Distribución de Esfuerzos y Deformación	54
4.3.4. Ancho efectivo.....	60
Capítulo 5 – Estudio Paramétrico de Modelos sin Fibra.....	62
5.1. Variación de cuantía de acero en Sistema de Muros Rectos	62
5.2. Variación de la longitud de alas de muros T con ancho de losa fijo	66
5.3. Variación de la longitud de alas de muros T con ancho de losa libre fijo	74
5.4. Estudio de variables combinadas.....	78
Capítulo 6 – Estudio paramétrico de Modelos con Fibra	84
6.1. Modelos con Mezcla de PVA-FRC con Arena Fina	84
6.2. Modelos con Mezcla de PVA-FRC con Grava	89
6.3. Estudio de la propagación de deformaciones y análisis de sensibilidad del modelo constitutivo a tracción.....	94
Capítulo 7 – Conclusiones.....	99
Capítulo 6 – Bibliografía.....	102
Apéndice B – Validación del modelo	106
B.1. Modelo Losa en Voladizo	106
B.2. Análisis de Sensibilidad.....	111
B.2.1. Refinamiento de Malla.....	111
B.2.2. Disposición del punto de apoyo	118

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Propiedades típicas de Fibras. Mehta & Monteiro, 2006.....	6
Tabla 2.2. Dosificación y resultados obtenidos por Vásquez, N. 2020.	10
Tabla 2.3. Propiedades según tipo de Fibra KURALON™	13
Tabla 2.4. Dosificación recomendada de fibras de PVA - KURALON™	14
Tabla 2.5. Especificaciones de dimensiones y cuantías de losas utilizadas en Zárate (2019).	29
Tabla 3.1. Clasificación de áridos según diámetro máximo	30
Tabla 3.2. Datos de mezcla y resultados experimentales de ensayos de compresión uniaxial realizados por Reveco, J. (2020)	31
Tabla 3.3. Propiedades de Fibras ensayadas por Vásquez, N (2020).....	38
Tabla 3.4. Datos de Mezclas ensayadas a Tracción directa por Vásquez, N (2020)	38
Tabla 3.5. Parametrización de Curvas a compresión.....	40
Tabla 3.6. Parametrización de Curvas a tracción.....	42
Tabla 4.1. Armadura Losa para sistema de Muros Rectos y Muros T.....	45
Tabla 4.2. Propiedades de vigas.....	46
Tabla 5.1. Casos de estudio variando cuantía de acero en sistemas de muros rectos.....	62
Tabla 5.2. Casos de estudio variando la longitud de alas de muros T con ancho de losa fijo.	67
Tabla 5.3. Casos de estudio variando la longitud de alas de muros T con ancho de losa libre fijo.	74
Tabla 5.4. Casos de estudio con variables combinadas.....	79

Tabla 6.1. Casos de estudio para hormigones PVA-FRC con Arena Fina.	84
Tabla 6.2. Casos de estudio para hormigones PVA-FRC con Arena Gruesa.	89
Tabla A.1. Propiedades del hormigón.	105
Tabla A.1. Propiedades del acero.	105
Tabla B.1. Mallado de Losa utilizado en el análisis de sensibilidad	112
Tabla B.2. Error en distancia respecto al centro de gravedad de la sección.	120

Índice de Figuras

Figura 2.1. Comportamiento de carga-desplazamiento del hormigón sin reforzamiento y el FRC sometido a compresión. <i>Bentur & Mindess, 2006</i>	7
Figura 2.2. Descripción esquemática de la relación Tensión-Deformación del RFC. Basado en <i>Bentur & Mindess, 2006</i>	8
Figura 2.3. Resistencia a la compresión normalizada (Izquierda), Modulo de Elasticidad normalizado (centro) y Resistencia a la tracción normalizada (Derecha) de los FRC a los 28 días con respecto al hormigón de control (Noushini, Samali & Vessalas, 2013)	10
Figura 2.4. Datos de probetas y resultados del estudio experimental realizado por Pan et al. (2015).	11
Figura 2.5. Microfibras (izquierda), Mesofibras (centro) y Macrofibras (derecha) de PVA - KURALON™	13
Figura 2.6. Comparación gráfica de la reducción de Fisuras entre hormigón no reforzado y fibroreforzados con PP y PVA (Kuraray, 2015).	14
Figura 2.7. (a) Vista en perspectiva de una Estructura de Muros de Corte típica y (b) Respuesta del sistema sujeto a cargas laterales (basado en Schwaighofer y Collins, 1977)	15
Figura 2.8. Variación longitudinal del momento en la sección crítica de la losa, para distintas longitudes transversales. Coull & Chee (1983).....	16
Figura 2.9. Distribución de Esfuerzos de corte en la zona crítica. Coull & Chee, 1983.....	17
Figura 2.10. Esquema en Planta (izquierda) y Elevación (derecha) del montaje experimental realizado por Schwaighofer & Collins, 1977.	17
Figura 2.11. Izquierda - Grafico Fuerza Aplicada en W2 vs Deformación vertical del Muro W2 y Derecha - Esquema de la propagación de grietas en la superficie de la losa. Resultados del estudio experimental realizado por Schwaighofer & Collins, 1977.	18
Figura 2.12. Izquierda – Representación de nodos y grados de libertad globales. Derecha – sección de membrana en capas típica (Rojas, et. al. 2016)	20

Figura 2.13. Modelo Constitutivo del hormigón a compresión, basado en Thorenfeldt (Rojas, et. al. 2016).	21
Figura 2.14. Modelo Constitutivo del hormigón a tracción, basado en Belarbi y Hsu (Rojas, et. al. 2016).	22
Figura 2.15. Modelo Histerético del hormigón (Rojas, et. al. 2016).....	22
Figura 2.16. Coeficiente de Modificación del Hormigón (Rojas, et. al. 2016).	23
Figura 2.17. Modelo constitutivo Menegotto-Pinto para el acero (Rojas, et. al. 2016).	24
Figura 2.18. Planta Típica de edificios anteriores al terremoto de 1985. Massone et. al., 2012.	26
Figura 2.19. Planta típica del edificio <i>Bosquemar</i> , Concepción. (Rojo = muros – Azul = vigas). Youssef et. al, 2011.....	27
Figura 2.20. Daño en losas de acoplamiento. Edificio <i>Bosquemar</i> , Concepción.....	27
Figura 3.1. Variación de f'_c y ϵ_{fc} en función del volumen de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Grava, considerando los datos de Reveco J. (2020)	32
Figura 3.2. Variación de f'_c y ϵ_{fc} en función del volumen de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Arena Gruesa, considerando los datos de Reveco J. (2020)	32
Figura 3.3. Variación de f'_c y ϵ_{fc} en función del volumen de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Arena Fina, considerando los datos de Reveco J. (2020)	32
Figura 3.4. Variación de $E_{80\%}$ en función del porcentaje de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Grava, considerando los datos de Reveco J. (2020).	33
Figura 3.5. Variación de $E_{80\%}$ en función del porcentaje de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Arena Gruesa, considerando los datos de Reveco J. (2020)	33
Figura 3.6. Variación de $E_{80\%}$ en función del porcentaje de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Arena Fina, considerando los datos de Reveco J. (2020).	33
Figura 3.7. Curvas Esfuerzo-Deformación a compresión para probetas con árido máximo: Grava. considerando los datos de Reveco J. (2020)	34

Figura 3.8. Curvas Esfuerzo-Deformación a compresión para probetas con árido máximo: Arena Gruesa. considerando los datos de Reveco J. (2020).....	34
Figura 3.9. Curvas Esfuerzo-Deformación a compresión para probetas con árido máximo: Arena Fina. considerando los datos de Reveco J. (2020).....	35
Figura 3.10. Curvas Esfuerzo-Deformación a tracción para probetas con árido máximo: 2.30[mm] y 0.425[mm] con 0.00% y 2.50% de incorporación de Fibras, considerando los datos de Vásquez, N (2020)	38
Figura 3.11. Curvas Experimentales y Modelo esfuerzo-deformación para probetas M01, M02 y M03.	40
Figura 3.12. Curvas Experimentales y Modelo esfuerzo-deformación para probetas M10, M11 y M12.	40
Figura 3.13. Error porcentual entre los valores experimentales y el modelo de ϵ_{cr} , considerando los datos de Vásquez, N (2020)	41
Figura 3.14. Error porcentual entre los valores experimentales y el modelo de f'_{cr} , considerando los datos de Vásquez, N (2020)	41
Figura 3.15. Curvas Experimentales y Modelo esfuerzo-deformación para probetas MP_A2.36_F2.5 y MP_A0.425_F2.5 con 2.5% de fibras incorporadas.....	42
Figura 4.1. Plano de Corte – Modelo 1 Piso (Henríquez, C. 2019).....	44
Figura 4.2. Plano de losa – Sistema de Muros Rectos (Modificado de Henríquez, C. 2019)	44
Figura 4.3. Plano de losa – Sistema de Muros T (Modificado de Henríquez, C. 2019)	44
Figura 4.4. Distribución de capas para muros y losas.....	45
Figura 4.5. Mallado Modelo 1 piso con muros Rectos y T.	46
Figura 4.6. Detalle del mallado de losa, para modelos de ancho de losa 150 [cm]. (Henríquez, C. 2019).....	47
Figura 4.7. Disposición de las cargas vertical adicional, horizontal y nodo monitor.	47
Figura 4.8. Respuesta Global y Deformada del Modelo Base, para distintos porcentajes de deriva.	49

Figura 4.9. Distribución de esfuerzos del Modelo Base para derivas del 0.6%.....	49
Figura 4.10. Distribución de momento en la losa para distintas configuraciones de Ala, para un 0.3% de deriva.....	50
Figura 4.11. Disposición de los puntos de cuadratura y elementos considerandos en el cálculo de momento.....	51
Figura 4.12. Momento Transmitido en función de la deriva en el Modelo Base.....	52
Figura 4.13. Esfuerzo Axial Transmitido en función de la deriva en el Modelo Base.	52
Figura 4.14. Disposición de los puntos de cuadratura y elementos considerandos en el cálculo de carga Axial.	53
Figura 4.15 (Arriba) Carga axial transferida a los muros – (Abajo) Variación de Carga Axial entre muros, en función de la deriva en el Modelo Base.....	53
Figura 4.16. Distribución de Rotación y Momento sobre la losa de acoplamiento para un 0.5% de Deriva – Modelo Base.....	54
Figura 4.17. Elementos considerados en la distribución de Esfuerzos y Deformación en las direcciones X e Y.	55
Figura 4.18. Distribución de deformación y momento en dirección Y – Modelo Base.....	56
Figura 4.19. Deformación e_{11} graficado en el espesor de la losa, para el tramo A-C – Modelo Base.....	56
Figura 4.19. Curvas m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde estudiados – Modelo Base.	57
Figura 4.20. Distribución de deformación y momento en dirección X – Modelo Base.....	58
Figura 4.21. Distribución de corte en dirección X – Modelo Base.....	60
Figura 4.22. Ancho efectivo vs Deriva– Modelo Base.....	61
Figura 5.1. Respuesta Global para sistemas de muros rectos con distinta cuantía de acero longitudinal.	63
Figura 5.2. Momento transmitido vs Deriva para modelos con distintas cuantías de acero longitudinal.	63

Figura 5.3. Axial transmitido vs Deriva para modelos con distintas cuantías de acero longitudinal.	63
Figura 5.4. Distribución de esfuerzos y deformaciones para modelos con distintas cuantías de acero longitudinal, para un 0.5% de deriva.....	64
Figura 5.5. Ancho efectivo vs Deriva para modelos con distintas cuantías de acero longitudinal.	65
Figura 5.6. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M513 y M515.....	66
Figura 5.7. Respuesta Global para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo.	67
Figura 5.8. Momento transmitido vs Deriva para para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo.	68
Figura 5.9. Axial transmitido vs Deriva para para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo.	68
Figura 5.10. Distribución de Rotación y Momento sobre la losa de acoplamiento para un 0.5% de Deriva – Modelo M523 con $L_A=80$ [cm].	69
Figura 5.11. Distribución de esfuerzos y deformaciones para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo, para un 0.18% de deriva.	70
Figura 5.12. Distribución de esfuerzos y deformaciones para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo, para un 0.5% de deriva.	71
Figura 5.13. Ancho efectivo vs Deriva para modelos para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo.	73
Figura 5.14. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M523 y M525.	73
Figura 5.15. Respuesta Global para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.	74
Figura 5.16. Momento transmitido vs Deriva para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.....	75
Figura 5.17. Axial transmitido vs Deriva para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.	75
Figura 5.18. Distribución de esfuerzos y deformaciones para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.	76

Figura 5.19. Ancho efectivo vs Deriva para modelos para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.	77
Figura 5.20. Ancho efectivo vs Deriva para modelos	78
Figura 5.21. Respuesta Global para sistemas con variables combinadas.	79
Figura 5.22. Momento transferido vs Deriva para estudio de variables combinadas.....	80
Figura 5.23. Axial transferido vs Deriva estudio de variables combinadas.....	80
Figura 5.24. Distribución de esfuerzos y deformaciones para estudio de variables combinadas.	81
Figura 5.25. m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde estudiados, considerando los Modelos tabulados en la Tabla 5.4.....	82
Figura 5.26. Ancho efectivo vs Deriva para modelos para para estudio de variables combinadas.....	83
Figura 5.27. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M541 y M543.....	83
Figura 6.1. Respuesta Global de sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.....	85
Figura 6.2. Momento transmitido vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.	85
Figura 6.3. Axial transmitido vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.	85
Figura 6.4. Distribución de esfuerzos y deformaciones para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.....	86
Figura 6.5. Curvas m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde estudiados, considerando los con Mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.	87
Figura 6.6. Ancho efectivo vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.	88
Figura 6.7. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M612 y M613.....	88
Figura 6.8. Respuesta Global de sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava.....	89
Figura 6.9. Momento transmitido vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava.	90

Figura 6.10. Corte transmitido vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava	90
Figura 6.11. Distribución de esfuerzos y deformaciones para para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava.....	91
Figura 6.12. Curvas m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde estudiados, considerando los con Mezcla de PVA-FRC con Grava.	92
Figura 6.13. Ancho efectivo vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava.	93
Figura 6.14. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M622 y M623.....	93
Figura 6.15. Deformación axial e_{11} – (a) Compresión (b) Tracción – vs Deriva, para el elemento extremo de la losa – Arena Fina.....	95
Figura 6.16. Deformación axial e_{11} – (a) Compresión (b) Tracción – vs Deriva, para el elemento extremo de la losa – Grava.....	95
Figura 6.17. Respuesta Global de sistemas con mezclas con grava y variación del parámetro b.	96
Figura 6.18. Momento transmitido vs Deriva para sistemas con mezclas con grava y variación del parámetro b.....	96
Figura 6.19. Axial transmitido vs Deriva para sistemas con mezclas con grava y variación del parámetro b.....	96
Figura 6.20. Distribución de esfuerzos y deformaciones para para sistemas con mezclas con grava y variación del parámetro b.	97
Figura 6.21. Deformación axial e_{11} – (a) Compresión (b) Tracción – vs Deriva, para el elemento extremo de la losa – Mezclas con grava y variación del parámetro b.	98
Figura B.1. Modelo de Losa en Voladizo	106
Figura B.2. Curva Fuerza vs Desplazamiento de Losa, considerando carga aplicada y reacción en los apoyos.....	107
Figura B.3. Curva Momento vs Desplazamiento de Losa, considerando carga aplicada y reacción en los apoyos.	107
Figura B.4. Momento vs Curvatura estimado.	108
Figura B.5. Comparación entre momentos de fluencia.	108

Figura B.6. Distribución de deformaciones e_{11} en la losa.	108
Figura B.7. Distribución de momento m_{11} en la losa.	108
Figura B.8. Arriba – Distribución de Momento y Corte en el eje X, para distintos desplazamientos verticales. Abajo – Distribución de esfuerzos típica para carga concentrada en el extremo libre de una viga en voladizo.	109
Figura B.9. Distribución de momento en direcciones X e Y para distintos desplazamientos, considerando 0.00% y 0.25% de Fibras en mezclas con Arena.	110
Figura B.10. Respuesta del sistema ante la variación del número de capas de hormigón consideradas en el modelo.	110
Figura B.11. Mallado de Losa utilizado en el análisis de sensibilidad.	111
Figura B.12. Respuesta global del sistema para distintos mallados de losa.	112
Figura B.13. Distribución de rotación y momento en dirección Y, para distintos mallados de losa.	113
Figura B.14. Distribución de rotación y momento en dirección X, para distintos mallados de losa.	114
Figura B.15. Distribución de rotación r_{11} y momento m_{11} en dirección Y, para distintos mallados de losa.	116
Figura B.16. Curvas m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde, para los distintos refinamientos de malla.	117
Figura B.17. Concentración del momento en la zona de acoplamiento, M1P y M10P. (Henríquez, 2020)	118
Figura B.18. Perfiles de deformación a lo largo del Alma Muro. Muñoz, F (2018).....	119
Figura B.19. Disposición de apoyos en modelo de sensibilidad.	120
Figura B.20. Respuesta Global del sistema con distintas posiciones de apoyo.	121
Figura B.21. Momento transmitido por la losa con distintas posiciones de apoyo.	121
Figura B.13. Distribución de rotación y momento en dirección X e Y para un 0.5% de deriva con distintas posiciones de apoyo.	122

Capítulo 1 — Introducción

1.1. Motivación

Desde su introducción en la arquitectura nacional hacia principios del siglo XX, el hormigón en compañía del acero ha jugado un papel fundamental en el desarrollo urbano del país, presentándose como un material versátil, durable y de fácil manejo. Actualmente, son consumidos más de 11.4 billones de toneladas de hormigón armado en el mundo; sin duda, su indiscutible popularidad a nivel mundial se asocia a las propiedades mecánicas que lo dotan de gran resistencia y ductilidad, y a la estandarización de su fabricación basada en el sin número de investigaciones que buscan asiduamente su perfeccionamiento, ofreciendo un conocimiento acabado de su comportamiento frente a diversos escenarios.

La alta densidad de población en áreas urbanas espacialmente acotadas promueve el diseño y construcción de edificios de gran altura. Este tipo de geometrías donde predomina la dimensión vertical es afectado principalmente por dos tipos de cargas: Viento y Sismos. Chile, siendo un país con un historial marcado por terremotos, tiene el desafío permanente de desarrollar y aplicar tecnologías de hormigón y diseños que permitan a la estructura tener el desempeño suficiente para que, bajo los estándares actuales de la Norma Sísmica Chilena NCh433 mod.2012: “*Aunque presenten daños, eviten el colapso durante sismos de intensidad excepcionalmente severa*”.

Si bien el concepto de “excepcionalmente severa” es subjetivo, en el contexto nacional es lo suficientemente específico para incentivar a ingenieros a estudiar, desarrollar y promover tecnologías y diseños que permitan la continuidad operacional en edificios que enfrenten eventos como el ocurrido el 27 de febrero de 2010, con un sismo de magnitud 8.8Mw que afectó al 80% de la población del país.

Un diseño de edificios de apartamentos de hormigón armado comúnmente utilizada, y altamente reproducida en Chile, es el sistema compuesto por muros transversales con y sin alas, acoplados por losas que generan una estructura eficiente ante cargas laterales. Las fuerzas laterales transmitidas al par de muros transversales generan su rotación en el plano perpendicular y una deformación vertical relativa entre los muros, que a su vez fuerzan el giro de la conexión rígida muro-losa. En respuesta, la losa reacciona induciendo fuerzas axiales de tracción y compresión en los muros, reduciendo en gran medida los momentos en las paredes y aumentando la rigidez lateral de la estructura.

Diversos análisis elásticos e inelásticos han demostrado que el campo de tensiones en losas de acoplamiento no es uniforme y tiende a generar regiones críticas en los extremos libres de los muros (aperturas de puertas, pasillos, escaleras, etc.), donde se produce liberación de energía a costa del agrietamiento del hormigón. El constante movimiento y aplicación de

cargas sísmicas, provoca una acumulación de desgaste en estas zonas de la losa, convirtiéndolos en potenciales puntos de fallas en eventos de gran magnitud, lo que motiva la búsqueda de soluciones locales que mejoren la ductilidad del material.

Frente a ello, se presenta la alternativa de adherir fibras de PVA (Polyvinyl Alcohol) en la mezcla de hormigón con el objetivo de mejorar su comportamiento a la flexión y aumentar su ductilidad, previniendo así la fractura de zonas críticas, extendiendo la vida útil de la edificación, haciéndola más segura y en términos económicos y ambientales más eficiente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estudiar la respuesta no-lineal de losas que acoplan muros rectos y muros T de hormigón armado con y sin incorporación de Fibras de PVA, considerando como variables, cuantías de acero, dimensiones de losa y muros, tamaño máximo del árido y porcentaje de fibra incorporado.

1.2.2. Objetivos Particulares

1. Estudiar el dimensionamiento y detallamiento típico de losas de acoplamiento entre muros de hormigón armado en edificaciones en Chile.
2. Estudiar las curvas características de tensión vs deformación del hormigón PVA fibroreforzado a partir de datos experimentales, de ensayos a compresión y tracción disponibles, para evaluar y seleccionar aquellas que muestren mejorías respecto a hormigones sin fibra, y que serán utilizadas en el posterior estudio paramétrico.
3. Calibrar modelos constitutivos del hormigón capaces de representar el comportamiento de las mezclas seleccionadas.
4. Generar y estudiar el modelo numérico del sistema de muros acoplados de 1 piso simplificado, aplicando variables base, para utilizar como punto de comparación en el estudio paramétrico.
5. A partir del modelo base, realizar un estudio paramétrico de modelos sin incorporaciones de fibras, que permitan conocer en detalle el comportamiento del sistema, considerando las siguientes variables: cuantía longitudinal de acero, longitud de ala de muros y ancho de losa.

6. Incorporar los modelos constitutivos de hormigones con fibra calibrados, a los materiales utilizados en el desarrollo de los modelos numéricos de la estructura.
7. Comparar el desempeño de los especímenes reforzados con fibras de PVA con el comportamiento típico de los modelos sin fibra.

1.3. Metodología

La presente Memoria de Título se compone de siete capítulos, cuyos objetivos y alcances se definen a continuación a modo de organización.

Capítulo 1 – Introducción

Presentación de la motivación, objetivos y estructura general de la Memoria, con el objetivo de orientar y contextualizar al lector sobre el fundamento y los alcances del tema tratado.

Capítulo 2 – Revisión Bibliográfica

Recopilación de antecedentes y datos típicos de losas acopladas en Chile, además de información obtenida de estudios experimentales y analíticos asociados a (1) Ensayos de losas de acople ante carga cíclicas y (2) Hormigón reforzado con fibras de PVA., que sirven como base teórica para la formulación de hipótesis, y el diseño y desarrollo de los modelos numéricos. Por otra parte, presenta el detalle de las propiedades de las fibras disponibles para ensayos y las principales características de la aplicación de elementos finitos SAFE-ToolBox.

Capítulo 3 – Modelo constitutivo del PVA-FRC

Análisis de datos experimentales de ensayos a compresión y tracción de probetas de hormigón reforzado con fibras de PVA en distintos volúmenes, y con distintos tamaños de árido máximo. A partir de los cuales se construyen los modelos constitutivos del material reforzado que serán posteriormente utilizados en el estudio paramétrico de modelos con fibra.

Capítulo 4 – Modelo Numérico

Presentación de las principales características de los modelos estructurales que serán utilizados en el estudio paramétrico: define dimensiones, geometrías, cuantías de acero, propiedades de los materiales, restricciones, etc. Además de las consideraciones aplicadas en SAFE-ToolBox, como cargas, algoritmo de solución y criterio de convergencia. Define los parámetros de estudio y entrega los resultados obtenidos del modelo base, entre los

que se encuentran la respuesta global del sistema, concentración de corte y momento en la losa y distribución de esfuerzos y deformaciones para distintas etapas de carga.

Capítulo 5 – Estudio Paramétrico de Modelos sin Fibra

Estudio comparativo de modelos sin fibra, considerando las variables: Cuantía de armadura longitudinal, longitud de ala y ancho de losa., en relación con los resultados obtenidos del modelo base, consideran los parámetros de estudio anteriormente definidos.

Capítulo 6 – Estudio Paramétrico de Modelos con Fibra

Estudio comparativo de modelos con fibra, considerando las variables: Porcentaje de Fibra y tamaño máximo del árido, en relación con los resultados obtenidos de modelos estudiados en el capítulo 5, consideran los parámetros de estudio anteriormente definidos.

Capítulo 7 – Conclusiones

Planteamiento de las principales conclusiones obtenidas a partir de los resultados y observaciones realizadas, en relación con las variables estudiadas, principalmente enfocado en la aplicación de fibras, a partir del cual se plantean recomendaciones para el diseño de ensayos de sistemas de muros acoplados con losas fibro-reforzadas.

1.4. Alcances

El estudio realizado a lo largo de esta memoria se orienta en el análisis de la transmisión de esfuerzos a través de la losa en secciones de pasillo simétricos donde se enfrentan muros rectos o muros T de igual características, tomando en cuenta variables exclusivamente asociadas a la losa; considerado como datos invariantes la geometría, dimensionamiento, cuantías y materialidad del alma de muros. Con el objeto de concentrar el estudio en la aplicación de fibras de PVA como refuerzo en el hormigón armado, se recurrió al uso del modelo no-lineal base desarrollado originalmente en el trabajo de Henríquez (2019), en el cual se comparó y demostró la representatividad del modelo simplificado en relación con el modelo de 10 pisos., el cual fue modificando para extender el estudio a muros T. Respecto al estudio de curvas esfuerzo vs deformación de probetas de hormigón fibro-reforzado, la calibración de modelos constitutivos se realizó considerando modelos de materiales compatibles con la aplicación de SAFE-toolbox, tal como se describe el capítulo 3. Además, debido al tiempo de procesamiento de datos, han sido considerados exclusivamente dos mezclas de hormigón con porcentajes de fibras 0.00%, 0.25% y 0.50% con tamaño de árido máximo clasificados como arena fina y grava. Se busca con esto determinar la influencia de las fibras en el comportamiento de losas y generar recomendaciones de diseño para ensayos de estructuras de similares dimensiones.

Capítulo 2 – Revisión Bibliográfica

El presente capítulo contiene la recopilación de los principales antecedentes obtenidos a partir de diversos estudios publicados y validados por la comunidad científica, que sirven como base teórica para la formulación de hipótesis, planteamiento de resultados esperados y el diseño y desarrollo de la metodología experimental expuestos a lo largo de todo este documento.

La información reunida a continuación se orienta en los siguientes cuatro tópicos y permitirá convenir y familiarizar al lector con los conceptos posteriormente utilizados.

- 2.1 . Efecto de la adhesión de Fibras de Polyvinyl Alcohol (PVA) en las propiedades del Hormigón
- 2.2 . Comportamiento de losas de Acoplamiento de Hormigón Armado
- 2.3 . SAFE-Toolbox
- 2.4 . Tipología de losas en Chile

2.1. Efecto de la adhesión de Fibras de Polyvinyl Alcohol (PVA) en las propiedades del Hormigón

2.1.1. Fibras de Refuerzo y su aplicación en Hormigones

El hormigón fabricado a partir de la mezcla de cemento, agua, áridos y fibras discretas discontinuas adopta el nombre general de Hormigón Reforzado con Fibra o FRC (del inglés, *Fiber-Reinforced Concrete*). Las fibras en su concepto más general son cualquier filamento (fragmento de material con una dimensión significativamente mayor que las otras dos) de origen natural, artificial o sintético como acero, carbono, polietileno, vidrio, cascaras de coco, etc., que al ser agregado a una matriz de materiales como epoxi, plásticos, cerámicas u otros, permite mejorar alguna o algunas de sus propiedades.

Particularmente en este documento *fibras de refuerzo* hará referencia a aquellas utilizadas en la Fabricación de FRC, cuya historia tiene un inicio mucho más reciente que data de 1900 con la fabricación del Cemento Reforzado con asbesto, conocido comúnmente como Fibrocemento. Desde este punto inicial, se han elaborado y estudiado gran variedad de fibras como acero, vidrio, carbono, celulosa, propileno, etc., con diversidad de tamaños y geometrías, que buscan mejorar propiedades específicas del hormigón con fines particulares como aislar, impermeabilizar, controlar grietas o mejorar propiedades mecánicas. Según Bentur & Mindess (2006) *las aplicaciones de FRC son tan variadas como variedad de fibras existen en el mercado*.

En general, las fibras tienen longitudes que varían entre los 6 y 64 mm, mientras que el rango de diámetros depende del tipo de fibra, por ejemplo, las fibras de acero poseen diámetros comunes que van entre los 0,5 y 1,0 mm, mientras que los filamentos de fibra de vidrio tienen diámetros de entre 13 y 18 μm . Particularmente, la ACI 544.3R-08 clasifica las fibras sintéticas según su diámetro (d) en fibras microsintéticas ($d < 0,3\text{mm}$) y macrosintéticas ($d \geq 0,3\text{mm}$), pero esta clasificación o subclasificaciones puede depender del proveedor de fibras.

Tabla 2.1. Propiedades típicas de Fibras. Mehta & Monteiro, 2006

Type of fiber	Tensile strength (ksi)	Young's modulus (10^3 ksi)	Ultimate elongation (%)	Specific gravity
Acrylic	30–60	0.3	25–45	1.1
Asbestos	80–140	12–20	~0.6	3.2
Cotton	60–100	0.7	3–10	1.5
Glass	150–550	10	1.5–3.5	2.5
Nylon (high tenacity)	110–120	0.6	16–20	1.1
Polyester (high tenacity)	105–125	1.2	11–13	1.4
Polyethylene	~100	0.02–0.06	~10	0.95
Polypropylene	80–100	0.5	~25	0.90
Rayon (high tenacity)	60–90	1.0	10–25	1.5
Rock wool (Scandinavian)	70–110	10–17	~0.6	2.7
Steel	40–400	29	0.5–35	7.8

Ahora bien, para caracterizar cada tipo de FRC no basta con conocer las propiedades mecánicas de las fibras. Pese a que estas por sí mismas puedan estar bien caracterizadas como se muestra en la Tabla 2.1., los FRC resultante de su adhesión poseen propiedades particulares debido a la interacción entre la matriz cementosa y las fibras, por lo que no es correcto utilizar esta información para realizar conjeturas apresuradas respecto a si una fibra u otra dará como resultado un FRC de mejor desempeño, es más, la variedad de fibras disponibles es tal, que no existen suficientes estudios ni base de datos que permita especificar que fibra es mejor como refuerzo en cada posible aplicación.

Originalmente estudios en torno al uso de hormigones fibro-reforzados sostenían la tesis de que las fibras en gran volumen podrían incrementar sustancialmente la resistencia a la tracción y flexión del hormigón al detener la propagación de las microfisuras y retrasar la aparición de fisuras. Sin embargo, estudios experimentales demostraron que los volúmenes y tamaños de fibra que pueden ser agregados para asegurar la trabajabilidad y la dispersión homogénea de las fibras en la mezcla, no provoca aumentos notables en la resistencia con respecto a hormigones convencionales (Mehta & Monteiro, 2006). Particularmente, el proceso de premezclado (el más utilizado en la construcción de edificaciones) permite incorporar hasta un 2% del volumen en fibras de acero con tal de mantener la trabajabilidad

requerida del hormigón (Bentur & Mindess, 2006), la comparación entre este FRC y el hormigón convencional se muestra en la

Figura 2.1.. Respecto al volumen de fibras, la ACI 544.3R-08 recomienda volúmenes de entre 0,05 y 0,2% para fibras microsintéticas y entre un 0,2 y 1,0% para fibras de acero y macrosintéticas, permitiéndose un 2,0% para casos puntuales de seguridad como aplicaciones en bóvedas y cajas fuertes.

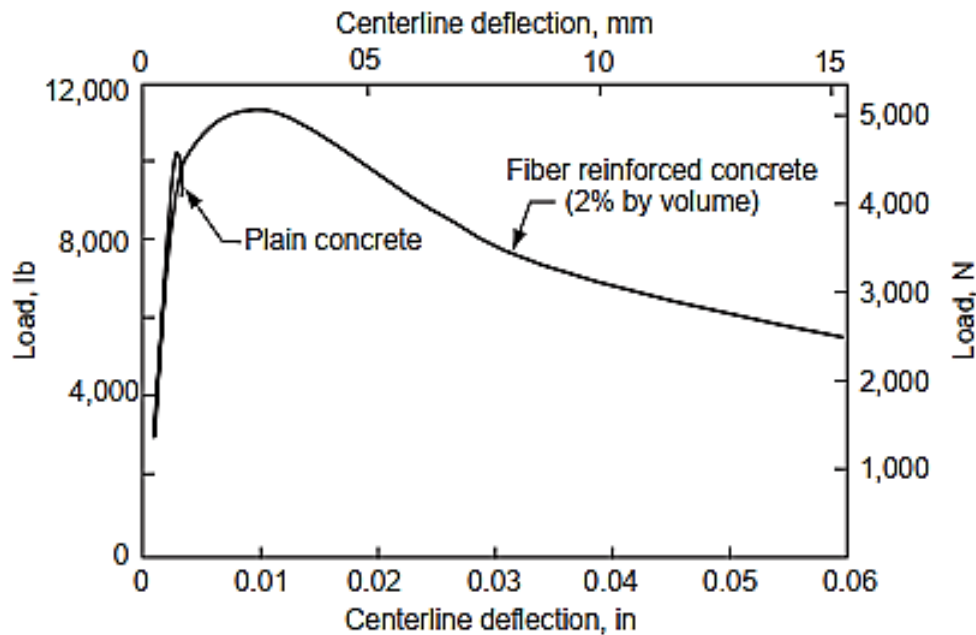


Figura 2.1. Comportamiento de carga-desplazamiento del hormigón sin reforzamiento y el FRC sometido a compresión. *Bentur & Mindess, 2006*

Sin embargo, aun cuando el aumento en resistencia no muestra ser de relevancia, la discontinuidad y dispersión de las fibras permiten un mejor control del agrietamiento post peak de tensión, mejorando la ductilidad y tenacidad del hormigón (Figura 2.1), además de mejorar en algunos casos la resistencia al impacto, fatiga y abrasión. En base a esto, Bentur & Mindess (2006) concluyen que, salvo para aplicaciones particulares, el refuerzo de fibra no sustituye al refuerzo de barras de acero, sino que cada uno en conjunto desarrolla su rol permitiendo mejoras importantes en resistencia y ductilidad. Estos casos particulares son:

1. Elementos delgados donde no es posible utilizar armadura convencional.
2. Elementos que soportan cargas o deformaciones localmente elevadas.
3. Elementos donde la armadura convencional se agrega con el objetivo de controlar la fisuración por humedad o temperatura.

Para comprender cuales son las propiedades de la fibra que influyen en el comportamiento de RFC y su desempeño a flexión y tracción, se debe entender la interacción entre la fibra y la matriz cementosa una vez que ha comenzado la fisuración de la matriz. Antes de este punto, matriz y fibras trabajan en conjunto soportando cargas crecientes con un módulo de elasticidad E_c (Módulo de elasticidad Conjunto), pero una vez que la fisura aparece, la matriz deja de resistir y la fibra soporta toda la carga funcionando como un puente de unión de la matriz mientras que la carga adicional provoca un efecto de agrietamiento múltiple que ocurre a una tensión aproximadamente constante. Cuando la matriz queda completamente dividida por grietas, cualquier carga adicional provocara el estiramiento o extracción de la fibra por lo que la rigidez queda definida únicamente por la rigidez de la fibra (E_f) (Bentur & Mindess, 2006). Este comportamiento típico se esquematiza en la Figura 2.2.

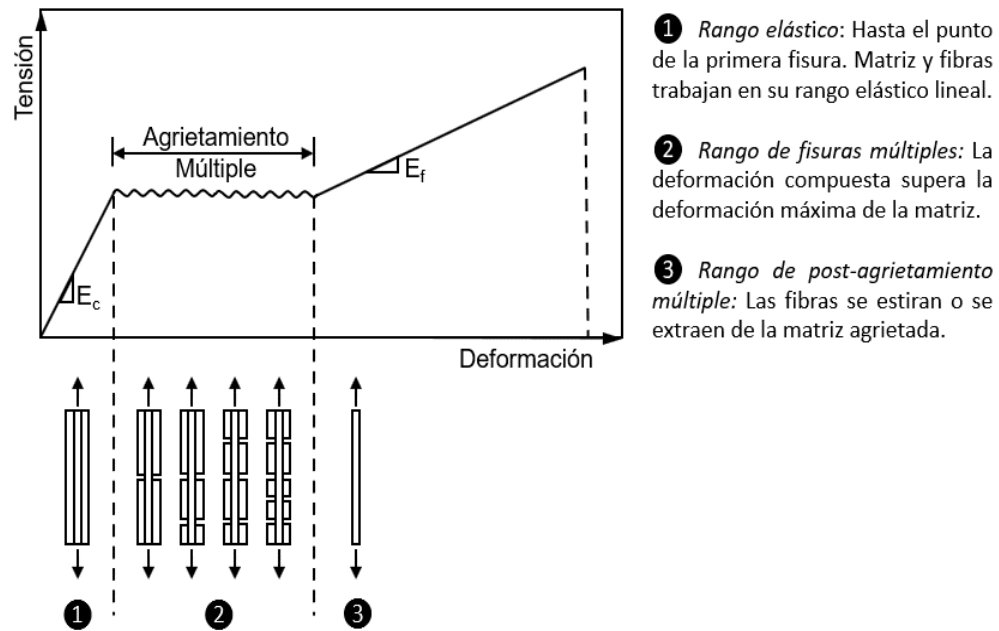


Figura 2.2. Descripción esquemática de la relación Tensión-Deformación del RFC. Basado en *Bentur & Mindess, 2006*.

Según se explica en Mehta & Monteiro (2006), el aumento de tenacidad está fuertemente relacionado con la concentración de fibras y la resistencia de las fibras a la extracción, la que a su vez depende de la forma y textura de la fibra. La resistencia a la extracción juega un papel fundamental: Si las fibras tienen una unión débil con la matriz, entonces se desprenderán a cargas bajas sin alcanzar a contribuir en la formación de puentes de fisura; si por el contrario la resistencia a la extracción es excesiva, la fibra se romperá antes de disipar energía por extracción, aportando mejoras despreciables a las propiedades mecánicas del hormigón.

2.1.2. Fibras de PVA y su efecto sobre las propiedades del Hormigón

Las fibras de Polyvinyl Alcohol (PVA) son fibras sintéticas de la familia de los polímeros cuyas propiedades microestructurales como tipo de enlace químico, fricción, alta relación de aspecto y alto módulo de elasticidad, lo han convertido en el último tiempo en una alternativa ideal para la fabricación de FRC, presentando alta resistencia a la tracción, buena dispersión en el hormigón, resistencia a medios alcalinos y sobre todo, una fuerte unión con la matriz cementosa debido a la existencia del grupo hidroxilo (OH) en su estructura molecular que le permite formar enlaces de hidrogeno con las moléculas de H₂O presentes en el cemento hidratado (Sasmal & Avinash 2016). Además de sus ventajas mecánicas, las fibras de PVA no son tóxicas, no causan daño al medio ambiente y tienen costos menores que fibras de acero u otras fibras poliméricas, con costos 8 veces menores que fibras de Polietileno (PE) y módulos de elasticidad y resistencia mayores que las fibras de polipropileno (PP) (Pan, et. al, 2015).

Para comprender el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de PVA, se documentan a continuación los principales resultados y conclusiones de estudios experimentales de hormigones fibro-reforzados.

Li et. al., en 1998 realizaron un estudio comparativo del comportamiento de hormigones reforzados con fibras cortas de acero, PVA y PP, y hormigones no reforzados. Los resultados del estudio de tensión uniaxial demostraron que para porcentajes de fibra menores al 2%, tanto las fibras de acero como PVA presentan mejoras en resistencia en torno al 10% y aumentos considerables en ductilidad (principalmente en probetas reforzadas con fibras de acero), mientras que la capacidad de deformación elástica no presenta mejoras notables. El aumento de fibras por sobre el 2% aumentó significativamente la tenacidad de las muestras, sin embargo, no condujo necesariamente a un aumento de la resistencia máxima a la compresión de las probetas de origen sintético por su tendencia a generar zonas de concentración o “bolas” de fibra que debilitan el hormigón. Esta conclusión fue respaldada por la investigación realizada por Noushini, Samali & Vessalas en 2013, quienes sometieron a ensayos de compresión uniaxial y tracción por hendimiento a 5 probetas de hormigón PVA-FRC con fibras de 6mm y 12mm con distinto porcentaje de volumen, verificando que las fibras no son beneficiosas para la resistencia a la compresión ni a la tracción cuando el contenido de fibra supera cierto nivel, y que la resistencia puede primero aumentar y luego disminuir al aumentar el volumen de fibras (Figura 2.3); en este mismo documento, concluyen que fibras más cortas permiten aumentos mayores de resistencia a la compresión frente a fibras más largas.

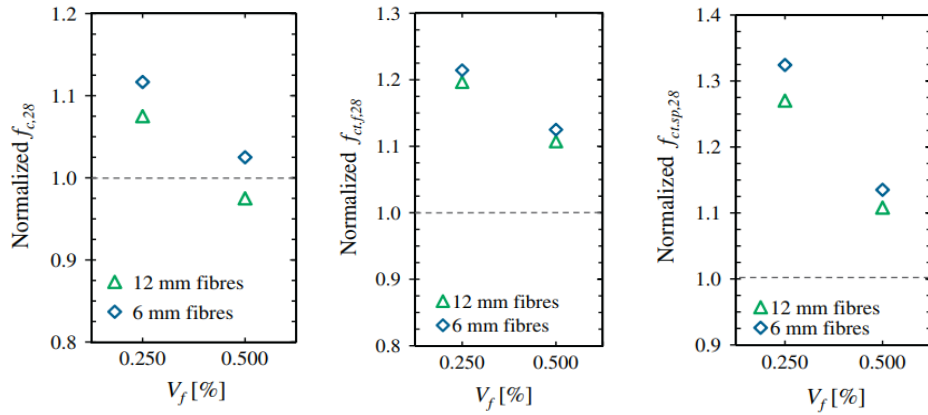


Figura 2.3. Resistencia a la compresión normalizada (Izquierda), Modulo de Elasticidad normalizado (centro) y Resistencia a la tracción normalizada (Derecha) de los FRC a los 28 días con respecto al hormigón de control (Noushini, Samali & Vessalas, 2013)

Vásquez, N. (2020), estudio la variación de ductilidad y resistencia del hormigón PVA-FRC, por medio de ensayos de compresión y tracción uniaxial. Estudió 9 mezclas a compresión, para 3 dosificaciones distintas en las que varió el tamaño máximo del árido (diámetro máx. = 9.5mm) y a cada mezcla agregó tres volúmenes de fibra diferente (0%, 1% y 2%). Todos los casos estudiados mostraron una disminución de resistencia a la tensión a los 28 días, siendo la de mayor caída la mezcla que incluyó gravilla de 9,5mm y un 2% de fibra, con una reducción de resistencia de un 75%, respecto al hormigón sin fibra. El efecto sobre la resistencia a la tracción se estudió en 4 probetas con áridos de diámetro máximo 2.36mm y 0,425mm con volúmenes de fibra de 0% y 2.5%. Los resultados muestran aumento de ductilidad y desarrollo de grietas múltiples, sin embargo, solo se obtuvo un aumento de resistencia para la probeta con árido de tamaño máximo 2.36mm. La dosificación y resistencia obtenidas de estos ensayos se muestra en la Tabla XX.

Tabla 2. 2. Dosificación y resultados obtenidos por Vásquez, N. 2020.

Mezcla	Cemento	Agua	Gravilla	Arena	Arena	Arena	W/C*	Ar/C
	[kg]	[kg]	9,5	9,5	4,75	0,3		
MD2_A9.5_WC0.54	1,02	0,45	1,14	2,78	0	0	0,54	8,66
MD2_A9.5_WC0.57	0,97	0,45	1,16	2,81	0	0	0,57	8,78
MD2_A9.5_WC0.52	1,34	0,61	0	0	2,63	0	0,52	1,15
MD2_A9.5_WC0.55	1,26	0,61	0	0	2,70	0	0,55	1,15
MD2_A9.5_WC0.50	1,58	0,60	0	0	0	2,10	0,50	0,84
MD2_A9.5_WC0.51	1,56	0,60	0	0	0	2,12	0,51	0,85

MD2: Mezcla Dosificación 2, AX: Tamaño máximo de árido X, WCY: Relación agua/cemento Y. *: ajustado con agua de áridos.

Por otro lado, en 2015, Pan et. al., desarrollaron un estudio experimental en probetas de PVA-ECC ensayadas a flexión en cuatro puntos. Diseñaron 21 probetas con distintas

proporciones de mezcla con el objetivo de estudiar el efecto de la relación agua-cemento, cenizas volantes, fracción de volumen de fibras, fibras aceitadas y no aceitadas etc., sobre las propiedades mecánicas del hormigón resultante. Rescatando que, después de la primera fisuración, las probetas exhibieron 4 tipos de comportamiento: fractura frágil, fractura cuasi frágil, fisuración múltiple estable y fisuración múltiple inestable. Los datos y resultados de este estudio se muestran en la Figura 2.4. La muestra M-14 (Sin reforzamiento de fibras) falla abruptamente una vez que se propaga la primera grieta. La adhesión de fibras de PVA no aceitada (M13) muestra una resistencia máxima menor que el espécimen sin fibras, pero una vez que alcanza su peak la carga disminuye gradualmente con la deformación, mostrando un leve aumento en ductilidad, este modo de falla clasifica como cuasi frágil. Para probetas con alta relación agua/cemento o alto porcentaje de cenizas volantes (M4), luego del agrietamiento inicial, se desarrollan grietas múltiples por efecto del puente de fibras, sin embargo, el fuerte efecto de unión matriz-fibra provocó la ruptura temprana de las fibras

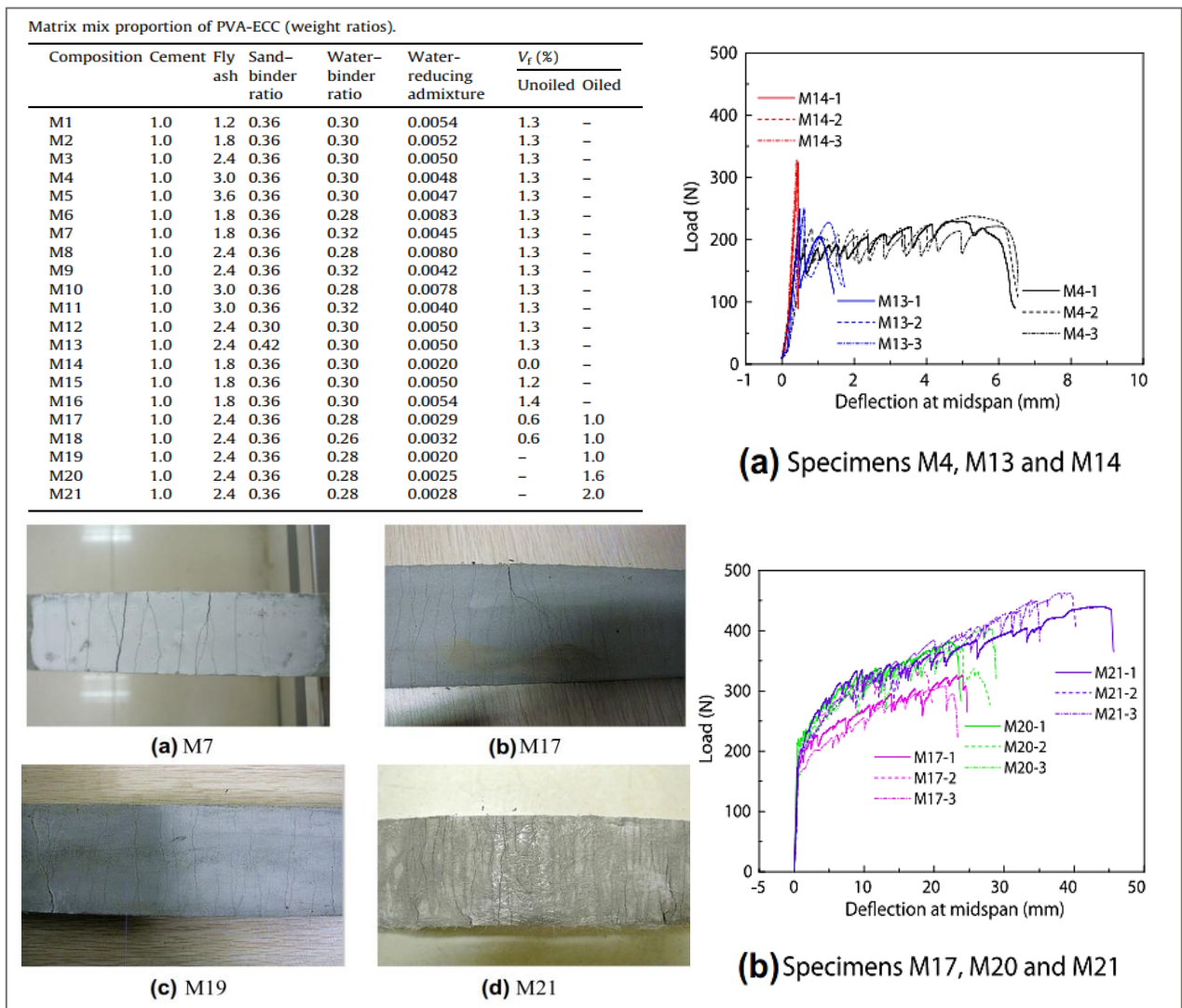


Figura 2.4. Datos de probetas y resultados del estudio experimental realizado por Pan et al. (2015).

(fisuración múltiple inestable), por lo que alcanzó deformaciones menores que muestras que contenían fibras aceitadas (M17 y M21) en las cuales las fisuraciones múltiples fueron capaces de desarrollarse hasta que ocurrió el desprendimiento de las fibras (fisuración múltiple estable), siendo capaces de desarrollar una importante deformación inelástica.

Las principales conclusiones resultaron en (1) aumentar la relación agua/cemento, disminuir la relación arena/cemento y aumentar la proporción de cenizas volante mejora la ductilidad, pero puede reducir la resistencia del material. (2) el uso de fibras recubiertas en aceite o una mezcla de aceitadas y no, permite desarrollar agrietamiento múltiple estable, aumentando la ductilidad del hormigón.

Sasmal & Avinash (2016), en esa misma línea, estudiaron el efecto de la relación agua/cemento, arena/cemento, volumen y tamaño de fibra en el comportamiento del PVA-ECC mediante ensayos de flexión en 16 probetas. Sus resultados respecto a cada una de estas características sugieren lo siguiente:

- *Relación agua/cemento (w/c):* Una relación agua/cemento mayor provoca un peak de máxima tensión distintivo que corresponde a la primera fisura, posterior a este la tensión decae a medida que aumenta la deformación. A medida que disminuye esta relación, se desarrolla de manera más estable el endurecimiento por deformación (agrietamiento múltiple), por lo que si se desea aumento de resistencia se debe optar por valores de w/c altos, pero mayores niveles de ductilidad se debe preferir relaciones menores.
- *Relación árido/cemento (a/c):* Una relación árido/cemento mayor provoca caídas de tensión y mejoras en ductilidad, se postula que esto podría deberse a que el aumento de contenido de arena aumenta la fricción entre la fibra y la matriz permitiendo el desarrollo de endurecimiento por deformación más estable. Una relación a/c superior a 0,3 permite desarrollar completamente el efecto de puente de unión de las fibras.
- *Efecto del volumen de fibra y longitud de la fibra:* El aumento de la fracción de volumen de un 1% a un 2% aumentó la resistencia a la flexión en casi un 100%, mientras que la variación de longitudes de 8mm a 12 [mm] no mostró variaciones importantes.

Los anteriores dos documentos citados hacen referencia a hormigones ECC cuyo diseño limita los agregados a áridos muy finos, esto debido a la cierta incompatibilidad que existe entre los áridos gruesos y la participación de las fibras en el hormigón; la presencia de agregados gruesos en la pasta aumenta la tenacidad de la matriz, lo que retrasa el inicio de la fisuración, esto a su vez hace que el puente de fibras actúe a tensiones mayores reduciendo la capacidad de desarrollar fisuras múltiples de manera estable, con lo cual se reduce la ductilidad a tracción del material compuesto. Además, la introducción de agregados gruesos

no solo disminuye la trabajabilidad (ya comprometida debido a la incorporación de fibras), sino que además si el diámetro de estos supera el espaciado promedio de las fibras tenderá a generar acumulaciones de fibra que reducen la resistencia a la tracción del material. (Sahmaran et. al, 2012). Resultados de pruebas realizados por Sahmaran et. al, 2009, indican que agregados de tamaño máximo 2,38 mm no conducen a cambios significativos en la resistencia de FA-ECC (ECC con adhesión de ceniza volante) de alto volumen.

2.1.3. Fibras de PVA - KURALON™

El mercado de fibras sintéticas de refuerzo en el país aún es pequeño y se limita principalmente a la distribución de macro y microfibras de polipropileno (PP) cuyo uso se recomienda en losas, pavimentos y elementos prefabricados para reducir retracciones plásticas y agrietamiento por secado, disminuir la exudación y mejorar la resistencia al impacto, rotura y abrasión del hormigón, pero no se recomiendan como sustitutos de la armadura estructural (CDT – CCHC, 2009).

La falta de alternativas para la adquisición de fibras de PVA hizo necesaria la importación de este producto a través de empresas internacionales, adquiriéndose Fibras de PVA – KURALON™ de Kuraray, empresa japonesa especializada en la manufactura de productos químicos, fibras y otros materiales. Las fibras disponibles y sus propiedades se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Propiedades según tipo de Fibra KURALON™

Tipo	Fibra	Diámetro μm	Longitud mm	Densidad g/cm ³	Módulo de Young GPa	Módulo de Rotura GPa
A	RECS15/12mm	40	12	1.3	41	1.6
B	RECS100/12mm	100	12	1.3	28	1.2
C	RF600/15mm	240	15	1.3	42	1.5



Figura 2.5. Microfibras (izquierda), Mesofibras (centro) y Macrofibras (derecha) de PVA - KURALON™

Su uso se recomienda en muros y fachadas, losas prefabricadas para puentes, suelos flotantes, pantallas anti-ruido y anti-viento, restauración de hormigones, revestimiento de túneles y prefabricados de hormigón entre otros. Algunas de las dosificaciones recomendadas por el fabricante se presentan en la Tabla 2.4., además, la Figura 2.6, muestra una comparación en la reducción de fisuras entre hormigones sin fibra de refuerzo y hormigones fibroreforzados con polipropileno y PVA puesta a disposición por el fabricante (Kuraray, 2015).

Tabla 2.4. Dosificación recomendada de fibras de PVA - KURALON™

Fibra	Dosificación %vol.	Aplicación
RF400/12mm	1.0%	Prefabricado de Hormigón - Inmobiliario
RF4000/30mm	0.6%	Prefabricado de Hormigón - Escaleras
RF4000/30mm	0.3%	Superficies de Túneles
RF400/XX	2.5%	Pantallas Anti-viento / Anti-ruido
RECS100L/12mm	1.0%	Morteros Dúctiles

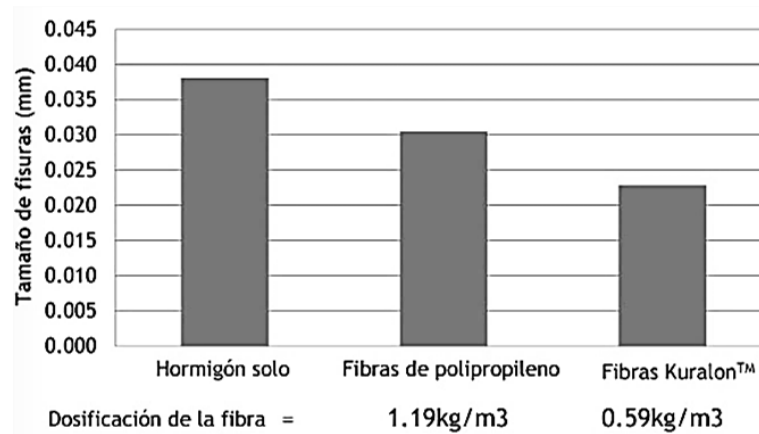


Figura 2.6. Comparación gráfica de la reducción de Fisuras entre hormigón no reforzado y fibroreforzados con PP y PVA (Kuraray, 2015).

2.2. Losas de Acoplamiento de Hormigón Armado

Los sistemas conformados por muros de corte y losas de acoplamiento actúan como un marco rígido articulado capaz de resistir cargas de gravedad y fuerzas laterales causadas por viento y sismos, donde las losas actúan como diafragmas que distribuyen las cargas horizontales a las paredes verticales de corte. Este tipo de sistemas surgió a partir de la necesidad de diseñar estructuras más eficientes que las estructuras columnares, frente al importante incremento del efecto de cargas laterales en altura.

La Figura 2.7.a muestra una estructura de Muros de Corte típica formada por dos muros transversales separadas por la apertura de pasillos que resisten las cargas laterales en la estructura. Debido al efecto de flexión de la estructura, se producen rotaciones en las

secciones transversales de los muros que obligan a la losa a girar y doblarse fuera del plano donde se conectan rígidamente con los muros (Figura 2.7.b), generando esfuerzos de momento resistentes que se transmiten entre muros a través de la losa aportando rigidez lateral a la estructura.

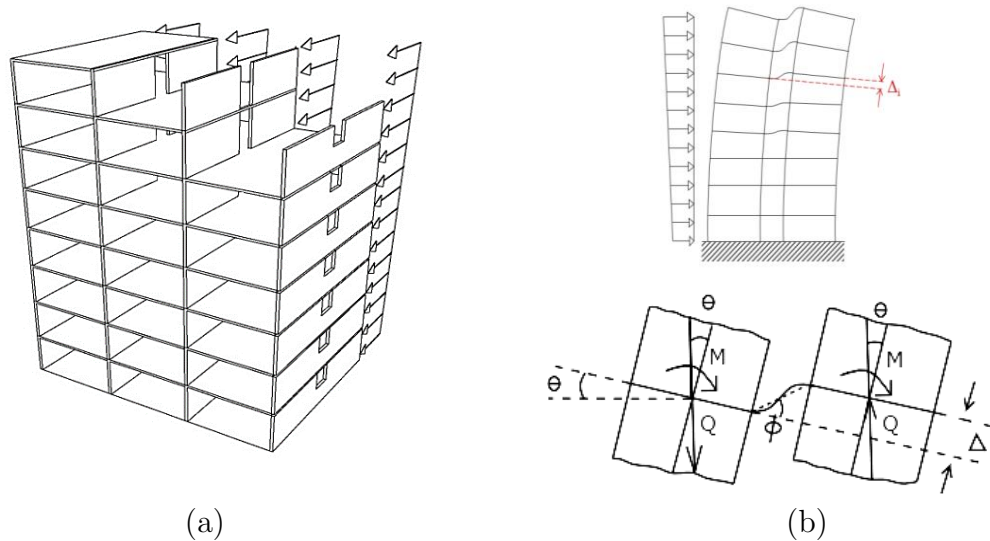


Figura 2.7. (a) Vista en perspectiva de una Estructura de Muros de Corte típica y (b) Respuesta del sistema sujeto a cargas laterales (basado en Schwaighofer y Collins, 1977)

Los modelos bidimensionales frecuentemente utilizados en el análisis estructural de muros cortantes suponen que estos se encuentran conectados mediante vigas cuya rigidez equivalente se determina mediante el parámetro de ‘*ancho efectivo*’. Muchas de las investigaciones realizadas en torno al efecto de acoplamiento en este tipo de sistemas se han enfocado en determinar dicho parámetro en diferentes conjuntos de circunstancias, dejando de lado el estudio de las acciones de corte y momento sobre la losa misma.

Conscientes de la falta estudios sobre el tema, en 1983 A. Coull y W. Y. Chee realizaron un análisis elástico de los momentos de flexión y corte inducidos en la losa por la rotación de las secciones transversales del par de muros acoplados, utilizando un modelo de elementos finitos. A partir de este, obtuvieron un patrón general de distribución de tensiones donde se observa que efecto del acoplamiento induce grandes esfuerzos de corte y momento alrededor de los extremos acoplados del muro, pero que lejos de la zona crítica los esfuerzos disminuyen rápidamente tanto en dirección longitudinal del muro como en la transversal. Particularmente se demostró que siempre que la relación entre el largo de la pared y el ancho de pasillo sea mayor a 0,5, el ancho efectivo de la losa prácticamente no se ve afectado por variaciones en el largo de la pared, con lo cual se consideró únicamente la influencia de la relación entre en ancho de pasillo y el ancho de la losa en la determinación de esfuerzos

resultantes. A continuación, se presentan las principales conclusiones referentes a la distribución de corte y momento obtenidas del estudio de Coull, A., & Chee, W. Y. (1983).

Distribución de Momento

A partir de la comparación entre de momento flector Mx a lo largo de la sección transversal crítica de la losa (eje y Figura 2.8) para losas de distintos anchos normalizados Y/L (ancho de losa / ancho de pasillo), mostraron que la variación de Mx para distancias menores a $y/L = 0,25$ (Región Crítica) desde el muro no se ve afectada por la variación del ancho de losa Y , mientras que, para distancias mayores, los valores de Mx son pequeños en comparación a la zona crítica, por lo cual la influencia del ancho de la losa deja de tener importancia práctica para deformaciones previas a pérdidas de resistencia.

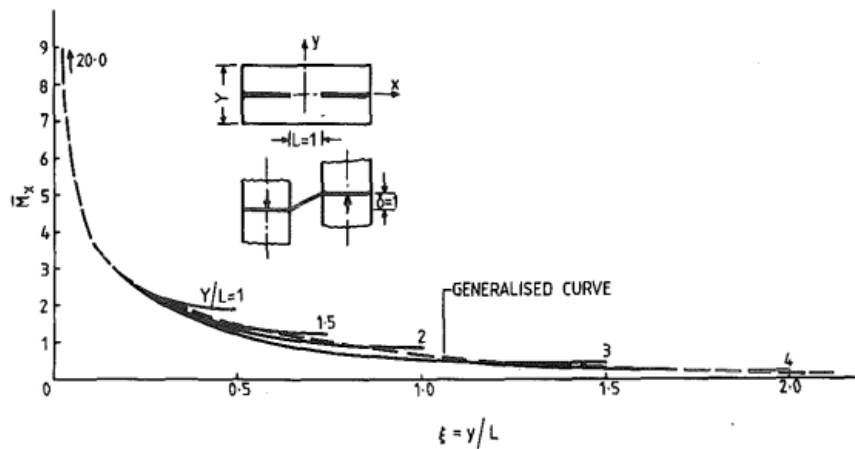


Figura 2.8. Variación longitudinal del momento en la sección crítica de la losa, para distintas longitudes transversales. Coull & Chee (1983)

Distribución de Corte

Los resultados del análisis numérico respecto de la distribución de corte Q_x y Q_y en el entorno a la conexión Muro-Losa (Figura 2.9) muestran que siempre existe una discontinuidad entre dos nodos adyacentes que impide evaluar cuantitativamente la forma real de la transferencia de corte entre ambos elementos. Sin embargo, para fines prácticos, no es esencial definir los valores exactos de corte en los puntos cercanos al muro ya que estos son principalmente resistidos por la armadura de amarre. La sección de interés que debe ser verificada contra la rotura por cortante se encuentra a una distancia u de la cara del muro. Las recomendaciones para el valor de distancia crítica dependen del código de diseño que sea utilizado, pero generalmente se da en términos de la profundidad efectiva d o profundidad total t de la losa, donde las fuerzas cortantes calculadas por el método de elementos finitos para mallas lo suficientemente refinadas, resultan ser valores finitos satisfactorios para el diseño.

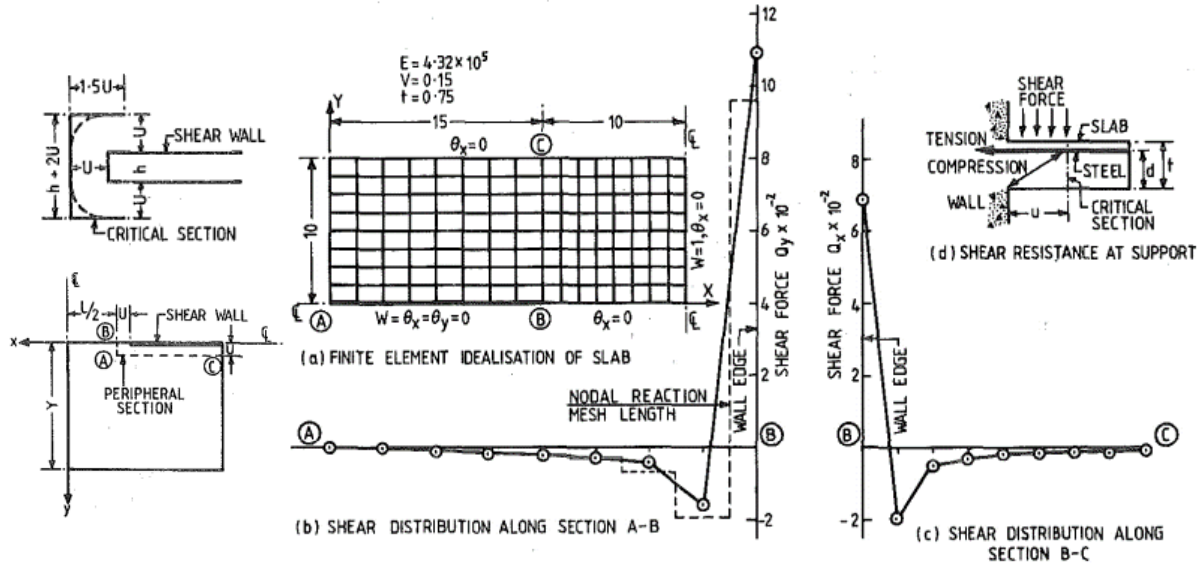


Figura 2.9. Distribución de Esfuerzos de corte en la zona crítica. Coull & Chee, 1983

En 1977 Schwaighofer, J. y Collins, M., pusieron a prueba el modelo experimental de un sistema muro-losa de hormigón armado a escala de aprox. 1:3 sometido a una carga monótonica creciente, que representaba tres pares de muros acoplados de un edificio de apartamentos típico. El experimento recreó el efecto de desplazamiento relativo entre muros provocado por cargas laterales, mediante el uso de 6 gatos hidráulicos dispuesto como se muestra en la Figura 2.10.

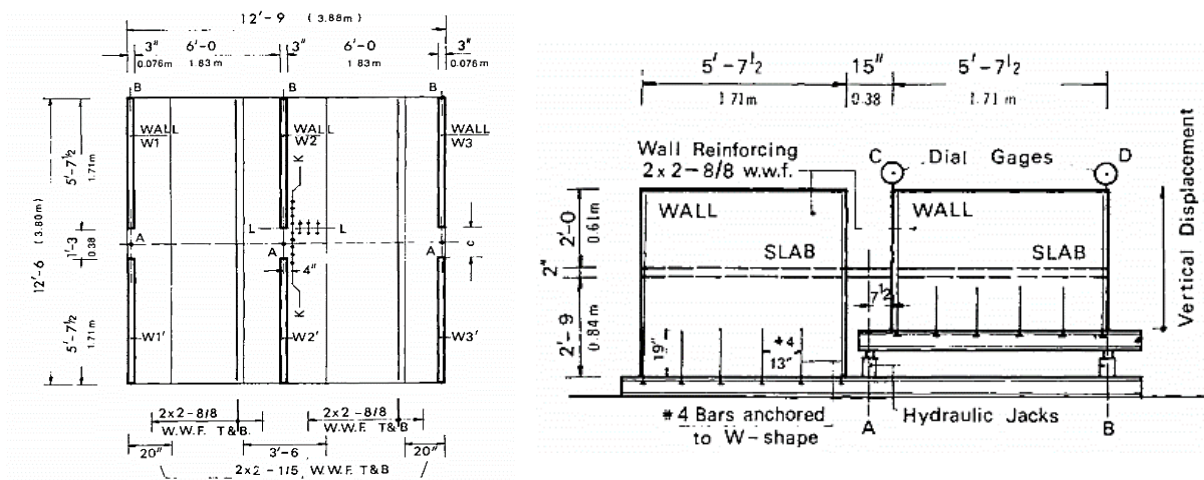


Figura 2.10. Esquema en Planta (izquierda) y Elevación (derecha) del montaje experimental realizado por Schwaighofer & Collins, 1977.

El comportamiento del modelo se representó mediante la relación entre la fuerza neta aplicada a la losa por el muro W2 y el desplazamiento resultante del mismo muro, medido a través de dos indicadores de dial (*dial gauges*, dispuestos en los puntos C y D de la Figura 2.10), con lo que se definieron las distintas etapas de carga (Figura 2.11).

Como se observa en la Figura 2.10, la losa fue equipada con extensómetros ubicados en las barras de acero de refuerzo en las líneas K-K y L-L (esta última a una distancia de 10cm del muro W2), lo que permitió graficar la deformación del acero en relación con su distancia al muro para distintas etapas de carga en las direcciones paralela y perpendicular al muro W2, además, se realizó la descripción de la propagación de grietas mediante representaciones graficas de las observaciones realizadas en 3 etapas de carga (A, B y C) (Figura 2.11). El análisis de los resultados realizado por estos autores, indica que, tal como lo predice la teoría elástica, pese a que la manera en que se transfiere el corte entre el muro y la losa es compleja, para efectos de diseño es conveniente y suficiente, suponer que este se transmite de manera uniforme en la zona crítica, la cual (según las observaciones del modo de falla y la distribución de deformaciones en dirección paralela y transversal) tendría forma de U a una distancia $d/2$ del muro (donde d es el espesor efectivo de la losa). Además, se recalca que el agrietamiento de la losa causó un importante deterioro de la rigidez del sistema y la falla final se causó debido a la perforación de la losa. Sugieren para el diseño que la resistencia a la flexión de la losa de acoplamiento se puede suponer usando un ancho de losa igual a la apertura de pasillo más el grosor de la pared.

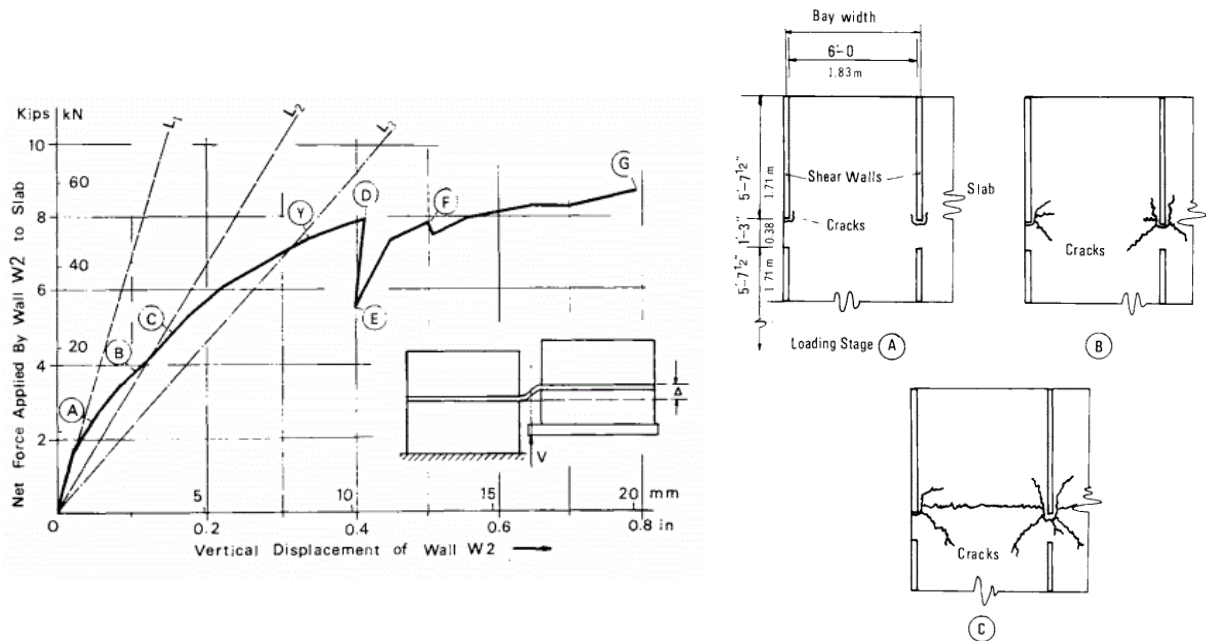


Figura 2.11. Izquierda - Grafico Fuerza Aplicada en W2 vs Deformación vertical del Muro W2 y Derecha - Esquema de la propagación de grietas en la superficie de la losa. Resultados del estudio experimental realizado por Schwaighofer & Collins, 1977.

Ancho Efectivo

Al someter a la estructura a cargas horizontales se generan esfuerzos de corte y momento que se distribuyen sobre la losa con tal de mantener la estructura acoplada. Esta distribución de momento no es uniforme en dirección transversal; particularmente, para deformaciones lineales estos esfuerzos son resistidos solo por la sección central de la losa, cuyo ancho es denominado Ancho efectivo.

Para efectos del análisis general resulta conveniente asumir que la losa actúa eficazmente como una viga al acoplar los muros, definiendo la rigidez de la losa en términos de sus características geométricas y materiales equivalentes, donde se hace indispensable el conocimiento del ancho efectivo. Por esta razón, distintos estudios se han orientado en buscar una expresión para este parámetro en función de variables como: ancho de losa, largo de pasillo, longitud de muros, ancho del ala en muros T, entre otros. Por ejemplo, Coull, A., & Chee, W. Y. (1983), tras parametrizar la distribución de momento en la losa, determinó la siguiente expresión para el ancho efectivo:

$$b_{eff} = \frac{1}{6(1 - \nu^2)} LK_a \quad (2.1)$$

Donde L el ancho de pasillo y $K_a = 2 \int_0^\xi M_x d\xi$ con $\xi = y/L$.

En estudios más actuales, como el realizado por Tapia (2008), se define el ancho efectivo a partir de modelos de elementos finitos de sistemas de muros acoplados tipo T, determinando que existe una relación lineal entre el ancho de pasillo, la longitud del ala de muros y el ancho efectivo de la losa (ecuación 2.2)

$$b_{eff} = L + 0.1 \frac{M_i}{e} \quad (2.2)$$

Donde L es el ancho de pasillo, M_i la longitud del ala y e el espesor de losa, como se muestra en la Figura 2.12.

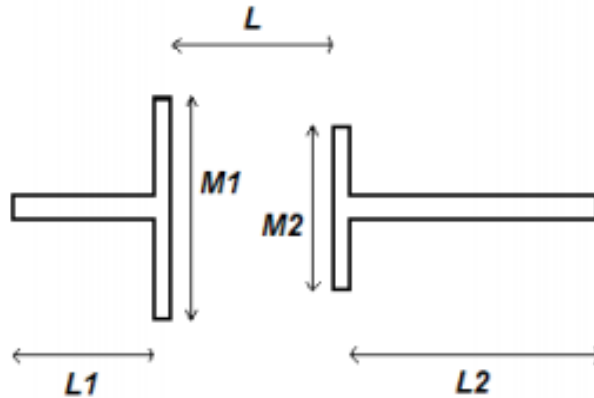


Figura 2.12. Esquema muro-losa para el cálculo del ancho efectivo según Tapia (2008).

2.3. SAFE-TB

SAFE-TB (*Structural Analysis by Finite Elements – ToolBox*) es un Framework de Matlab desarrollado y presentado el 2016 por Rojas, et al., que consiste en una herramienta de modelación no lineal basado en métodos de elementos finitos que permite representar el comportamiento de piezas de Hormigón Armado utilizando un sistema de membrana en capas conformadas por cuadriláteros de cuatro nodos con 3 grados de libertad cada uno (Figura 2.13), donde cada capa representa un material particular distribuido de manera homogénea y completamente adherido, que se rige por la ley constitutiva que se defina para el caso.

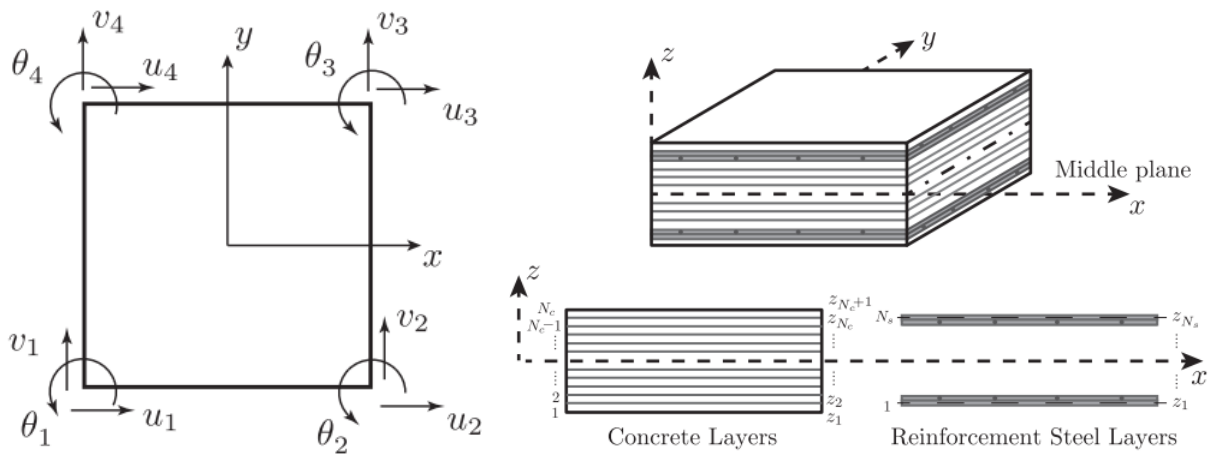


Figura 2.13. Izquierda – Representación de nodos y grados de libertad globales. Derecha – sección de membrana en capas típica (Rojas, et. al. 2016)

La distribución de esfuerzos y deformaciones del modelo se realiza a partir de una deformación o carga controlada como parámetro de entrada, con lo cual el programa, mediante el algoritmo iterativo, que resuelve y encuentra la convergencia para cada elemento finito, documentando desplazamiento, curvatura y esfuerzos.

La formulación de la sección en capas le otorga mayor flexibilidad a esta herramienta, permitiendo modificar las propiedades del hormigón y acero, no solo para representar las distintas secciones del elemento como la cubierta de hormigón, el refuerzo de acero o el hormigón confinado, sino también, para incorporar, por ejemplo, hormigones mejorados como los fibro-reforzados u otros.

A continuación, se presentan los modelos que definen la ley constitutiva de los materiales que serán utilizados en el modelo de losas presentado en el Capítulo 4 de este documento.

2.3.1. Ley Constitutiva del Hormigón

Para efectos de modelación se asume el hormigón como material ortotrópico con relaciones axiales de tensión-deformación en los ejes ortogonales principales, las que se representan por medio de las tensiones-deformaciones promedio y un módulo de Poisson no válido después de la fisuración. Se considerará para esta investigación el modelo propuesto por Massone (2009), que extiende los modelos de cargas estáticas para incluir el efecto de histéresis en el material.

El comportamiento del hormigón a **compresión** se define por la curva propuesta por Thorenfeldt en 1987 y calibrada por Collins y Porasz en 1989 (Rojas, et. al. 2016) según se muestra en la ecuación 2.3. y la Figura 2.14., donde f'_c es la resistencia máxima a compresión del hormigón, $k=1$ para casos confinados y no confinados, $n=3.1$ para hormigón confinado y $n=2.1$ para no confinado.

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = f'_c \frac{n \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^{nk}} \quad (2.3)$$

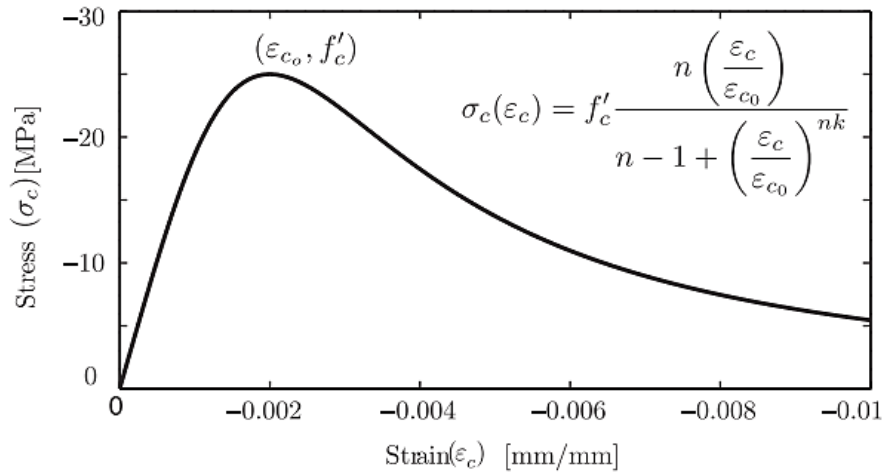


Figura 2.14. Modelo Constitutivo del hormigón a compresión, basado en Thorenfeldt (Rojas, et. al. 2016).

Para definir el comportamiento del hormigón a **tracción** se considera la curva bilineal propuesta por Belarbi y Hsu en 1994, presentada en la ecuación 2.4., donde la primera sección de la curva corresponde al comportamiento el hormigón en estado elástico y la segunda, post fisuración (Figura 2.15.). Se considerarán parámetros $b=0.4$ para hormigón confinado y $b=0.6$ para no confinado, además una deformación unitaria de fisuración (ε_{cr}) igual a 0.00008 y el esfuerzo máximo a tracción $f_{cr} = 0.31\sqrt{f'_c} [MPa]$

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = \begin{cases} f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cr}} \right) & \text{si } \varepsilon_c \leq 0 \\ f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cr}} \right)^b & \text{si } \varepsilon_c > 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

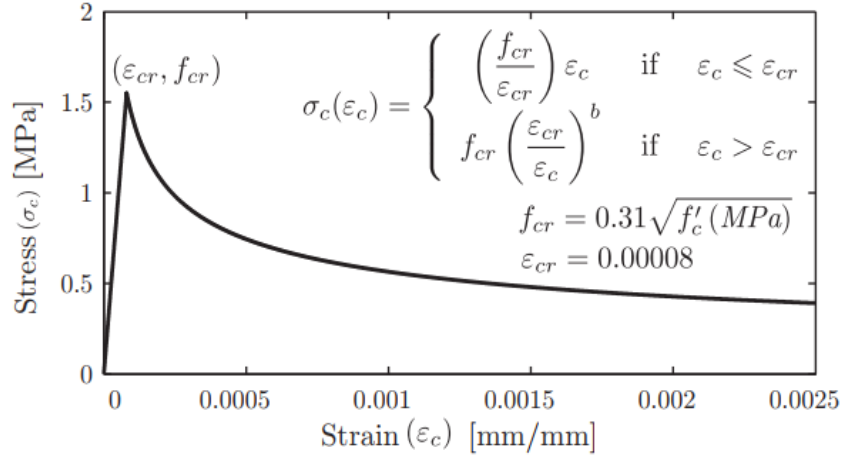


Figura 2.15. Modelo Constitutivo del hormigón a tracción, basado en Belarbi y Hsu (Rojas, et. al. 2016).

El *comportamiento histerético* del hormigón se representa por la gráfica de carga y descarga mostrada en la Figura 2.16 y las ecuaciones 2.5 y 2.6, donde la sección de carga asciende con módulo de rigidez E_c y la sección de descarga desciende con $0.071E_c$. Cada sección se encuentra limitada por las deformaciones máximas a compresión (ε_m^c) y tracción (ε_m^t) del ciclo anterior y los parámetros $\alpha_c = 0.32$ y $\alpha_t = 0.08$.

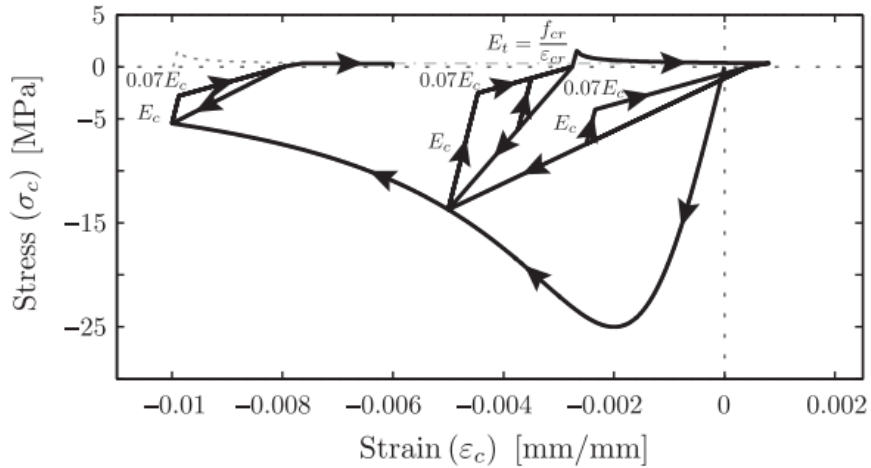


Figura 2.16. Modelo Histórico del hormigón (Rojas, et. al. 2016).

$$\varepsilon_p^c = \varepsilon_m^c \left(1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^c}{\varepsilon_{c0}}\right)\alpha_c} \right) \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_p^t = \varepsilon_m^t \left(1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^t}{\varepsilon_{cr}}\right) \alpha_t} \right) \quad (2.6)$$

El modelo también permite la incorporación de coeficientes que modifican la capacidad máxima del hormigón a compresión, como se muestra en la Figura 2.17.

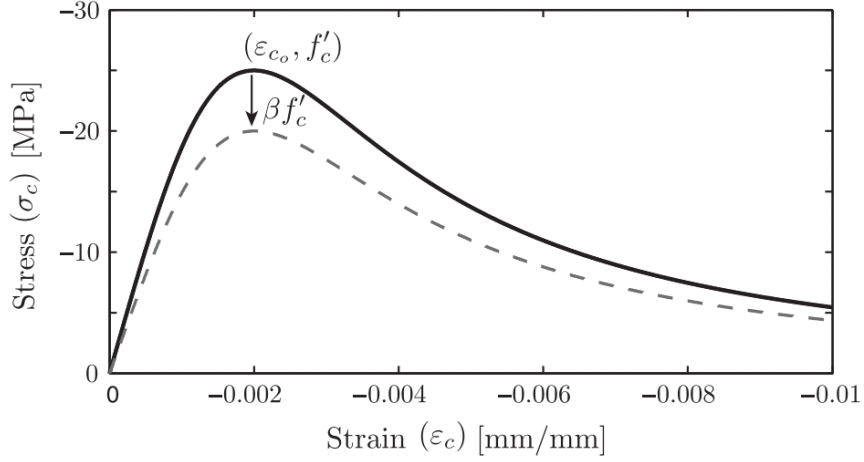


Figura 2.17. Coeficiente de Modificación del Hormigón (Rojas, et. al. 2016).

- **Coeficiente de ablandamiento:** Corresponde a la reducción de resistencia a la compresión en una dirección debido a la tracción en dirección perpendicular. Se utiliza la ecuación modelada por Belarbi y Hsu en 1995 (ecuación 2.7) con los parámetros $k_\theta = 250$ y $k = 1$, basado en Rojas et. al. 2016:

$$\beta_s = \frac{k}{\sqrt{1 + k_\theta \varepsilon_t}} \quad (2.7)$$

- **Coeficiente de daño por carga cíclica:** Para modelar el efecto de reducción por compresión biaxial frente a cargas cíclicas se considera la ecuación propuesta por Palermo y Vecchio (ecuación 2.8), donde ε_{max} y ε_{min} son las deformaciones máxima y mínima de cada ciclo, ε_{c_0} la deformación a resistencia máxima α_1, α_2 parámetros que toman los siguientes valores:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1 \\ 0.175 \end{cases} \quad \alpha_2 = \begin{cases} 0.5 & \text{antes de la fisuración} \\ 0.6 & \text{después de la fisuración} \end{cases}$$

$$\beta_d = \frac{1}{1 + \alpha_1 \left(\frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{\varepsilon_{c_0}} \right)^{\alpha_2}} \quad (2.8)$$

- **Coefficiente de mejora por confinamiento:** Para representar el aumento de resistencia a la compresión por confinamiento se utiliza el factor definido según la ecuación 2.9, donde ρ_s es la cuantía de acero transversal y f_y es el módulo de elasticidad del acero transversal:

$$\beta_{conf} = 1 + \frac{\rho_s f_y}{f'_c} \quad (2.9)$$

- **Coefficiente de mejora de la fuerza a compresión:** El aumento de resistencia a la compresión producido por un estado de compresión biaxial o por confinamiento otorgado por estribos, trabas o zunchos en el hormigón, se cuantifica mediante el parámetro propuesto por Vecchio en 1992 (ecuación 2.10), donde i es la dirección de mejora de la resistencia, j la dirección perpendicular a i y σ_{cj} la tensión normal a i .

$$\beta_{ej} = 1 + 0.92 \left(\frac{\sigma_{cj}}{f'_c} \right) - 0.76 \left(\frac{\sigma_{cj}}{f'_c} \right)^2 \quad (2.10)$$

2.3.2. Ley Constitutiva del Acero

El modelo del acero de refuerzo considera este material como capas homogéneas perfectamente embebido al hormigón que actúan de manera uniaxial en la dirección de preferencia de las barras de refuerzo y en el cual la relación tensión-deformación se puede representar por el promedio de esta relación en las barras. El modelo utilizado corresponde al modelo de Menegotto-Pinto (Figura 2.18) que plantea la siguiente expresión (Rojas, et. al. 2016):

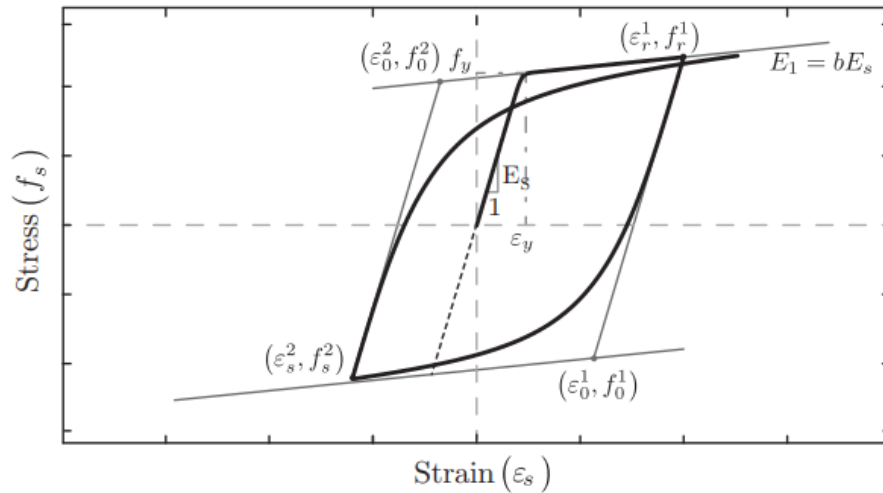


Figura 2.18. Modelo constitutivo Menegotto-Pinto para el acero (Rojas, et. al. 2016).

$$f_s^*(\varepsilon_s^*) = b\varepsilon_s^* + \frac{(1-b)}{(1+\varepsilon_s^{*R})^{\frac{1}{R}}} \varepsilon_s^* \quad (2.11)$$

Con

$$\varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \quad (2.12)$$

$$f_s^* = \frac{f_s - f_r}{f_0 - f_r} \quad (2.13)$$

Donde la curva de la ecuación 2.11 representa la transición entre la asíntota de pendiente E_s a la asíntota de pendiente bE_s en el punto (ε_0, f_0) hasta (ε_r, f_r) punto en el cual tiene lugar la reversión de deformación. Con cada reversión, los valores de estas coordenadas deben ser actualizadas (Filippou et. al. 1983).

En la ecuación 2.9, el parámetro b representa el coeficiente de endurecimiento y los valores de R y ξ se definen mediante las ecuaciones 2.14 y 2.15 respectivamente, donde $R_0 = 18$, $\alpha_1 = 16.2$, $\alpha_2 = 0.15$ (Rojas, 2016), ε_m corresponde a la máxima o mínima deformación de un ciclo de carga (según corresponda) y ε_y a la deformación de fluencia.

$$R = R_0 - \frac{\alpha_1 \xi}{\alpha_2 + \xi} \quad (2.14)$$

$$\xi = \left| \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_0}{\varepsilon_y} \right| \quad (2.15)$$

Para capturar el efecto de disminución de tensión y aumento de endurecimiento posterior a la fluencia debido a que el acero se encuentra embebido en el hormigón, en el promedio de tensión-deformación se modifican los parámetros f_y y b , según las ecuaciones 2.16 y 2.17.

$$f_y^{Promedio} = (0.91 - 2B)f_y \quad (2.16)$$

$$b_y^{Promedio} = (0.02 - 0.25B)b \quad (2.17)$$

Donde b toma el valor de $B = \frac{1}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5}$ con ρ la cuantía de acero embebido.

2.4. Tipología de losas en Chile

La construcción de edificios de hormigón armado es una práctica común en Chile con más de 100 años de historia, cuya masificación en las últimas 4 décadas se atribuye al excelente desempeño que mostraron frente al Terremoto 7,8Mw de 1985.

Según diversos autores, el éxito de estas estructuras se debe a la regularidad y redundancia estructural de su diseño, como también a la elevada densidad de muros que típicamente representan entre un 2% y 3% del área de la planta. Según el estudio realizado por Bentur (2012), los edificios que para 2010 mantuvieron esta tradición reafirmaron su buen desempeño frente al terremoto 8,8Mw del 27F, aunque, pese a que en su mayoría no reportaron considerables daños estructurales, algunos edificios mostraron daños en dinteles y losas de acoplamiento.

El trabajo realizado por Massone et. al. (2012), sostiene también, que la relación entre el área de la sección transversal de los muros y el área de la planta de edificios (A_w/A_f) es aproximadamente un 3% para edificios anteriores a 1985 (Figura 2.19), además, rescata que los espesores típicos de pared se encontraban entre los 20 y 30 [cm]. En esta misma investigación, se reporta que la información sobre un total de 454 edificios chilenos construidos entre 1939 y 2006 indicaría que un 78% de las construcciones tiene una densidad de muros de entre un 1.5% y un 3.5%. Aunque esta variable se ha mantenido relativamente constante con los años, se observó en la investigación de Calderón (2007), que el número de pisos ha aumentado desde 15 a 25 pisos desde 1990, reduciendo la proporción A_w/W (área de piso (A_w) en relación con el peso del piso por número de pisos (W)) típica de edificios anteriores a 1985 de 0.003 [m²/tonf] a 0.002 [m²/tonf].

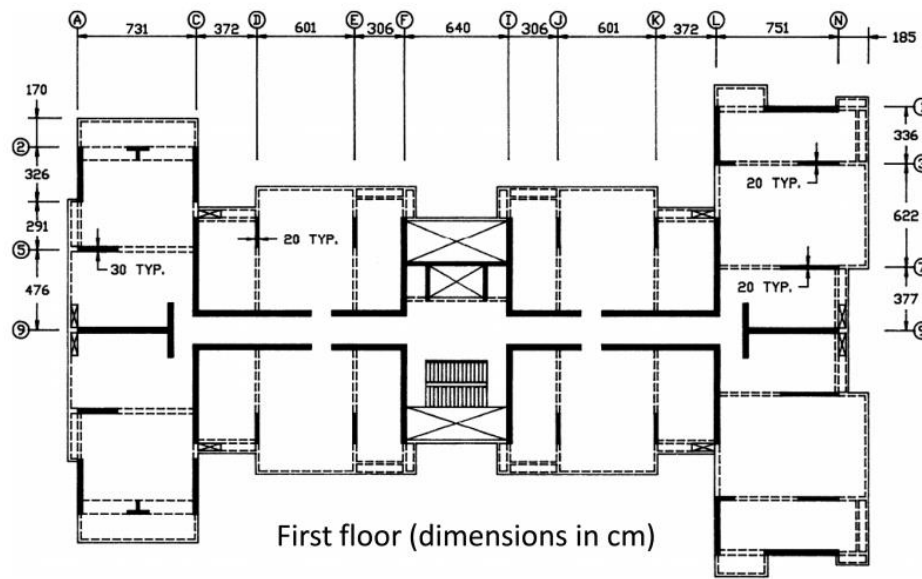


Figura 2.19. Planta Típica de edificios anteriores al terremoto de 1985. Massone et. al., 2012.

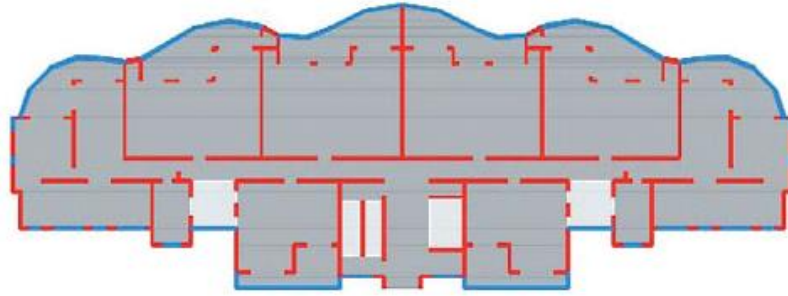


Figura 2.20. Planta típica del edificio *Bosquemar*, Concepción. (Rojo = muros – Azul = vigas). Youssef et. al., 2011.



Figura 2.21. Daño en losas de acoplamiento. Edificio *Bosquemar*, Concepción.

La tipología de edificios actual tiende a tener una relación de aspecto en planta mayor, donde se dispone un corredor central en la dirección larga del edificio con múltiples muros perpendiculares que funcionan como separación entre departamentos, además cuentan con muros más delgados de entre 15 y 20 [cm] incluso para edificios de hasta 20 pisos (Massone et. al., 2012). Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 2.20, donde se muestra la planta

típica del edificio *Bosquemar* ubicado en Concepción, Chile., el cual corresponde a uno de los tres edificios estudiados por Youssef et. al (2011) tras el terremoto de magnitud 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 en Chile., donde se observó que la mayor parte del daño de los pisos superiores se produjo en losas de acoplamiento, en secciones de pasillo entre aberturas de puertas y paredes paralelas como se observa en la foto de la Figura 2.21.

La Figura 2.21.a muestra los daños típicos observados en losas de acoplamiento generados por grietas longitudinales a lo largo del pasillo, junto a ello, la Figura 2.21.b, muestra con mayor detalle como gran parte del hormigón sufrió daños por aplastamiento, siendo posible observar luz desde el piso inferior; en esta misma se observa un segundo tipo de grieta común que se propaga de manera diagonal entre aberturas de puertas a lo largo del pasillo.

Para definir la tipología de losas chilenas se considera la caracterización de losas realizada por Chaperón (2018) y Henríquez (2019), basados en la revisión de entre 15 y 20 planos de edificios de hormigón armado diseñados entre el 2010 y 2014. En ambos reportes se precisa que el espesor de losa no varía en altura, por lo que no se hace distinción en sus estudios.

A partir de la información reportada por Chaperón (2018) sobre losas acopladas entre muros T, se concluye que:

- El espesor de losas varía entre 15 y 16cm de espesor, siendo más común (con un 69% de representatividad) la losa de acoplamiento de 15cm.
- El ancho de losas (ancho de pasillo) oscila entre los 150 y 160cm.
- La mayoría de las losas de acople estudiadas dispone de armadura distribuida $\phi 10@15$ en ambas direcciones.

Por otro lado, el estudio de Henríquez (2019) sobre losas acopladas entre muros rectangulares, concluye lo siguiente:

- El espesor de losas varía entre 15 y 16cm de espesor, siendo más representativo el primer caso (60%).
- Respecto al ancho de losa, se observaron valores entre 130 y 180cm, siendo más común el intervalo de espesores entre 150 y 160cm.
- El largo de vano típico observado es de entre 80 y 100cm
- La mayoría de las losas estudiadas dispone de armaduras distribuidas en dirección longitudinal y transversal de entre un 0.18% y 0.20%. Mientras que la armadura de refuerzo típica presenta cuantías de entre un 1.30% y 1.40% con barras de 6mm.

En esta misma línea, Zárate (2019) en su estudio comparativo sobre la respuesta experimental de losas de hormigón armado con mallas tradicionales y electrosoldadas, establece en su diseño de losas espesores de 12 y 14 cm como valores típicamente utilizados en viviendas nacionales. Mientras que los parámetros de ancho y largo de vano quedan determinados por la capacidad del sistema donde se ejecuta el ensayo, a modo de referencia se presentan las dimensiones de las cuatro probetas ensayadas en la Tabla 2.5. Respecto a la armadura, se consideraron cuantías longitudinales y transversales de entre un 0,25% y un 0,32%, con barras de 8mm.

Tabla 2.5. Especificaciones de dimensiones y cuantías de losas utilizadas en Zárate (2019).

Nombre	Largo [cm]	Ancho [cm]	Espesor [cm]	Cuantía Longitudinal	Cuantía Transversales
L1	180	53	14	0.0038	0.0029
L2	180	85	14	0.0024	0.0029
L3	180	61	12	0.0039	0.0032
L4	180	97	12	0.0025	0.0032

Capítulo 3 – Modelo constitutivo del PVA-FRC

Con el fin de definir la dosificación de la mezcla y el porcentaje de fibra que serán utilizados para ajustar el modelo constitutivo del hormigón PVA-FRC utilizado en el modelamiento de losas de acoplamiento (Capítulo 5), en el presente capítulo se estudiarán los datos experimentales obtenidos de Reveco, J. (2020) y Vásquez, N (2020).

3.1 Análisis de Datos Preliminares

Reveco, J. (2020) ensayó a compresión uniaxial un total de 63 probetas de hormigón fibro-reforzado con PVA (3 para cada uno de los 21 especímenes de estudio). Cada una de las mezclas estudiadas mantuvo constante la relación agua/cemento (0.4 [kg/kg-cemento]), árido/cemento (2.63 [kg/kg-cemento]) y la dosis de cemento (0.25 [kg/kg-hormigón]), e incluyó 1500 [ml/m³-Hormigón] de superplastificante, variando:

- Tipo de Fibra: A, B y C cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 2.3.
- Porcentaje de Fibra (%V_f): 0.00%, 0.62% y 1.23% [m³-fibra/ m³-hormigón].
- Tamaño máximo del árido: Grava, Arena Gruesa y Arena Fina (Tabla 3.1.)

Tabla 3.1. Clasificación de áridos según diámetro máximo

Tipo de Agregado	Grava	Arena Gruesa	Arena Fina
Diámetro máximo [mm]	12.50	4.75	0.475

La dosificación específica de cada uno de los 21 especímenes se resume en la Tabla 3.2. Además, en la misma, se han tabulado las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los ensayos considerando el promedio simple de los datos.

Los gráficos de las Figuras 3.1 a la 3.3 muestran la variación de la resistencia máxima a la compresión (f'_c) y su deformación asociada ($\epsilon_{f'_c}$) normalizados respecto a las probetas de control, en función del porcentaje de volumen de fibra incorporado (%V_f) para los 3 tipos de fibra y los distintos tamaños de árido máximo.

La Figura 3.1 muestra que la adición de fibras en mezclas con agregado de grava provoca reducciones de resistencia máxima (f'_c) de hasta un 8.0% debido a la incorporación de un 1.23% de fibras tipo A y C, mientras que la mezcla con fibras del tipo B en proporciones de 1.23% tiene un aparente aumento de resistencia que se acerca al 2% (0.5 [MPa]), sin embargo, si se toman en cuenta los datos sin normalizar, las probetas de control M01, M04 y M13 (misma dosificación y 0.00% de fibra) muestran una diferencia de hasta 2.1 [MPa] de

resistencia debido a la distribución no homogénea de los áridos. Considerando esto, el aumento en resistencia atribuible a la incorporación de fibras no es lo suficientemente importante para contrarrestar la dispersión normal de mezclas con áridos gruesos, por lo que se considera despreciable. El mismo grafico muestra los efectos sobre la deformación en el peak de resistencia; se puede observar que solo para fibras de tipo A se presenta una mejoría de la capacidad de deformación inelástica del material, mientras que las fibras de tipo B y C reducen de manera proporcional al volumen de fibra esta propiedad.

Tabla 3.2. Datos de mezcla y resultados experimentales de ensayos de compresión uniaxial realizados por Reveco, J. (2020)

Especímen tag	Cemento kg/m ³	Agua kg/m ³	Agregado(kg/m ³)						Propiedades Mecánicas				
			Arena			Fibra(kg/m ³)			f' _c MPa	ε _{f_c} -	E _{s0%} MPa		
			Grava	Gruesa	Fina	A	B	C				%P _f	
M01	796	318	980	637	477		0	0	0.00%	34.76	0.0034	12022	
M02	796	318	980	637	477	7.96	0	0	0.62%	33.31	0.0036	11973	
M03	796	318	980	637	477	15.92	0	0	1.23%	32.06	0.0045	9812	
M04	796	318	980	637	477	0	0	0	0.00%	32.65	0.0043	8419	
M05	796	318	980	637	477	0	7.96	0	0.62%	32.30	0.0040	10726	
M06	796	318	980	637	477	0	15.92	0	1.23%	33.17	0.0036	11405	
M07	796	318	0	1197	898	0	0	0	0.00%	25.94	0.0055	5637	
M08	796	318	0	1197	898	0	7.96	0	0.62%	23.44	0.0044	7049	
M09	796	318	0	1197	898	0	15.92	0	1.23%	21.35	0.0052	5623	
M10	796	318	0	0	2094	0	0	0	0.00%	18.14	0.0032	7768	
M11	796	318	0	0	2094	0	7.96	0	0.62%	19.22	0.0053	5474	
M12	796	318	0	0	2094	0	15.92	0	1.23%	18.86	0.0054	5656	
M13	796	318	980	637	477	0	0	0	0.00%	33.40	0.0047	8241	
M14	796	318	980	637	477	0	0	7.96	0.62%	33.35	0.0032	11879	
M15	796	318	980	637	477	0	0	15.92	1.23%	30.68	0.0028	15162	
M16	796	318	0	1197	898	0	0	0	0.00%	22.76	0.0047	6975	
M17	796	318	0	1197	898	0	0	7.96	0.62%	24.24	0.0048	7494	
M18	796	318	0	1197	898	0	0	15.92	1.23%	23.41	0.0043	7553	
M19	796	318	0	0	2094	0	0	0	0.00%	18.13	0.0032	7692	
M20	796	318	0	0	2094	0	0	7.96	0.62%	19.33	0.0051	5006	
M21	796	318	0	0	2094	0	0	15.92	1.23%	18.89	0.0047	5708	

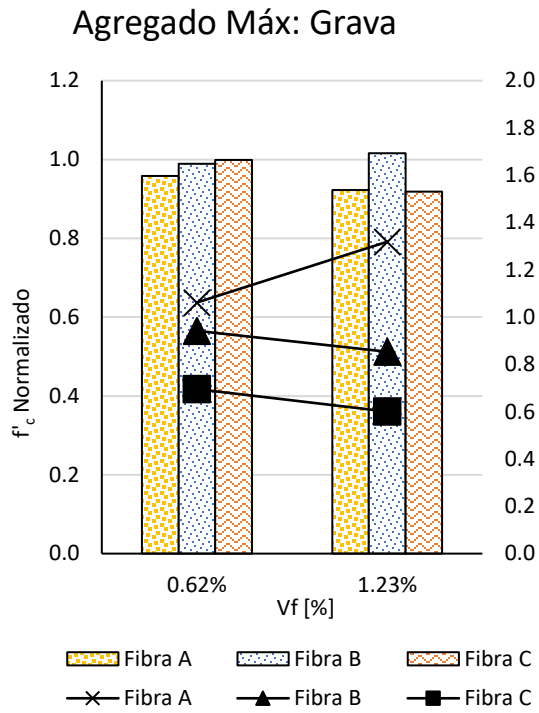


Figura 3.1. Variación de f'_c y ϵ_{fc} en función del volumen de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Grava, considerando los datos de Reveco J. (2020)

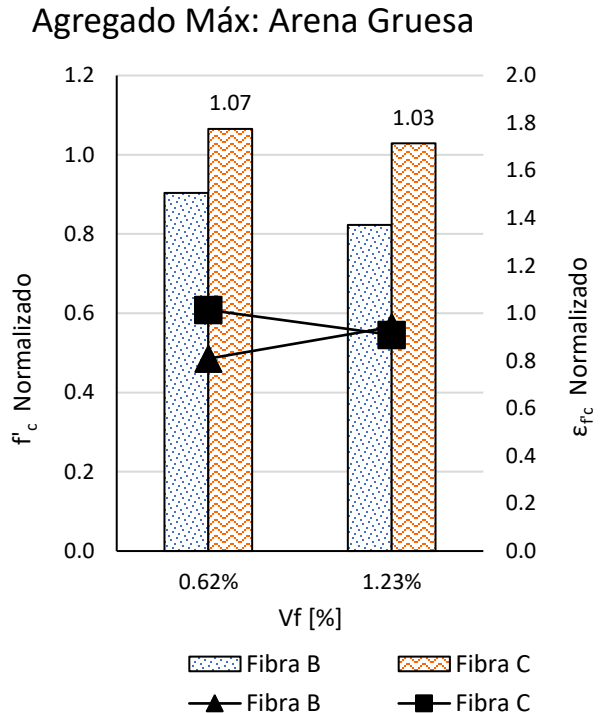


Figura 3.2. Variación de f'_c y ϵ_{fc} en función del volumen de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Arena Gruesa, considerando los datos de Reveco J. (2020)

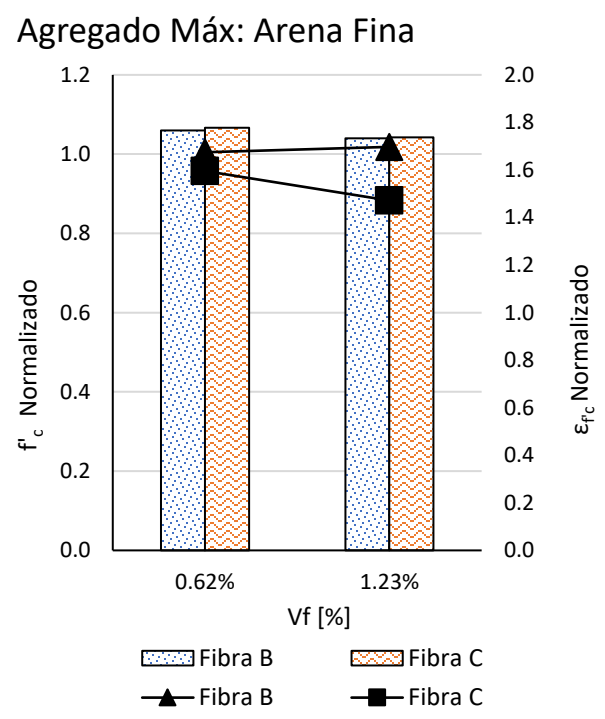


Figura 3.3. Variación de f'_c y ϵ_{fc} en función del volumen de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Arena Fina, considerando los datos de Reveco J. (2020)

Para arenas gruesas con adición de fibras tipo B (Figura 3.2) se observan reducciones de resistencia de hasta un 18% para valores de $\%V_f$ de 1.23%. Mientras que para fibras C se observa primero un aumento y luego una disminución de resistencia que es atribuible al efecto de concentración de fibras que debilita el hormigón (Li et. al., 1998). Por otro lado, estas muestras mantienen el valor de ϵ_{fc} con variaciones significativamente menores que las muestras con grava, siendo menor la reducción en la capacidad de deformación pre peak de resistencia del material.

Las mezclas con agregado de arena fina mostraron mejorías en ambas propiedades. Según se muestra en el gráfico de la Figura 3.3 la resistencia máxima a la compresión aumenta hasta en un 7% para un porcentaje de fibra del 0.63% y luego vuelve a disminuir (para ambas fibras estudiadas: B y C), lo que es comparable con los resultados observados en arenas gruesas con agregados de fibra C, sin embargo, a diferencia de estas, la deformación en el peak de resistencia se mantiene en valores similares al hormigón sin fibra.

Para estudiar el efecto sobre la capacidad de deformación elástica se construyeron los gráficos de las Figuras 3.4 a 3.6, donde se presenta el módulo de elasticidad calculado con deformaciones hasta el 80% de la deformación en el peak de resistencia ($E_{80\%}$). En estos se observa que la incorporación de fibras tiende a rigidizar el material, a excepción de las arenas finas, donde la incorporación de fibras puede aumentar en un 40% la elasticidad del material.

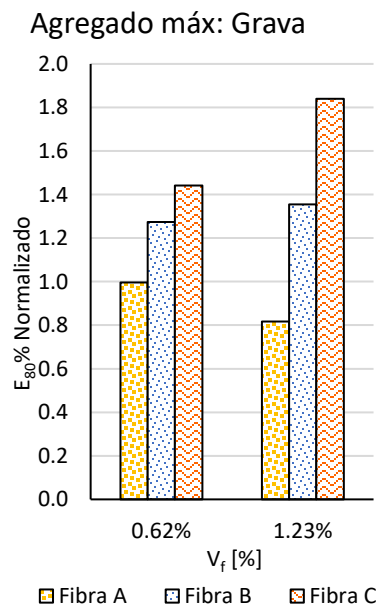


Figura 3.4. Variación de $E_{80\%}$ en función del porcentaje de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Grava, considerando los datos de Reveco J. (2020).

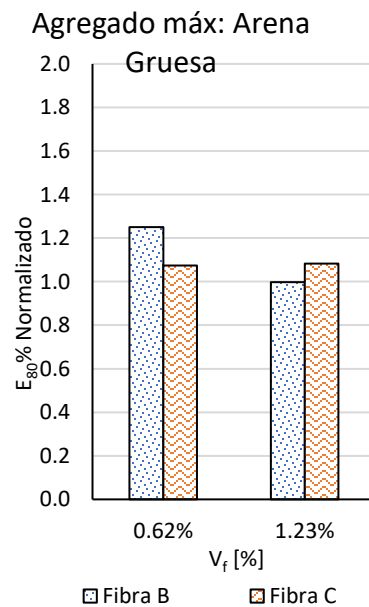


Figura 3.5. Variación de $E_{80\%}$ en función del porcentaje de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Arena Gruesa, considerando los datos de Reveco J. (2020).

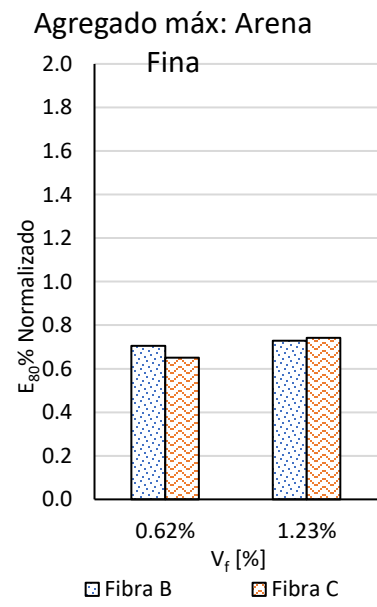


Figura 3.6. Variación de $E_{80\%}$ en función del porcentaje de fibra incorporado, para mezclas con agregado máximo: Arena Fina, considerando los datos de Reveco J. (2020).

Agregado máx: Grava

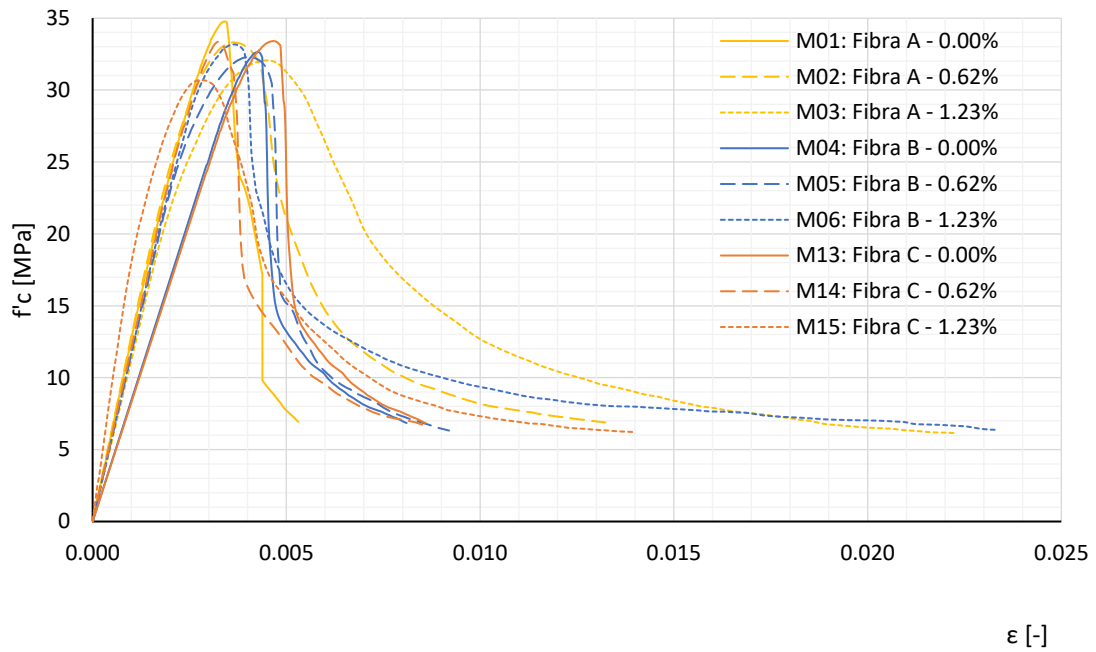


Figura 3.7. Curvas Esfuerzo-Deformación a compresión para probetas con árido máximo: Grava, considerando los datos de Reveco J. (2020)

Agregado máx: Arena Gruesa

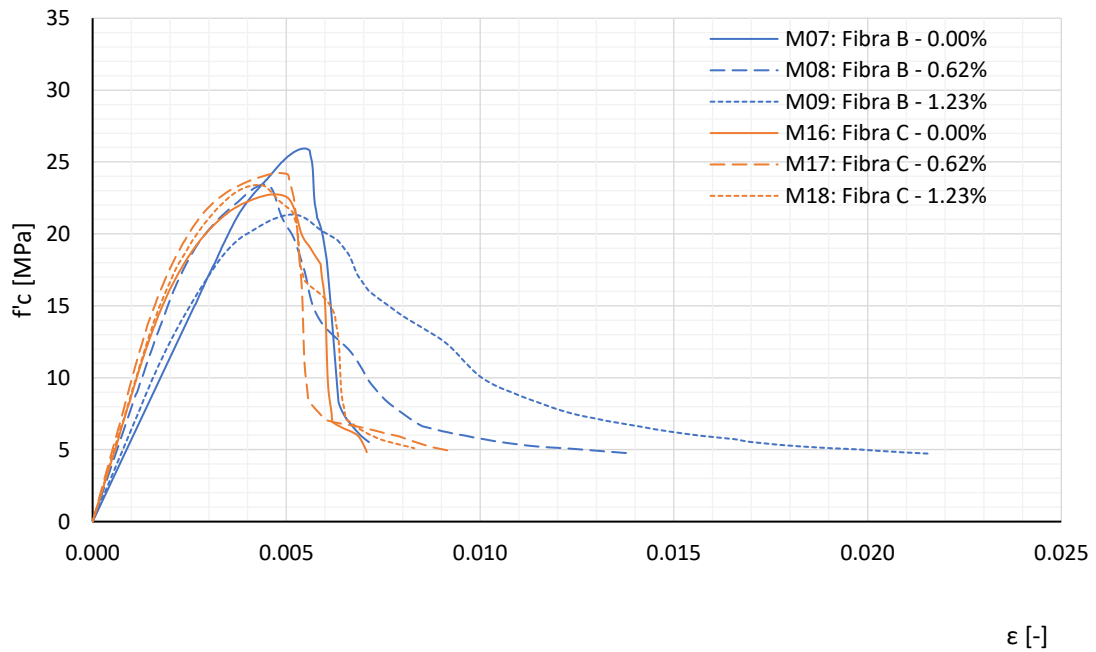


Figura 3.8. Curvas Esfuerzo-Deformación a compresión para probetas con árido máximo: Arena Gruesa, considerando los datos de Reveco J. (2020)

Agregado máx: Arena Fina

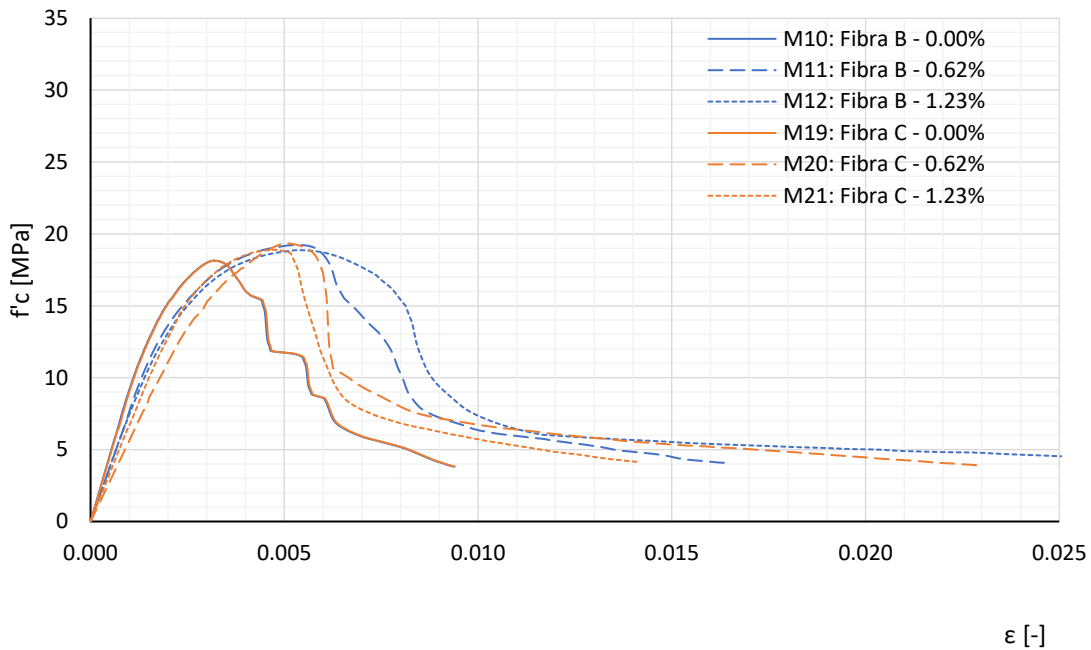


Figura 3.9. Curvas Esfuerzo-Deformación a compresión para probetas con árido máximo: Arena Fina. considerando los datos de Reveco J. (2020)

Finalmente, para estudiar en detalle el efecto sobre la capacidad de deformación post peak o ductilidad de los hormigones Fibro-reforzados se grafican las curvas esfuerzo deformación de las Figuras 3.7 a la 3.9.

Una vista general de las tres curvas Esfuerzo-Deformación graficadas, permite observar el efecto sobre la capacidad de deformación plástica del material en función de las 3 variables controladas: Volumen de fibra, tamaño máximo del árido y tipo de fibra.

Para mezclas con grava (Figura 3.7) se observa un importante aumento de tenacidad y ductilidad debido a la incorporación de fibras tipo A en un 1.23% (M03), frente a una disminución del 8% de resistencia comparado con la probeta de control (M01). Este resultado es coherente con lo señalado previamente en el estudio bibliográfico, donde se indica que la incorporación de fibras tiende a generar efectos contrarios en la resistencia máxima y la tenacidad del hormigón.

Se observa además que las fibras de tipo B no generan aumentos significativos de tenacidad en comparación a las fibras de tipo A, mientras que la fibra C (la de mayor diámetro y longitud), no solo disminuye la resistencia máxima, rigidiza y adelanta la fractura, sino además reduce la tenacidad y no muestra aumentos considerables de la deformación frente a la muestra de control.

Para mezclas con arena fina se observa una mayor estabilidad de los datos en cuanto a resistencia máxima y rigidez, lo que permite independizar el comportamiento previo a la fisuración del porcentaje de fibra incorporado, además, para un mismo tipo de fibra la tensión última tiende a igualarse, mientras que la deformación última (ϵ_u) y la tenacidad aumentan con el porcentaje de fibra. En este caso se repite la observación respecto a que las fibras de tipo C permiten un menor desarrollo de la ductilidad y tenacidad del material.

Las mezclas diseñadas con arena gruesa como árido máximo (Figura 3.8) muestran un resultado interesante: Si bien se podría esperar que la disminución de tamaño del árido máximo tendiera a estabilizar las propiedades pre peak de resistencia, los resultados muestran que es posible obtener caídas de resistencia aún mayores que con áridos gruesos y que no conllevan necesariamente a un aumento de ductilidad, obteniéndose valores de ϵ_u incluso menores a las mezclas con grava y aumentos en tenacidad no necesariamente significativas (como las observadas en las muestras M17 y M18 para fibras tipo C). Este efecto se puede atribuir a la generación de zonas de debilidad por acumulación de fibras, a la que se ven propensas las muestras con grava y arenas gruesas, pero que en el caso de las primeras puede ser compensado por la mayor resistencia de los agregados gruesos.

Estas observaciones permiten realizar las siguientes conclusiones:

- La incorporación de fibras tipo C puede provocar mayor rigidez y disminuciones importantes de resistencia a compresión que no conllevan a aumentos significativos de tenacidad y ductilidad independiente del tamaño del árido utilizado.
- Solo las fibras de tipo A permiten aumentar la tenacidad y ductilidad del hormigón en mezclas con grava, pero esto ocurre en perjuicio de la resistencia a la compresión.
- Las mezclas de arena fina con incorporaciones de fibra tipo B presentan un importante aumento de tenacidad y ductilidad, además de un leve aumento de resistencia, retraso de la primera fractura y aumento de la elasticidad del material. Sin embargo, la disminución de resistencia debido a la no incorporación de áridos gruesos es significativa, obteniéndose resistencias 15 [MPa] por debajo de mezclas con grava para la misma dosificación.

Con el objetivo de establecer una dosificación que permita alcanzar resistencias máximas por sobre los 30 [MPa], minimizando las caídas de resistencia y maximizando el aumento de ductilidad por la incorporación de fibras, se plantea estudiar dosificaciones con las siguientes características:

- Incorporación de fibras tipo A y B.
- Incorporación de volúmenes de fibra tipo A mayores al 1.23% en mezclas con grava para establecer una relación entre la disminución de resistencia máxima y de la curvatura en deformaciones plásticas con respecto al aumento del $\%V_f$.
- Priorización de ensayos con grava y arena fina por sobre ensayos con arena gruesa.

- Variación de la relación a/c en mezclas con arena fina para establecer una relación entre la dosis de cemento y la caída de resistencia por efecto de la incorporación de fibras.

Respecto al comportamiento a tracción, se dispone a modo de antecedente, de los resultados de ensayos a tracción preliminares desarrollados por Vásquez (2020). Las propiedades de las fibras utilizadas se muestran en la Tabla 3.3 mientras que los datos disponibles respecto a las mezclas ensayadas y las propiedades mecánicas obtenidas se presentan en la Tabla 3.4, donde el V_f (Volumen de Fibra) hace referencia a m^3 de fibra incorporado por m^3 de Hormigón.

El gráfico de la Figura 3.10 muestra los resultados de los ensayos antes mencionados. Dado que se dispone únicamente de 4 muestras, solo es posible realizar las siguientes observaciones generales para establecer posteriormente un modelo aproximado del comportamiento a tracción del PVA-FRC:

- Independiente del volumen de fibras incorporado a la mezcla, el módulo de elasticidad no presenta variaciones importantes, sin embargo, la máxima resistencia puede tanto aumentar como decaer por efecto de la adición de fibras. Debido al número acotado de demuestras no es posible verificar la correlación de este efecto con el tamaño máximo del árido.
- En ambos casos se observa una caída de resistencia luego de que la curva alcanza su máximo, seguido de un aumento de un 28% y 12% (para mezclas con árido de $D=2.36$ [mm] y $D=0.425$ [mm] respectivamente) en relación con la primera caída de resistencia.
- La deformación plástica medida desde la primera caída de resistencia hasta la resistencia última es de 0.79% y 0.32% (para mezclas con árido de $D=2.36$ [mm] y $D=0.425$ [mm] respectivamente).
- El comportamiento observado clasifica según las definiciones utilizadas por Pan et al. (2015) como Cuasi Frágil. En este tipo de comportamiento las fibras no alcanzan a desarrollar el efecto de agrietamiento múltiple antes de fallar por rotura a tracción, no alcanzando a desarrollar su potencial para liberar energía por desprendimiento, por lo que se considera un uso poco eficiente de las fibras, sin embargo, es un resultado esperable considerando el alto porcentaje en la relación árido/cemento. Considerando los antecedentes bibliográficos, resultados más eficientes pueden ser obtenidos reduciendo la relación a/c a tan solo 0.3 con agregados exclusivamente finos, e incorporando cenizas volantes para reducir la dosis de cemento. Dado que esta no es una práctica habitual en la construcción chilena y su aplicación implicaría importantes aumentos en costos, el estudio se limitará a modelos con comportamiento a tracción Cuasi Frágil.

- La variación en la relación a/c utilizadas por Reveco, J (2020) y Vásquez, N (2020) es de un 1.1%, por lo que se presupone que el comportamiento a tracción de las probetas diseñadas por Reveco, J (2020) presentarían un comportamiento post peak de resistencia de las mismas características que el descrito. Verificar esta afirmación es fundamental, principalmente en mezclas con grava con el fin de correlacionar la variación de f'_{tc} en mezclas con fibra respecto a mezclas de control con 0.0% de fibra.

Tabla 3.3. Propiedades de Fibras ensayadas por Vásquez, N (2020)

Fibra PVA	
Diámetro (mm)	0.15
Longitud (mm)	12
Módulo Elástico (GPa)	20
Densidad (gr/cm ³)	1.19

Tabla 3.4. Datos de Mezclas ensayadas a Tracción directa por Vásquez, N (2020)

espécimen	Mezclas				Propiedades Mecánicas			
	D _{max} [mm]	V _f [%]	w/c	a/c	f' _c [MPa]	f' _t [MPa]	ε _{cr}	E [MPa]
MP_A2.36_F0	2.36	0.00	0.59	2.66	30.41	1.53	0.000085	18000.00
MP_A2.36_F2.5	2.36	2.50	0.59	2.66	27.20	2.08	0.000089	23370.00
MP_A0.425_F0	0.43	0.00	0.79	2.66	29.83	1.24	0.000072	17222.00
MP_A0.425_F2.5	0.43	2.50	0.79	2.66	21.22	1.10	0.000069	15942.00

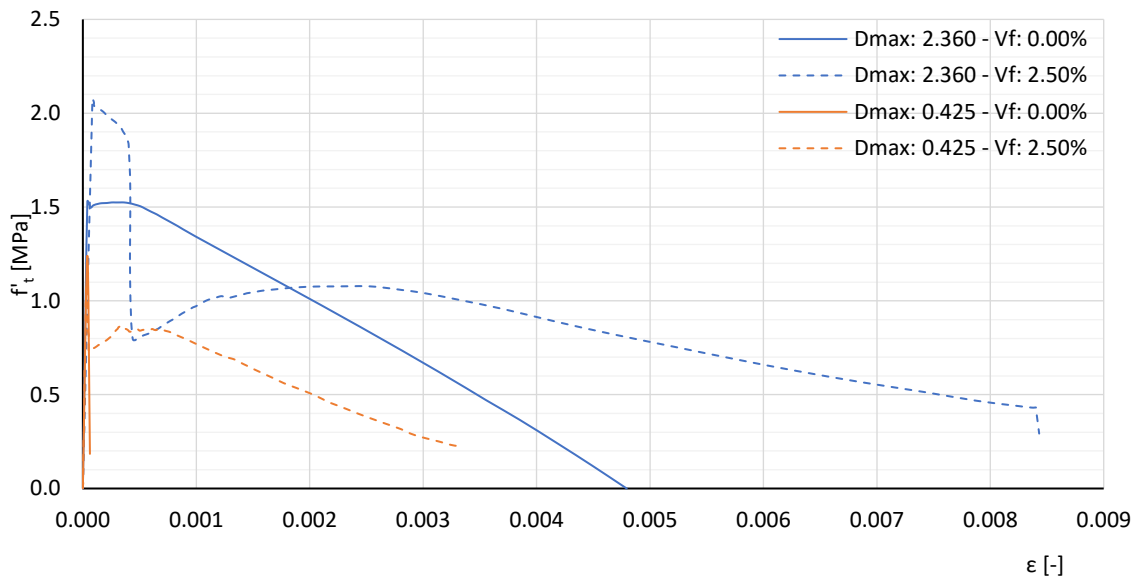


Figura 3.10. Curvas Esfuerzo-Deformación a tracción para probetas con árido máximo: 2.30[mm] y 0.425[mm] con 0.00% y 2.50% de incorporación de Fibras, considerando los datos de Vásquez, N (2020)

3.2 Ajuste del Modelo constitutivo del PVA-FRC

El desarrollo de modelos en SAFE-TB requiere definir el modelo constitutivo de los materiales que componen la estructura; el detalle respecto al modelo de hormigón y acero típicamente utilizados se presentó previamente en el Capítulo 2.

Utilizando los datos experimentales de ensayos a compresión y tracción no confinados disponibles, se procede a calibrar el modelo constitutivo del hormigón fibro-reforzado con PVA, considerando como modelo base las Ecuaciones 2.1 y 2.2.

3.2.1 Modelo constitutivo del PVA-FRC sometido a compresión

Del análisis expuesto en el punto 3.1. se resuelve modelar las curvas correspondientes a las probetas M01 a M03 y M10 a M12, agregando a la ecuación 2.1 dos parámetros de control: m y q , como se presenta en la ecuación 3.1. Los cuáles serán debidamente modificados en el código para su implementación.

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = (mf'_c) \frac{n \left(q \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)}{n - 1 + \left(q \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^{nk}} \quad (3.1)$$

Las curvas experimentales M01 a M03 y M10 a M12 se muestran en las Figura 3.10 y 3.11 (respectivamente) junto a las curvas modelo resultantes del ajuste de parámetros presentado en la Tabla 3. 5. Para cada una de las curvas modelo se presenta la correlación respecto a la curva experimental correspondiente, dividida en dos zonas: Pre y Post Peak de Máxima resistencia con tal de cuantificar la representatividad de la curva en su comportamiento elástico y plástico.

Para todos los casos tabulados se observan correlaciones por sobre el 90%, exceptuando la probeta M12 donde solo se obtuvo una correlación del 81%. En general se observa que la incorporación de fibras tiende a acentuar la curvatura en la zona de deformación plástica, divergiendo del modelo de Thorenfeldt (1987), así, para obtener curvas con mayor precisión en la representación se requeriría la incorporación al programa de una variante del modelo, como el planteado por Li, et. al. (2014) y estudiado por Vásquez, N (2020). Para efectos de este documento se considerará el modelo disponible teniendo en cuenta los valores de correlación obtenidos en zona plástica y la representatividad del modelo elástico.

Tabla 3. 5. Parametrización de Curvas a compresión.

Espécimen	M01	M02	M03	M10	M11	M12
Tipo de Fibra	A	A	A	B	B	B
Agregado Máximo	Grava	Grava	Grava	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina
Porcentaje Fibra	0.00%V _f	0.62%V _f	1.23 %V _f	0.00%V _f	0.62%V _f	1.23 %V _f
f _c [MPa]	34.761	33.310	32.057	18.136	19.220	18.865
ε _c	0.0034	0.0036	0.0045	0.0032	0.0053	0.0054
n	6.50	2.20	2.70	3.20	2.70	1.90
k	1.10	1.40	1.00	1.10	1.05	1.20
m	1.00	0.97	0.98	1.00	0.99	0.98
q	1.00	0.82	0.96	1.00	1.17	1.00
Correlación Pre-Peak (E_R ²)	1.000	1.000	0.999	0.998	0.996	0.999
Correlación Pos-Peak (P_R ²)	0.938	0.908	0.959	0.988	0.940	0.811

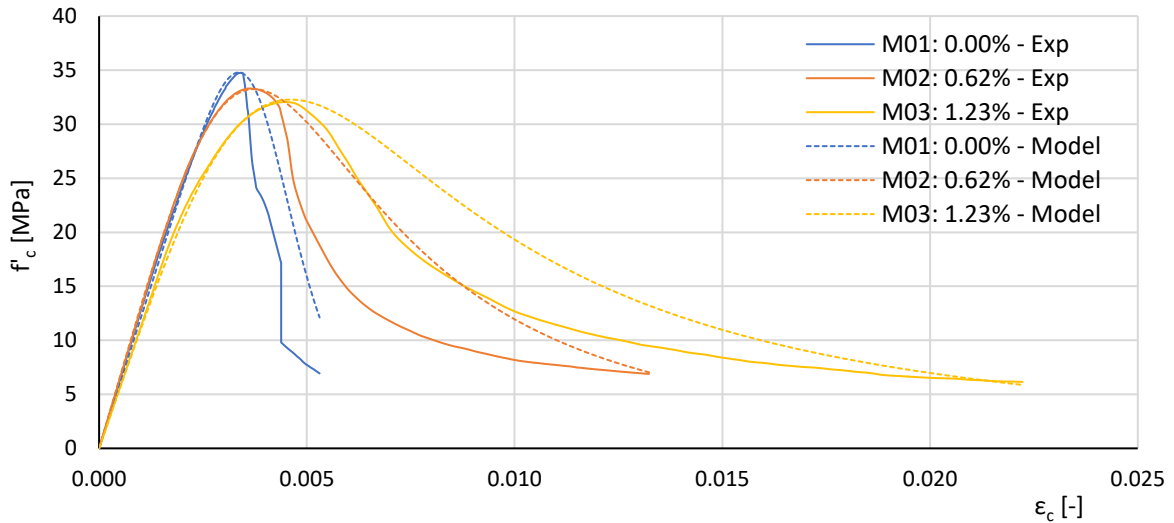


Figura 3.11. Curvas Experimentales y Modelo esfuerzo-deformación para probetas M01, M02 y M03.

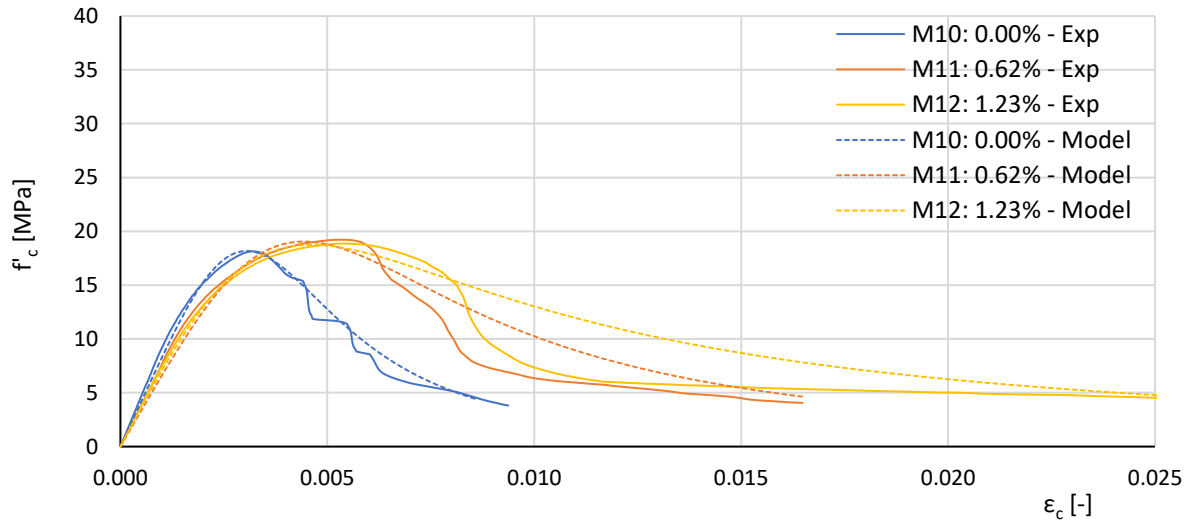


Figura 3.12. Curvas Experimentales y Modelo esfuerzo-deformación para probetas M10, M11 y M12.

3.2.2 Modelo constitutivo del PVA-FRC sometido a tracción

Para ajustar las curvas a tracción, se considera el modelo base planteado en la ecuación 2.2, el cual se aplicará a las curvas experimentales de la Figura 3.10 para extrapolar a las curvas M01 a M03 y M10 a M12 que serán utilizadas posteriormente en el capítulo 5.

Para estudiar la representatividad del modelo en la aproximación de los valores de deformación y tensión en el peak de resistencia (ϵ_{cr} , f_{cr}), fueron graficados los errores de los datos experimentales respecto al modelo en las Figuras 3.13 y 3.14, considerando los siguientes valores para el modelo:

$$\epsilon_{cr} = 0.00008 \quad (3.2)$$

$$f'_{cr} = 0.31\sqrt{f'_c} \quad (3.3)$$

Los resultados muestran que las probetas de control presentan deformaciones ϵ_{cr} que alcanzan desviaciones de hasta un 10.0% respecto al valor esperado por el modelo, mientras que la desviación máxima en probetas con incorporación de fibras es de un 13.8% (para mezclas con $D_{max} = 0.425$ [mm]). Debido a que la desviación de los datos con y sin fibra se encuentra dentro del mismo orden, se considera mantener el valor ϵ_{cr} del modelo.

Respecto a la resistencia máxima a la compresión, el modelo para mezclas sin fibra muestra errores de hasta un 27%, error que para para la misma dosificación, pero con incorporaciones del 2.5% de fibra, decae a un 23%. Igual que en el caso anterior, los errores mostrados permiten suponer que el modelo representa las mezclas con fibras incorporadas con el mismo grado de precisión que representa la ley constitutiva de hormigones sin fibra a tracción, validándose su uso en la representación elástica de mezclas con incorporaciones de fibra.

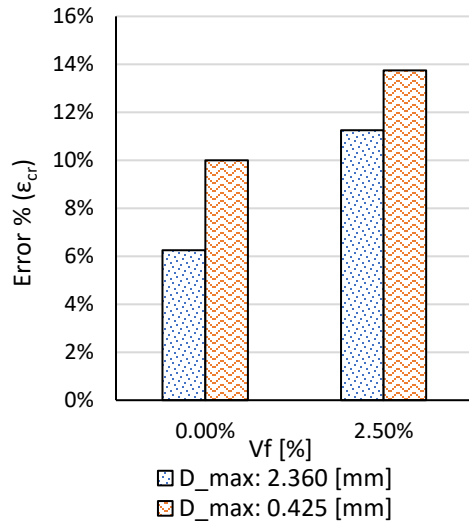


Figura 3.13. Error porcentual entre los valores experimentales y el modelo de ϵ_{cr} , considerando los datos de Vásquez, N (2020)

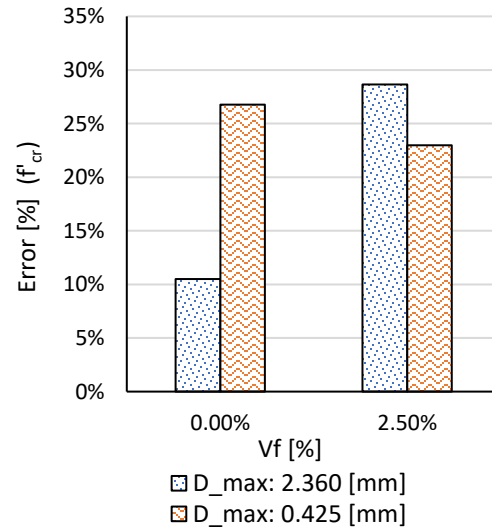


Figura 3.14. Error porcentual entre los valores experimentales y el modelo de f'_{cr} , considerando los datos de Vásquez, N (2020)

Para modelar la deformación plástica se consideró un valor de $b=0.4$ (ecuación 2.2), mismo valor utilizado en hormigones sin reforzamiento de fibra. La Figura 3.15 muestra gráficamente los resultados del modelo para las probetas con 2.50% de fibra, en este se observa que el modelo subestima la tenacidad del material, mostrando una menor capacidad de resistencia en deformaciones plásticas frente a los resultados experimentales, lo que genera un modelo conservador de la respuesta plástica del material.

Tomando en cuenta las observaciones realizadas, se define el modelo a tracción para las probetas M01 a M03 y M10 a M12, según se muestra en la Tabla 3.6.

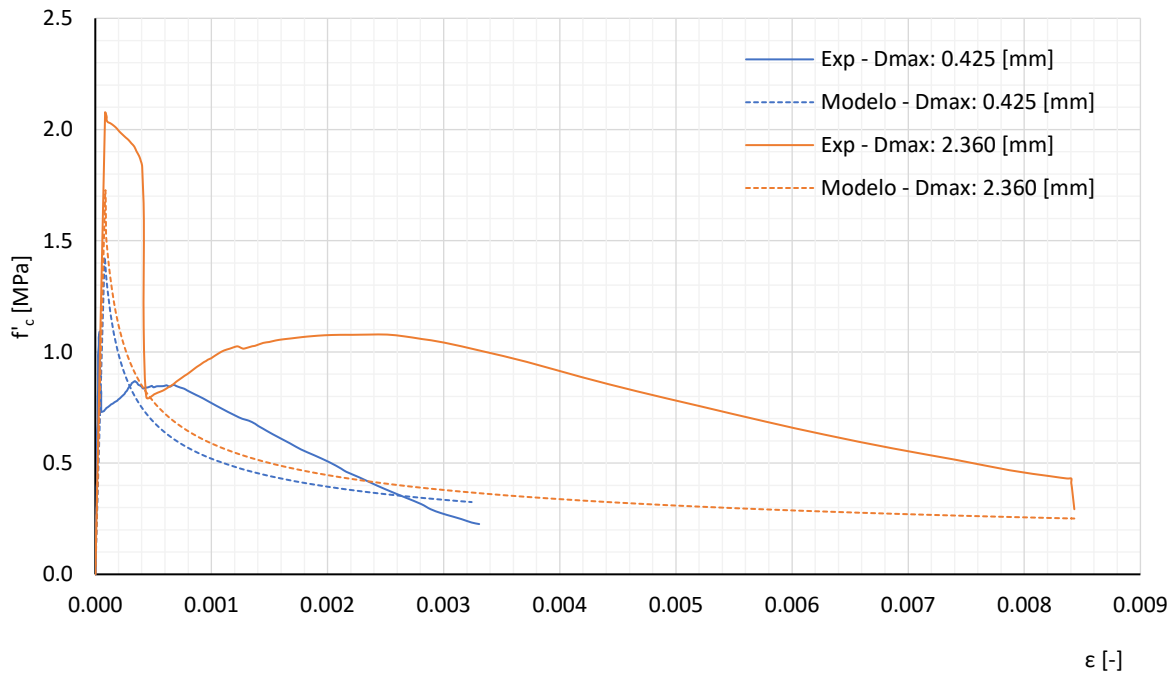


Figura 3.15. Curvas Experimentales y Modelo esfuerzo-deformación para probetas MP_A2.36_F2.5 y MP_A0.425_F2.5 con 2.5% de fibras incorporadas.

Tabla 3.6. Parametrización de Curvas a tracción.

Espécimen	M01	M02	M03	M10	M11	M12
Tipo de Fibra	A	A	A	B	B	B
Agregado Máximo	Grava	Grava	Grava	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina
Porcentaje Fibra	0.00% V_f	0.62% V_f	1.23 % V_f	0.00% V_f	0.62% V_f	1.23 % V_f
f'_{cf} [MPa]	1.828	1.789	1.755	1.320	1.359	1.346
ϵ_{cr}	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008
n	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40

Capítulo 4 – Modelo Numérico

Para estudiar el efecto de la adhesión de fibras en el comportamiento de sistemas de muros acoplados por losas, fue utilizado el modelo de 1 piso con armadura distribuida desarrollado en SAFE-Toolbox originalmente por Henríquez C. (2019), el cual fue modificado para incluir las variaciones en las propiedades del hormigón que representan la incorporación de fibras en la losa de acoplamiento según se describió en el capítulo 3; además de ser modificada la geometría de los muros para extender el estudio a sistemas con muros T.

Teniendo en cuenta ello, el presente capítulo tiene por objetivo describir las características de los modelos estudiados en cuanto a sus dimensiones, cuantías, tipo y característica de los materiales, discretización de los elementos, entre otros. Además de definir los parámetros de estudio que serán abordados en los siguientes capítulos y presentar los resultados del modelo que será utilizado como base de comparación en los posteriores capítulos, al cual se hará referencia como Modelo Base (MB).

4.1. Dimensiones y cuantías

La estructura general consiste en un sistema de entre piso conformado por la losa de acoplamiento y la mitad del par de muros superior e inferior como se muestra en el plano de corte de la Figura 4.1, donde han sido especificados: dimensiones, armadura y cuantía del sistema.

Este modelo corresponde a la simplificación de un modelo originalmente de 10 pisos, que se plantea con el objetivo de estudiar el comportamiento de la losa reduciendo el tiempo de análisis de datos sin perder representatividad del modelo original, por lo cual, fueron incluidos elementos viga en el coronamiento y en la base de los muros que buscan representar la continuidad de los muros y generar condiciones de apoyo semejables al del sistema inserto en la edificación total; las dimensiones de estos elementos y su posición en el sistema se han incluido en el plano de la Figura 4.1. y se mantienen para la configuración de muros T, considerando mismo espesor y cuantías de acero para el ala de los muros.

Las dimensiones de la losa se muestran en detalle las Figura 4.2. y 4.3 para los sistemas de muros rectos y muros T, respectivamente. En esta última se observa la disposición de las variables: longitud de Ala (L_A), ancho de losa total (L_T) y ancho de losa libre (L_L), las cuales se especificarán para cada caso de estudio en los subcapítulos correspondientes. Por otra parte, las cuantías utilizadas en cada uno de los tramos se especifican en la Tabla 4.1., siendo variable la cuantía longitudinal de los tramos centrales (ρ_l). Para este estudio se ha igualado (en todos los casos), la cuantía de los tramos 1 y 2, y se ha generado un cuarto tramo con una cuantía intermedia que evita secciones con discontinuidades abruptas de armadura que puedan generar concentraciones de tensiones.

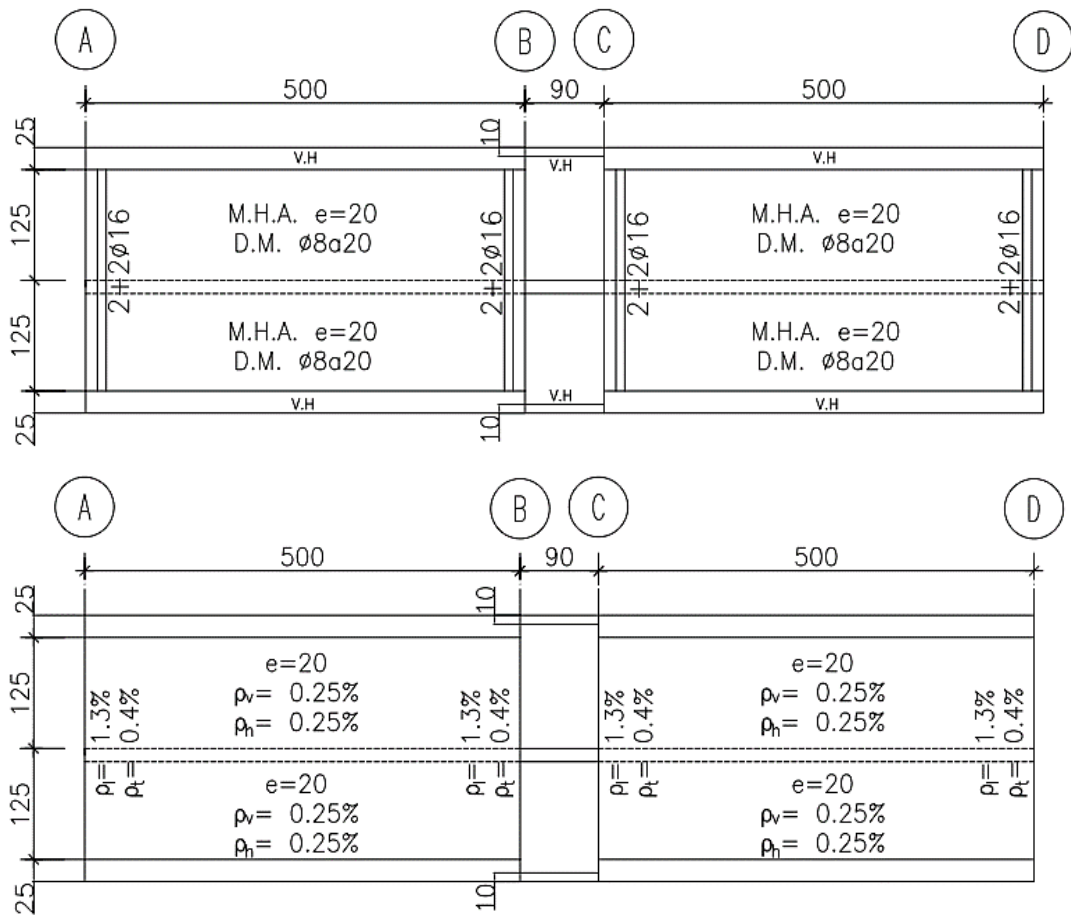


Figura 4.1. Plano de Corte – Modelo 1 Piso (Henríquez, C. 2019)

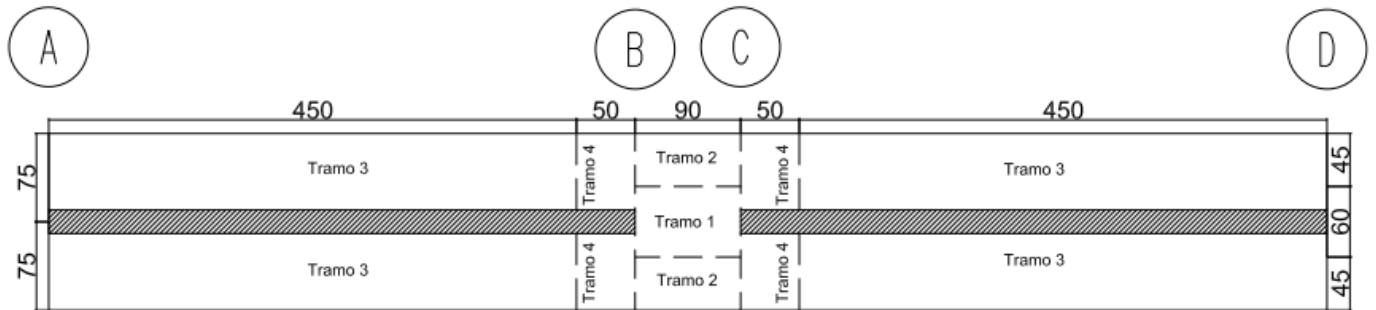


Figura 4.2. Plano de losa – Sistema de Muros Rectos (Modificado de Henríquez, C. 2019)

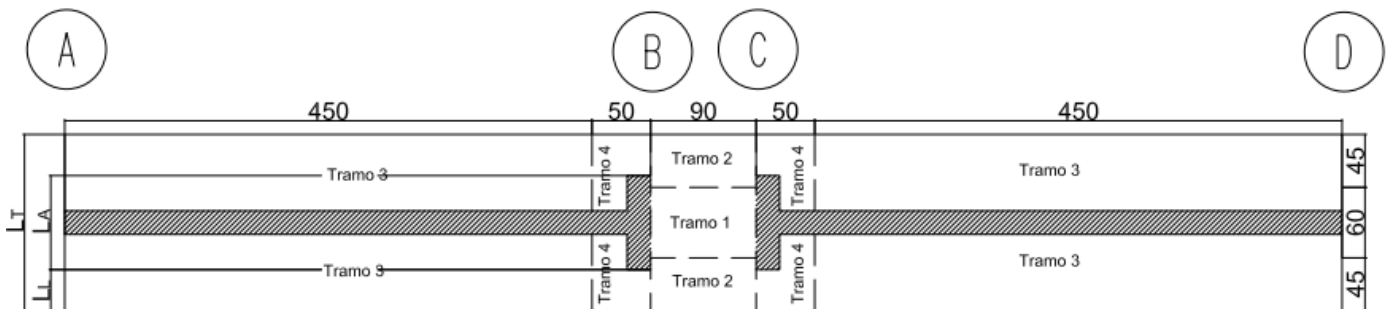
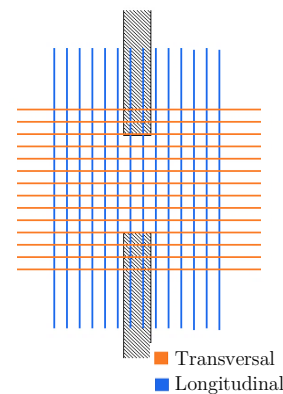


Figura 4.3. Plano de losa – Sistema de Muros T (Modificado de Henríquez, C. 2019)

Tabla 4.1. Armadura Losa para sistema de Muros Rectos y Muros T.

Tramo	Dirección	Armadura Inferior	Armadura Superior
1	Longitudinal	6 ϕ 16 (0.0130)	6 ϕ 16 (0.0130)
	Transversal	ϕ 8@10 (0.0034)	ϕ 8@10 (0.0034)
2	Longitudinal	ρ_1	ρ_1
	Transversal	ϕ 8@18 (0.0019)	ϕ 8@18 (0.0019)
3	Longitudinal	ρ_1	ρ_1
	Transversal	ϕ 8@18 (0.0019)	ϕ 8@18 (0.0019)
4	Longitudinal	ϕ 8@18 (0.0019)	ϕ 8@18 (0.0034)
	Transversal	ϕ 8@18 (0.0019)	ϕ 8@18 (0.0019)



4.2. Descripción del modelo SAFE-Toolbox

El modelo se construyó utilizando el *framework* de elementos finitos SAFE-Toolbox, programado en Matlab, en el cual se emplean elementos rectangulares con 9 puntos de cuadratura y 6 grados de libertad (3 giros y 3 desplazamientos). Para el caso de muros y losas fueron utilizados elementos tipo Shell con materiales inelásticos cuyo comportamiento responde a los modelos descritos en detalle en el capítulo 2; cada uno de estos elementos se constituye de 6 capas de hormigón (H25 para muros y H20 para losa) y 2 capas de acero $F_y = 420$ MPa, cuya distribución y dimensión se muestra esquemáticamente en la Figura 4.4. Las propiedades generales de los materiales utilizados se precisan en el Anexo A.

Las vigas por su parte fueron modeladas como elementos tipo Shell de material elástico, variando el módulo de elasticidad (E) del acero y sus propiedades geométricas con el objetivo de modelar vigas rígidas. Para este mismo fin, fueron incorporadas vigas tipo Beam por sobre y bajo la viga Shell como se muestra en detalle en la Figura 4.5. Estos elementos se incluyen en las alas de muros T solo entre la viga Shell y el muro. El detalle de las propiedades de vigas se muestra en la Tabla 4.2.

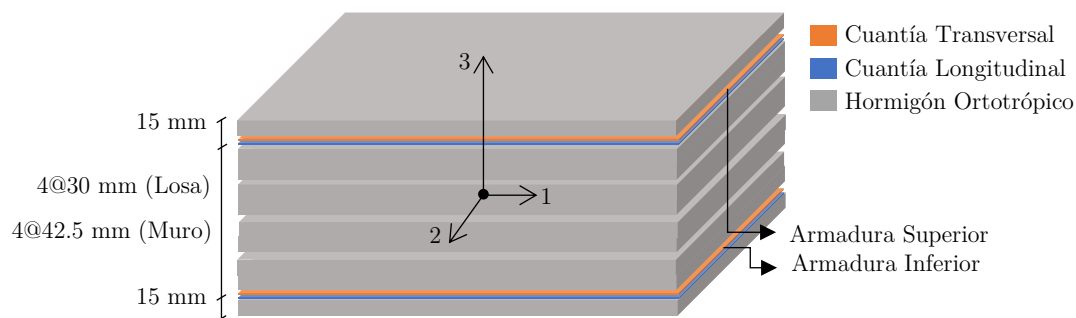


Figura 4.4. Distribución de capas para muros y losas.

Tabla 4.2. Propiedades de vigas.

Tipo	E[MPa]	Altura [cm]	Ancho [cm]
Shell	23500	25	20
Beam Borde de Muro	10^8	10	80
Beam Entre Muro	47000	10	80

Los apoyos de la estructura fueron materializados como un apoyo simple y un apoyo deslizando en medio de cada uno de los muros. Adicionalmente se han agregado restricciones fuera del plano en los nodos de los bordes superiores e inferiores de los muros, con el objetivo de representar el movimiento entre muros típico en edificios de altura.

El mallado del modelo se muestra de manera general en las Figuras 4.5 y 4.6 para los sistemas de muros rectos y muros T, respectivamente. El alma de muros se construyó con elementos de borde de 210x250[mm] y elementos centrales de 400x250[mm], mientras que las alas de muros T se modelaron con elementos de 150x250[mm] con tal de coincidir con los elementos de mayor precisión de la losa central. El detalle del mallado de losa para casos con ancho $L_T=150$ [cm] se muestra en la Figura 4.6. Para el resto de los casos se consideró el mismo mallado base agregando elementos laterales de dimensión no superior a los 200[mm] hasta alcanzar el ancho de losa necesario.

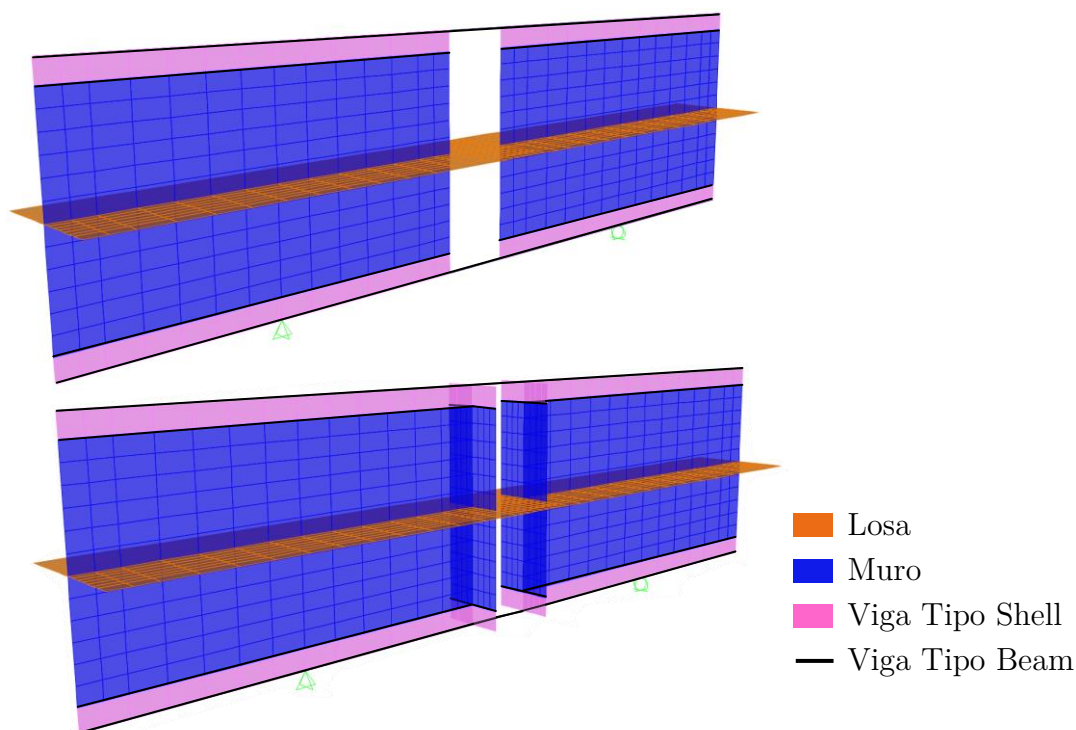


Figura 4.5. Mallado Modelo 1 piso con muros Rectos y T.

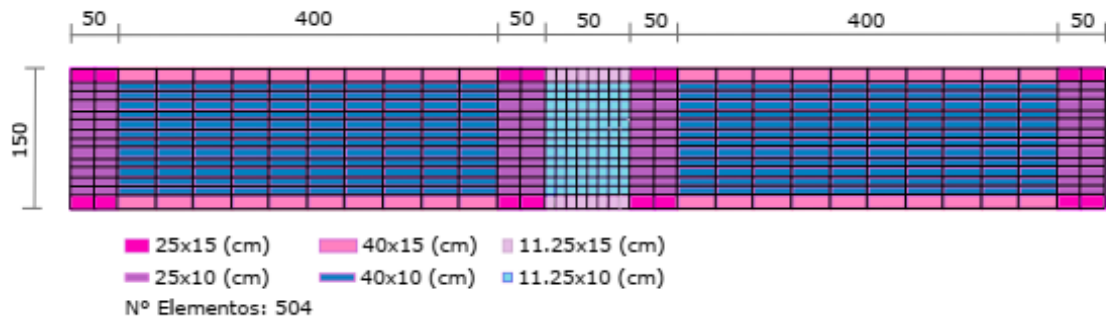


Figura 4.6. Detalle del mallado de losa, para modelos de ancho de losa 150 [cm]. (Henríquez, C. 2019)

Con el fin de estudiar el comportamiento dinámico de la estructura modelada, fueron aplicadas en el sistema cargas en las direcciones globales definidas como -z (vertical) y x (horizontal en el plano de los muros) considerando las siguientes cargas:

1. Carga vertical por Peso Propio: En cada uno de los elementos tipo Shell (sin incluir las vigas) se aplica carga por concepto de peso propio, estimando el valor de la densidad del hormigón como 2450 [kg/m³] y 9.8 [m/s²] la aceleración de gravedad.
2. Carga vertical adicional: La carga vertical neta asociada a carga muerta y sobrecarga se estima según la ecuación 4.1., donde A_g es el área de la sección transversal de los muros y f'_c la resistencia a la compresión del hormigón. Esta carga se distribuye de manera proporcional en los nodos superiores de la estructura mediante el método de control de carga en un total de 5 pasos.

$$P = 0.1 A_g f'_c \quad (4.1)$$

3. Carga horizontal: Como el sistema estudiado considera solo 1 piso en su análisis, la carga horizontal fue aplicada únicamente a nivel de los nodos superiores mediante control de desplazamientos monitoreando el nodo 391 (Figura 4.7). Esta carga es distribuida uniformemente en todos los nodos superiores de la estructura y es aplicada en una etapa posterior a la aplicación de cargas verticales.

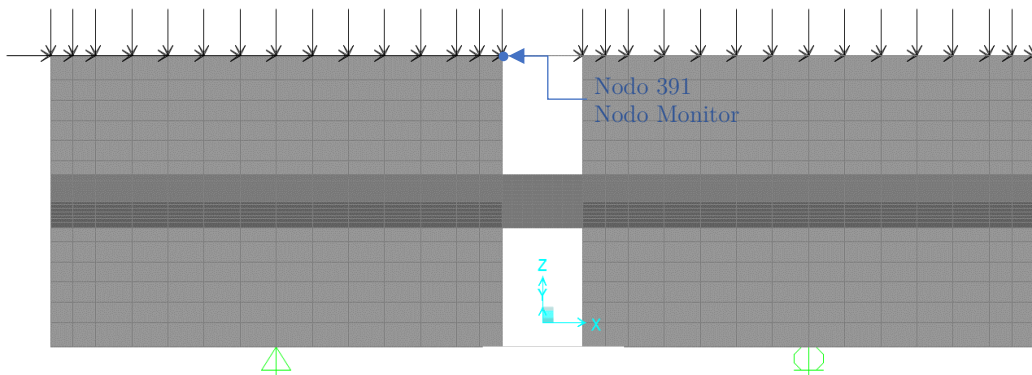


Figura 4.7. Disposición de las cargas vertical adicional, horizontal y nodo monitor.

La resolución del análisis en cada paso de carga se realizó mediante el método de Newton-Raphson Modificado, que permite resolver funciones no lineales con múltiples raíces de manera iterativa a partir de un valor inicial lo suficientemente cercano a la raíz buscada. Mientras que, para verificar la convergencia del método en el paso de carga específico, se utilizó el test de incremento de norma de desplazamiento (*Norm Displacement Increment Test*), el cual comprueba la convergencia comparando la norma del vector solución del paso en curso con la predicción del primer paso. El resultado de la convergencia depende de los parámetros de tolerancia, máximo número de iteraciones y el tipo de norma seleccionado; parámetros que pueden ser modificados en el caso de no obtener convergencia.

4.3. Parámetros de estudio y resultados del modelo base.

A continuación, se definen y describen los principales parámetros de estudio que serán revisados a lo largo de este documento. Junto a cada uno, se presentan los resultados obtenidos del *Modelo Base* (MB) correspondiente al modelo de Muros Rectos con 0.00% de fibras, armadura longitudinal $\phi 10@15$ y 150 [cm] de ancho de losa.

4.3.1. Respuesta Global

La respuesta del sistema en el primer ciclo de carga modelado permite estudiar la capacidad de carga horizontal del sistema. Para representar esta curva se utilizó la relación entre la carga horizontal neta aplicada y la deriva de piso medida como el desplazamiento horizontal del nodo monitor por unidad de altura.

La Figura 4.8 muestra la respuesta global del sistema para el Modelo Base junto a la sucesión de cinco figuras correspondientes a la deformada del sistema en los puntos indicados en el gráfico. La curva resultante muestra la tendencia típica de estructuras de hormigón armado, donde la primera fractura se presenta en derivas del orden de un 0.02%. Posterior a ello, el sistema se deforma inelásticamente hasta alcanzar su capacidad máxima, para luego decaer hasta el punto de fluencia del sistema. En este caso, se observa una capacidad máxima de 390 [kN] en derivas en torno al 0.7% y un límite de fluencia en un 0.86% de deriva para aproximadamente 325 [kN] de carga horizontal; en esta etapa de fluencia del sistema, el hormigón ha perdido localmente capacidad de transmitir esfuerzos en el elemento más solicitado siendo las barras de acero superior e inferior quienes equilibran el sistema, deformándose para un mismo nivel de carga. La deformada en los distintos niveles de deriva permite visualizar el efecto del desplazamiento de los muros sobre la losa, la cual se ve sometida a importantes esfuerzos y deformaciones fuera del plano, por lo que resulta ser el elemento que controla el tipo de falla y límite de fluencia de la estructura, lo que se verifica al observar la distribución de esfuerzos y deformaciones sobre el sistema presentados en la Figura 4.9.

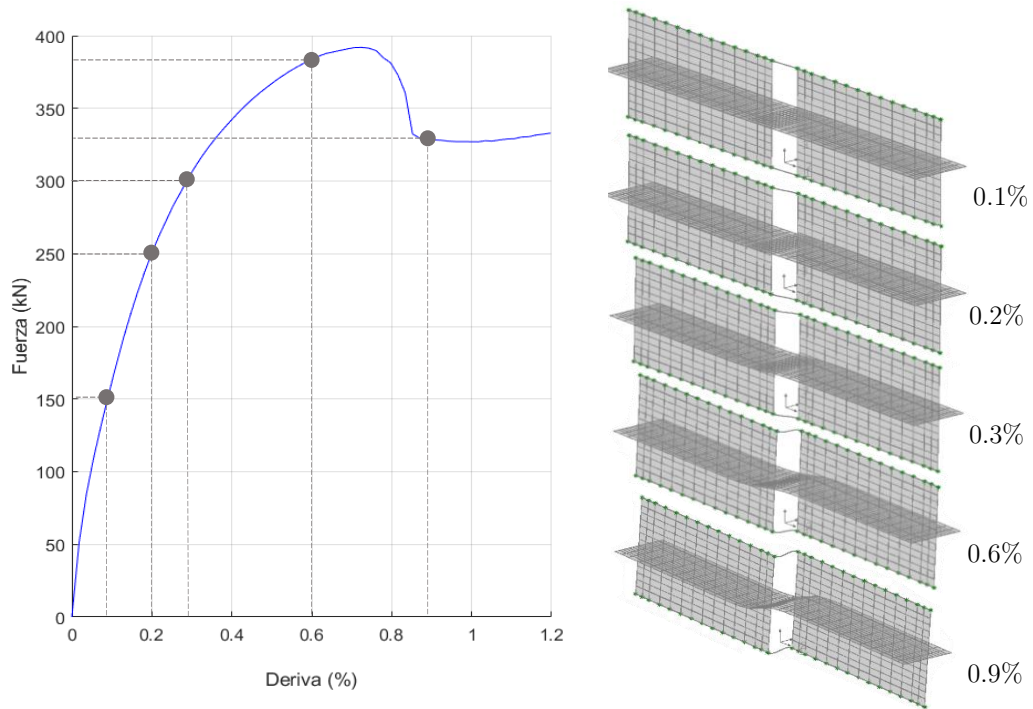


Figura 4.8. Respuesta Global y Deformada del Modelo Base, para distintos porcentajes de deriva.

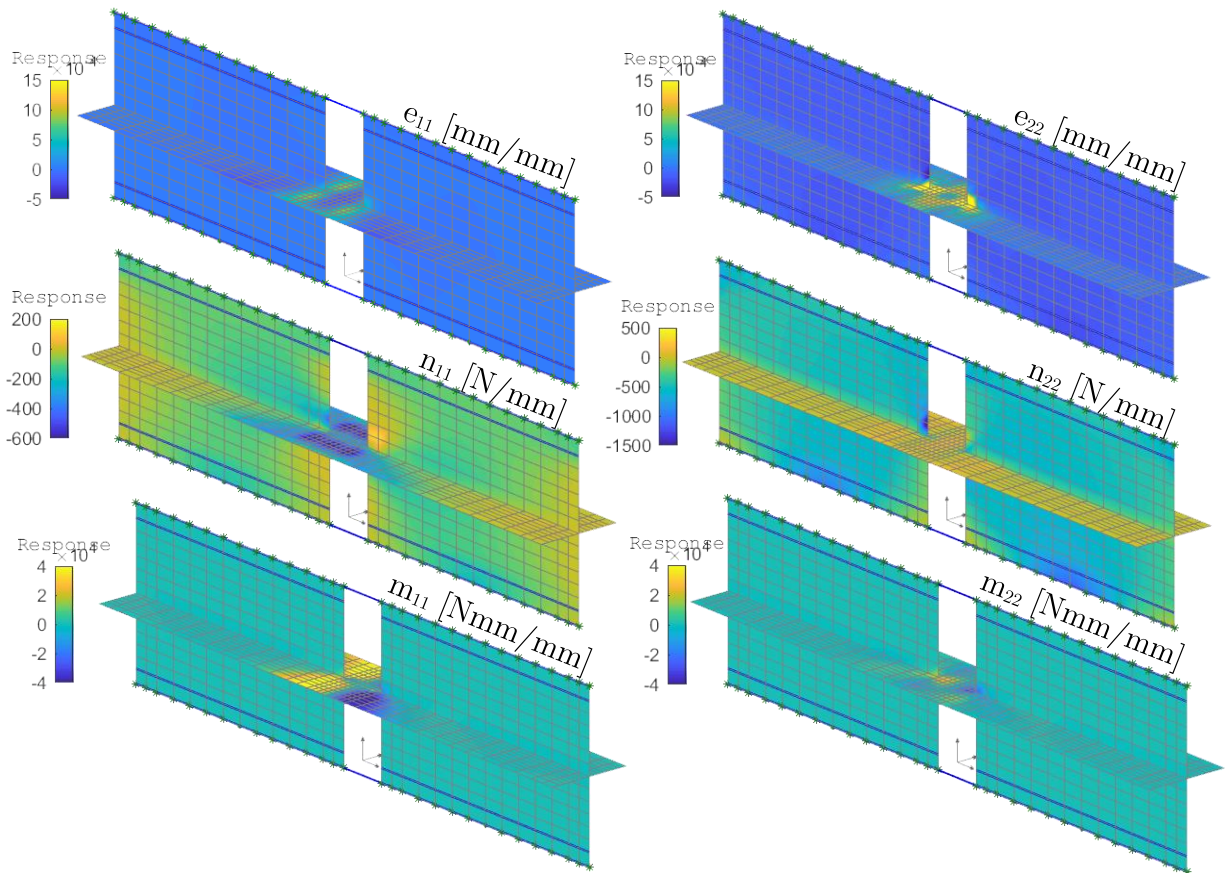


Figura 4.9. Distribución de esfuerzos del Modelo Base para derivas del 0.6%.

4.3.2. Esfuerzos Transmitidos

Al observar la distribución de esfuerzos de la Figura 4.9 (gráfico m_{11}), se aprecian cuatro zonas de concentración de momento m_{11} (antisimétricos en dirección X y simétricos en Y) en el entorno de la unión Muro-Losa de pasillo. Al comparar la distribución de momento en la losa con distintas configuraciones de Ala (Figura 4.10), es posible observar que solo cuando el pasillo se encuentra completamente confinado por el par de muros, los esfuerzos de momento se concentran en el centro del corredor, disipándose rápidamente en los elementos traseros del ala de los muros. Para el resto de los casos en los cuales parte de la losa se encuentra desconectada de muros, los esfuerzos se propagan desde el borde de los muros en ambas direcciones y sentidos, generando bulbos de esfuerzos que presentan sus máximos en los elementos de borde de la losa de acoplamiento.

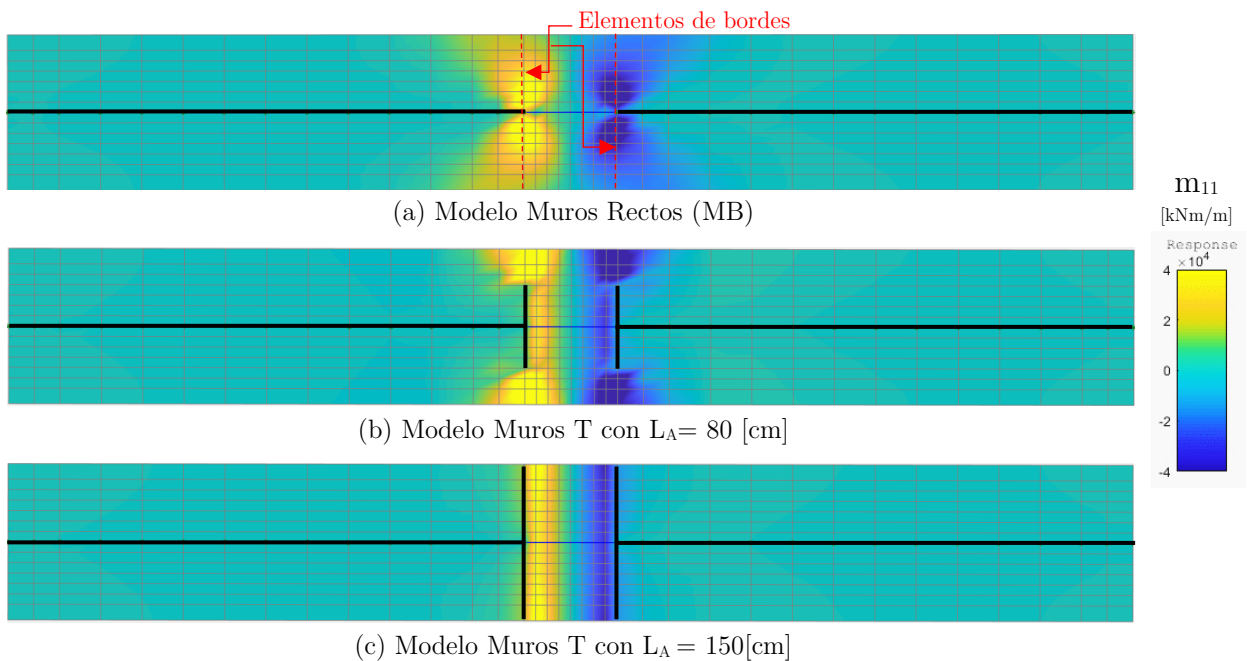


Figura 4.10. Distribución de momento en la losa para distintas configuraciones de Ala, para un 0.3% de deriva.

Estas observaciones resultan interesantes para definir la “losa de acoplamiento” que corresponde a la sección de losa que actúa resistiendo los esfuerzos transmitidos desde los muros permitiendo el acoplamiento del sistema. Para los alcances de esta memoria será definida como tal, la sección de losa comprendida entre los “elementos de borde” marcados en la Figura 4.10.a, por contener las zonas de mayor esfuerzo para todos los casos de estudio, por lo que se concentrará el análisis en el estudio de la distribución de deformaciones y esfuerzos en esta zona.

MOMENTO y AXIAL TRANSMITIDO

Para estudiar la máxima capacidad de transmisión de esfuerzos de la losa de acoplamiento, se calculan el momento y esfuerzo axial neto de la sección transversal de borde en cada paso de carga.

El momento transmitido por la losa corresponde al momento integrado a lo largo de A-B considerando las tensiones de los puntos de cuadratura 1-4-7 esquematizados en la Figura 4.11. el cual se refiere al momento de rotación fuera del plano calculado a partir de la ecuación 4.2. De la misma manera, el esfuerzo axial correspondiente a los esfuerzos en el plano en dirección longitudinal de la losa, se calculan con la misma metodología considerando la ecuación 4.3.

$$M = \sum_{i=1}^n m_{11_i} \Delta_i \quad (4.2)$$

$$N = \sum_{i=1}^n n_{11_i} \Delta_i \quad (4.3)$$

Donde m_{11_i} y n_{11_i} son los esfuerzos por unidad de largo en los puntos de cuadratura indicados por cada elemento y Δ_i es el ancho de la sección asociado a dicho punto (definido como 1/3 del ancho total del elemento).

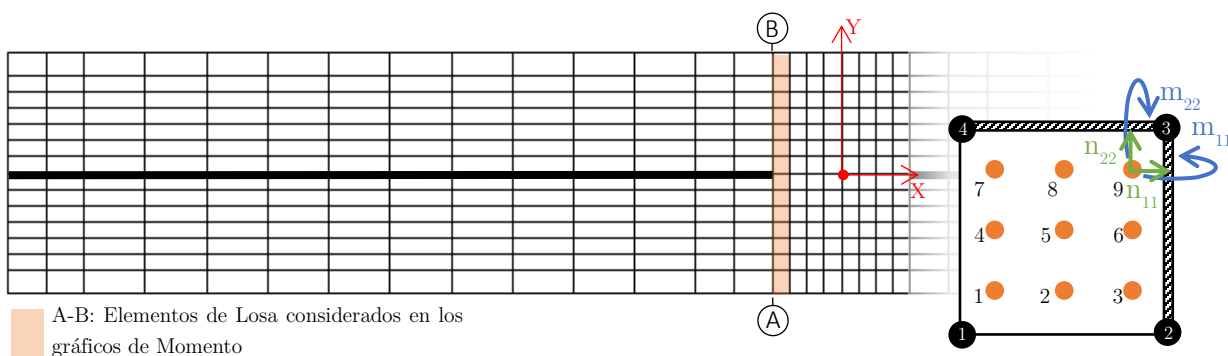


Figura 4.11. Disposición de los puntos de cuadratura y elementos considerandos en el cálculo de momento.

De manera análoga, se calculó el momento y axial transmitidos al extremo opuesto de la losa, al borde del Muro 2, que permite verificar el equilibrio de la losa. Los resultados de ambas curvas se muestran en las Figura 4.12 y 4.13, donde, además, se han demarcado los puntos en los cuales el elemento central alcanza deformaciones 0.002 y 0.003 en el hormigón y 0.0021 a nivel del acero, para determinar los puntos en los que el sistema comienza a perder capacidad. Como se observa en los resultados presentados, el momento y la carga axial se transfieren íntegramente entre un extremo y el otro de la losa de acoplamiento, alcanzando

un máximo de momento de aproximadamente 62 [kNm] en una deriva del 0.5% y una máxima carga axial de 600 [kN] a 0.6% de deriva, mostrando que el sistema se ve sometido a importantes esfuerzos de compresión.

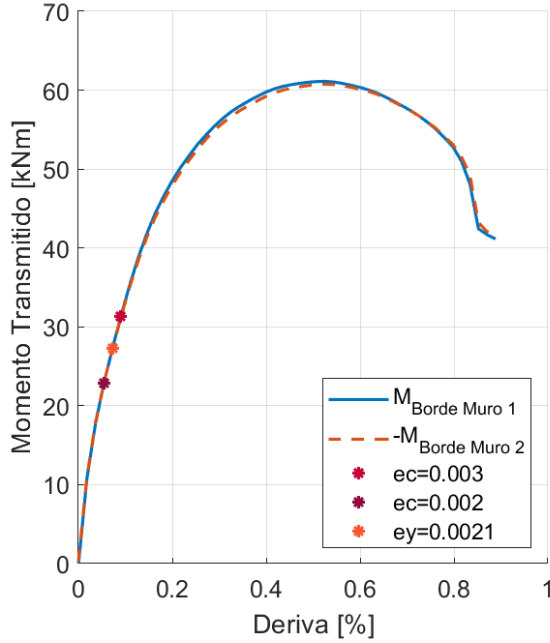


Figura 4.12. Momento Transmitido en función de la deriva en el Modelo Base.

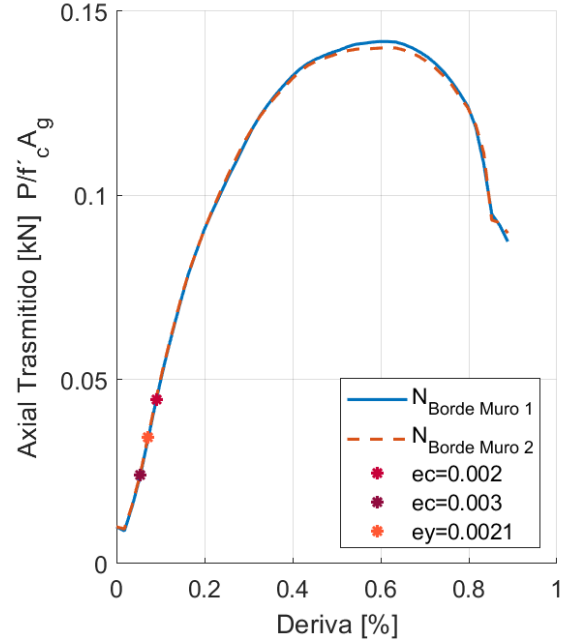


Figura 4.13. Esfuerzo Axial Transmitido en función de la deriva en el Modelo Base.

CARGA AXIAL TRANSMITIDA A MUROS

Otro parámetro de estudio que permite cuantificar la capacidad del sistema y verificar el acoplamiento del sistema es la carga axial transmitida, que corresponde a parte de la carga axial del muro que se trasmite y distribuye hacia la losa.

Esta carga axial se mide como la diferencia entre la suma de los esfuerzos verticales n_{22} integrado a lo largo de cada muro por sobre y bajo la losa, utilizando los puntos de cuadratura 1-2-3 (en elementos superiores) y 7-8-9 (en elementos inferiores) de los elementos marcado entre C-D, esquematizados en la Figura 4.14, según la siguiente ecuación:

$$N = \sum_{s=1}^n n_{22s} \Delta_s - \sum_{i=1}^n n_{22i} \Delta_i \quad (4.4)$$

Donde n_{22s} y n_{22i} son los esfuerzos por unidad de largo (superior e inferior, respectivamente) en los puntos de cuadratura indicados por cada elemento y Δ_i o Δ_s es el ancho de la sección asociado al punto (definido como 1/3 del ancho total del elemento).

Los resultados de la carga axial medida en ambos muros se muestran en la Figura 4.15, donde se observa que ambas curvas mantienen la misma magnitud hasta derivas cercanas a 0.25%, punto desde el cual ambas curvas se separan, evidenciando el desacoplamiento de la estructura. Los resultados sugieren que, llegado a dicho nivel de deriva, abruptamente parte de la carga axial que sería transmitida a la losa se redirige hacia los apoyos del muro, debido a la pérdida de capacidad de la losa.

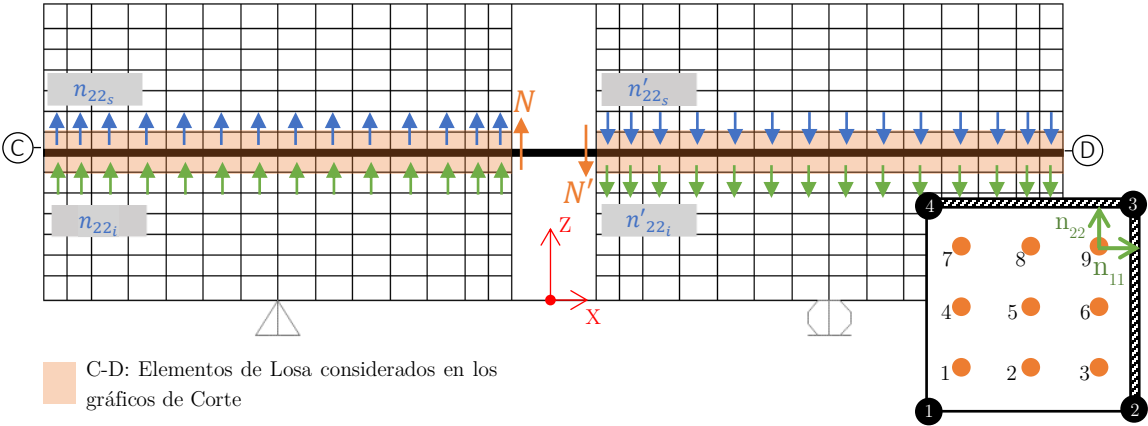


Figura 4.14. Disposición de los puntos de cuadratura y elementos considerados en el cálculo de carga Axial.

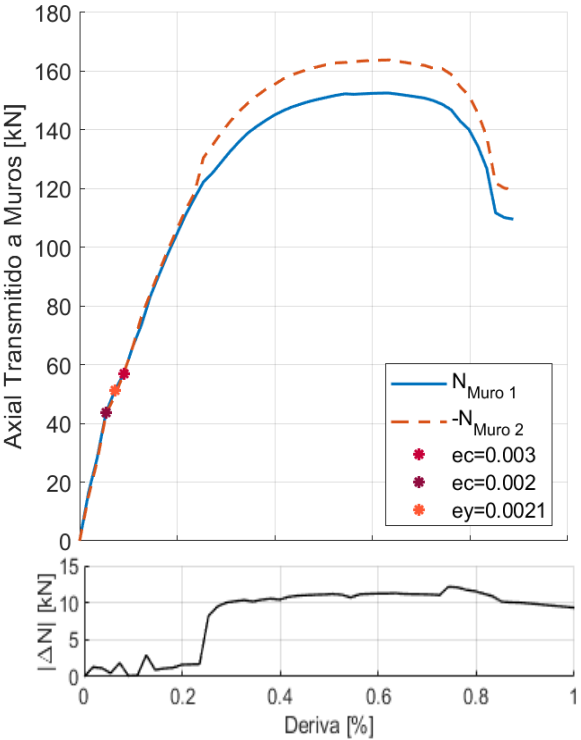


Figura 4.15 (Arriba) Carga axial transferida a los muros – (Abajo) Variación de Carga Axial entre muros, en función de la deriva en el Modelo Base.

4.3.3. Distribución de Esfuerzos y Deformación

La distribución de esfuerzos y deformaciones del sistema global se pueden observar de manera general en la Figura 4.9., sin embargo, es de interés estudiar el detalle estas distribuciones en la sección de pasillo de la losa donde se concentran los esfuerzos, para ello fue graficada la Figura 4.16 considerando un 0.5% de deriva (punto en el cual se observa el mayor momento transferido). En cada uno de estos gráficos se consideró el promedio de las tensiones/deformaciones de los nueve puntos de cuadratura, tomando como referencia para la ubicación en el plano XY la posición central del elemento.

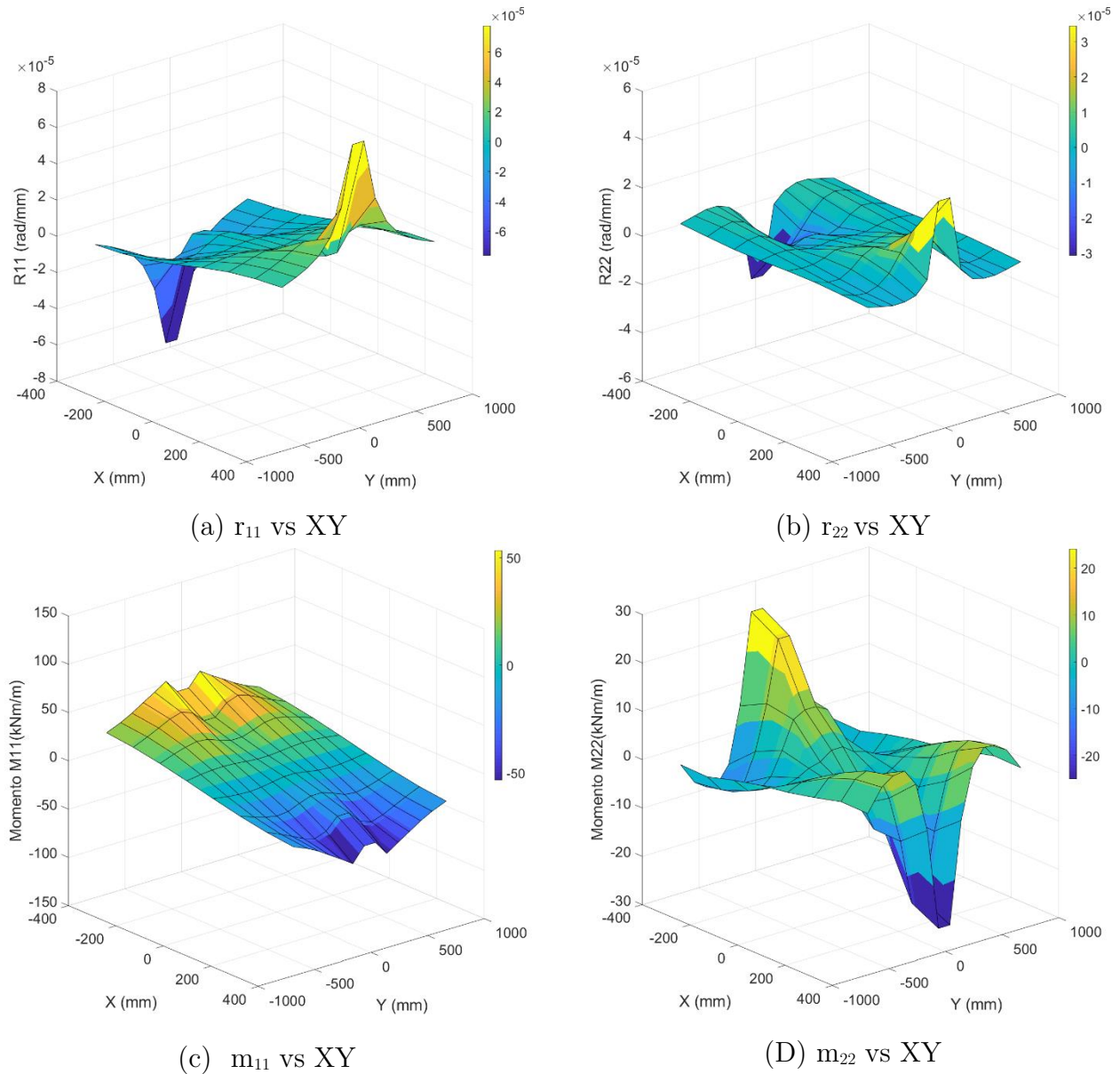


Figura 4.16. Distribución de Rotación y Momento sobre la losa de acoplamiento para un 0.5% de Deriva – Modelo Base.

En cada uno de los 4 gráficos se observa simetría en los resultados, teniendo la mayor concentración en los puntos colindantes con el borde de los muros, desde donde se propagan lateralmente hasta los límites de la losa, disipándose.

No obstante, los gráficos señalados muestran exclusivamente la distribución para un estado de carga puntual. Para estudiar la propagación de estos esfuerzos a medida que aumenta la carga horizontal neta y determinar el comportamiento del sistema frente a la fluencia de sus elementos, se grafican los esfuerzos m_{11} y m_{22} , y las rotaciones r_{11} y r_{22} en los ejes A-B y C-D, considerando los puntos de cuadratura 1-4-7 y 7-8-9, respectivamente (según se indica en la Figura 4.17). Estos resultados se presentan en las Figuras 4.17 y 4.20.

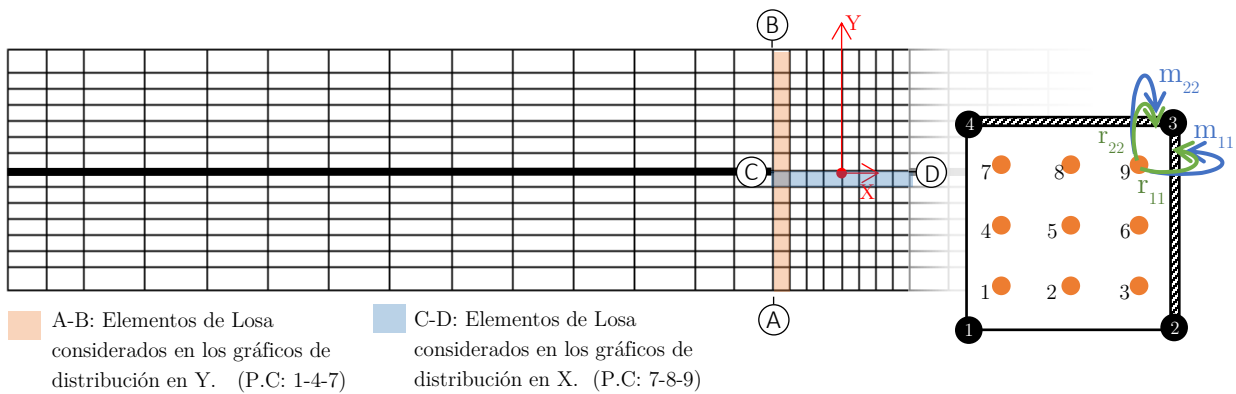


Figura 4.17. Elementos considerados en la distribución de Esfuerzos y Deformación en las direcciones X e Y.

El gráfico de rotación r_{11} en dirección Y para distintos valores de deriva (Figura 4.18.a), muestra como el patrón de distribución mantiene las máximas deformaciones en los elementos cercanos al muro, disminuyendo progresivamente en dirección lateral hasta el borde de la losa. Estas deformaciones son moderadas hasta la fluencia del acero de refuerzo en la dirección longitudinal, punto desde el cual las barras se deforman con mayor rapidez (lo que se observa al estudiar el entorno de la recta $e_y = 0.0021$, la cual corresponde al giro que provoca la deformación de fluencia en la capa de acero a tracción).

Para una deriva del 0.1%, únicamente el par de elementos centrales en las cercanías al muro han sobre pasado el límite de fluencia del acero, propagando el giro a los elementos vecinos hasta ser despreciables en los extremos de la losa. Cuando la deriva de los muros aumenta, los elementos que entran en fluencia aceleran su deformación, provocando mayores deformaciones en los elementos colindantes, propagando el giro y con ello la fluencia de las barras laterales siguientes. Para una deriva del 0.6%, la fluencia del acero ya alcanzó las barras más extremas, desde este punto en adelante, la losa solo puede continuar perdiendo capacidad y se deforma en todo su ancho con mayor aceleración. Esta observación es consistente con el resultado de la Figura 4.12, que muestra que el máximo momento

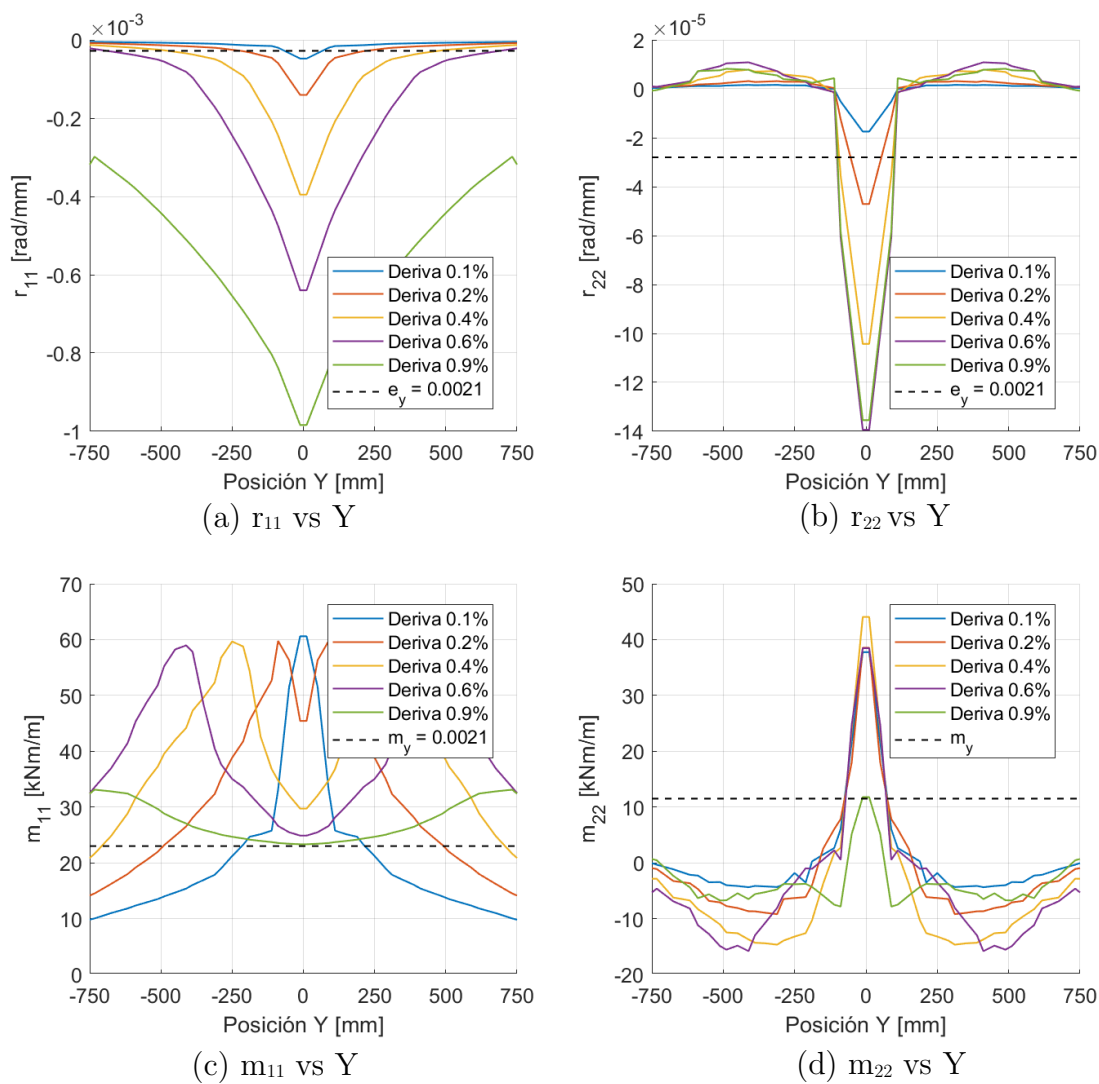


Figura 4.18. Distribución de deformación y momento en dirección Y – Modelo Base.

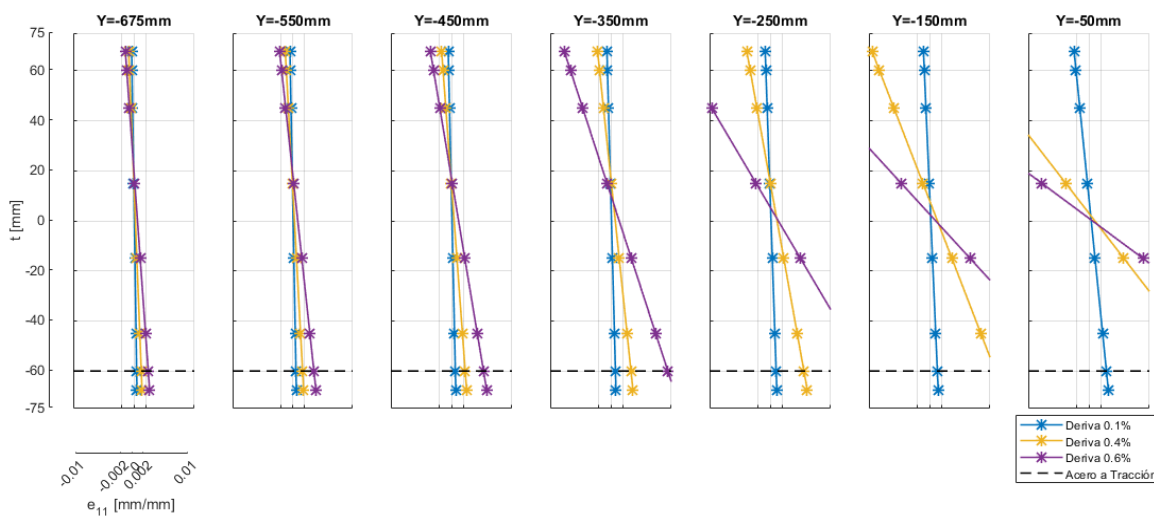


Figura 4.19. Deformación e_{11} graficado en el espesor de la losa, para el tramo A-C – Modelo Base.

trasmitido se alcanza en derivas cercanas al 0.5%, momento previo al que todos los elementos de borde fluyen, llegando al límite de su capacidad de trasmisión de esfuerzos.

Para estudiar este efecto a nivel de deformación de elementos en el espesor de la losa, se grafican en la Figura 4.19 las deformaciones e_{11} para el punto de cuadratura 4 al centro de cada capa de material, para el set de elementos de borde que van de A-C referido al esquema de la Figura 4.17. Se observa en el resultado como el elemento más cercano al muro ($y=-50$ [mm]) alcanza la deformación 0.0021 en un 0.1% de deriva a nivel de la capa de acero. A 0.4% de deriva el elemento ubicado a una distancia de $y=-450$ [mm] alcanza el punto de fluencia del acero, mientras que para una deriva del 0.6%, el elemento más lejano al muro ($y=-675$ [mm]) alcanza este punto, de modo que toda la sección alcanza su máxima capacidad de carga. Se observa, además, que a este porcentaje de deriva la deformación unitaria máxima del concreto a compresión sobrepasa los 0.003 desde el centro del muro hasta una distancia de -450 [mm], encontrándose en rangos donde el hormigón tiende a fallar por aplastamiento (Nilson, 1999).

Respecto a la dirección transversal (Figura 4.18.b) se observa que la magnitud de las deformaciones r_{22} son de alrededor de 10^2 veces menores que las deformaciones en la dirección principal, a excepción de los elementos inmediatamente colindantes al muro, donde se observa un giro mayor, pero que no supera la magnitud de las deformaciones en dirección de r_{11} .

Para estudiar el detalle de la distribución de momento se graficó la rotación r_{11} vs m_{11} en la Figura 4.20, para el set de elementos referidos anteriormente. Este grafico permite apreciar dos cosas, por una parte, el momento por unidad de ancho máximo que alcanza el elemento depende de su posición en la losa debido al grado de confinamiento que sufre el hormigón y a la rigidez aportada por el refuerzo transversal; este máximo de momento alcanza en promedio los 59 [kNm/m], valor que en la Figura 4.18.c se observa como el límite aprox. De

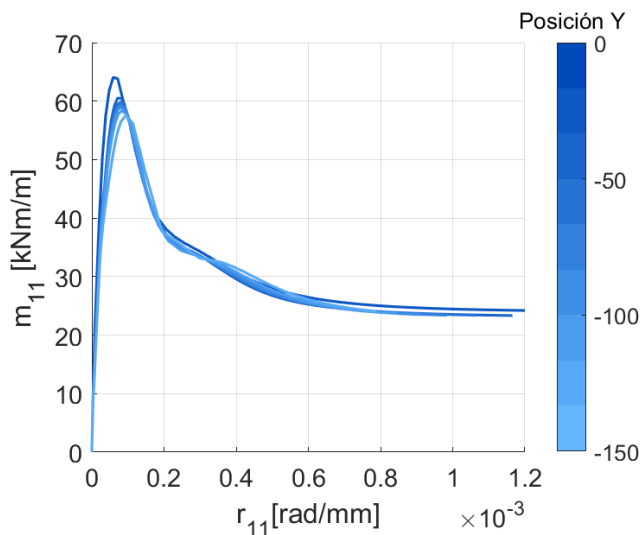
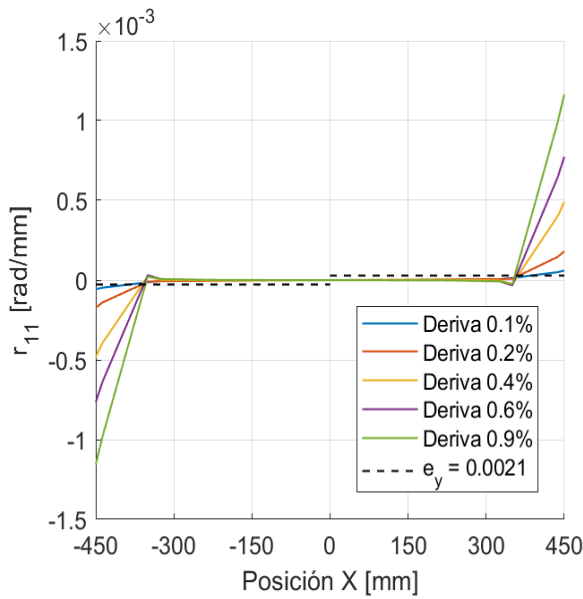


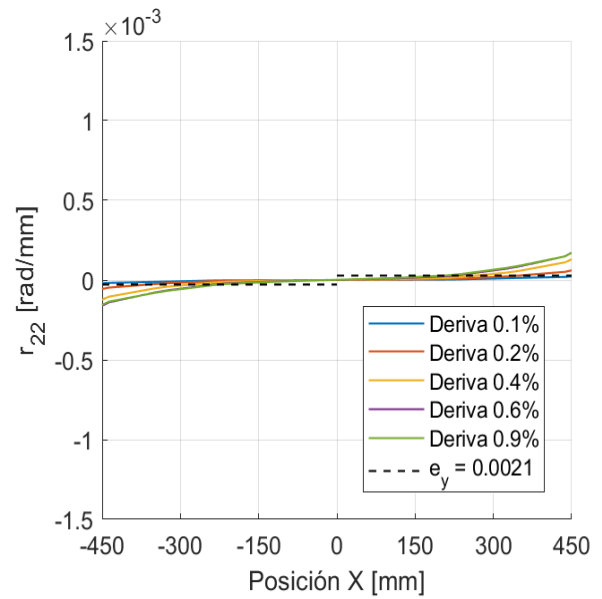
Figura 4.20. Curvas m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde estudiados – Modelo Base.

m_{11} que alcanzan los elementos en cada una de las derivas graficadas. Una vez que el elemento llega a este máximo, pierde capacidad y parte de los esfuerzos que eran transmitidos por él, se redirigen y transmiten por los elementos vecinos.

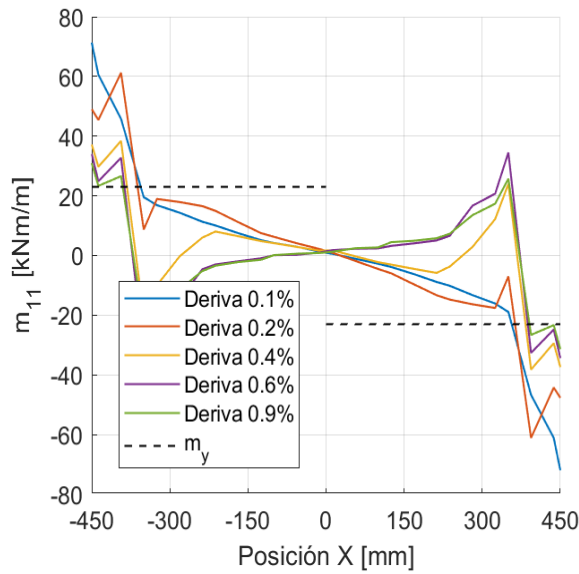
Por otra parte, el límite de fluencia de los elementos tiende aproximadamente a los 23 [kNm/m], valor que se marca con líneas punteadas en la Figura 4.18.c y al cual tiende el momento a medida que aumenta la deriva y se sobrepasa el momento máximo del elemento.



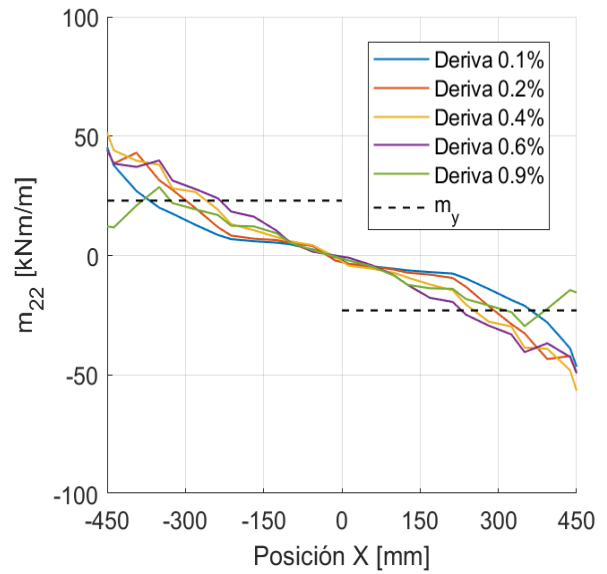
(a) r_{11} vs X



(b) r_{22} vs X



(c) m_{11} vs X



(d) m_{22} vs X

Figura 4.21. Distribución de deformación y momento en dirección X – Modelo Base.

En relación con el momento m_{22} , se observa en la Figura 4.18.d, como una vez que la sección alcanza el máximo momento de la dirección transversal (aprox. 40 [kNm/m]) pierde rápidamente capacidad y disminuye el momento en el centro hasta el momento de fluencia, marcado con líneas punteadas.

Respecto a la distribución de esfuerzos y deformaciones en dirección X, se observa en la Figura 4.21.a. que la rotación de los elementos en dirección de r_{11} se concentran exclusivamente en los elementos cercanos a los muros, siendo únicamente estos los que alcanzan deformaciones e_y del acero, lo que define una zona crítica de deformaciones en el borde de los muros. La rotación r_{22} se encuentra dentro del mismo orden de rotación que r_{11} en los elementos centrales; los que se encuentran por debajo de e_y , exceptuando los elementos al borde del muro, que se corresponden con las máximas deformaciones observadas en la Figura 4.18.b.

De igual manera, la distribución de m_{11} (Figura 4.21.c), muestra como las máximas sollicitaciones se concentran en los elementos del borde de muro, decayendo rápidamente a momentos que no superan el momento de fluencia de las barras. Se observa que, al aumentar la deriva, se generan discontinuidades de momento cada vez más pronunciadas que se mantienen dentro del par de elementos de borde que colindan con el muro. Al observar en detalle la propagación de momento individualmente en los 3 puntos de cuadratura de dichos elementos, es posible notar que siguen la tendencia descrita en dirección Y. Cuando el punto de cuadratura más cercano al borde sobre pasa su resistencia máxima pierde capacidad, concentrando el esfuerzo en el siguiente punto. Para mantener el elemento en equilibrio, el último punto presenta una caída drástica de momento que compensa la concentración en el borde, compatibilizando el momento neto del elemento con la distribución en dirección X, provocando así la discontinuidad de momento concentrado en el borde.

El estudio de la distribución en el eje longitudinal permite verificar que tanto las rotaciones como los momentos transmitidos resultan en un perfil antisimétrico que responde al tipo de deformación y verifica el equilibrio de la losa al presentar momentos de igual magnitud y distinta dirección en torno al eje central de la losa.

A partir de la distribución de momento m_{11} , se construyó el gráfico de corte en X (Figura 4.22) considerando la derivada discreta del momento según la ecuación 4.5., donde se observa como los elementos centrales mantienen una tendencia lineal, con una importante discontinuidad de corte en el borde que es resultado del punzonamiento provocado por la rotación de la losa, siendo resultados consistentes con los detallados en la Figura 2.9.

$$q_{11} = \frac{\Delta m_{11}}{\Delta x} \quad (4.5)$$

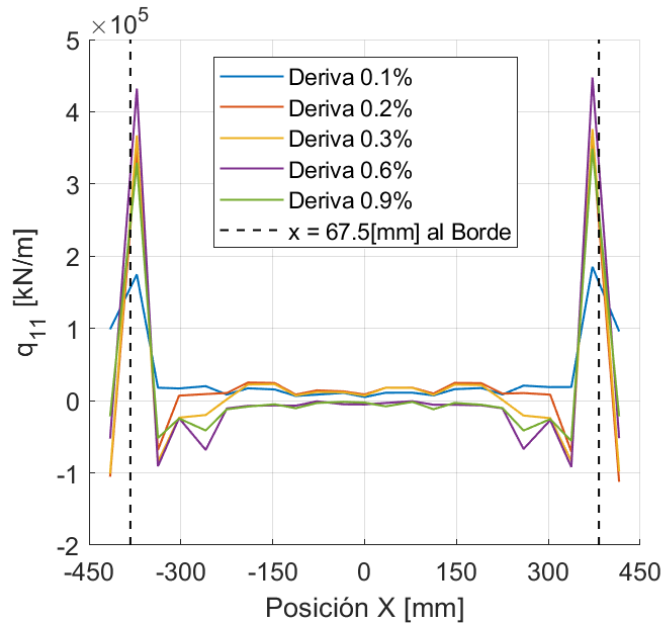


Figura 4.22. Distribución de corte en dirección X – Modelo Base.

Tal como es indicado en el estudio numérico de Coull, A., y Chee, W. Y. (1983) y el estudio experimental de Schwaighofer, J. y Collins, M (1977), estas discontinuidades se presentan en el entorno del muro a una distancia de aproximadamente $d/2$ (espesor medio de la losa descontando el recubrimiento de hormigón), que corresponderían a 67.5 [mm]. Si bien en la distribución de corte se observa que los peaks se obtienen cercanos a dicha distancia, esta observación no es concluyente debido a la influencia del refinamiento de malla estudiado con mayor detalle en el Apéndice B.2. Además, respecto a estos estudios y la caracterización de la zona crítica, es posible notar que la distribución de m_{11} en dirección Y (para derivas menores al 0.1%) concentra los esfuerzos desde el centro del muro hasta una distancia menor a los 100 [mm], lo que es consistente con la forma en “U” de la zona crítica definida por estos autores, sin embargo, esto ocurre solo hasta que el elemento alcance su máxima capacidad e inicie la pérdida de resistencia.

4.3.4. Ancho efectivo

Es posible entender el ancho efectivo como una medida de equivalencia que representa el ancho de losa tal que la fuerza resultante sea igual a la magnitud de la distribución de momento transmitida real. Utilizando el máximo momento por unidad de longitud medido en la sección crítica al borde del muro es posible calcular el ancho efectivo considerando la ecuación 4.6.

$$\max(m_{11_i}) \cdot b_{eff} \approx \sum_{i=1}^n m_{11_i} \Delta_i = M \Rightarrow b_{eff} = \frac{M}{\max(m_{11_i})} \quad (4.6)$$

La Figura 4.23. muestra los resultados del cálculo de ancho efectivo vs Deriva a partir de esta ecuación. En la misma, se ha graficado a modo de referencia el ancho efectivo según la ecuación 2.2 (Tapia, 2008). Además, tomando en cuenta las observaciones respecto a la distribución de esfuerzos en dirección Y, tal que los elementos una vez comienzan a perder capacidad redistribuyen los esfuerzos hacia los elementos laterales de modo que desde el inicio de pérdidas de capacidad en el elemento central hasta el inicio de la fluencia del sistema, en cada paso hay un punto que alcanza su capacidad máxima de momento, se construyó la aproximación del ancho efectivo considerando $\max(m_{11i}) = 59 \text{ [kNm/m]}$ para todo nivel de deriva. Como es predecible, esta aproximación es válida desde que el elemento central alcanza la deformación e_y a nivel del acero a tracción hasta la fluencia del sistema. Además, resulta interesante notar que para el caso de estudio el ancho efectivo definido por Tapia (2008) coincide con el ancho efectivo máximo obtenido previo a la fluencia del sistema.

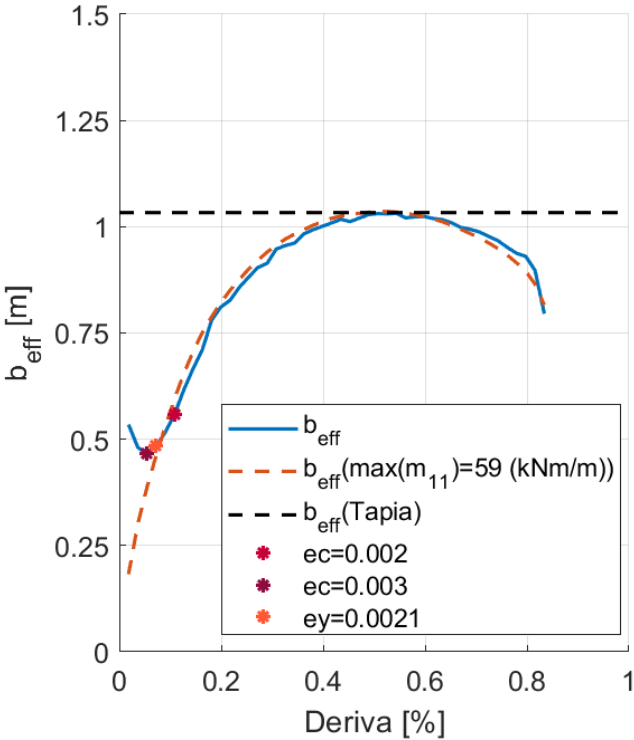


Figura 4.23. Ancho efectivo vs Deriva– Modelo Base

Capítulo 5 – Estudio Paramétrico de Modelos sin Fibra

A continuación, se extiende el estudio realizado sobre Modelo Base, a modelos sin fibra, cuyas variables de estudio son

1. Cuantía de Acero longitudinal en sistemas de muros rectos.
2. Ancho del ala de muros T (L_A), manteniendo constante el ancho total de la losa (L_T) (Figura 4.3).
3. Ancho del ala de muros T (L_A), manteniendo constante el ancho de losa libre (L_L), entendida como la distancia entre el borde del ala y el término de la losa en dirección transversal (Figura 4.3).

Para cada uno de los casos se tabulan los valores de las variables, junto a la etiqueta del caso que consta de un número que hace referencia al subcapítulo y el número del caso. Cada set de resultados se compara con el caso definido como MB (Modelo Base).

5.1. Variación de cuantía de acero en Sistema de Muros Rectos

La Tabla 5.1, resume los casos de estudio del presente subcapítulo. Para estudiar el comportamiento del sistema global se graficó la respuesta global del sistema de cada uno de estos casos en la Figura 5.1., en la cual se observa que para cargas menores y previo a la primera fractura del hormigón (la que se mantiene en un 0.002% para todos los casos), la variación en el comportamiento de los sistemas es despreciable. Superado este punto, a

Tabla 5.1. Casos de estudio variando cuantía de acero en sistemas de muros rectos.

Etiqueta Caso	Armadura Longitudinal	Cuantía Longitudinal	Longitud del Ala (L_A) [cm]	Ancho de Losa Total (L_T) [cm]
MB	$\phi 10@15$	0.0035	0	150
M511	$\phi 8@15$	0.0022	0	150
M512	$\phi 10@10$	0.0052	0	150
M513	$\phi 12@10$	0.0075	0	150
M514	$\phi 16@10$	0.0134	0	150
M515	$\phi 18@10$	0.0169	0	150

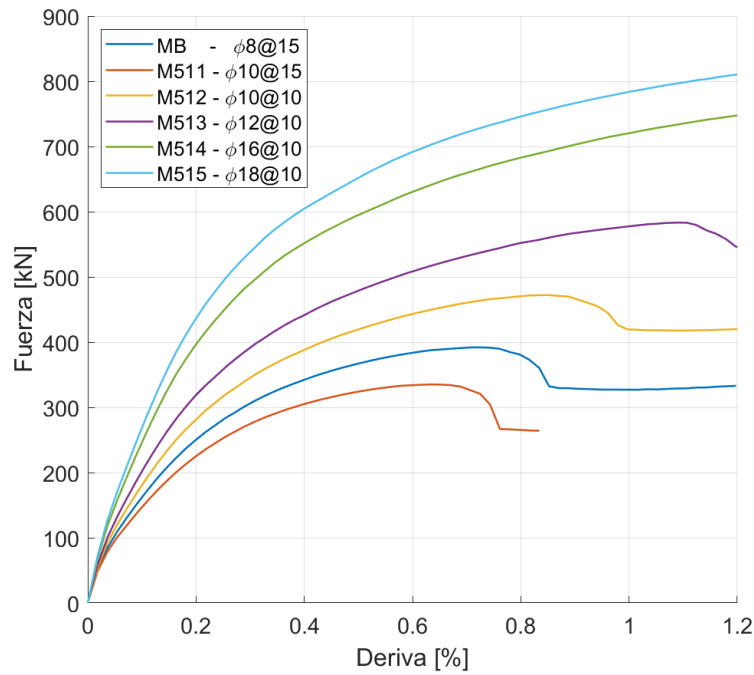


Figura 5.1. Respuesta Global para sistemas de muros rectos con distinta cuantía de acero longitudinal.

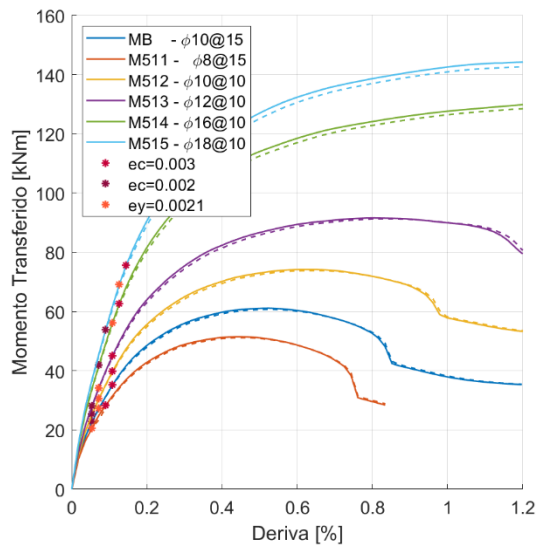


Figura 5.2. Momento transmitido vs Deriva para modelos con distintas cuantías de acero longitudinal.

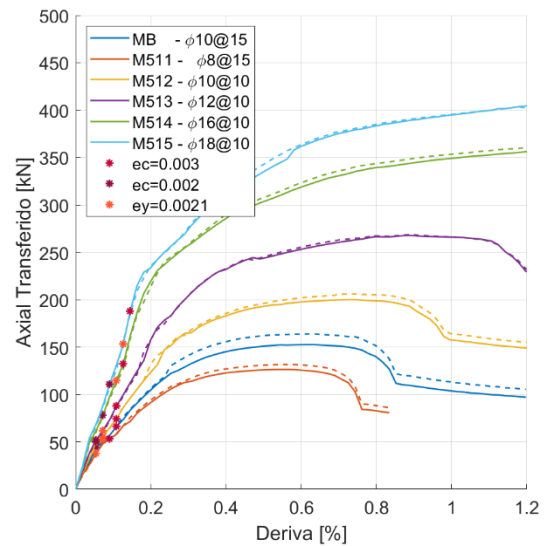


Figura 5.3. Axial transmitido vs Deriva para modelos con distintas cuantías de acero longitudinal.

medida que se aumenta la cuantía de acero longitudinal el sistema se rigidiza, tomando mayores cargas a desplazamientos menores, aumentando su resistencia máxima y retrasando la deriva de fluencia del sistema. Los gráficos de momento y axial transmitidos (Figuras 5.2. y 5.3) reproducen este resultado. Particularmente la Figura 5.3, muestra que la respuesta medida en ambos muros se mantiene en variaciones pequeñas, incluso menores que las observadas en el modelo base, demostrando que el sistema se mantiene acoplado, mientras que la Figura 5.2 demuestra el equilibrio en cada modelo.

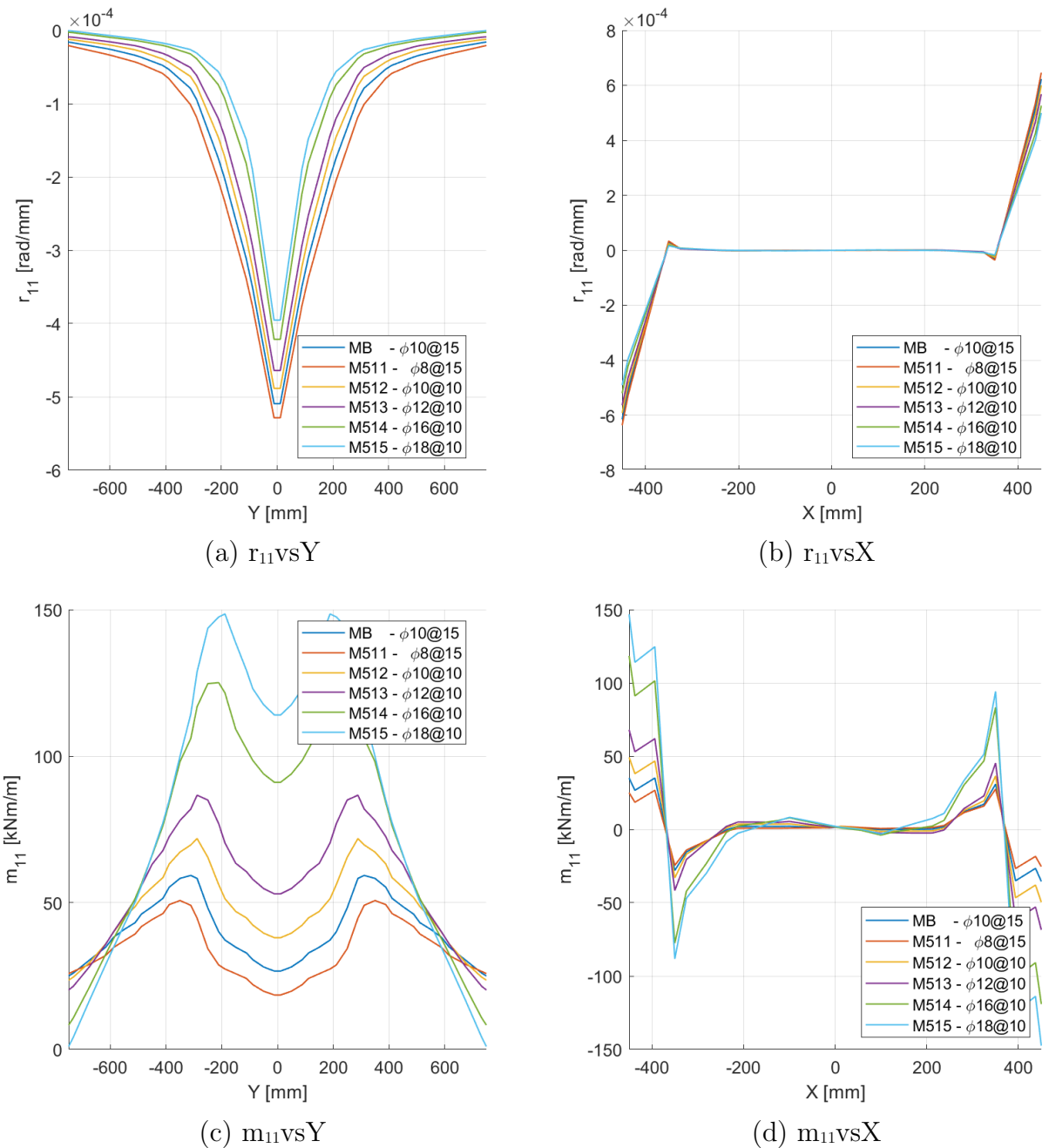


Figura 5.4. Distribución de esfuerzos y deformaciones para modelos con distintas cuantías de acero longitudinal, para un 0.5% de deriva.

Los puntos marcados en las Figuras 5.2 y 5.3 muestran que las deformaciones en el centro de la losa se mantienen proporcionales a la deriva de los muros para cuantías menores a 0.0075 ($\phi 12@10$), es decir, existe un giro constante entre muro y losa para bajas cuantías y derivas. Sin embargo, para cuantías mayores (modelos M514 y M515), el leve desplazamiento de los puntos sugiere que la rigidez de la losa opone mayor resistencia al giro impuesto por el muro, retrasando la deformación longitudinal en relación con la deriva de techo. Este efecto aumenta a medida que aumenta la deriva y divergen las curvas Momento vs Deriva,

así, por ejemplo, para un 0.5% de deriva la rotación de la sección cercana al muro (Figura 5.4.a) muestra que la rotación es menor para losas con mayor cuantía de armadura, mientras que el momento máximo y el momento de fluencia de los elementos tiende a aumentar (Figura 5.4.c), lo que provoca el aumento de capacidad observado en el gráfico de Fuerza vs Deriva; resultados que son consistentes con obtenidos por Henríquez (2019). La variación en niveles de rotación observados en la Figura 5.4.a, trae como consecuencia una propagación más acelerada de esfuerzos en los sistemas con menor cuantía de armadura, lo que se hace evidente al estudiar la posición en Y de los peaks de momento en la Figura 5.4.c: Mientras el modelo M515 a un 0.5% de deriva alcanza un máximo momento a una distancia $Y = 200$ [mm], el Modelo Base lo alcanza en $Y = 300$ [mm], así al aumentar la deriva, los modelos con menor cuantía alcanzarán peaks de momento en sus extremos con mayor rapidez, lo que explica que estos sistemas alcancen la fluencia antes que los modelos con mayor porcentaje de armadura longitudinal.

Finalmente, la Figura 5.5 muestra las curvas de ancho efectivo vs deriva para los distintos casos de estudio. En ella se observa como el aumento en la cuantía de acero reduce el porcentaje de deriva en el que se alcanza el máximo ancho efectivo antes de la fluencia y reduce el ancho efectivo para un mismo porcentaje de deriva. Esto se debe a que, a mayor proporción de acero longitudinal, el esfuerzo se concentra mayormente en los elementos centrales. Se observa, además, que la aproximación de Tapia (2008) continúa siendo válida hasta cuantías del orden de $\phi 10@10$, estando levemente subestimada para los casos de mayor armadura.

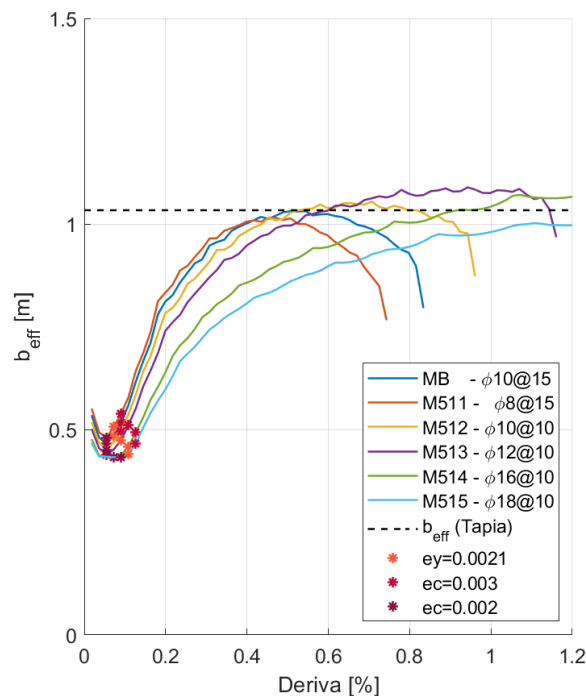


Figura 5.5. Ancho efectivo vs Deriva para modelos con distintas cuantías de acero longitudinal.

Para verificar el uso de la aproximación con $\max(m_{11})$ constante, se graficaron individualmente las curvas de ancho efectivo vs deriva para los modelos M513 y M515 (Figura 5.6). En cada caso se utilizó el valor aproximado de momento máximo observados en la Figura 5.4.c, para definir la curva de b_{eff} aproximado, obteniendo resultados similares para derivas mayores al punto $e_y=0.0021$ tal como en el MB.

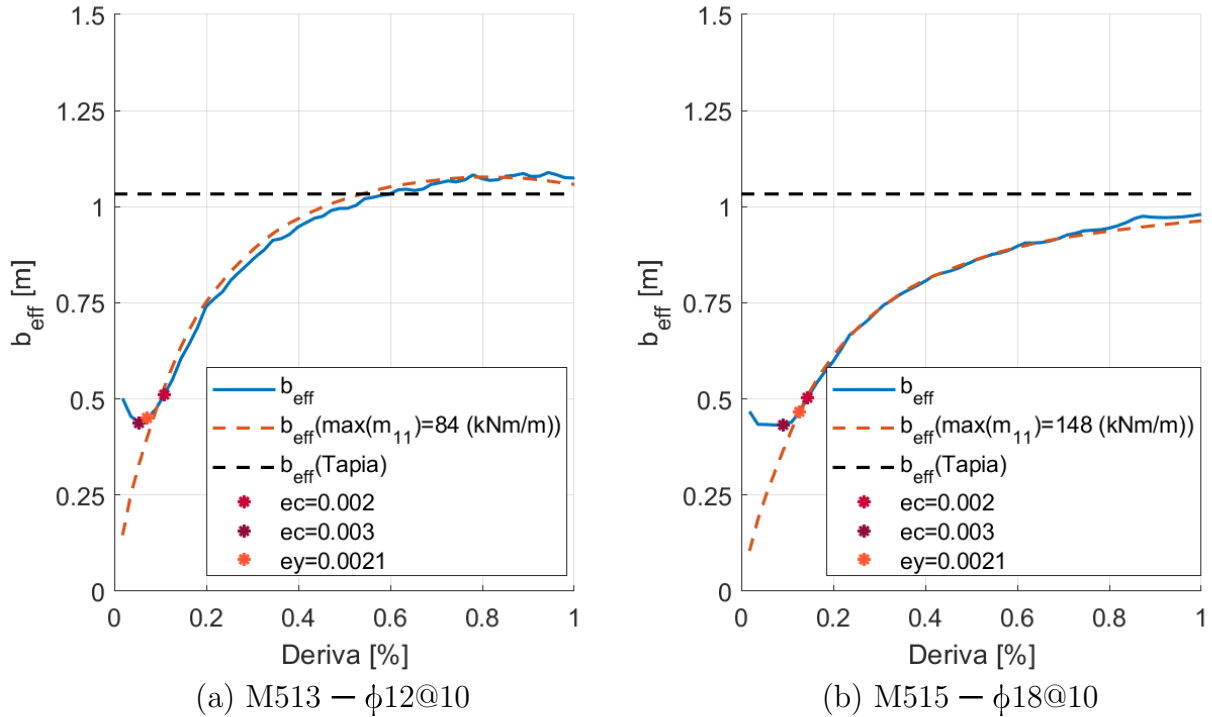


Figura 5.6. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M513 y M515.

5.2. Variación de la longitud de alas de muros T con ancho de losa fijo

A continuación, la Tabla 5.2, resume los casos de estudio del presente subcapítulo, correspondientes a modelos con muros tipo T con distinta longitud de alas (L_L) y Ancho de losa total (L_T) 150 cm (Figura 4.3). Para todos estos, la Figura 5.7 grafica la curva fuerza vs deriva, donde se observa que, la primera fractura del hormigón se mantiene sin cambios en derivas del orden de un 0.02%, mientras que para derivas de hasta un 0.2% el sistema tiende a ser más rígido y tener mayor capacidad de carga a medida que aumenta el largo del ala de los muros, lo que se corresponde con los resultados obtenidos por Chaperón (2019).

Tabla 5.2. Casos de estudio variando la longitud de alas de muros T con ancho de losa fijo.

Etiqueta Caso	Armadura Longitudinal	Cuantía Longitudinal	Longitud del Ala [cm]	Largo de Pasillo [cm]
MB	$\phi 10@15$	0.0035	0	150
M521	$\phi 10@15$	0.0035	40	150
M522	$\phi 10@15$	0.0035	60	150
M523	$\phi 10@15$	0.0035	80	150
M524	$\phi 10@15$	0.0035	100	150
M525	$\phi 10@15$	0.0035	150	150

Cuando el sistema con muros tipo T alcanza el 0.2% de deriva se observa una redistribución de esfuerzos que se manifiesta como un cambio de pendiente en la curva fuerza vs deriva que varía según el largo de ala estudiado; este reajuste sugiere el desarrollo de una falla local relacionada con la inclusión del ala en los muros. Para niveles de deriva superiores, los sistemas continúan deformándose inelásticamente y reacomodándose hasta el punto de fluencia, el que tiende a ocurrir con mayor rapidez con el aumento en la longitud del ala, pero que se mantiene en cargas con reducciones menores al 5% respecto a la fuerza en el punto de fluencia del sistema con muros rectos (MB).

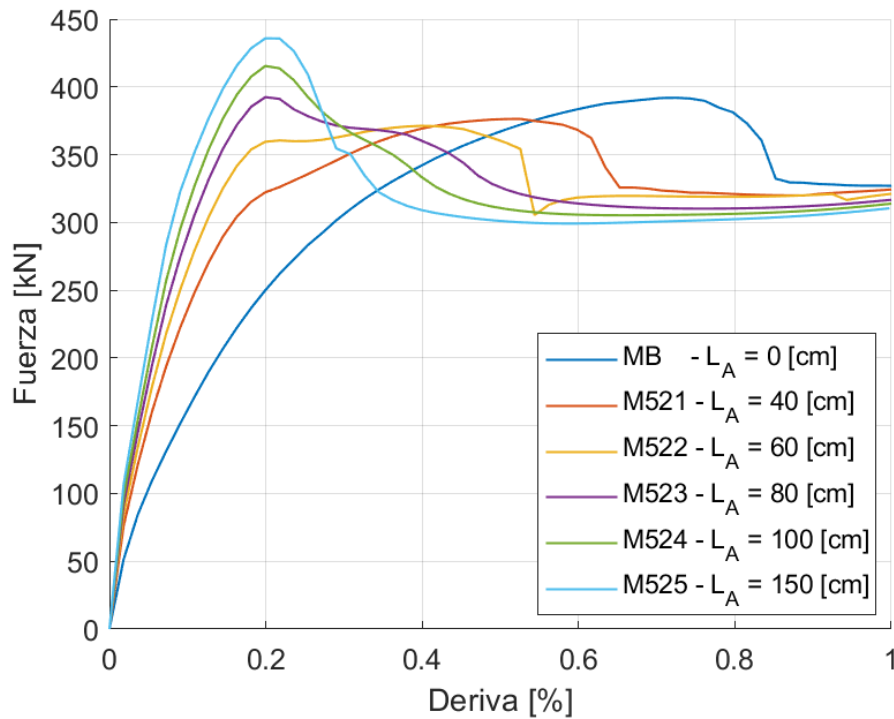


Figura 5.7. Respuesta Global para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo.

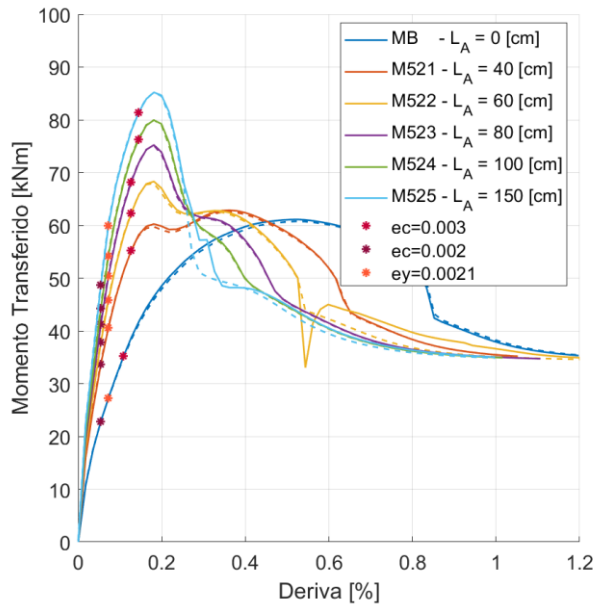


Figura 5.8. Momento transmitido vs Deriva para para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo.

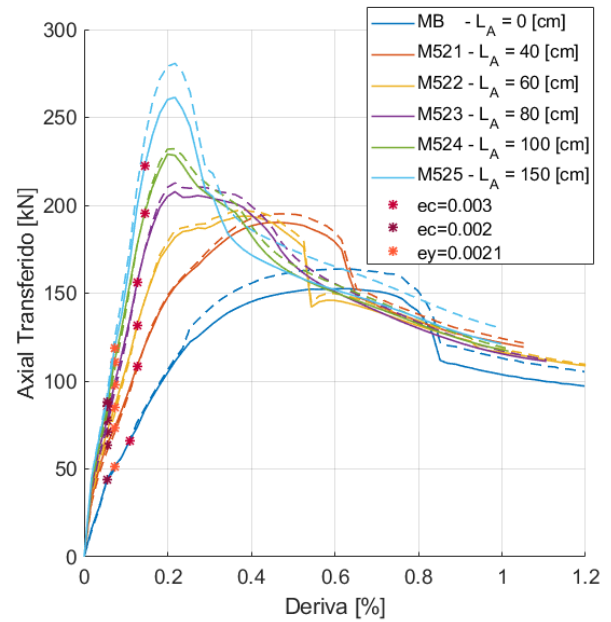
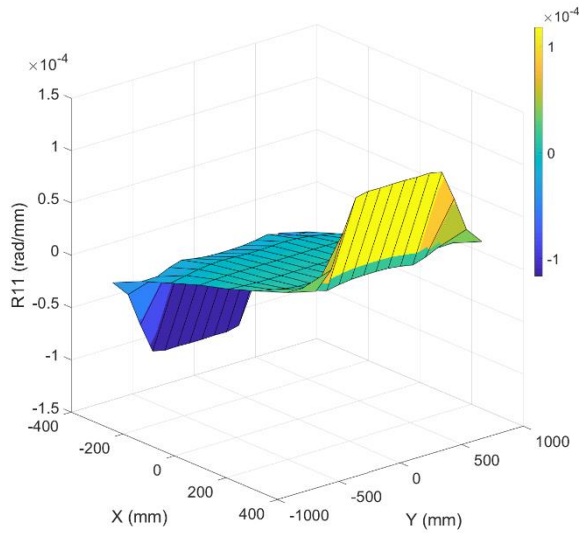


Figura 5.9. Axial transmitido vs Deriva para para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo.

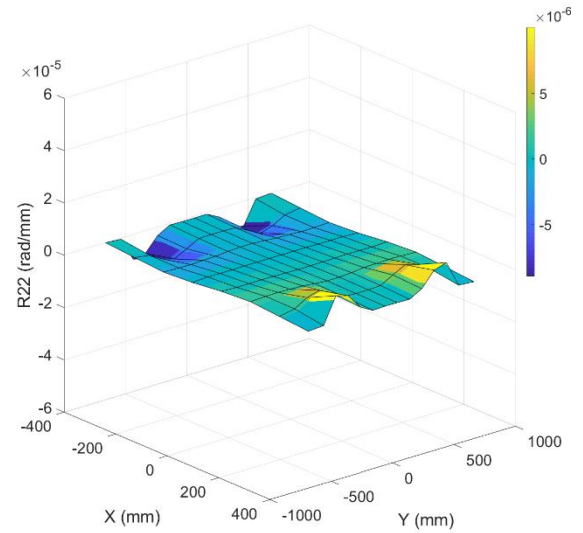
Los gráficos de momento y carga axial transferidos (Figuras 5.8 y 5.9), muestran que la respuesta medida a cada lado de la estructura resulta ser igual en momento (se mantiene el equilibrio en la losa), mientras que los esfuerzos axiales transferidos muestran pequeñas divergencias, no significativamente superiores a las observadas en el modelo base, presentando un leve desacoplamiento.

Para comprender la diferencia entre el comportamiento de muros rectos y muros T, es esencial estudiar la distribución de esfuerzos en los bordes del ala de muros. La Figura 5.10, muestra la distribución de momento y rotación en XY para el modelo M523 con 80 [cm] de longitud de ala. Se aprecia que, a diferencia de lo observado en el modelo de muros rectos, en modelos de muros T, la rotación no se concentra exclusivamente en el borde del centro del alma del muro, sino que todos los elementos de conexión muro-losa rotan en un mismo grado generando una mayor concentración de esfuerzos en ese grupo de elementos.

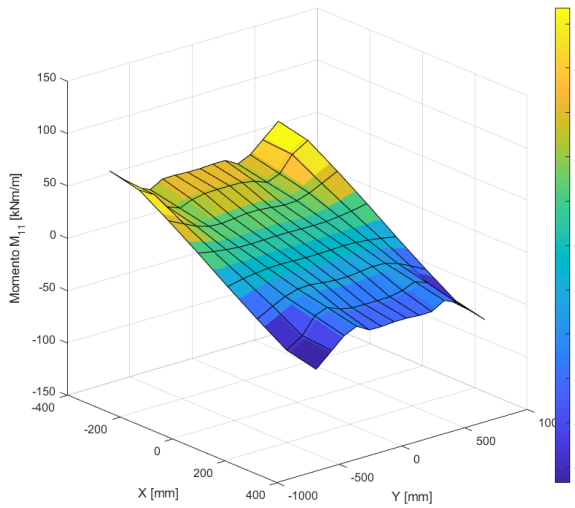
Para estudiar en detalle la causa de las variaciones en las curvas comparando los distintos modelos, se muestran los resultados de la distribución de esfuerzos y deformaciones a un 0.20% de deriva (punto en el que se alcanza el máximo momento) y 0.5% de deriva (punto en el que la tendencia se ha invertido y los modelos con mayor longitud de ala alcanzan menores momentos que los sistemas con menor longitud de ala), en las Figuras 5.11 y 5.12.



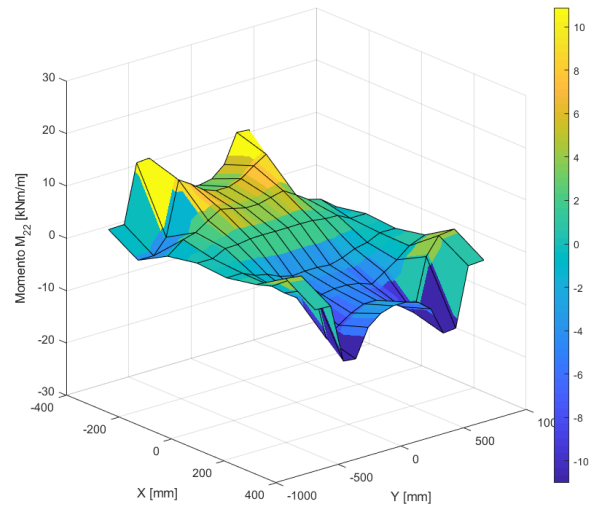
(a) r_{11} vs XY



(b) r_{22} vs XY



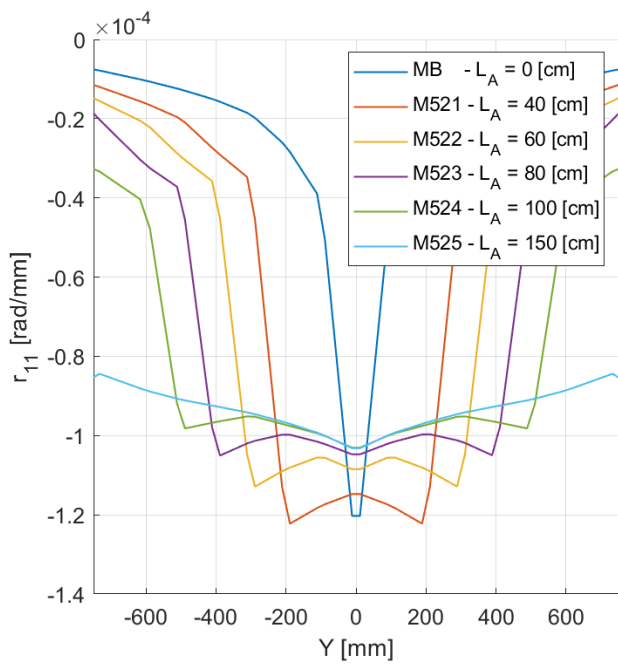
(c) m_{11} vs XY



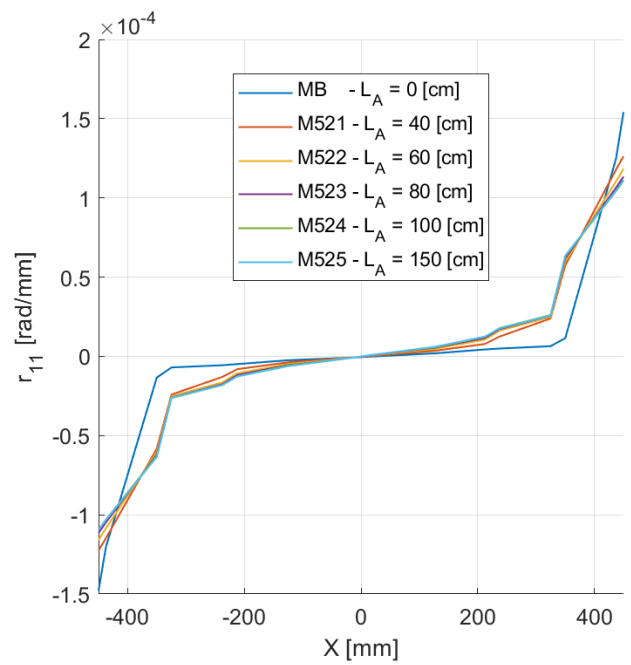
(D) m_{22} vs XY

Figura 5.10. Distribución de Rotación y Momento sobre la losa de acoplamiento para un 0.5% de Deriva – Modelo M523 con $L_A=80$ [cm].

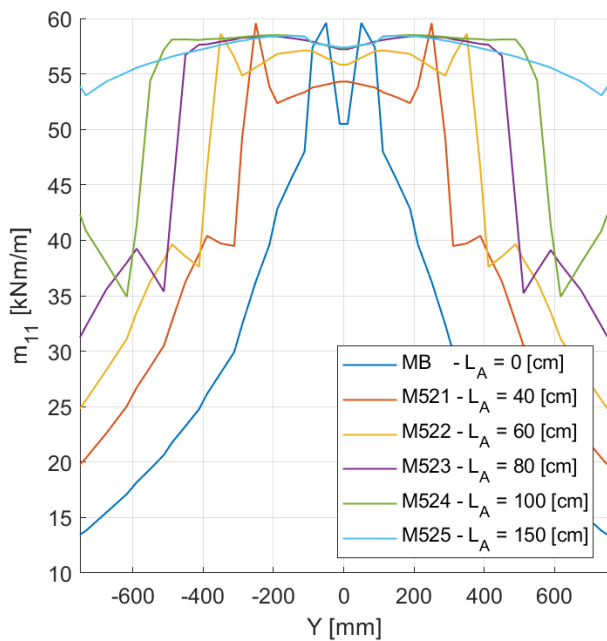
En la Figura 5.11.a se observa que la rotación es mayor en la sección de losa unida al ala de los muros T. Desde el borde del ala y de manera simétrica, la rotación disminuye progresivamente en dirección lateral hasta los límites de la losa, siguiendo la tendencia típica de los sistemas de muros rectos. Se observa también que la rotación es menor para modelos con mayor longitud de ala, debido a que los esfuerzos transmitidos por el alma de los muros se distribuyen en un ancho mayor generando tensiones menores y, por consiguiente, deformaciones menores. Así como en el caso anteriormente revisado, la rotación de los elementos disminuye rápidamente en el eje X (Figura 5.11.b).



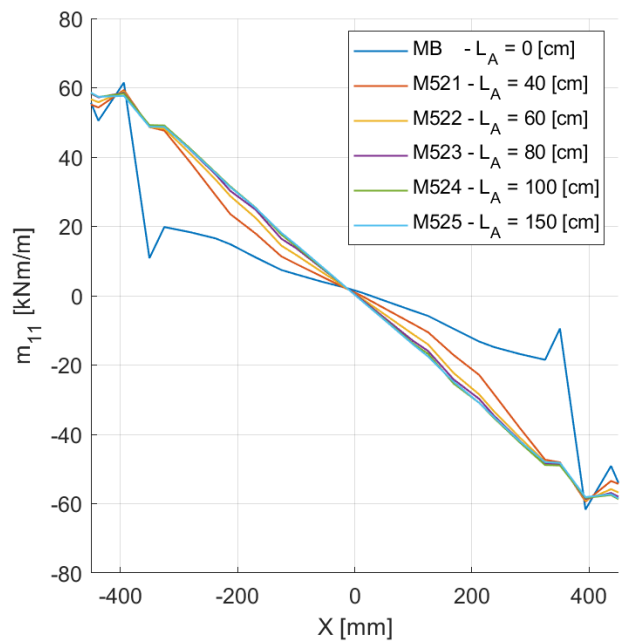
(a) r_{11} vs Y



(b) r_{11} vs X

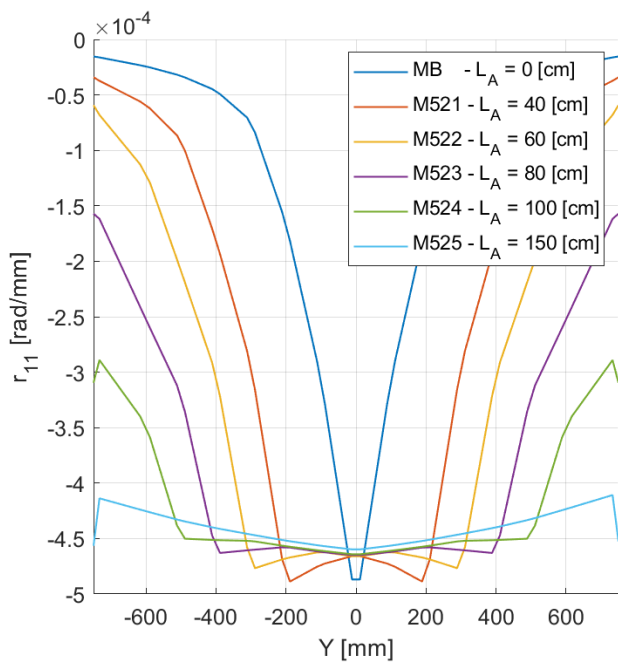


(c) m_{11} vs Y

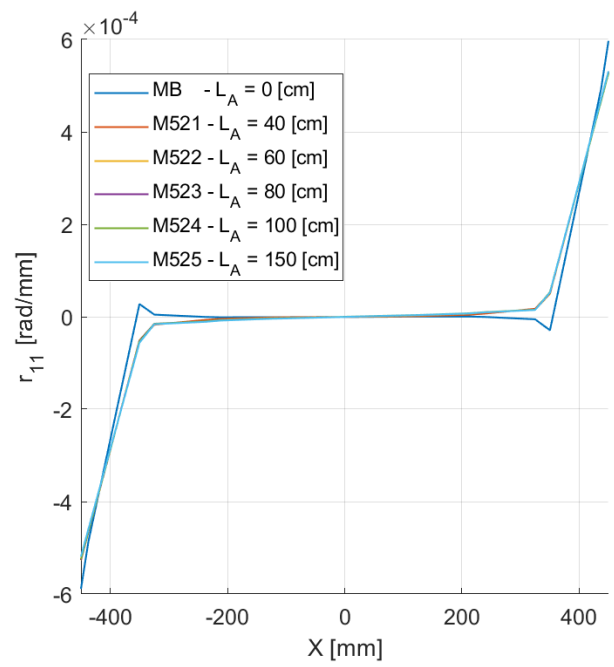


(d) m_{11} vs X

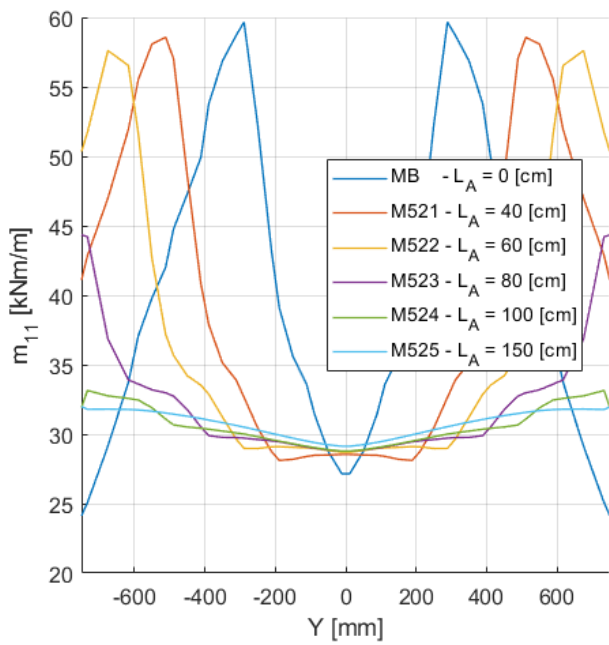
Figura 5.11. Distribución de esfuerzos y deformaciones para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo, para un 0.18% de deriva.



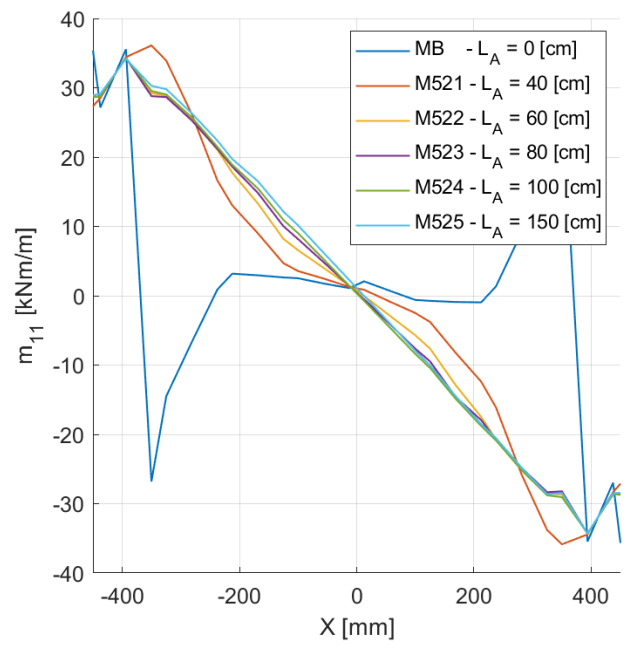
(a) r_{11} vs Y



(b) r_{11} vs X



(c) m_{11} vs Y



(d) m_{11} vs X

Figura 5.12. Distribución de esfuerzos y deformaciones para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo, para un 0.5% de deriva.

Si se observa la Figura 5.11.c, es posible notar que el momento máximo (aprox. 59 kNm/m) y el momento de fluencia (23 [kNm/m]) determinados previamente para el modelo base, tienden a ser iguales para todas las variantes mostradas en el gráfico, de este modo, la mayor rigidez y máxima capacidad de transmisión de momento de los sistemas con mayor longitud de ala no se debe a un aumento en la capacidad local de los elementos (como era el caso anterior), sino al aumento de la sección donde se alcanza dicho máximo, de tal modo que el momento m_{11} integrado a lo largo de la sección resulta ser mayor. Ahora bien, esta distribución a lo largo del ala del muro trae como consecuencia no solo un aumento de capacidad de transmisión de momento, sino también una menor ductilidad del sistema.

Debido a que todos los elementos conectados al muro rotan de manera relativamente uniforme, también alcanzan el máximo momento al mismo porcentaje de deriva, así los modelos con menor ancho de losa libre (L_L) distribuyen sus esfuerzos a un menor número de elementos laterales, alcanzando la fluencia anticipadamente, lo que explica el cambio de tendencia observado. Por ejemplo, el modelo M525 a un 0.2% de deriva a rotado en toda su extensión a valores que lo acercan al momento máximo, al continuar aumentando la deriva, la rotación de los elementos seguirá creciendo, por lo que todos los elementos tenderán a perder capacidad provocando que la curva momento transferido vs deriva decaiga rápidamente. Para este mismo porcentaje de deriva el modelo M521, solo ha alcanzado momentos máximos entre los -300 y 300 [mm], teniendo 450 [mm] de longitud lateral para continuar propagando esfuerzos aun cuando los elementos centrales hayan perdido capacidad. A causa de esto el sistema resulta tener mayor ductilidad que el modelo de mayor longitud L_A .

La Figura 5.12.c, comprueba esta observación; para un 0.5% de deriva los modelos M523, M524 y M525 ($L_A > 60$ [cm]) muestran todos sus elementos cercanos al momento de fluencia, mientras que los modelos con longitud de ala menores aun presentan elementos que no han sobrepasado su máximo de capacidad, por lo cual, muestran aún una importante capacidad de transmisión de esfuerzos.

Respecto al ancho efectivo (Figura 5.13) se observa que el ancho efectivo sugerido por Tapia (2008) sobreestima el ancho efectivo máximo calculado para los distintos casos con muros T, mostrando mayor diferencia a medida que aumenta la longitud del ala y se reduce la longitud de losa libre (L_L), lo que sugiere que existe una longitud L_L mínima desde el cual es válida esta aproximación.

Se observa también que las curvas alcanzan la fluencia a niveles menores de deriva a medida que aumenta la longitud del ala (L_A) debido a los mecanismos de transmisión de esfuerzos ya explicados, por tanto, no resulta ser una buena aproximación utilizar únicamente el momento m_{11} máximo en todos los pasos de carga. Como se aprecia en la Figura 5.14, la aproximación

resulta válida solo en los primeros 0.5% de deriva para el modelo M523 con $L_A = 80$ [cm] ($L_L = 35$ [cm]), mientras que para el modelo M525 con $L_A = 150$ [cm] ($L_L = 0$ [cm]), solo resulta válida hasta derivas de aproximadamente un 0.3%.

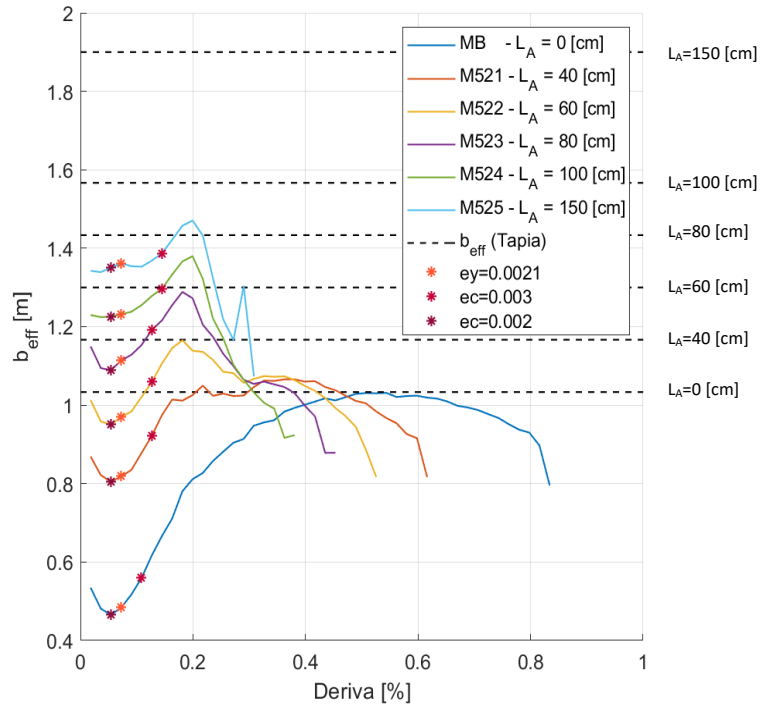


Figura 5.13. Ancho efectivo vs Deriva para modelos para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_T fijo.

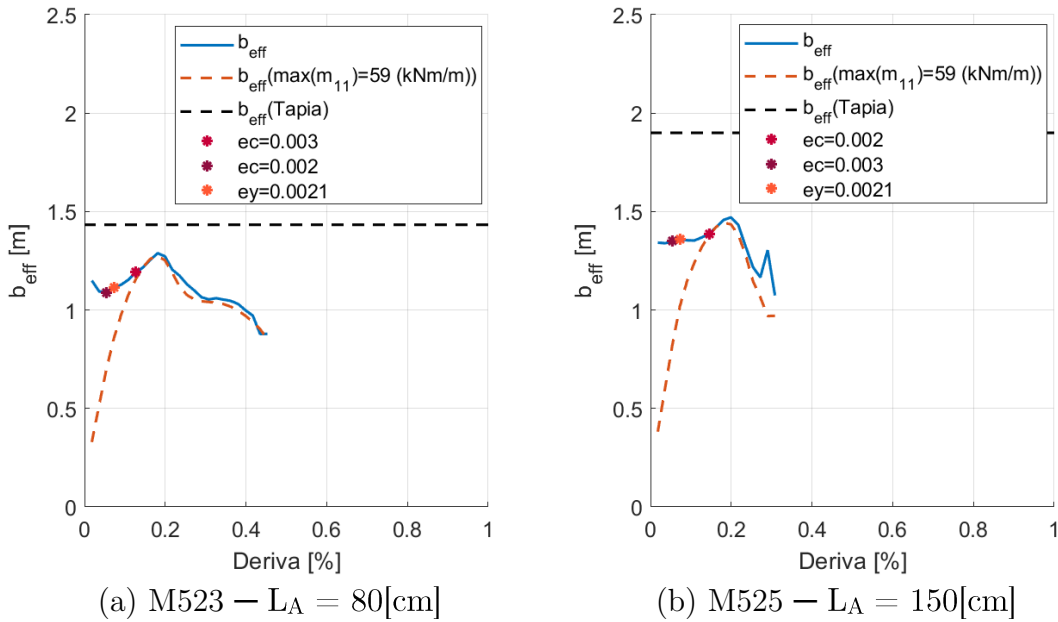


Figura 5.14. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M523 y M525.

5.3. Variación de la longitud de alas de muros T con ancho de losa libre fijo

Las curvas Fuerza vs Deriva del sistema global para los casos con longitud de ala variable (L_A) y ancho L_L constante tabulados en la Tabla 5.3, se presentan en la Figura 5.15., donde se aprecia que, para todos los casos estudiados, la primera fractura del hormigón se mantiene en derivas del orden de un 0.02%. Además, se observa un mayor grado de rigidez y máxima capacidad de carga a medida que aumentan las longitudes L_A y L_T , en tanto la deriva de fluencia resulta ser la misma para todos los casos estudiados, encontrándose cercano al 0.86%, tal como fue registrado para el modelo base.

Tabla 5.3. Casos de estudio variando la longitud de alas de muros T con ancho de losa libre fijo.

Etiqueta Caso	Armadura Longitudinal	Cuantía Longitudinal	Longitud del Ala [cm]	Largo de Pasillo [cm]
MB	$\phi 10@15$	0.0035	0	150
M531	$\phi 10@15$	0.0035	40	190
M532	$\phi 10@15$	0.0035	60	210
M533	$\phi 10@15$	0.0035	80	230
M534	$\phi 10@15$	0.0035	100	250
M535	$\phi 10@15$	0.0035	150	300

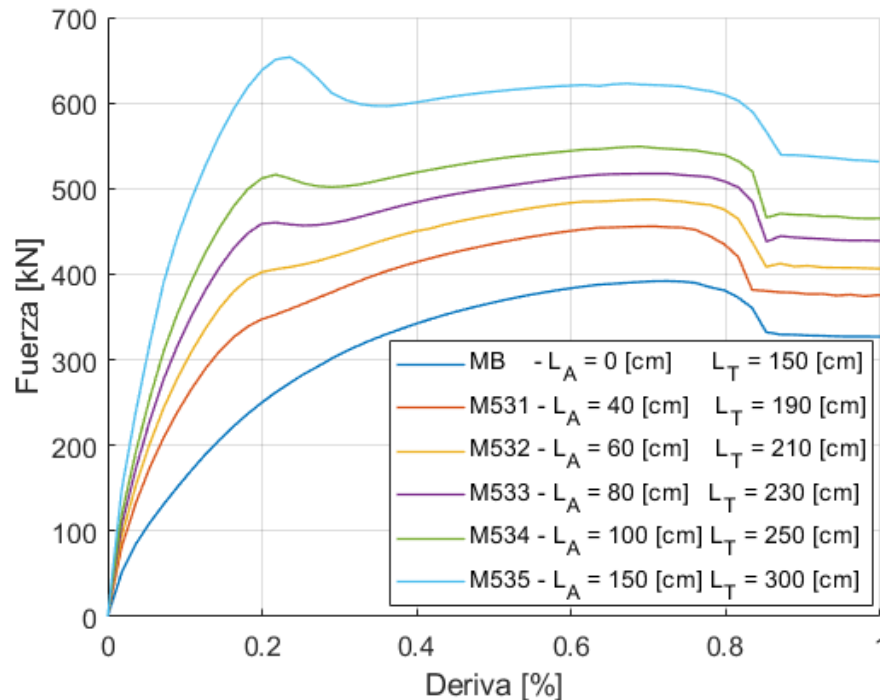


Figura 5.15. Respuesta Global para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.

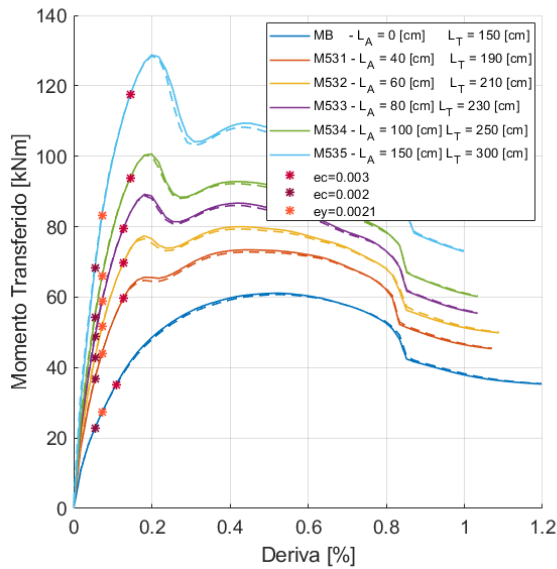


Figura 5.16. Momento transmitido vs Deriva para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.

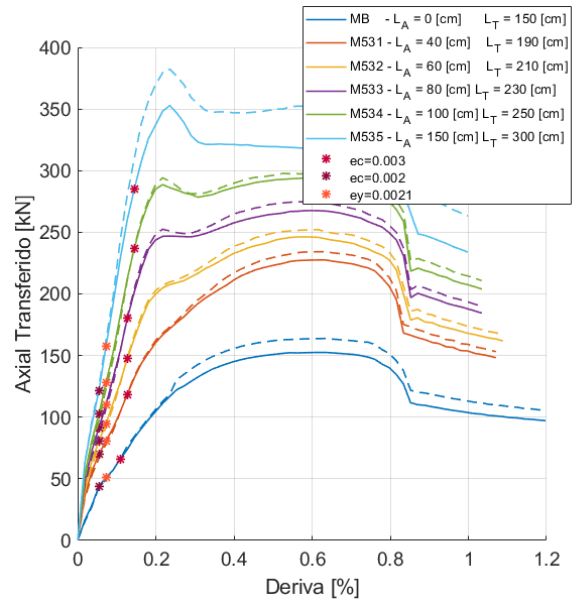
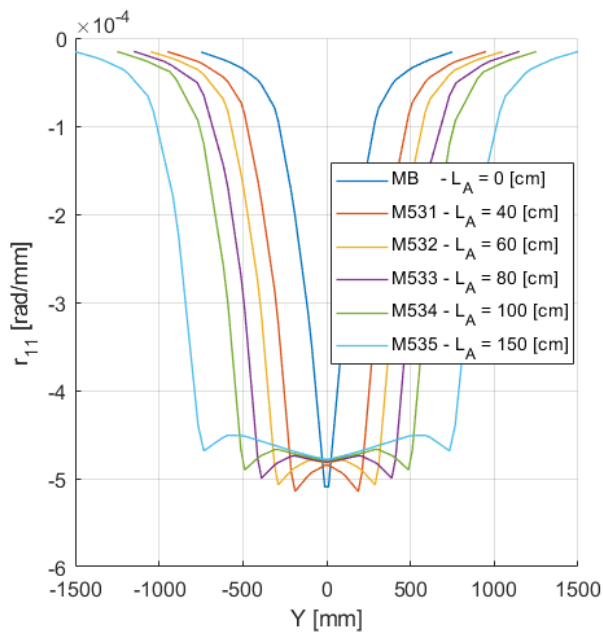


Figura 5.17. Axial transmitido vs Deriva para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.

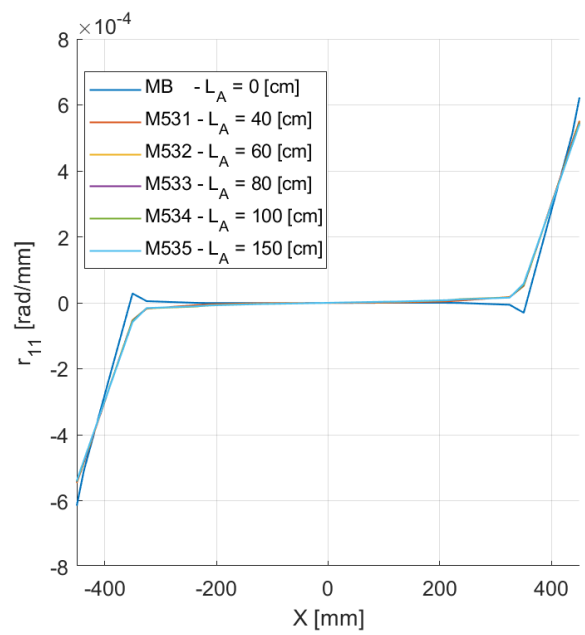
Los gráficos de momento y axial transferidos (Figuras 5.16 y 5.17), igual que en casos anteriores reproduce la tendencia observada en las curvas de fuerza vs deriva. Además, se verifica que el momento se transmite íntegramente a lo largo de la losa, mientras que los esfuerzos axiales muestran variaciones menores que las observadas en el modelo base, exceptuando el caso de M535 ($L_A=150$ [cm]), donde se observa una variación de hasta 36 [kN].

Estos resultados muestran un comportamiento similar al observado en el subcapítulo 5.2, donde la rigidez es mayor a medida que aumenta la longitud del ala de los muros hasta derivas cercanas al 0.2%, posterior a ello se muestra una redistribución de esfuerzos que varía la pendiente de la curva, pero que, a diferencia del caso anterior, no resulta ser suficiente para invertir la tendencia, es decir, para todos los porcentajes de deriva graficados, a mayor longitud de ala, mayor capacidad de transmisión de esfuerzos del sistema, no presentándose pérdidas importantes de ductilidad. Para estudiar este efecto se han graficados las distribuciones de rotación r_{11} y momento m_{11} en direcciones X e Y en la Figura 5.18, para una deriva del 0.5%.

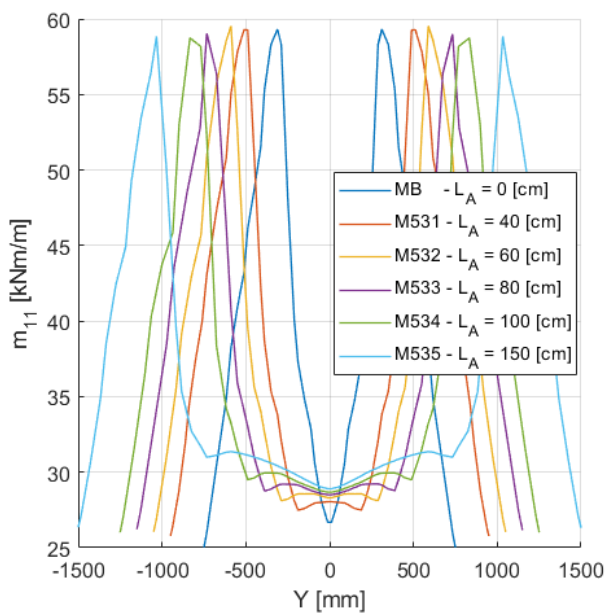
Se observa en la Figura 5.18.a que la rotación se concentra en los elementos conectados directamente al borde del ala del muro, mientras que, desde los extremos de éste, hasta los límites de la losa, la rotación tiende a disminuir reproduciendo la tendencia del modelo base. En dirección X, estas deformaciones se concentran igualmente en de la sección de borde y tienden a disminuir rápidamente hacia el centro de la losa (Figura 5.18.b), tal como se describió para sistemas de muros T con L_T constante.



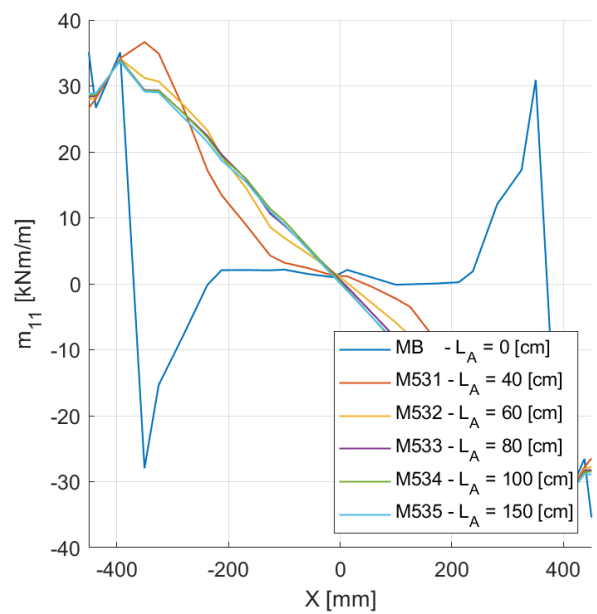
(a) r_{11} vs Y



(b) r_{11} vs X



(c) m_{11} vs Y



(d) m_{11} vs X

Figura 5.18. Distribución de esfuerzos y deformaciones para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.

La distribución de momento (Figura 5.18.c) muestra que el máximo momento y el momento de fluencia de la losa se mantiene cercano a los valores alcanzados por el modelo base. Al igual que en el modelo con ancho de losa fijo, el aumento de L_L no genera mayor rigidez local de los elementos, sino una mayor sección de momentos concentrados, tales que el momento m_{11} integrado en el ancho total de la losa resulta ser mayor. Aun en más, como el

ancho de losa libre se mantiene fijo, el ancho total de la losa aumenta, de modo que los sistemas con grandes longitudes de ala pueden redistribuir los esfuerzos a los elementos contiguos una vez que alcanzan su máxima capacidad, por lo que, desde la posición de mayor momento hasta los límites laterales de la losa, se reproduce el mismo efecto independiente de la longitud del ala. En consecuencia, este aumento en el ancho de la losa aumenta el número de elementos capaces de distribuir esfuerzos, provocando un aumento del momento neto transmitido que evita la pérdida de ductilidad observada en casos con L_T constante.

Además, como la distribución de rotación es igual a lo largo de L_L para todos los modelos, la propagación de momento es también la misma, de forma que el elemento extremo alcanza el momento de fluencia al mismo tiempo para todos los casos provocando la fluencia del sistema al mismo porcentaje de deriva, tal como se aprecia en la Figura 5.15.

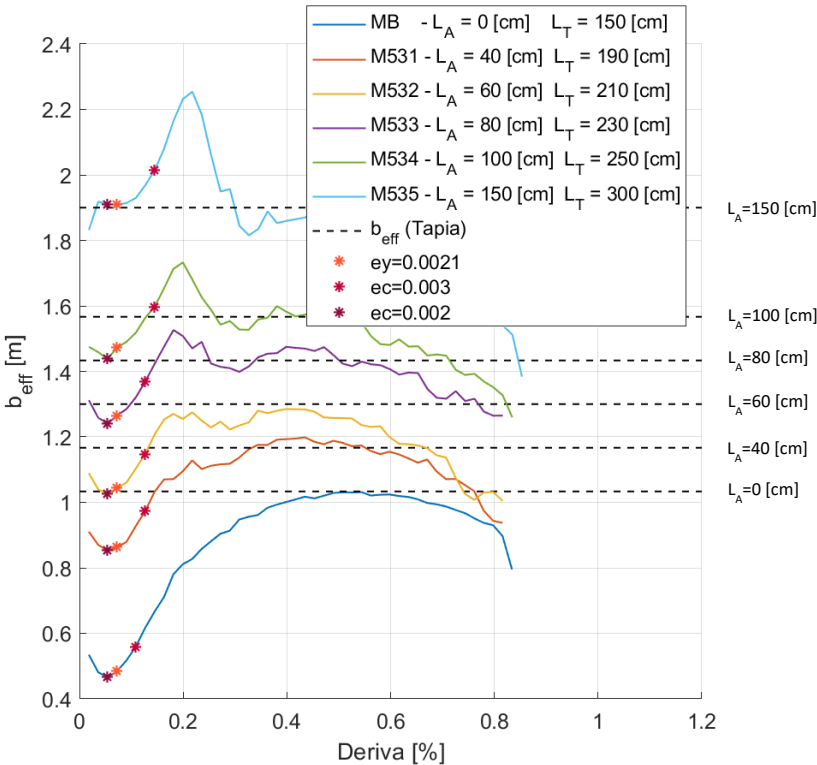


Figura 5.19. Ancho efectivo vs Deriva para modelos para sistemas de muros T con distinta longitud de ala y L_L fijo.

Respecto al ancho efectivo, se observa en la Figura 5.19 como las curvas siguen la misma tendencia desplazando los resultados en el eje de las ordenadas, de modo que, a mayor longitud de ala, mayor ancho efectivo. En este caso se observa que el ancho efectivo propuesto por Tapia (2008) resulta ser una mejor aproximación que en el apartado 5.2. comprobándose que este parámetro depende no solo de la longitud del ala, sino también de la longitud total de la losa, siendo válida la aproximación de Tapia (2008) para longitudes de losa libre superiores a $L_L = 75$ [cm]. Por otra parte, como la fluencia de

los modelos ocurre a grandes derivas, resulta interesante representar la curva considerando la aproximación de $\max(m_{11})$. Para estudiar ello, se han graficado las curvas de ancho efectivo vs deriva para los modelos M533 y M535, donde se observa como la aproximación resulta precisa para niveles de deformación cercanos al comienzo de la pérdida de capacidad del sistema hasta su fluencia total, aproximadamente a una deriva de 0.86%.

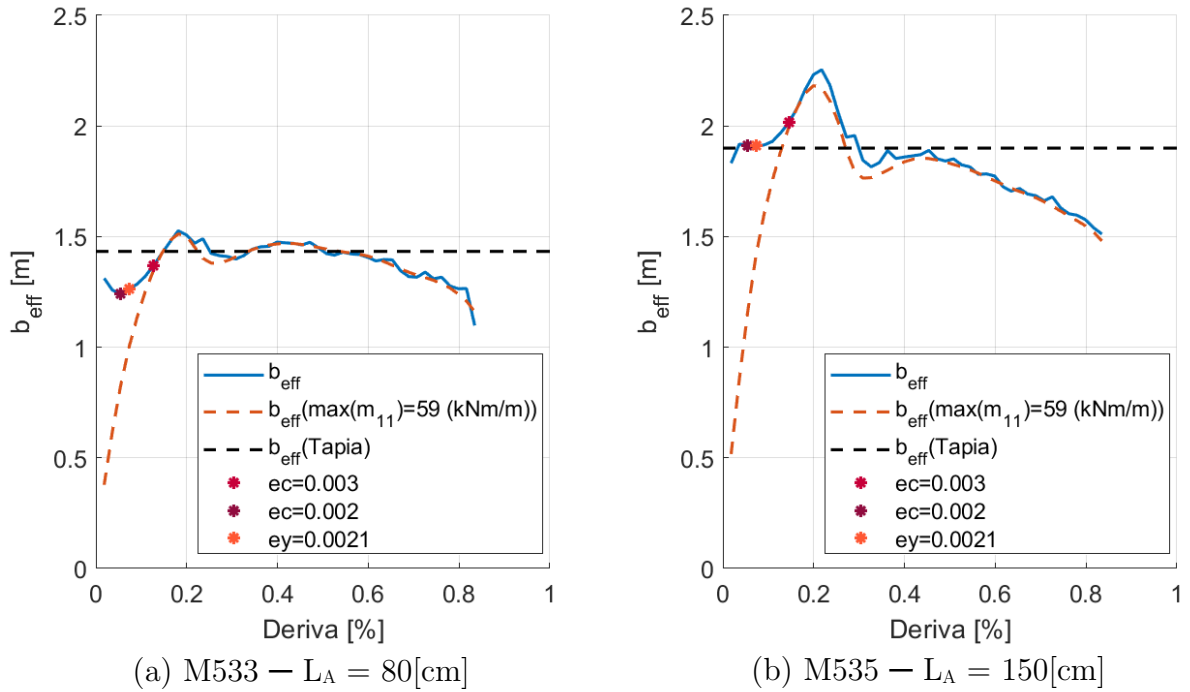


Figura 5.20. Ancho efectivo vs Deriva para modelos

5.4. Estudio de variables combinadas

A continuación, la Tabla 5.4, resume los casos de estudio del presente subcapítulo. En este apartado se estudiarán 4 casos de variables combinadas en relación con casos definidos en los subcapítulos anteriores, con el fin de estudiar los efectos del aumento de cuantía longitudinal en sistemas de muros T con longitudes L_T y L_L constantes.

Para estudiar el comportamiento del sistema global se graficó la relación Fuerza vs Deriva de cada uno de los casos de la Tabla 5.4 en la Figura 5.21, en la cual se observa que, al igual que en todos los casos previos, la primera fractura del hormigón ocurre en derivas del orden de un 0.02%. Al comparar el comportamiento de los sistemas con armadura $\phi 10@15$ y $\phi 12@10$ para todas las geometrías estudiadas, se observa que, en todos los casos, el aumento de cuantía longitudinal aumenta la rigidez, capacidad global y deriva de fluencia del sistema,

Tabla 5.4. Casos de estudio con variables combinadas.

Etiqueta Caso	Armadura Longitudinal	Cuantía Longitudinal	Longitud del Ala [cm]	Largo de Pasillo [cm]
MB	$\phi 10@15$	0.0035	0	150
M523	$\phi 10@15$	0.0035	80	150
M525	$\phi 10@15$	0.0035	150	150
M533	$\phi 10@15$	0.0035	80	230
M535	$\phi 10@15$	0.0035	150	300
M513	$\phi 12@10$	0.0075	0	150
M541	$\phi 12@10$	0.0075	80	150
M542	$\phi 12@10$	0.0075	150	150
M543	$\phi 12@10$	0.0075	80	230
M544	$\phi 12@10$	0.0075	150	300

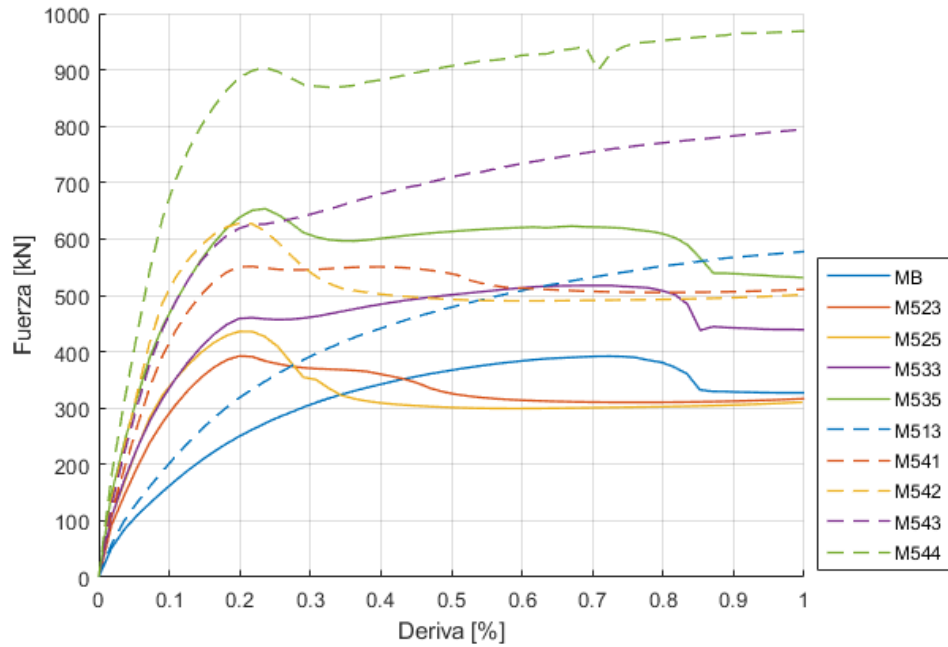


Figura 5.21. Respuesta Global para sistemas con variables combinadas.

pero mantiene constante los porcentajes de deriva donde ocurren cambios de pendiente, los que se corresponden con los puntos de máxima capacidad de transmisión de momento de la losa, como se muestra en la Figura 5.22. Los gráficos de momento y carga axial transferidos, muestran que el momento es transferido íntegramente en todos los casos, mientras que el esfuerzo axial resulta en variaciones de igual orden entre modelos de igual geometría y distinta cuantía longitudinal, por lo que el desacoplamiento no depende de la cuantía del sistema.

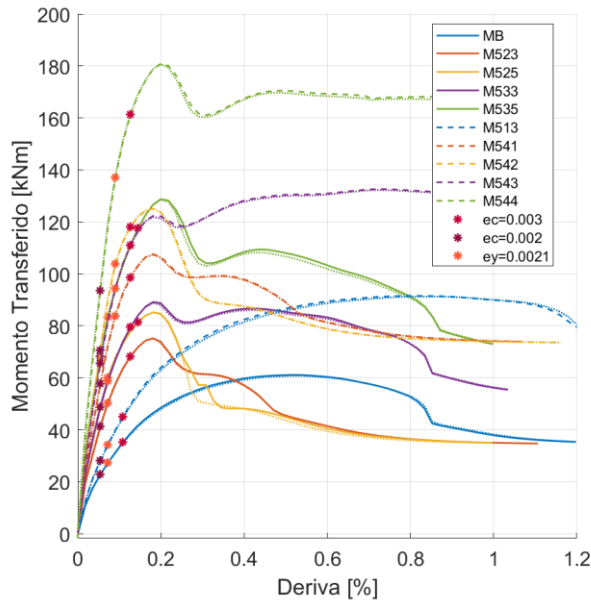


Figura 5.22. Momento transferido vs Deriva para estudio de variables combinadas.

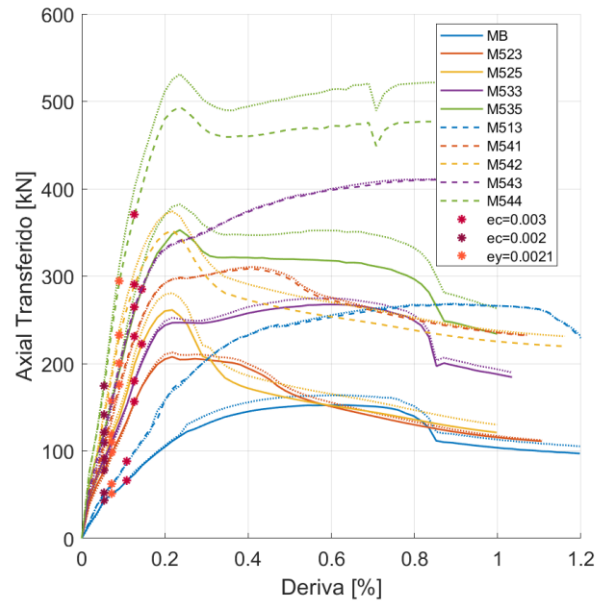
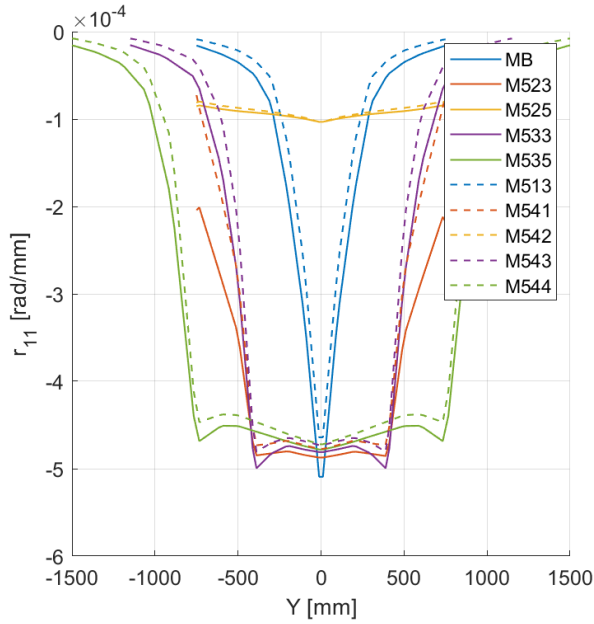


Figura 5.23. Axial transferido vs Deriva estudio de variables combinadas.

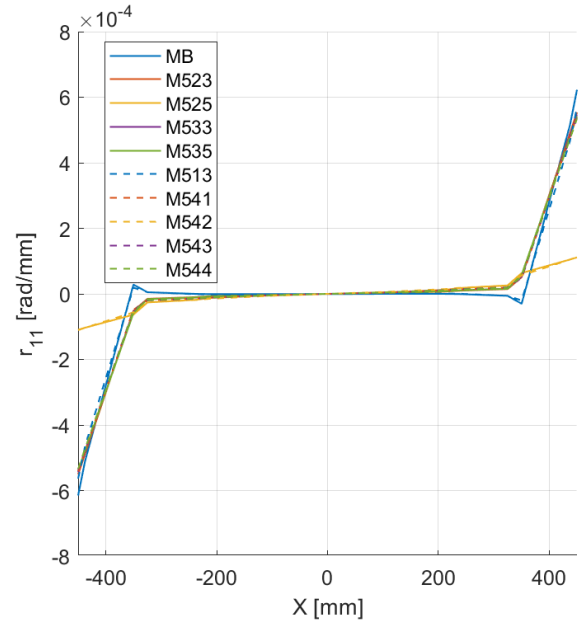
Se aprecia en los resultados de la distribución de esfuerzos y deformaciones, que el aumento de cuantía (independiente de la geometría de los muros) retrasa la rotación debido al aumento de rigidez del material, tal como se verificó en el apartado 5.1. (Figura 5.24.a), mientras se mantienen constantes las tendencias observadas en los apartados 5.2 y 5.3., respecto a la rotación de los elementos conectados al muro y la propagación de deformación desde el borde del ala hasta los límites de la losa, la que decrece rápidamente. Por otra parte, el momento máximo y momento de fluencia (Figura 5.24.c) aumentan con el aumento de cuantía longitudinal hasta el mismo nivel, independiente de la geometría de los muros y el ancho de la losa, manteniendo la tendencia en distribución de los modelos originales con armadura $\phi 10@15$. Así, las variaciones observadas en el apartado 5.1, resultan ser directamente aplicables a las distribuciones características observadas en los apartados 5.2 y 5.3.

Para verificar las observaciones anteriores se muestran en la Figura 5.25 las relaciones m_{11} vs r_{11} (según fue indicado en el apartado 4.3.3.), para todos los casos registrados en la Tabla 5.4. En estas se observa que la variación en el momento máximo alcanzado por los elementos de borde observado en el Modelo Base se mantiene al aumentar la cuantía longitudinal, pero disminuye al agregar el elemento de muro transversal. De este modo, el momento máximo y el momento de fluencia para todos modelos con armadura longitudinal $\phi 10@15$ se mantienen en torno a los 59 [kNm/m] y 23 [kNm/m] respectivamente, mientras que estos valores aumentan hasta los 95 [kNm/m] y 55 [kNm/m], para el caso con armadura $\phi 12@10$, tal como se muestra en la Figura 5.24.c., lo que es consistente con las observaciones

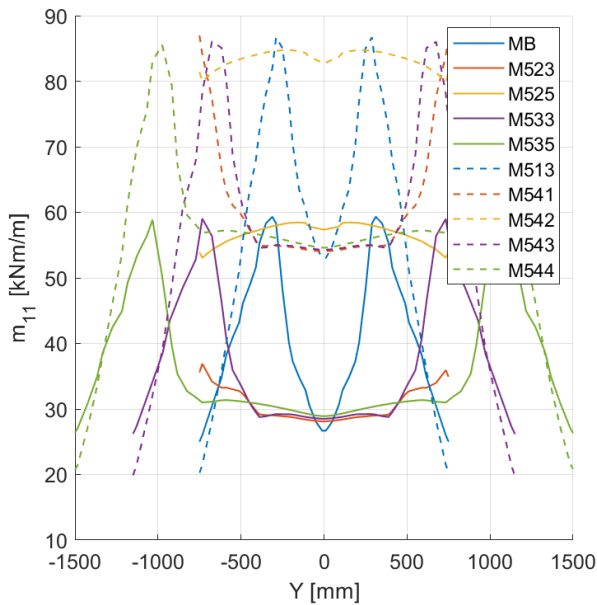
realizadas en el subcapítulo 5.2, respecto a que el aumento de cuantía longitudinal aumenta la capacidad de transmisión de momento a nivel de elementos; capacidad que no se ve afectada por la variación de la geometría de losa y muros.



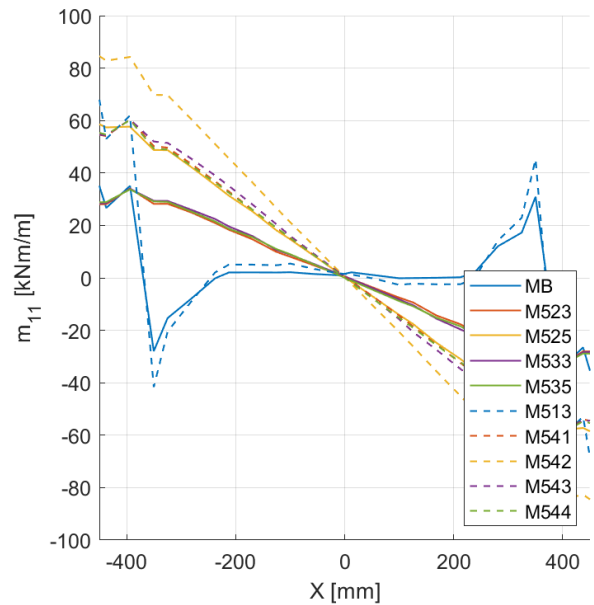
(a) r_{11} vs Y



(b) r_{11} vs X



(c) m_{11} vs Y



(d) m_{11} vs X

Figura 5.24. Distribución de esfuerzos y deformaciones para estudio de variables combinadas.

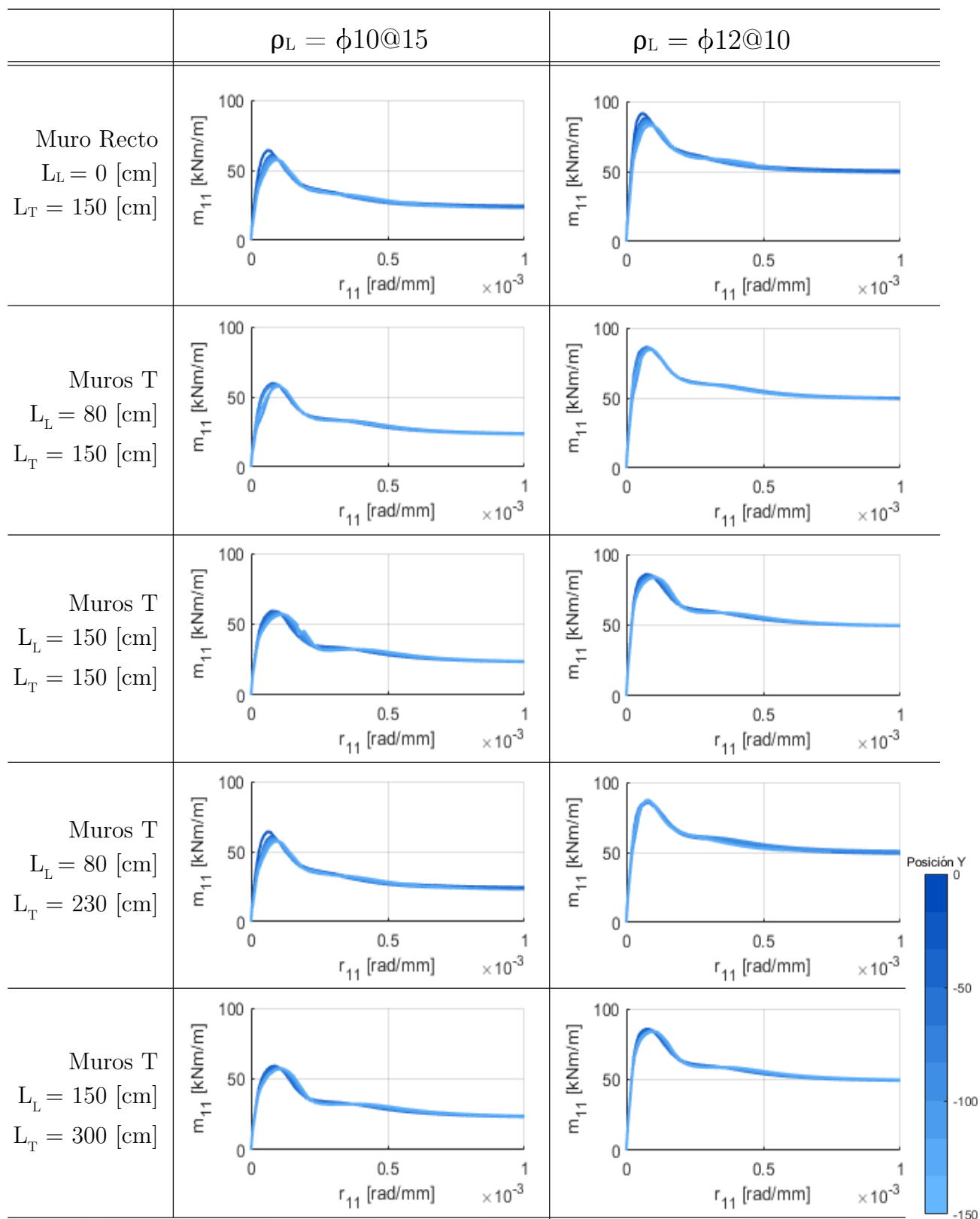


Figura 5.25. m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde estudiados, considerando los Modelos tabulados en la Tabla 5.4.

Finalmente, respecto al ancho efectivo, el aumento en cuantía longitudinal no aumenta significativamente el máximo ancho efectivo previo a la fluencia, de modo que las observaciones realizadas en los apartados 5.2 y 5.3 son aplicables independiente de esta cuantía. Como se observa en la Figura 5.27, para un mismo ancho L_A y cuantía $\phi 12@10$, las aproximaciones del $\max(m_{11})$ y Tapia (2008), resultan más precisas para $L_L \geq 75$ [cm] (M543).

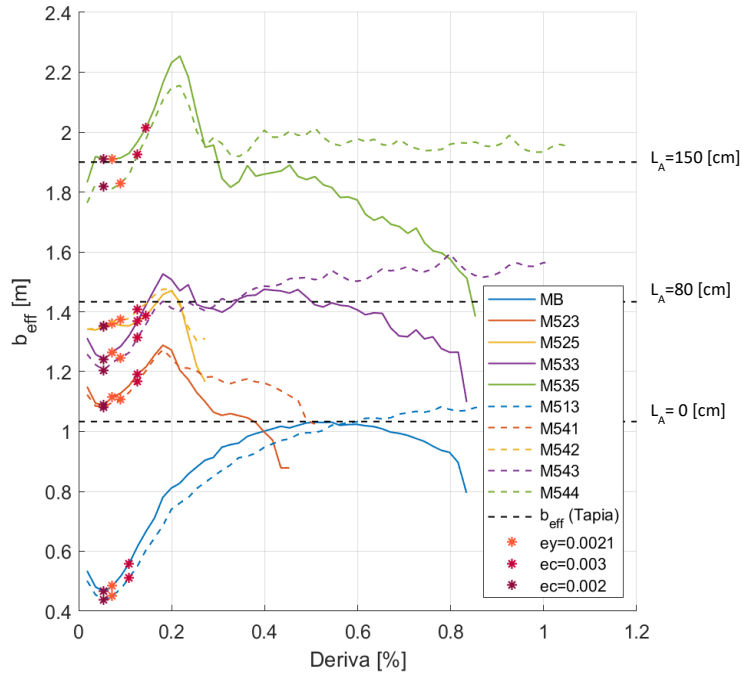


Figura 5.26. Ancho efectivo vs Deriva para modelos para para estudio de variables combinadas.

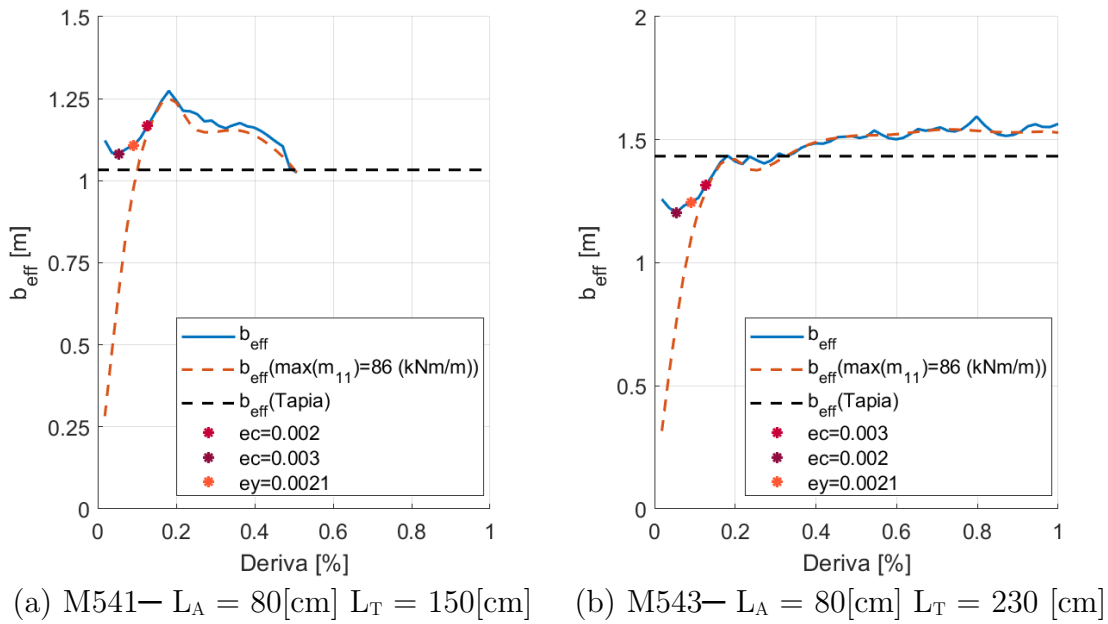


Figura 5.27. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M541 y M543.

Capítulo 6 – Estudio paramétrico de Modelos con Fibra

A lo largo del capítulo se estudiará el comportamiento de sistemas de muros acoplados con hormigón armado reforzado con fibras de PVA. Para este estudio paramétrico fueron considerados los modelos constitutivos de PVA-FRC definidos en el capítulo 3.3.1. Con ello, se estudiarán modelo con mezclas de arena fina y arena gruesa con 0.62% y 1.23% de fibras, en sistemas con muros Rectos y Muros T.

En cada uno de los subcapítulos siguientes se tabulan los valores de las variables junto a la etiqueta del modelo correspondiente, se han considerado para esto, los modelos previamente estudiados, correspondientes a longitudes de ala 0 [cm] (muros rectos) y 80 [cm] (con L_T y L_L constantes) con armadura longitudinal $\phi 10@15$. Para eliminar del estudio el efecto de la variación en la resistencia máxima del concreto debido a la incorporación de fibra, se ha igualado en los 3 casos (0.00%, 0.62% y 1.23%) el valor de f'_c , manteniendo el resto de los parámetros que definen el comportamiento del material (Tablas 3.6 y 3.7).

6.1. Modelos con Mezcla de PVA-FRC con Arena Fina

A continuación, se presenta el estudio realizado para mezclas con arena fina, considerando un valor de $f'_c = 19.22$ [MPa] para losas. Los casos de estudio se resumen en la Tabla 6.1, mientras que los resultados de las curvas fuerza vs deriva del sistema se muestran en la Figura 6.1. Se observa en los resultados de ésta, que la capacidad de carga

Tabla 6.1. Casos de estudio para hormigones PVA-FRC con Arena Fina.

Etiqueta Caso	Armadura Longitudinal	Cuantía Longitudinal	Longitud del Ala [cm]	Largo de Pasillo [cm]	Árido Máximo [mm]	Volumen de Fibra [%]
M611	$\phi 10@15$	0.0035	0	150	0.475	0.00
M612	$\phi 10@15$	0.0035	0	150	0.475	0.62
M613	$\phi 10@15$	0.0035	0	150	0.475	1.23
M614	$\phi 10@15$	0.0035	80	150	0.475	0.00
M615	$\phi 10@15$	0.0035	80	150	0.475	0.62
M616	$\phi 10@15$	0.0035	80	150	0.475	1.23
M617	$\phi 10@15$	0.0035	80	230	0.475	0.00
M618	$\phi 10@15$	0.0035	80	230	0.475	0.62
M619	$\phi 10@15$	0.0035	80	230	0.475	1.23

y deriva de fluencia del sistema aumentan directamente con la adición de fibras (para las tres geometrías estudiadas), de modo tal que, a mayor porcentaje de fibra, mayor es la carga máxima y mayor la deriva de fluencia. Sin embargo, aun cuando se observa mayor flexibilidad para ambos porcentajes respecto al modelo con 0.00% de fibra, esta propiedad no mantiene una relación directa, mostrando mayor flexibilidad para un 0.62% que para un 1.23% de incorporación de fibra.

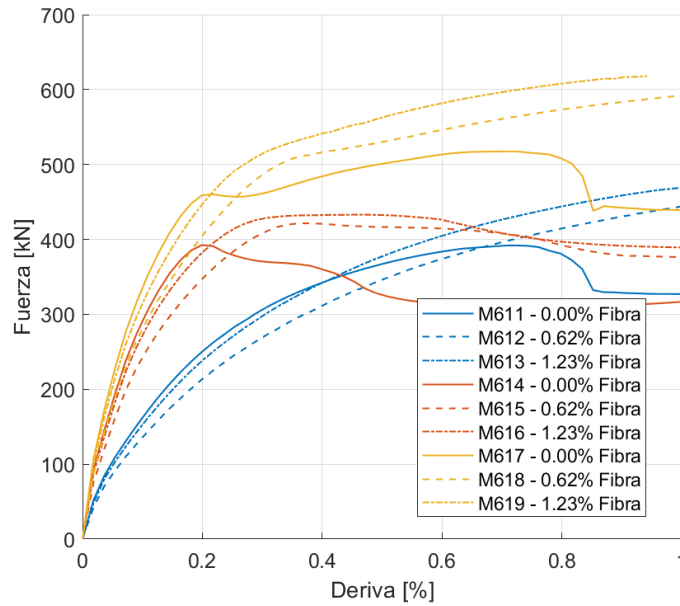


Figura 6.1. Respuesta Global de sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.

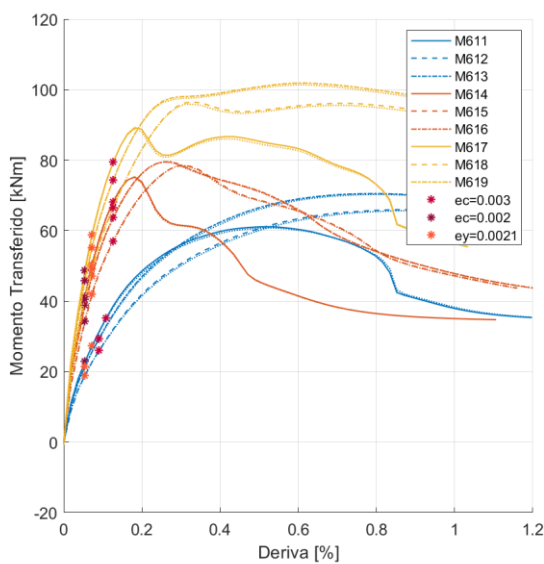


Figura 6.2. Momento transmitido vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.

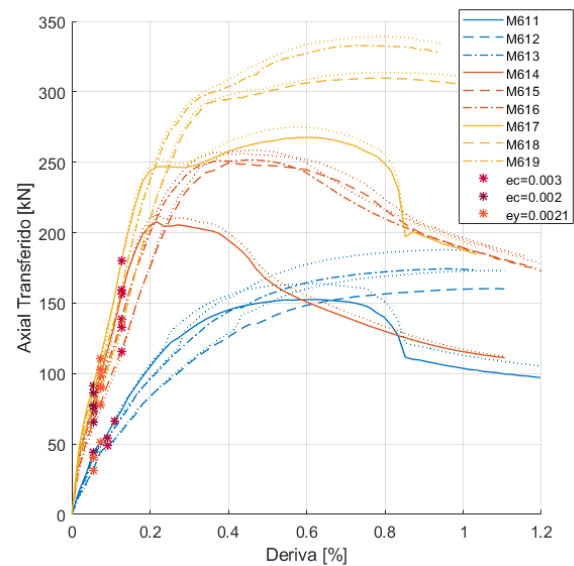


Figura 6.3. Axial transmitido vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.

Por otra parte, la Figura 6.2 muestra que el momento medido en ambos bordes de la losa de acoplamiento resulta ser igual en todos los casos de estudio, demostrando el equilibrio de los sistemas, mientras que la Figura 6.3 muestra desacoplamientos de magnitudes similares a los obtenidos en los modelos sin fibra, pero que se desarrollan a derivas mayores.

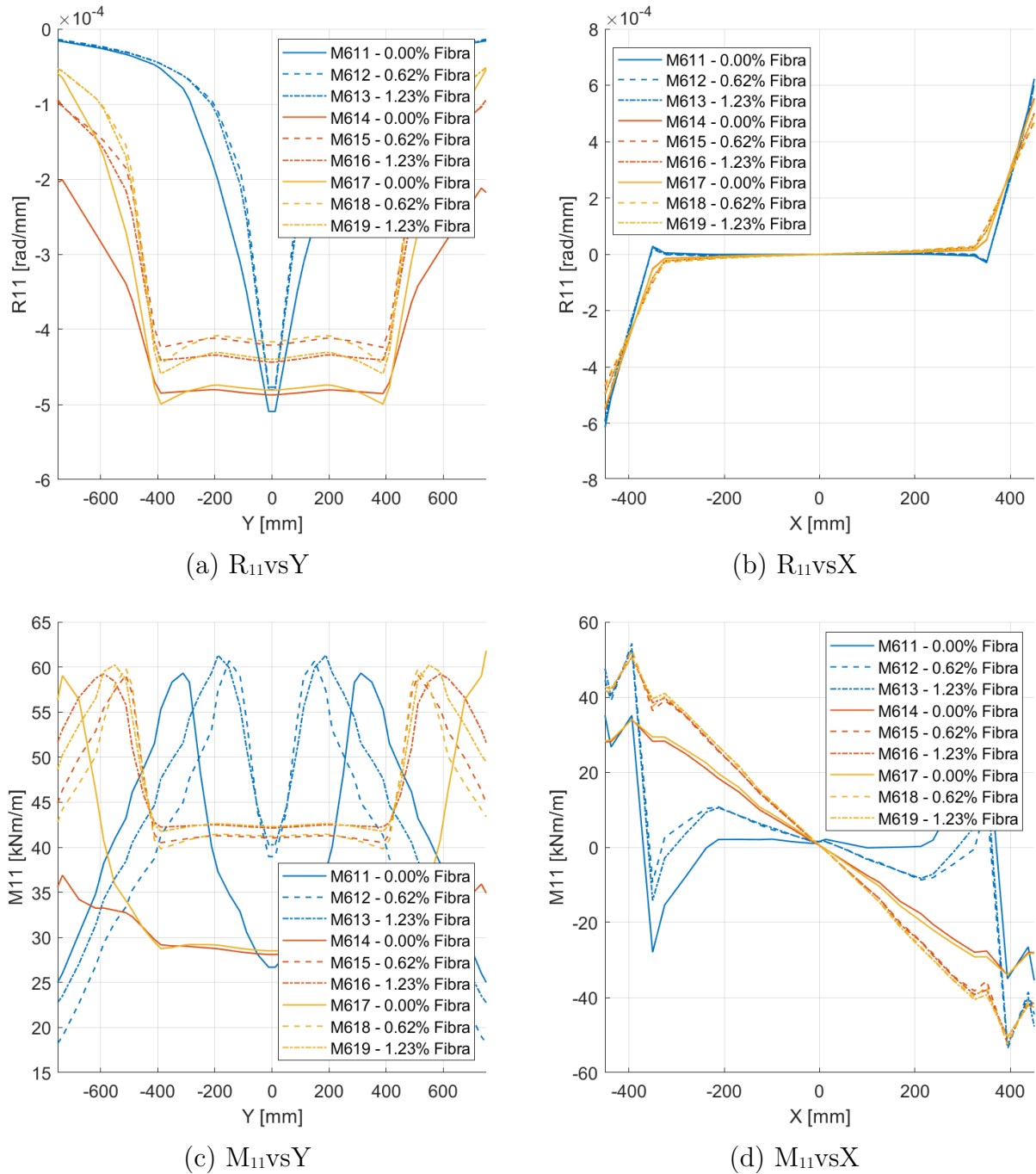


Figura 6.4. Distribución de esfuerzos y deformaciones para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.

Al estudiar en detalle la distribución de esfuerzos en la Figura 6.4, es posible notar que el aumento de fibra reduce la rotación en relación con los modelos sin fibra (Figura 6.4.a). Esta incorporación de fibras modifica las propiedades del material otorgando mayor ductilidad e incrementando la flexibilidad y el momento de fluencia del material compuesto, tal como se observa en la Figura 6.5.. El aumento de ductilidad permite a la losa alcanzar rotaciones mayores sin pérdidas abruptas de capacidad en relación con modelos sin fibra, lo que, junto a la reducción de rotaciones, ralentiza la propagación de esfuerzos laterales desplazando hacia la derecha la deriva de fluencia de la losa y por tanto la del sistema completo, además de aumentar la capacidad máxima de transmisión de esfuerzos.

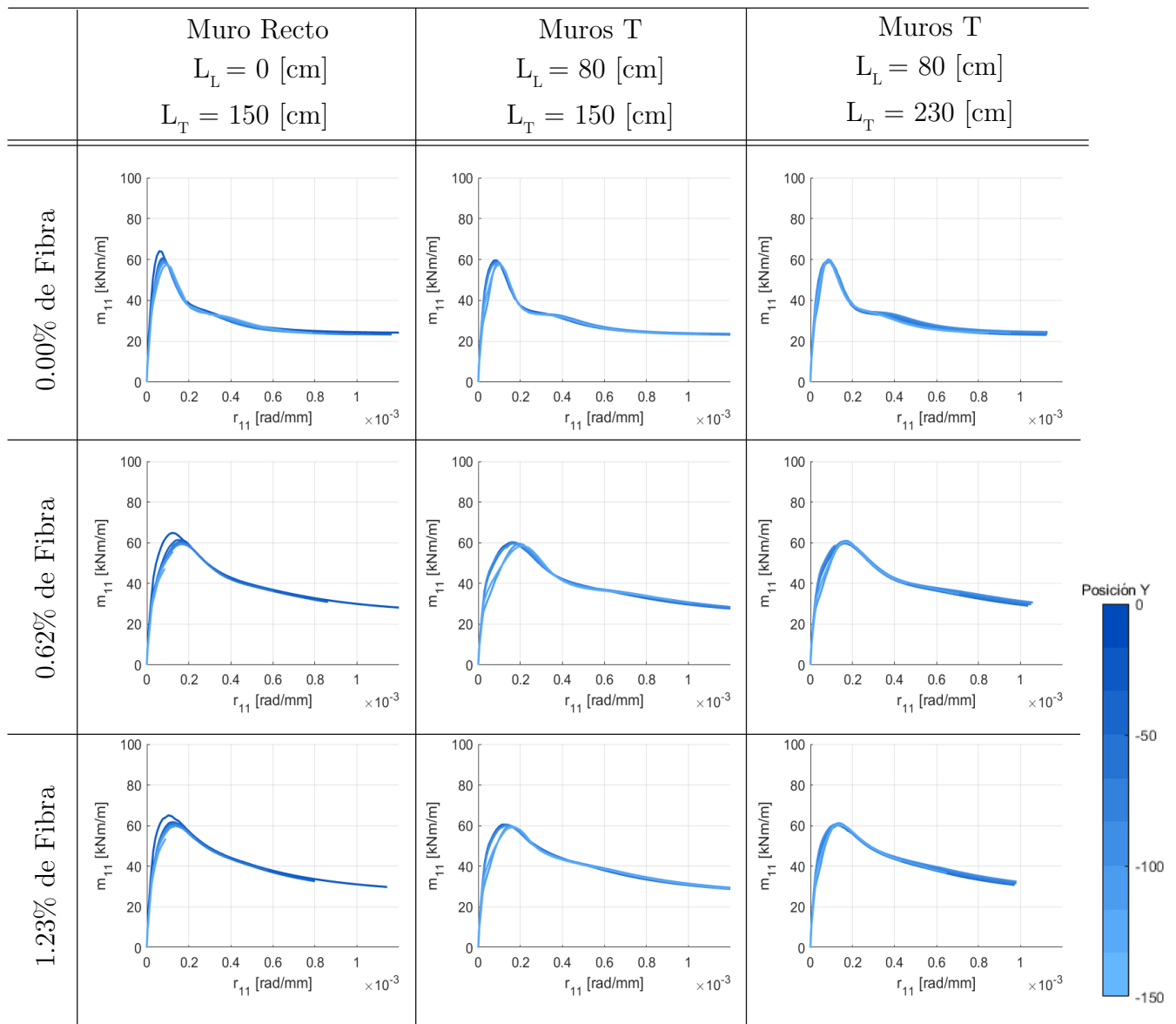


Figura 6.5. Curvas m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde estudiados, considerando los con Mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.

Respecto al ancho efectivo, en general el aumento de fibra permite una mejor distribución de los esfuerzos en la losa, por lo cual el ancho efectivo es mayor que en casos sin fibra, así la aproximación de Tapia (2008) resulta menos precisa en las tres geometrías estudiadas, mientras que la aproximación de $\max(m_{11})$ resulta en valores levemente sobreestimados, con diferencias menores a un 7.6% respecto al ancho efectivo real.

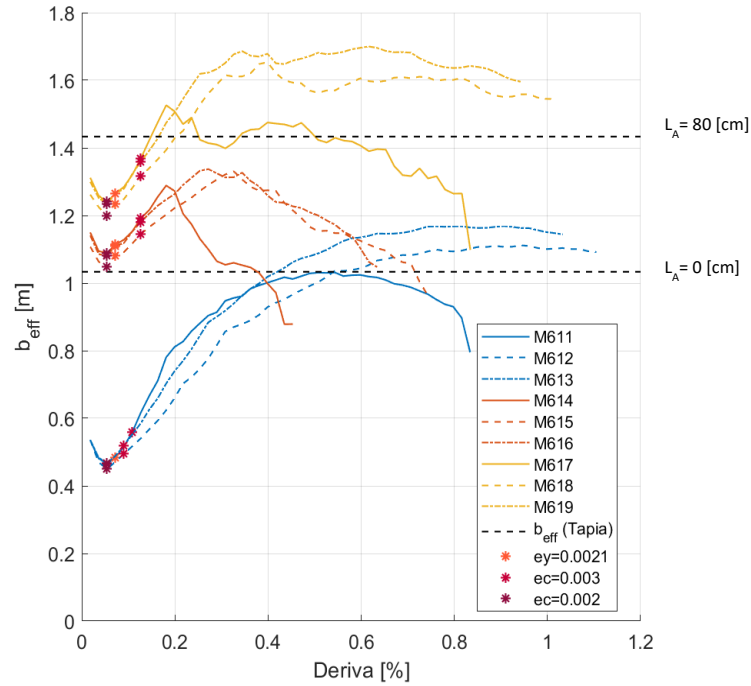


Figura 6.6. Ancho efectivo vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Arena Fina.

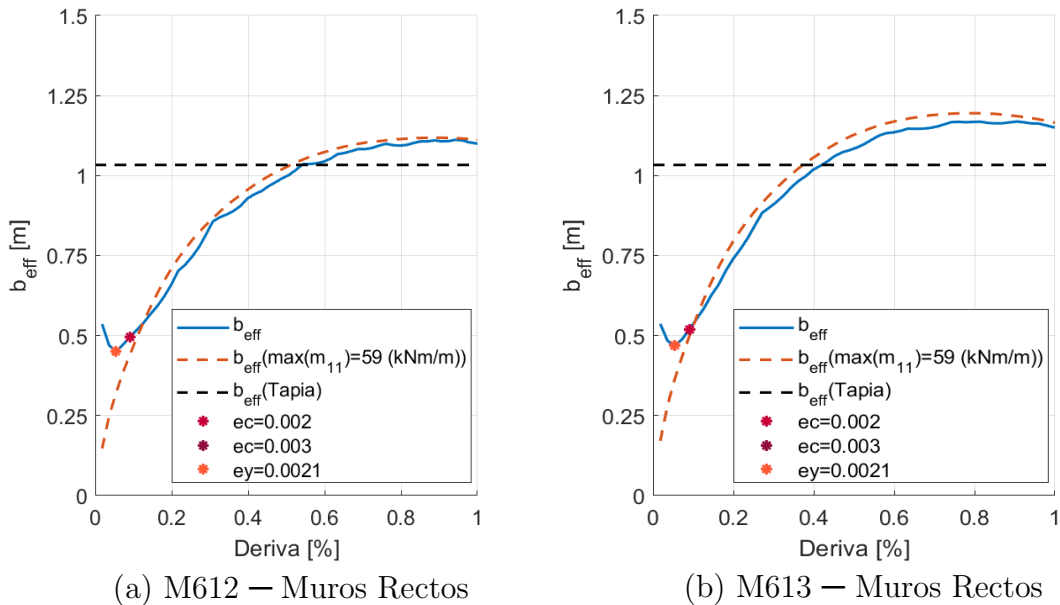


Figura 6.7. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M612 y M613.

6.2. Modelos con Mezcla de PVA-FRC con Grava

El presente subcapítulo registra el estudio realizado para mezclas con grava considerando un valor de $f'_c = 33.31$ [MPa] para losas. Los casos de estudio se muestran en la Tabla 6.2, mientras que los resultados de las curvas fuerza vs deriva del sistema se muestran en la Figura 6.8.

Tabla 6.2. Casos de estudio para hormigones PVA-FRC con Grava.

Etiqueta Caso	Armadura Longitudinal	Cuantía Longitudinal	Longitud del Ala (L_L) [cm]	Ancho de Losa Total (L_T) [cm]	Árido Máximo [mm]	Volumen de Fibra [%]
M621	$\phi 10@15$	0.0035	0	150	12.50	0.00
M622	$\phi 10@15$	0.0035	0	150	12.50	0.62
M623	$\phi 10@15$	0.0035	0	150	12.50	1.23
M624	$\phi 10@15$	0.0035	80	150	12.50	0.00
M625	$\phi 10@15$	0.0035	80	150	12.50	0.62
M626	$\phi 10@15$	0.0035	80	150	12.50	1.23
M627	$\phi 10@15$	0.0035	80	230	12.50	0.00
M628	$\phi 10@15$	0.0035	80	230	12.50	0.62
M629	$\phi 10@15$	0.0035	80	230	12.50	1.23

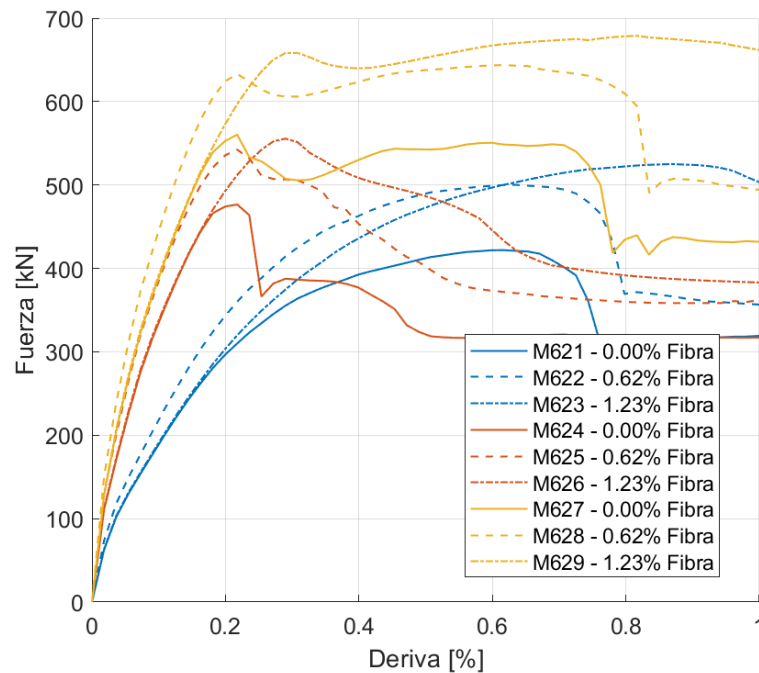


Figura 6.8. Respuesta Global de sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava.

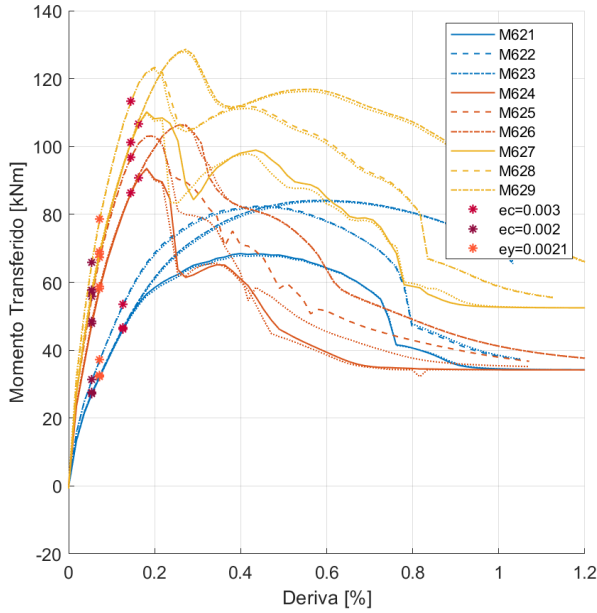


Figura 6.9. Momento transmitido vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava.

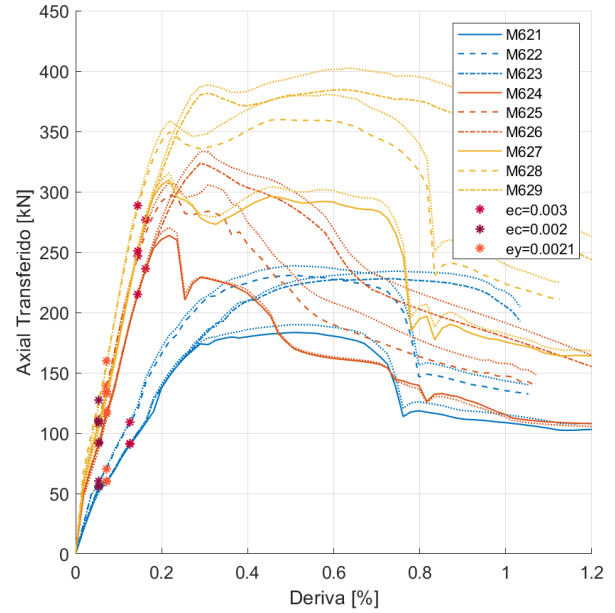
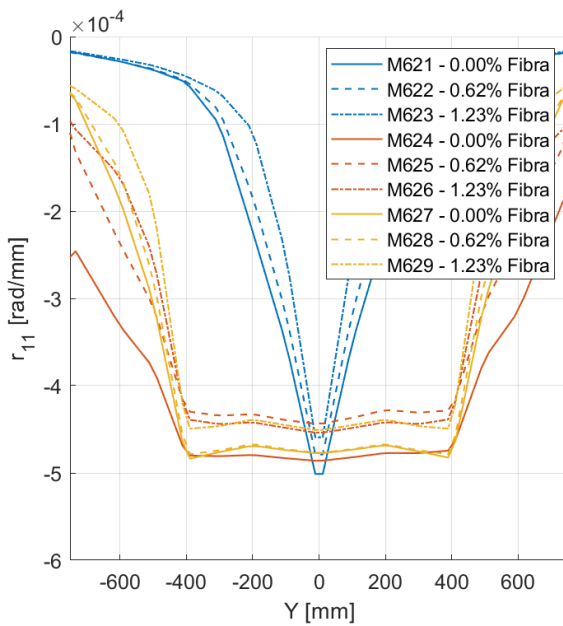


Figura 6.10. Corte transmitido vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava

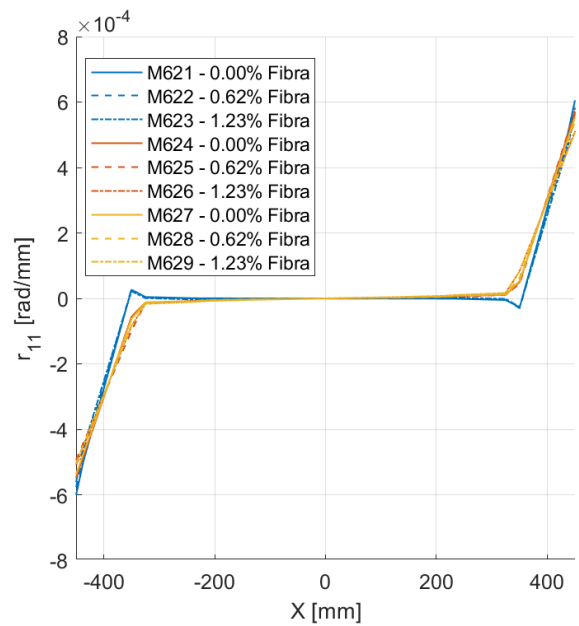
Se observa en estos resultados que, a diferencia de los modelos con arena fina, la incorporación de fibras en un 0.62 % tiende a rigidizar la estructura, al mismo tiempo que aumenta su capacidad máxima y ductilidad, retrasando la fluencia (para las 3 geometrías estudiadas), mientras que la incorporación de un 1.23% de fibra no genera variaciones en la elasticidad del sistema respecto al modelo sin fibra, pero si aumenta la capacidad máxima y ductilidad.

Observando en detalle la capacidad de transmisión de momento de la losa (Figura 6.9) la adición de un 0.62% de fibra aumenta la máxima capacidad de la losa, manteniendo constante la deriva respecto al modelo con 0.00% de fibra, mientras que un 1.23% de fibra no solo aumenta la capacidad, sino, además, aumenta la deriva asociada a este momento.

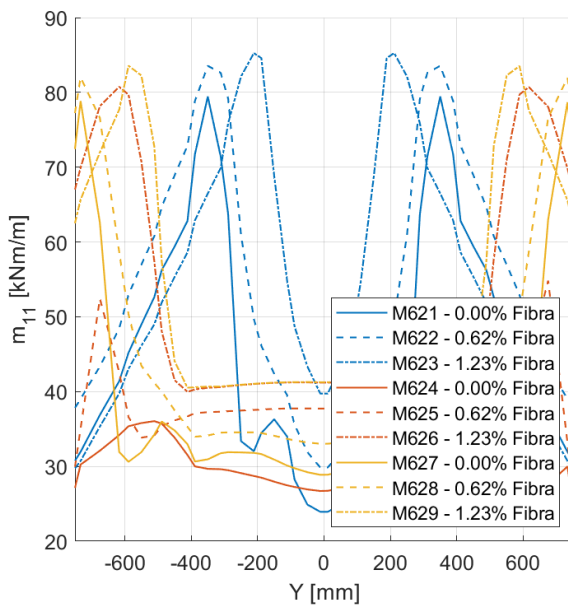
Al estudiar la distribución de esfuerzos y deformación en el eje Y se observa que la incorporación de fibras rigidiza el sistema, dificultando el giro de los elementos (Figura 6.11.a) Así para un 1.23% de deriva los modelos con mayor porcentaje de fibra presentan giros menores que los sistemas con menor porcentaje de fibras, lo que provoca un desfase en la transmisión de momento de los elementos, el cual se expresa como una propagación y alcance de momentos máximo y de fluencia más rápidos en modelos sin fibra, por ejemplo, el modelo M624 (modelo con 80 [cm] de ala y 150 [cm] de ancho de losa) a un 1.23% de deriva sobrepasó su máxima capacidad de momento en todos sus elementos, tendiendo a equilibrarse entorno al momento de fluencia, sin embargo, al aplicar fibras (M625 y M626), los modelos aún conservan capacidad de transmisión de esfuerzos.



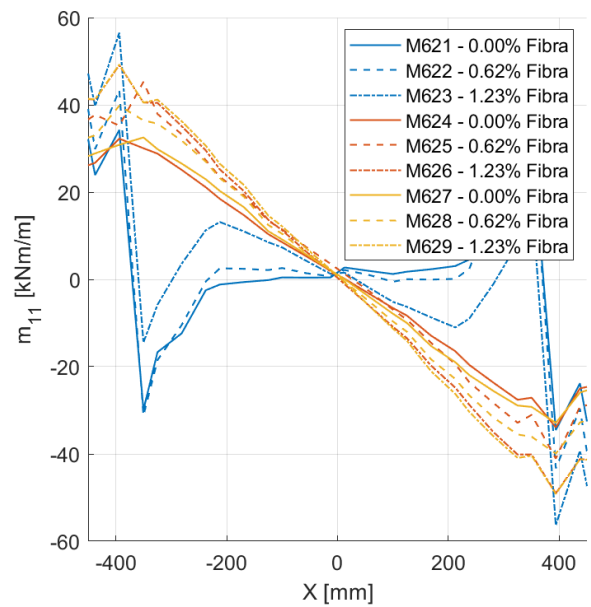
(a) r_{11} vs Y



(b) r_{11} vs X



(c) m_{11} vs Y



(d) m_{11} vs X

Figura 6.11. Distribución de esfuerzos y deformaciones para para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava.

La Figura 6.12 muestra la relación entre el momento m_{11} y la rotación r_{11} de los elementos de borde, considerando geometría y porcentaje de fibra. Se observa que el aumento de fibra tiende a reducir levemente la pendiente post-peak de momento, suavizando la curva. Debido

a esto y al leve aumento de capacidad máxima de los elementos, se retrasa la propagación de esfuerzos en dirección Y, retrasando la fluencia del sistema al mismo tiempo que aumenta el momento neto transmitido y con ello la capacidad del sistema. Se observa que estas variaciones ocurren de igual manera en las tres geometrías estudiadas, por lo que la incorporación de fibras actúa a nivel global independientemente de la geometría de los muros y losa.

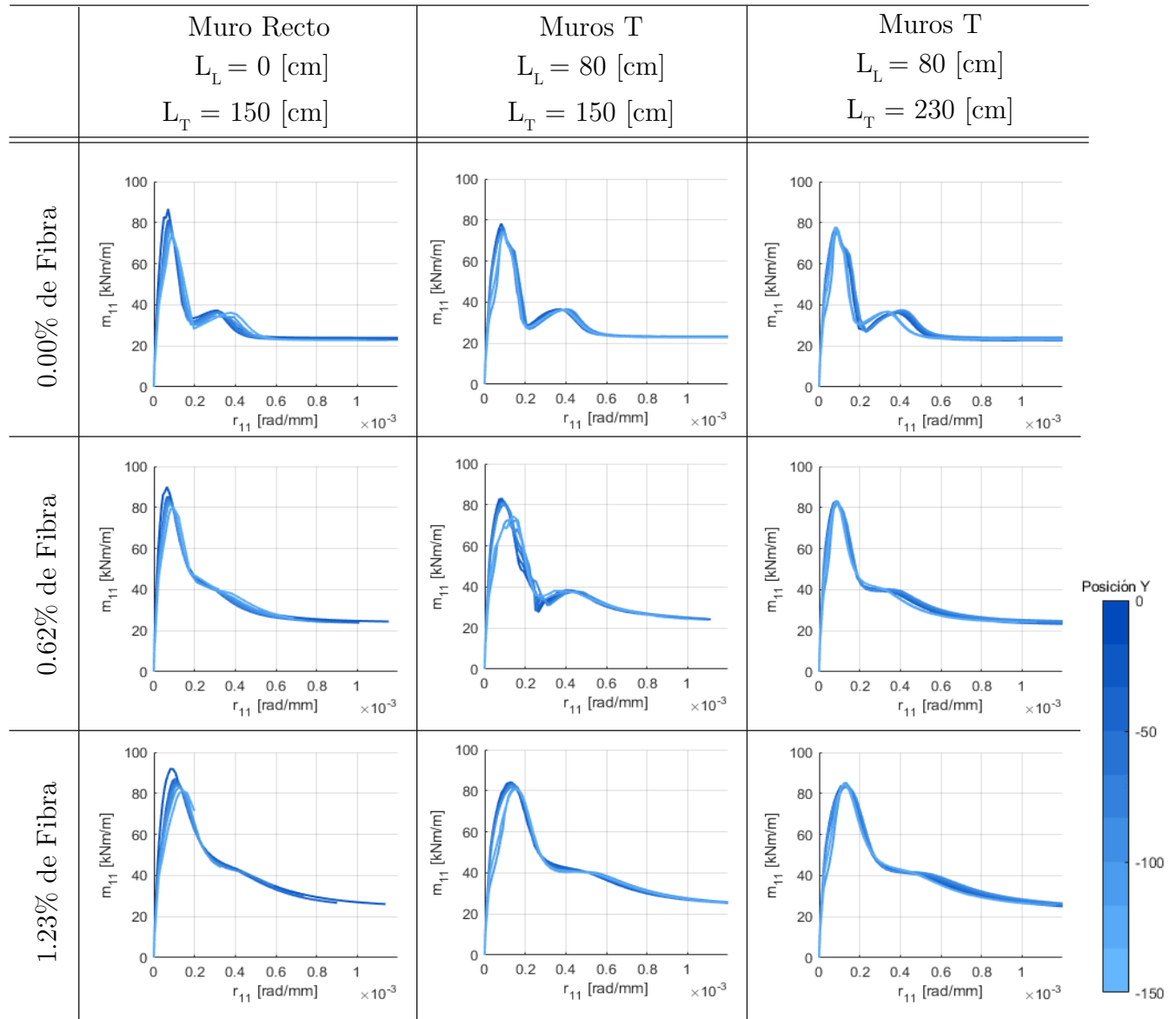


Figura 6.12. Curvas m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde estudiados, considerando los con Mezcla de PVA-FRC con Grava.

Finalmente, las curvas de ancho efectivo tienden a reproducir los efectos observados en mezclas con arenas finas, de modo que la mejor distribución de esfuerzos en la losa aumenta el ancho efectivo máximo en mezclas con incorporaciones de fibra T tomando en cuenta esto y considerando que, según se observa, la aproximación de Tapia (2008) sobreestima el ancho efectivo máximo en mezclas con 0.00% de fibra y muros rectos, esta aproximación resulta con mayor precisión en mezclas con fibra. Por otra parte, la aproximación de $\max(m_{11})$ resulta en valores levemente sobreestimados, con diferencias máximas de un 10% respecto al ancho efectivo real.

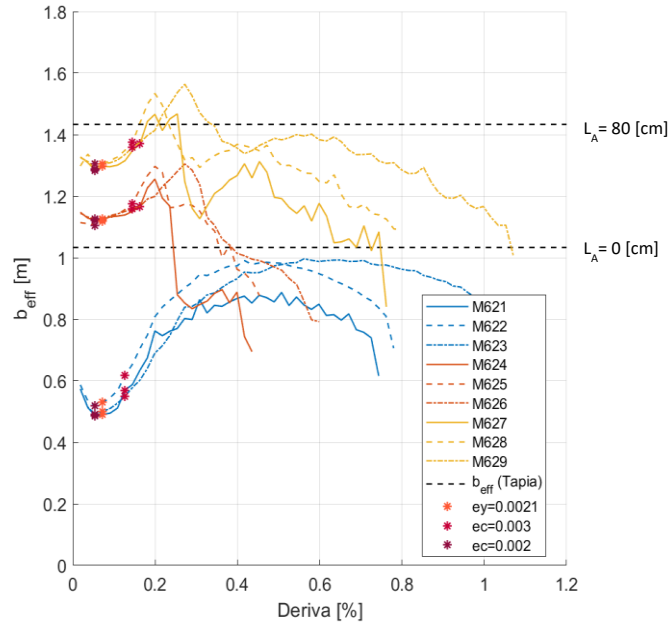


Figura 6.13. Ancho efectivo vs Deriva para sistemas con mezcla de PVA-FRC con Grava.

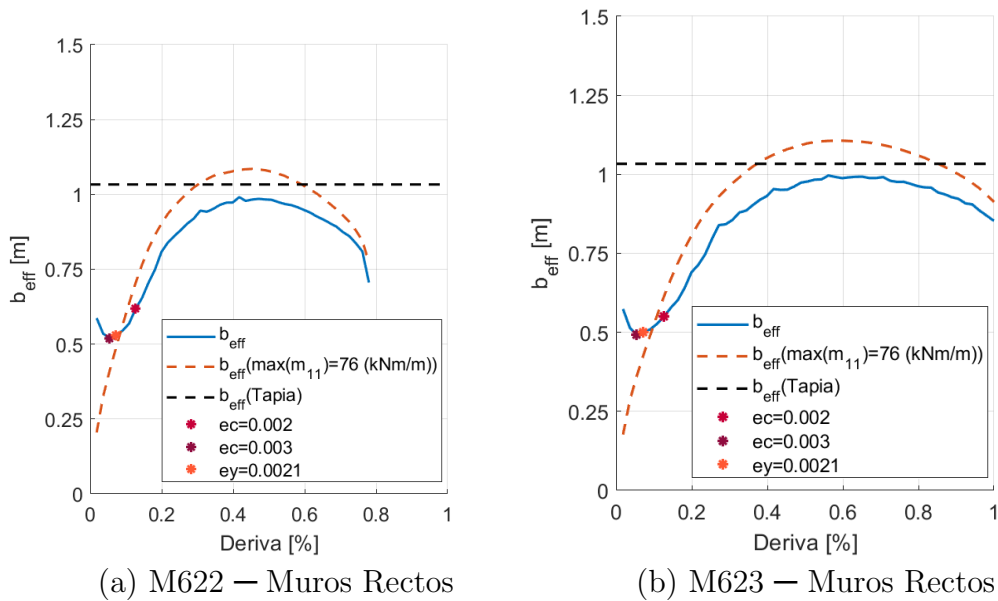


Figura 6.14. Ancho efectivo vs Deriva para modelos M622 y M623.

6.3. Estudio de la propagación de deformaciones y análisis de sensibilidad del modelo constitutivo a tracción

Los resultados de modelos con incorporaciones de fibras de PVA en el elemento de acoplamiento, tanto en mezclas con grava como arena fina, sugieren que el principal aporte de este material es el aumento de ductilidad de elementos en deformaciones no lineales. Este aumento de ductilidad permite alcanzar mayores deformaciones tanto a compresión como a tracción antes de alcanzar la fluencia de la sección transversal completa, además de permitir alcanzar mayores porcentajes de deriva antes de la falla lo que conlleva a la reducción y retraso de la fisuración transversal en el borde de muros, tal como se muestra en la

Figura 6.15 y 6.16, donde se ha graficado la deformación e_{11} de la capa de hormigón más comprimida y traccionada en función de la deriva de techo para el elemento de borde de losa.

Respecto a mezclas con arena fina, en el caso de sistemas de muros T con menos de 75 [cm] de losa libre (L_L) la deformación converge para los tres porcentajes de fibra hasta una deformación unitaria de 0.003 a compresión y 0.008 a tracción a un 0.35% de deriva, punto desde el cual aumenta súbitamente la deformación del modelo sin fibra. Para los modelos de muros rectos y T con 75 [cm] de longitud de losa libre, las respuestas (de los modelos con mismo porcentaje de fibras) son comparables, pues como se explicó previamente, los mecanismos de distribución de esfuerzos y rotaciones en los elementos desconectados del muro es la misma independiente de la longitud del ala del muro. Para estos casos se alcanzan deformaciones de hasta un 0.001 a compresión y 0.002 a tracción antes de la divergencia de las curvas a un 0.55% de deriva.

Superado este punto de divergencia entre curvas con distinto porcentaje de fibras, los modelos sin fibra se deforman súbitamente presentándose como una asíntota de la relación e_{11} vs deriva y que en la práctica sugiere la fractura transversal a alcanzado los extremos de la losa. Como se observa en los gráficos, este efecto se reproduce en los modelos con fibra a mayor porcentaje de deriva, lo que en la práctica permitiría reducir reparaciones por fisuración.

En mezclas con grava se observan respuestas similares, pero con menores retrasos de fisuración medidos en función del porcentaje de deriva, principalmente para incorporaciones de 0.62% de deriva.

Los resultados hasta aquí presentados son respuesta de la variación exclusiva de modelos constitutivos a compresión según fue explicado en el capítulo 3, debido a que los resultados experimentales no fueron suficientes para justificar la variación del modelo a tracción. Con

el fin de respaldar esta decisión se estudia a continuación la respuesta de modelos con grava y 0% de fibra (M621, M624 y M627) con variaciones en el parámetro b del modelo a tracción.

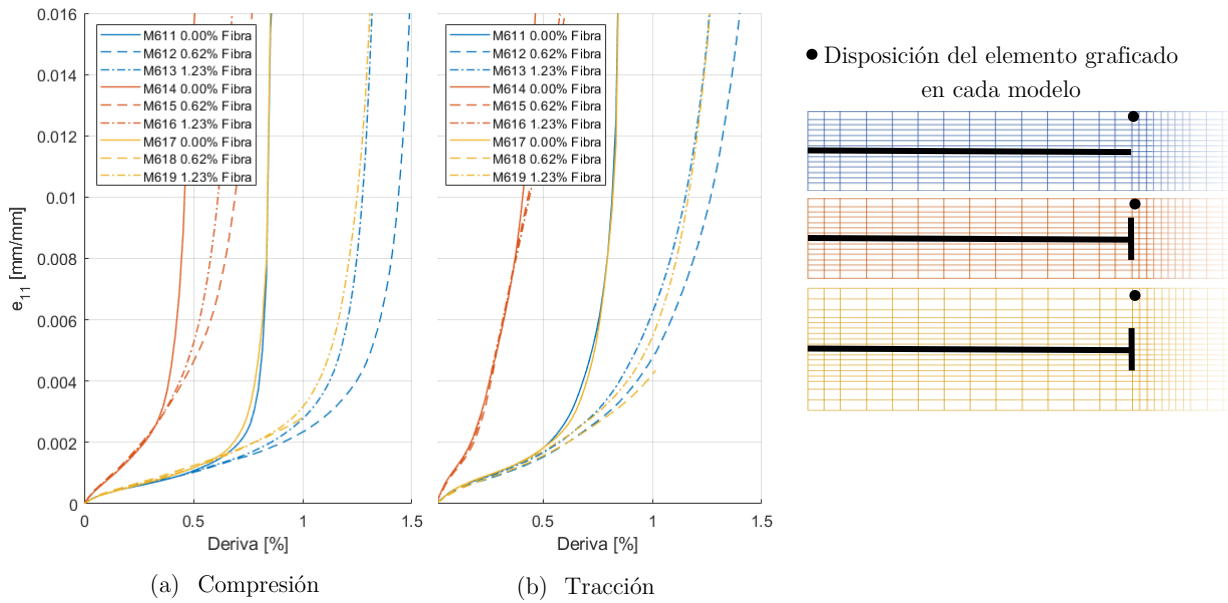


Figura 6.15. Deformación axial e_{11} – (a) Compresión (b) Tracción – vs Deriva, para el elemento extremo de la losa – Arena Fina.

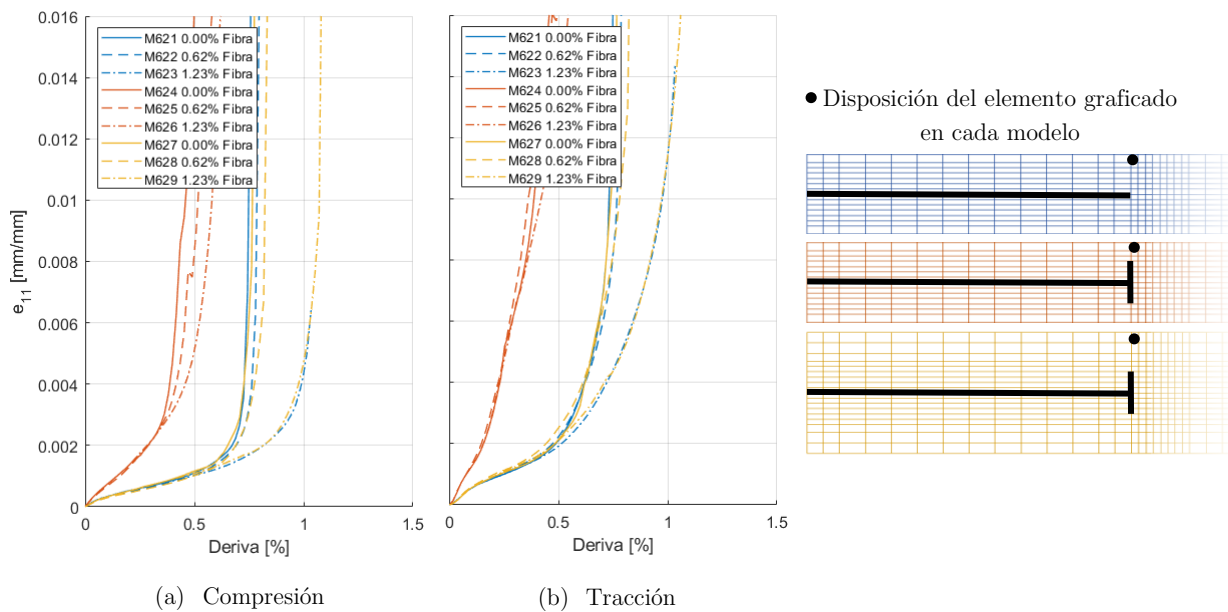


Figura 6.16. Deformación axial e_{11} – (a) Compresión (b) Tracción – vs Deriva, para el elemento extremo de la losa – Grava.

La Figura 6.17 muestra que la respuesta a nivel de sistema global no presenta importantes variaciones en rigidez y capacidad, más aún, en comparación con las variaciones observadas a causa de la variación del modelo a compresión, la modificación del modelo a tracción no resulta en variaciones de la ductilidad del sistema. Estas observaciones se aplican del mismo modo a los gráficos de esfuerzos transferidos.

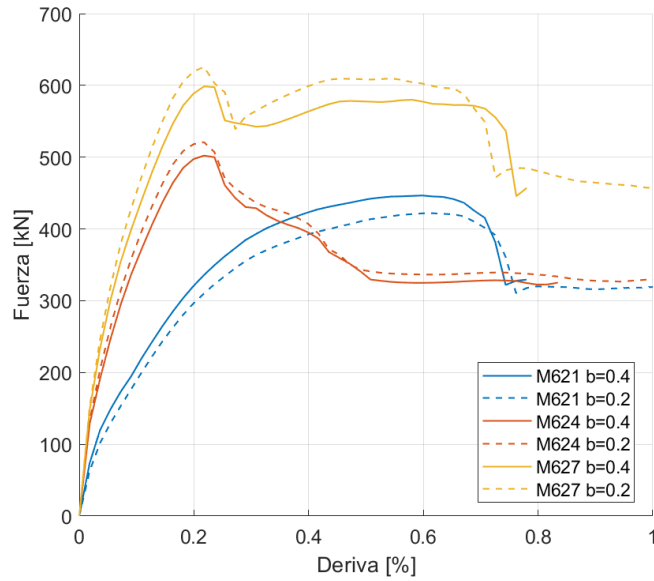


Figura 6.17. Respuesta Global de sistemas con mezclas con grava y variación del parámetro b .

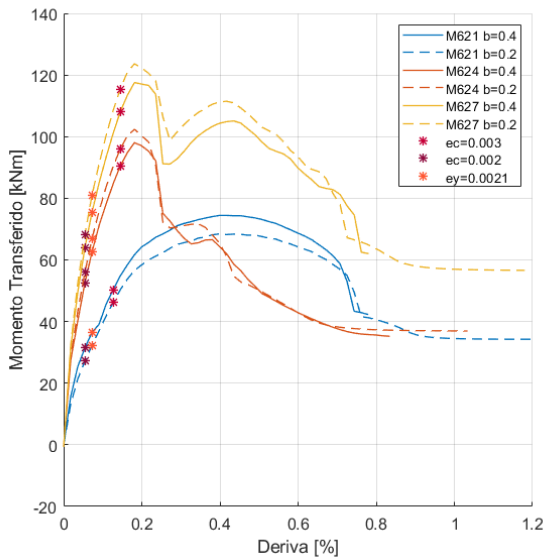


Figura 6.18. Momento transmitido vs Deriva para sistemas con mezclas con grava y variación del parámetro b .

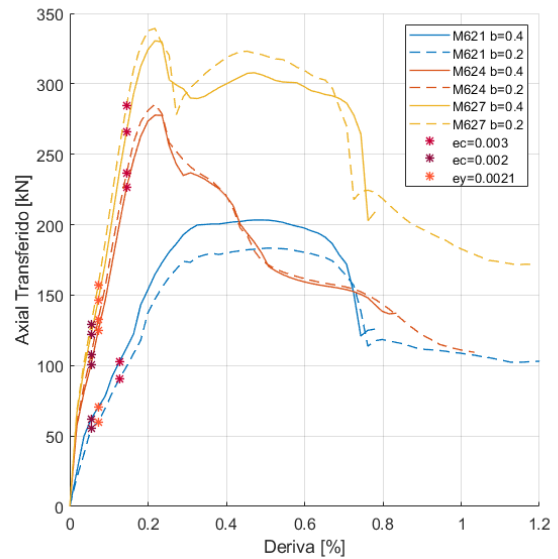
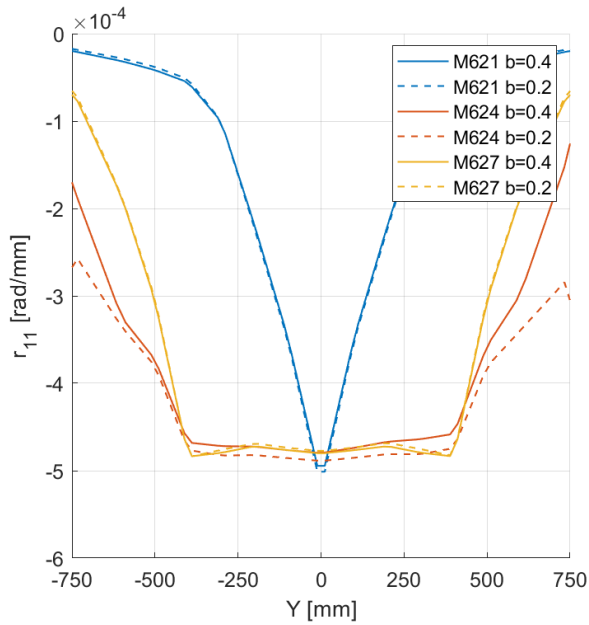
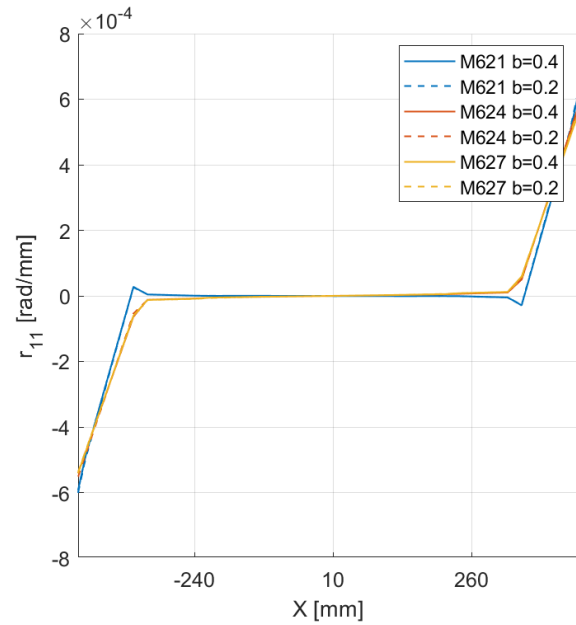


Figura 6.19. Axial transmitido vs Deriva para sistemas con mezclas con grava y variación del parámetro b .

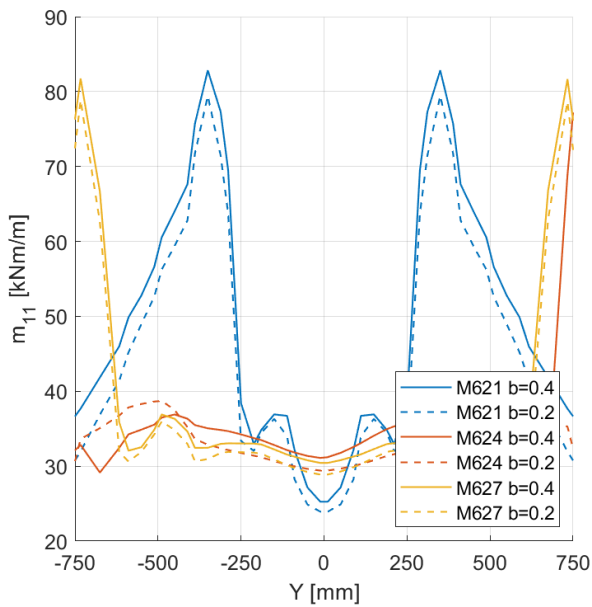
Respecto a la distribución de esfuerzos y deformaciones en la losa, la variación de $b=0.4$ a $b=0.2$ no resulta en variaciones significativas para cualquiera de los tres modelos estudiados. Teniendo en cuenta el análisis de modelos sin fibra, los resultados obtenidos del análisis de modelos de muros rectos y muros T con 80 [cm] de longitud L_A son aplicables al resto de los modelos estudiados.



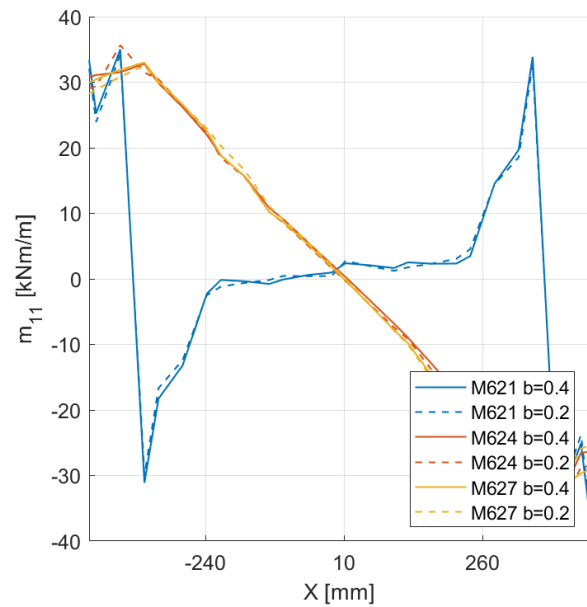
(a) r_{11} vs Y



(b) r_{11} vs X



(c) m_{11} vs Y



(d) m_{11} vs X

Figura 6.20. Distribución de esfuerzos y deformaciones para para sistemas con mezclas con grava y variación del parámetro b .

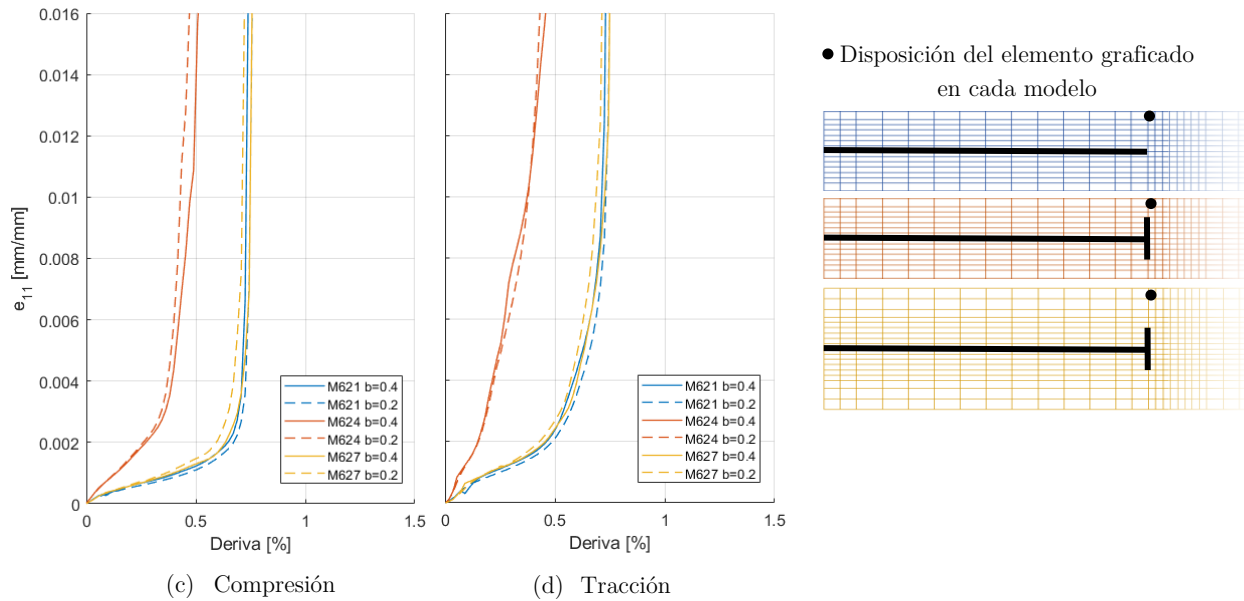


Figura 6.21. Deformación axial e_{11} – (a) Compresión (b) Tracción – vs Deriva, para el elemento extremo de la losa – Mezclas con grava y variación del parámetro b .

Finalmente, al estudiar la deformación axial a compresión y tracción del elemento extremo de la losa variando únicamente el parámetro b a tracción (Figura 6.21) se observa que la respuesta no resulta en un retraso significativo de la fisuración en comparación al resultado de la Figura 6.16.

Los resultados obtenidos de la comparación entre modelos con distinto valor del parámetro b muestran que la variación del modelo constitutivo del hormigón a tracción considerando el modelo de Belarbi y Hsu no tiene influencia significativa en el desempeño del elemento de acoplamiento y, por tanto, en el sistema en general, de este modo, el uso arbitrario de $b=0.4$ en el estudio de modelos con distinto porcentaje de fibra no resulta en imprecisiones significativas respecto a los resultados posibles de obtener a partir de valores de b efectivamente calibrados según el porcentaje de fibra incorporados. Esta aseveración hace referencia exclusiva a la representación del material a partir del modelo a tracción descrito en el apartado 3.2.2., lo que no descarta que el uso de modelos constitutivos de hormigón a tracción que capturen con precisión el efecto de fibras resulte en variaciones mayores a las presentadas en este análisis, no obstante, tal estudio se encuentra fuera del alcance de este documento que se limita al uso del modelo mencionado, se sugiere, por tanto, comprobar y comparar las variaciones en la respuesta utilizando distintos modelos a tracción.

Capítulo 7 – Conclusiones

A lo largo de esta memoria de título se ha estudiado a partir del modelo de elementos finito desarrollado a través del programa SAFE-ToolBox, el comportamiento de losas de acoplamiento de hormigón armado con y sin reforzamiento de fibras para configuraciones de muros restos y muros T, con el fin de estudiar el efecto de la variación de cuantías, geometría e incorporación de Fibras de PVA, en el comportamiento de sistemas de muros de corte.

Para el estudio se recurrió al modelo de un piso de muros acoplados desarrollado por Henríquez (2019), cuyo comportamiento fue comparado y validado respecto al de estructuras de 10 pisos con características geométricas y materialidad que responden a la realidad constructiva chilena. Tal modelo fue modificado para extender el análisis a muros tipo T e introducir los modelos constitutivos de hormigón fibro-reforzado.

Los resultados del estudio de datos experimentales de ensayos a compresión de probetas de hormigón reforzado con fibras de PVA realizados por Reveco, J (2020) permitieron determinar que solo fibras del tipo A y B resultan en relaciones de esfuerzo-deformación con mejoras en capacidad y ductilidad del material, para mezclas con grava y arena fina, respectivamente. Dado que los datos disponibles de ensayos a tracción fueron escasos, solo fue posible concluir que la incorporación de fibras en hormigones con agregados de arena o diámetros superiores no desarrollan el efecto de agrietamiento múltiple que permite liberar energía antes de fallar por rotura a tracción. A partir de los datos, fueron calibrados los modelos constitutivos del material, considerando los modelos de compresión y tracción disponibles en los módulos de programación de SAFE-ToolBox.

A partir del estudio del modelo de un piso se caracterizó el comportamiento típico del sistema de muros acoplados, enfocando el estudio en el comportamiento de la losa, quien fue precisado como el elemento de mayor concentración de esfuerzos y el determinante de la respuesta global del sistema. Se verificó, además, que los desplazamientos de los muros generan la deformación de losa típica de estructuras de corte, que son el objeto de estudio de esta investigación. El análisis de los mecanismos de transmisión de esfuerzos y deformaciones en la respuesta no-lineal de la losa, permiten entender el perfil de momento transmitido de la losa. Se determinó que en un sistema de muros rectos se provocan concentraciones de esfuerzos y rotaciones en los elementos de losa cercanos a los bordes del muro, los que se disipan rápidamente en las direcciones longitudinal y trasversal previo al comienzo de la pérdida de capacidad de dichos elementos. El aumento de deriva del sistema genera un aumento en la rotación de la sección trasversal de losa que coincide con el borde del muro, cuando un elemento de esta sección alcanza rotaciones que superan su capacidad máxima y pierde rigidez, los esfuerzos se redistribuyen hacia los elementos laterales. Este mecanismo se repite en cada paso de carga hasta que el elemento extremo alcanza la fluencia

llevando al sistema total a un estado de carga continua. Dado que el sistema contiene suficiente cuantía superior e inferior, la losa no alcanza un punto de falla, sino que se mantiene en un estado de fluencia debido al equilibrio de tensiones entre la enfierradura superior e inferior. No obstante, la falla del concreto ocurre y se trasmite como líneas transversales en la sección crítica estudiada.

El estudio de sistemas con variaciones de armadura demuestra que el aumento de cuantía longitudinal provoca una rigidización del sistema, un aumento de capacidad máxima y un aumento del par Fuerza-Deriva de fluencia de la estructura global, debido a que el aumento de cuantía modifica la respuesta de los elementos aumentando su capacidad máxima y momento de fluencia, generando un aumento del momento integrado en cada paso de carga. Por otra parte, la incorporación de elementos transversales del muro en los bordes (ala) y su respectiva variación de longitud, genera aumentos de rigidez y capacidad máxima debido al aumento de elementos transversales que concentran el momento transferido, sin embargo, esto solo ocurre en etapas previas a la pérdida de capacidad de los elementos de borde del muro. En etapas posteriores, la rigidez de la losa se ve determinada por la distancia libre entre el muro y el extremo lateral de la losa, de forma que, a mayor ancho de ala, menor ductilidad del sistema. Esta pérdida de ductilidad se compensa al mantener constante la distancia entre el borde del muro y el extremo de la losa en la dirección transversal como se verificó en el tercer estudio paramétrico, en este mismo estudio se observa que la fluencia del sistema aumenta con el aumento de longitud de ala, pero ocurre al mismo porcentaje de deriva, debido a que la propagación de esfuerzos posterior al inicio de la pérdida de esfuerzos solo depende de los elementos laterales disponibles. Finalmente, el estudio de variables combinadas determinó que el efecto de aumento de armadura longitudinal es replicable en sistemas con muros T, siendo un efecto independiente de la geometría de la sección, de forma que ambos efectos resultan ser aditivos.

Una vez entendido el sistema de muros rectos y muros T, se efectuó el estudio paramétrico en modelos con hormigón armado fibro-reforzado. Para fibras tipo B en mezclas con arena fina, existe un aumento de capacidad y, sobre todo, aun aumento de ductilidad post pérdidas de capacidad, las cuales son independientes de la geometría del sistema y solo dependen del porcentaje de fibra incorporado. Así la incorporación de fibras resulta en una reducción del nivel de rotación de los elementos, que puede reducir el tamaño de la fractura del hormigón por aplastamiento. Estos resultados se repiten en el estudio de fibras tipo A en mezclas con grava, siendo la única diferencia las variaciones en cuanto a rigidez que presentan ambos modelos. Se concluye en general que el principal aporte de este material es el aumento de ductilidad de elementos en deformaciones no lineales que permiten retrasar la propagación de la fractura transversal, lo que en la práctica permitiría reducir reparaciones. Se sugiere la verificación de estas observaciones por medio de ensayos experimentales de losas acopladas que incluyan incorporaciones de fibra, tomando en cuenta el diseño de mezclas considerados en este estudio.

Todo el análisis antes expuesto fue realizado en base a un sistema de muros de corte cuya geometría y cuantías resultan ser comunes en las construcciones chilenas y que se han mantenido inalterados en los modelos (a excepción de la cuantía longitudinal de acero en la losa de acoplamiento) por tanto, se encuentra fuera del alcance de este estudio, el análisis de muros propiamente tal, quedando propuesto para futuros estudios.

Por otra parte, el estudio de modelo con hormigón fibro-reforzado se desarrolló considerando curvas calibradas en base a un número limitado de muestras, y para un escaso número de variables, por lo que un análisis más extenso de la influencia de fibras en losas de acoplamiento requerirá de una base de datos de mayor alcance además del uso de modelos constitutivos a tracción que representen con mayor precisión el comportamiento de material reforzado, lo cual se propone para futuros trabajos.

Capítulo 6 – Bibliografía

- Almazán, J. (2012). *Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del Maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile*. Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural, 7(2-3), 4-28.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2006). Fibre reinforced cementitious composites. Crc Press. 2nd Edition.
- Calderón Corail, J. A. (2007). *Actualización de tipologías estructurales usadas en Edificios de Hormigón Armado en Chile*. Tesis Universidad de Chile.
- Corporación del Desarrollo Tecnológico (CDT) - CCHC. (2009). Fibras de Refuerzo - Fibras sintéticas para hormigón Sika Fiber. Especificar CDT. Recurso Online, disponible en: <http://www.especificar.cl/fichas/fibras-de-refuerzo-fibras-sinteticas-para-hormigon-sika-fiber>
- Chaperón, M. (2018). *Estudio De La Respuesta Numérica De Losas Acopladas Con Muros T De Hormigón Armado*. Tesis Universidad de Chile.
- Coull, A., & Chee, W. Y. (1983). *Design of floor slabs coupling shear walls*. *Journal of Structural Engineering*, 109(1), 109-125.
- Coull, A., & Chee, W. Y. (1980). *Interaction between floor slabs and shearwalls in tall buildings*. Special Publication, 63, 543-574.
- Filippou, F. C., Popov, E. P., & Bertero, V. V. (1983). Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints.
- Henríquez, C. (2019). *Estudio De La Respuesta Numérica De Losas Acopladas Con Muros Rectangulares De Hormigón Armado*. Tesis Universidad de Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. *Diseño Sísmico de Edificios*. NCh433.Of.96. Mod.2012.
- Kuraray. (2015). FIBRA DE PVA - KURALON™ [Diapositivas]. KURALON | kuraray PVA Fiber dor Concrete and Mortar.
- Li, Z., Li, F., Chang, T. P., & Mai, Y. W. (1998). *Uniaxial tensile behavior of concrete reinforced with randomly distributed short fibers*. *Materials Journal*, 95(5), 564-574.

- Lowes, L. N., Lehman, D. E., & Baker, C. (2016). Recommendations for modeling the nonlinear response of slender reinforced concrete walls using PERFORM-3D. In 2016 SEAOC convention. Maui, USA.
- Massone, L., Bonelli, P., Lagos, R., Lüder, C., Moehle, J. and Wallace, J. (2012). *Seismic Design and Construction Practices for RC Structural Wall Buildings*, EERI, Earthquake Spectra – Chile. Special Issue
- Massone, L., Orakcal, K. and Wallace, JW (2009). *Modelling of squat structural walls controlled by shear*. ACI Structural Journal Title No. 106-S60, September 2009, pp 646-655.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). *Concrete microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill, Third Edition.
- Nilson, A. H., & Darwin, D. (1999). *Diseño de estructuras de concreto*. Colombia: McGraw-Hill.
- Noushini, A., Samali, B., & Vessalas, K. (2013). *Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete*. *Construction and Building Materials*, 49, 374-383.
- Pan, Z., Wu, C., Liu, J., Wang, W., & Liu, J. (2015). Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*, 78, 397-404.
- Reveco, J. (2021). *Caracterización y estudio de la respuesta de hormigón reforzado con fibras de PVA*. Tesis Universidad de Chile.
- Sahmaran, M.; Lachemi, M.; Hossain, K. M. A.; Ranade, R.; and Li, V. C. (2009), Influence of Aggregate Type and Size on the Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*, V. 106, No. 3, May-June 2009, pp. 308-316
- Sahmaran, M., Yücel, H. E., Demirhan, S., Arýk, M. T., & Li, V. C. (2012). Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 109(6), 627.
- Sasmal, S., & Avinash, G. (2016). Investigations on mechanical performance of cementitious composites micro-engineered with poly vinyl alcohol fibers. *Construction and Building Materials*, 128, 136-147.

Schwaighofer, J. and Collins, M. (1977). *Experimental Study of the Behavior of Reinforced Concrete Coupling Slabs*. ACI Journal Title No. 74-12, March, 1977, pp 123-127.

Vásquez, N. (2020). *Estudio de la variación de ductilidad y resistencia del hormigón al reforzarlo con microfibras de PVA*. Tesis Universidad de Chile.

Tapia Pérez, S. E. (2008). *Influencia de la Flexión Transversal y de la Resistencia de la Losa en Edificios Estructurados con Muros de Hormigón Armado*. Tesis Universidad de Chile.

Youssef, N. F., Tunick, D., Naeim, F., Lew, M., Carpenter, L. D., Rojas, F., ... & Adaros, M. S. (2011). *Performance of the Torre Bosquemar and Olas buildings in San Pedro de la Paz and the Pedro de Valdivia building in Concepción in the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 20(1), 65-82.

Zárate, F. (2019). *Comparación De La Respuesta Experimental De Losas De Hormigón Armado Con Mallas Tradicionales Y Electrosoldadas*. Tesis Universidad de Chile.

Apéndice A – Propiedades de los materiales

Tabla A.1. Propiedades del hormigón.

Propiedad		Valor
Densidad	ρ	2500 [kg/m ³]
Coefficiente de Poisson	ν	0.2 [-]
Resistencia máxima a la compresión	f'_c	25 [MPa]
Módulo de Elasticidad	E_c	23500 [MPa]
Resistencia a tracción	f'_{cr}	1.55 [MPa]
Deformación unitaria en f'_c (no confinado)	$\varepsilon(f'_c)$	0.002 [mm/mm]
Deformación unitaria en f'_{cc} (confinado)	$\varepsilon(f'_{cc})$	0.0065 [mm/mm]
Deformación unitaria en f'_{cr} (tracción)	$\varepsilon(f'_{cr})$	0.00008 [mm/mm]

Tabla A.2. Propiedades del acero

Propiedad		Valor
Módulo de Elasticidad	E_s	200000 [MPa]
Tensión de fluencia	F_y	420 [MPa]
Resistencia máxima a la compresión	$\varepsilon(F_y)$	0.0021 [mm/mm]
Pendiente de fluencia	b_o	0 [-]
Reducción de fluencia	RF_y	0.85 [-]

Apéndice B – Validación del modelo

Con el objetivo de verificar si el modelo presentado es capaz de representar el comportamiento típico de losas y comprobar que variables asociadas a la programación como la discretización de esta no afecten de manera significativa en los resultados, en lo que sigue se analizará el modelo de losa en voladizo y se realizará el análisis de sensibilidad de la estructura.

B.1. Modelo Losa en Voladizo

Para verificar el funcionamiento de SAFE-ToolBox se estudió el modelo de losa en voladizo mostrado en la Figura B.1, el cual se construyó considerando las dimensiones y propiedades de los materiales utilizados en el modelo del Tramo 1 de losa (Figura 4.2), manteniendo además el espesor y la discretización del mallado, obteniéndose en total 48 elementos de 112.5x100x150 [mm].

Para efectos del estudio, fueron empotrados los 7 nodos en la dirección transversal de uno de los lados, mientras que, en el extremo opuesto se aplicó una carga vertical con desplazamiento controlado, hasta alcanzar los 15 [mm] medidos en el nodo 60 (nodo monitor).

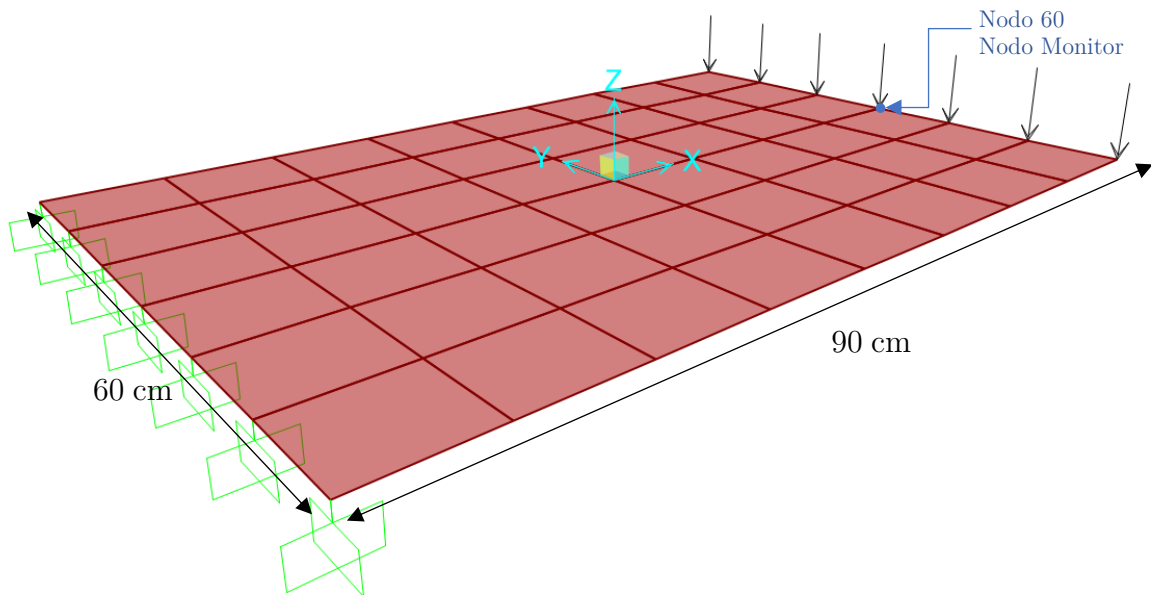


Figura B.1. Modelo de Losa en Voladizo

Para verificar que las cargas aplicadas son transferidas íntegramente hasta los apoyos y con ello, verificar el equilibrio del sistema y la convergencia del modelo, fueron graficados en las Figuras B.2 y B.3 las curvas Fuerza y Momento vs Desplazamiento medidos a partir de las cargas aplicadas y reacciones en los apoyos.

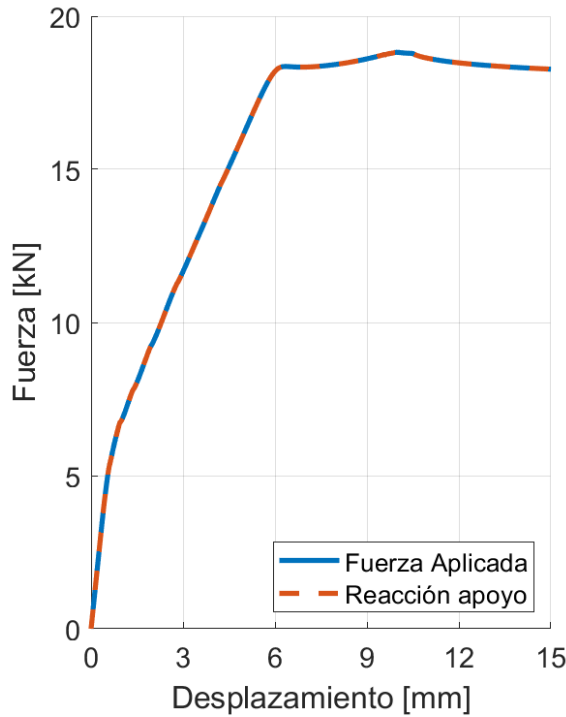


Figura B.2. Curva Fuerza vs Desplazamiento de Losa, considerando carga aplicada y reacción en los apoyos.

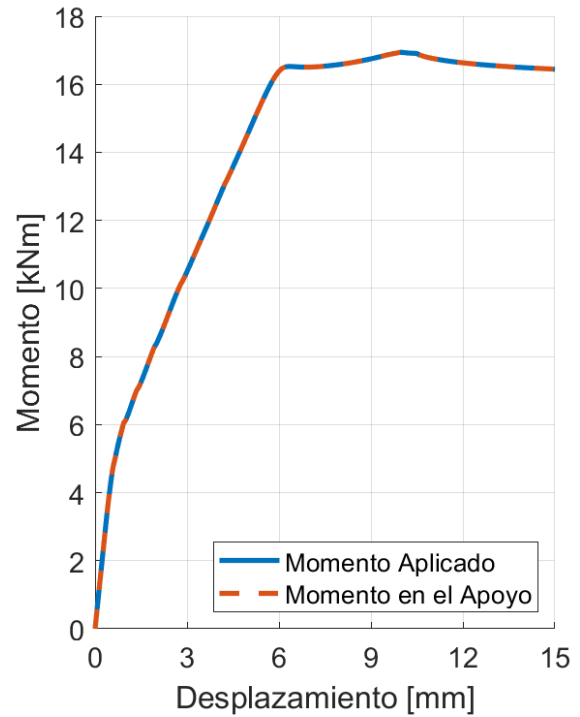


Figura B.3. Curva Momento vs Desplazamiento de Losa, considerando carga aplicada y reacción en los apoyos.

Estos resultados permiten verificar la convergencia para todos los pasos de carga realizados, incluso una vez es alcanzada la fluencia del sistema, para las reacciones de momento y corte.

Luego, para verificar si los resultados obtenidos por el modelo se corresponden con el momento de fluencia teórico esperado, se graficó la curva Momento vs Curvatura, considerando el equilibrio de la sección transversal de la losa utilizando teoría de vigas (Figura B.4) obteniéndose un valor de momento de fluencia estimado de $M_y = 15.08$ [kNm]. Al comparar este resultado con la curva Momento vs Desplazamiento obtenida a partir del modelo, se observa un exceso de capacidad respecto a M_y , que puede atribuirse a la contribución de rigidez de la armadura transversal, la cual toma mayor significancia debido al ancho de la sección.

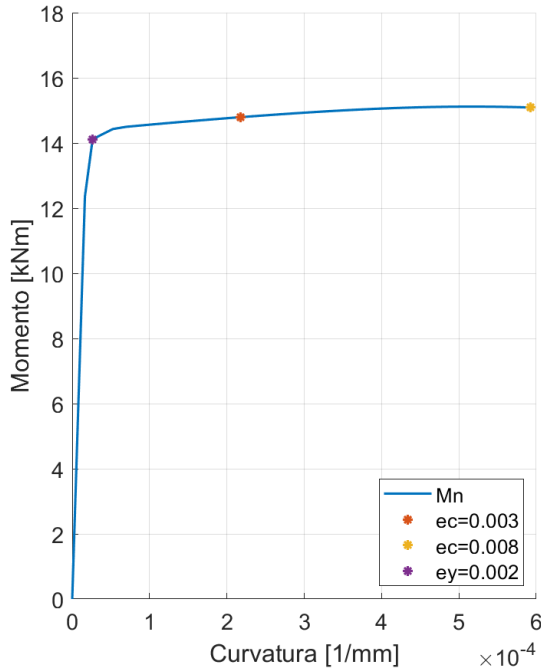


Figura B.4. Momento vs Curvatura estimado.

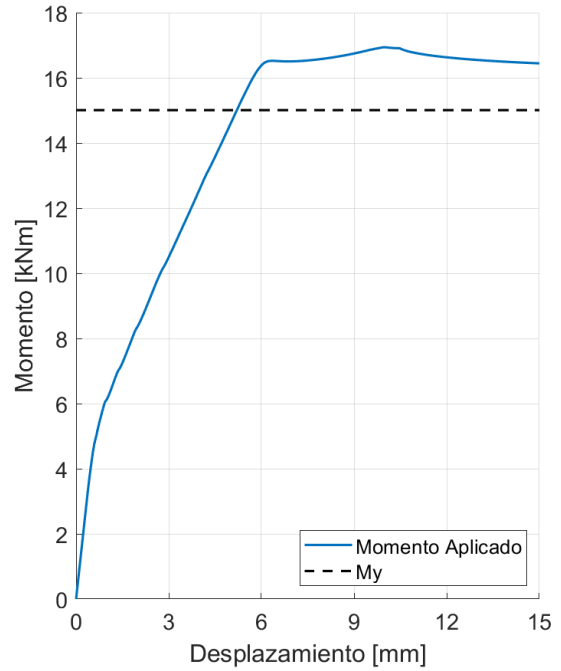


Figura B.5. Comparación entre momentos de fluencia.

Para estudiar la distribución de esfuerzos en la losa, se graficó la deformación e_{11} y el momento m_{11} en las Figuras B.6 y B.7, respectivamente (para un desplazamiento vertical del nodo monitor de 10 [mm]), donde se observa que las máximas deformaciones y momentos se concentran el empotramiento y se disipan en la dirección longitudinal, manteniéndose uniforme en la dirección transversal de la losa.

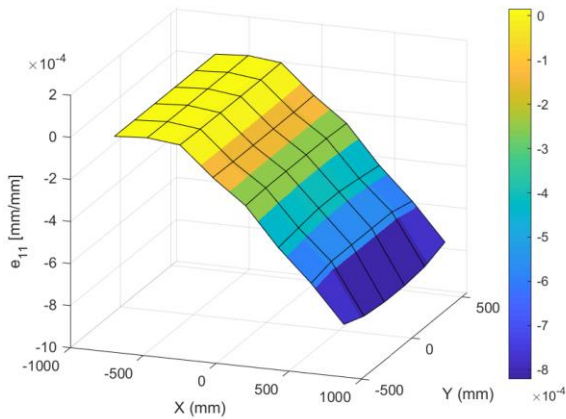


Figura B.6. Distribución de deformaciones e_{11} en la losa.

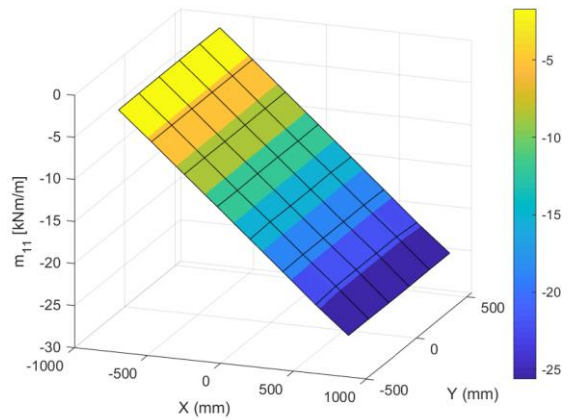


Figura B.7. Distribución de momento m_{11} en la losa.

Al graficar el momento integrado en la dirección transversal de la losa (considerando el promedio de los puntos de cuadratura y la posición central del elemento como referencia) para distintos desplazamientos (Figura B.8) se observa la respuesta triangular típica de vigas en voladizo con carga concentrada aplicada en el extremo libre, donde los esfuerzos en los elementos de borde coinciden con los valores obtenidos en las Figuras B.2 y B.3, verificándose el correcto funcionamiento del modelo.

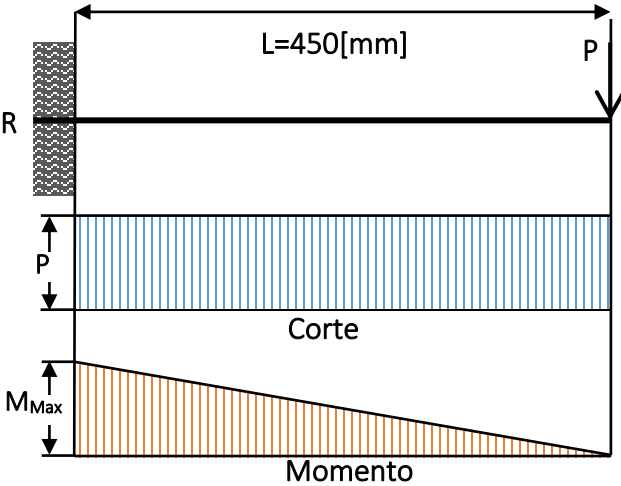
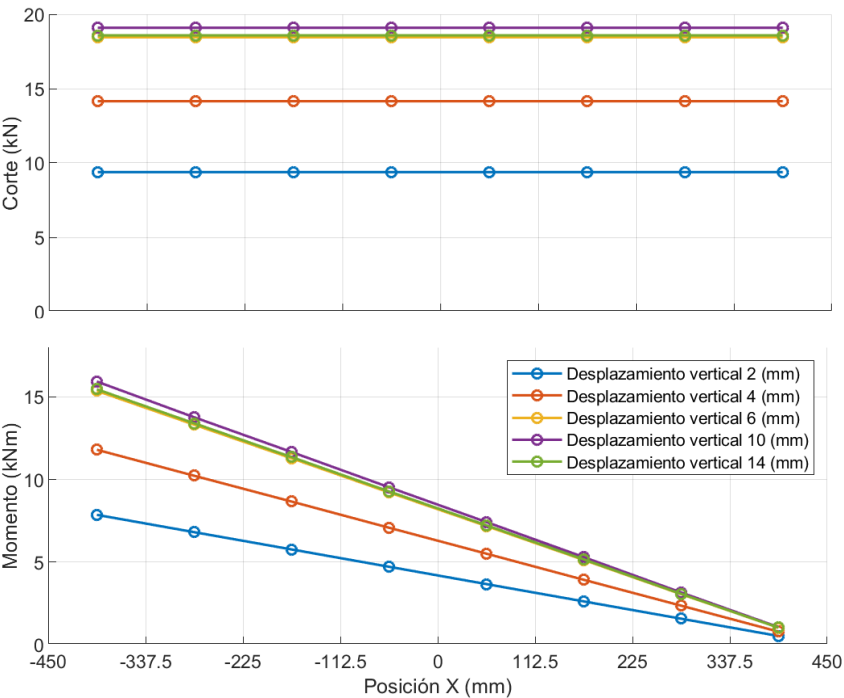


Figura B.8. Arriba – Distribución de Momento y Corte en el eje X, para distintos desplazamientos verticales. Abajo – Distribución de esfuerzos típica para carga concentrada en el extremo libre de una viga en voladizo.

Finalmente, se comprobó que la incorporación de fibras a la losa no genera variaciones en la distribución de momentos en las direcciones X e Y (Figura B.9) y que la variación en el número de capas de material no varía el desempeño de la losa ni provoca divergencias en la solución del sistema (Figura B.10)

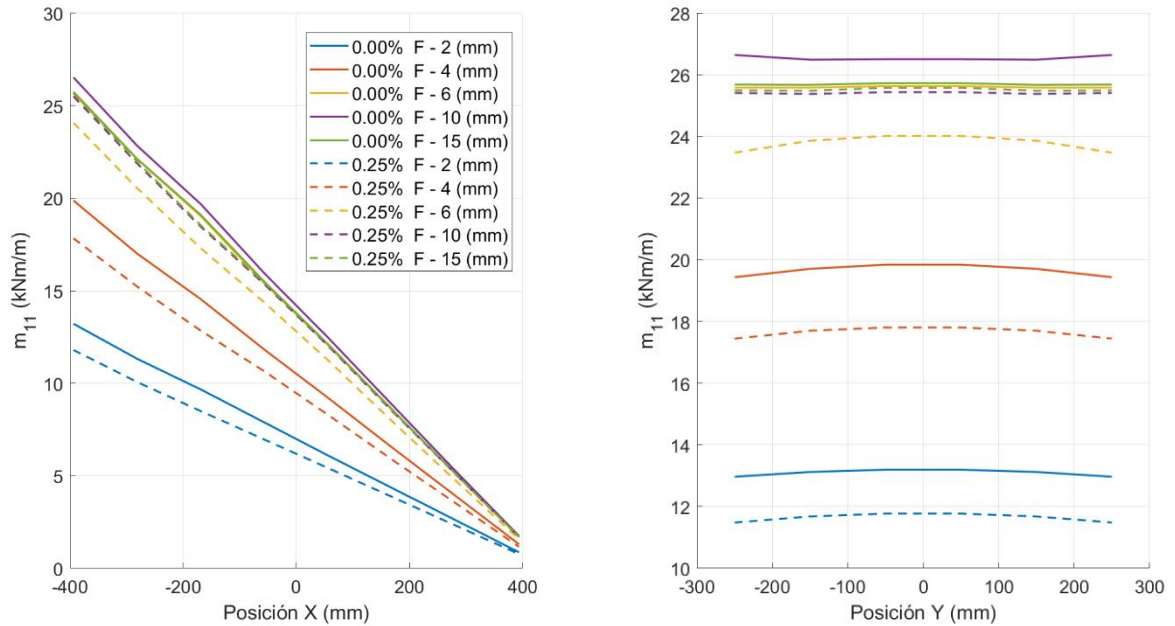


Figura B.9. Distribución de momento en direcciones X e Y para distintos desplazamientos, considerando 0.00% y 0.25% de Fibras en mezclas con Arena.

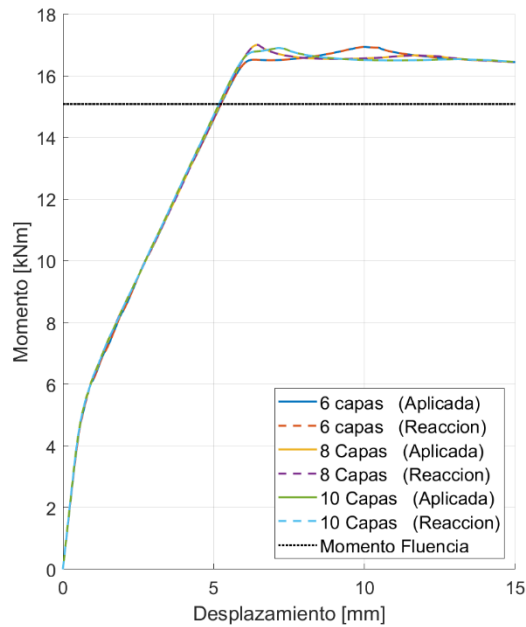


Figura B.10. Respuesta del sistema ante la variación del número de capas de hormigón consideradas en el modelo.

B.2. Análisis de Sensibilidad

B.2.1. Refinamiento de Malla

La discretización de los elementos resulta ser una de las variables fundamentales del estudio numérico que determina no solo la convergencia del modelo, sino también la representatividad de la respuesta respecto a la estructura objetivo. A diferencia de otros parámetros propios del diseño de la estructura como la geometría y su materialidad, el refinamiento del mallado no es intrínseco a la estructura y depende de variables externas como la capacidad de procesamiento de datos, tiempo y requerimientos de precisión. Un método clásico de verificación de “convergencia” del modelo resulta ser la aplicación de múltiples análisis aplicando diferentes niveles de refinamiento (Lowes, L.N, et. al., 2016).

Para efectos de este estudio fueron realizadas 2 variantes del modelo de muros rectos estudiado en el capítulo 4, donde se varió el refinamiento de la losa de acoplamiento en ambas direcciones. La Figura B.11 muestra las configuraciones de malla utilizados en el análisis de sensibilidad. Para la primera variante (MB1) fueron subdivididos los elementos de la zona de acoplamiento del modelo base original (MB) por la mitad en ambas direcciones, consiguiendo una cuadrícula de 16x28 elementos, mientras que para la segunda variante (MB2) se reconstruyó el mallado con el fin de obtener elementos de 15x15 [cm], obteniendo una cuadrícula de 6x10 elementos. El detalle de las dimensiones del mallado en la zona de acoplamiento se muestra en la Tabla B.1

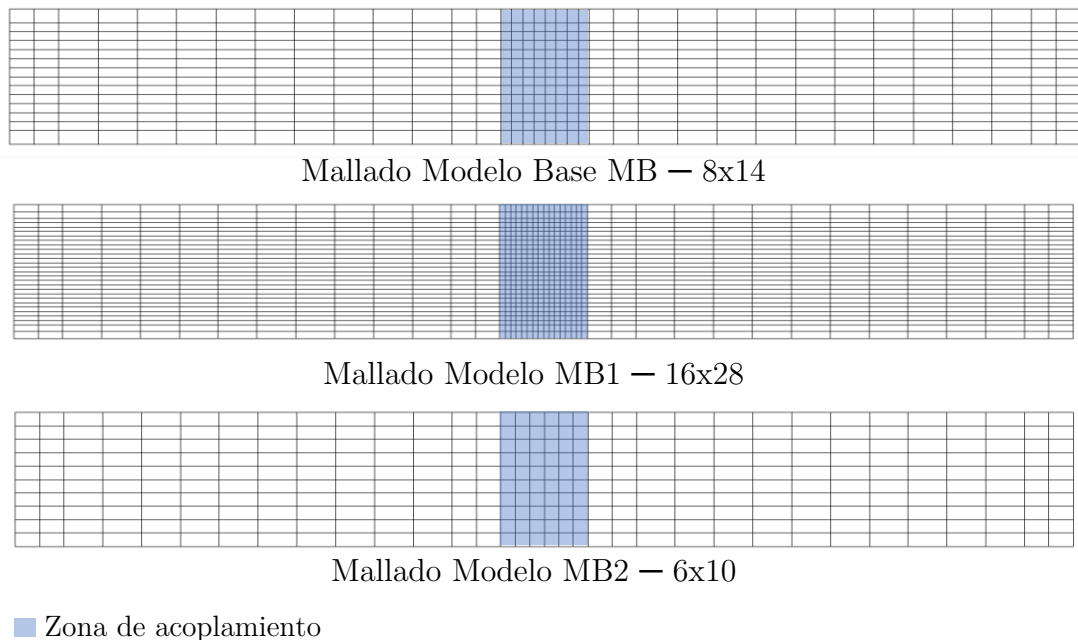


Figura B.11. Mallado de Losa utilizado en el análisis de sensibilidad.

Tabla B.1. Mallado de Losa utilizado en el análisis de sensibilidad

Modelo	N° Elementos	Dimensiones elementos centrales	Dimensiones Bordes Laterales
MB	8x14	11.25x10 [cm]	11.25x15 [cm]
MB1	16x28	5.63x5 [cm]	5.63x7.5 [cm]
MB2	6x10	15x15 [cm]	15x15 [cm]

La Figura B.12 muestra los resultados de la modelación para cada una de las variantes en términos de la respuesta global del sistema, en los cuales se observa que el refinamiento de la malla no influye en la rigidez del sistema para derivas menores al 0.2%, cuando no existen aún pérdidas de capacidad en los elementos, posterior a ello se observa una rigidización del modelo que aumenta con el tamaño de los elementos, además de un aumento en la capacidad máxima y del par momento - deriva de fluencia del sistema.

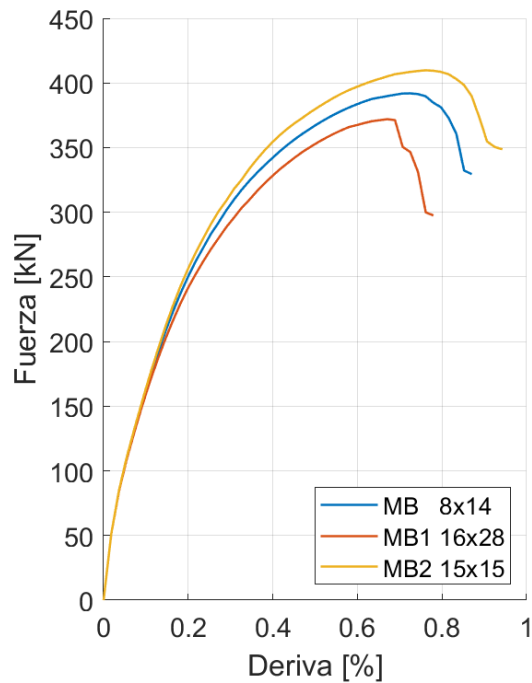
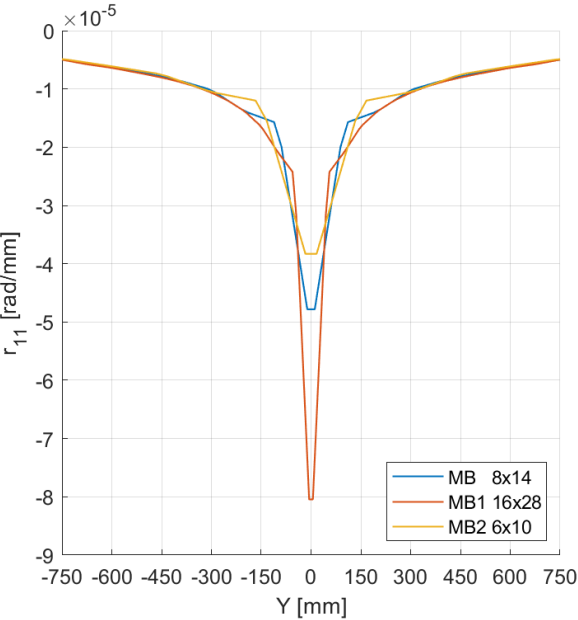


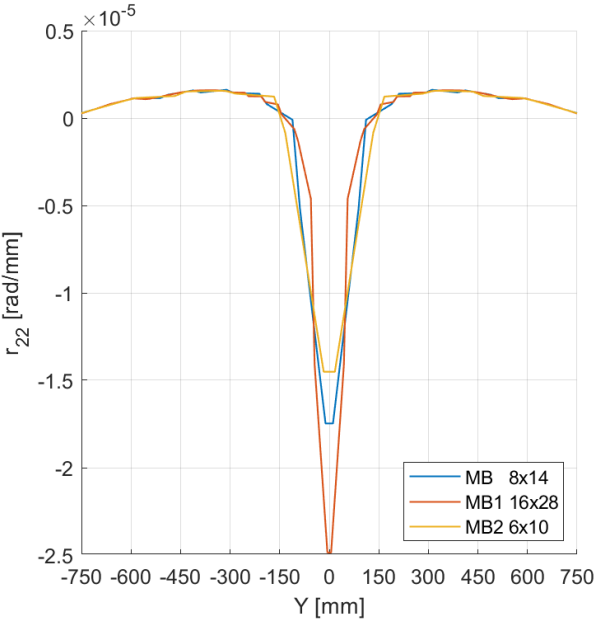
Figura B.12. Respuesta global del sistema para distintos mallados de losa.

Las Figuras B.13 y B.14 muestran el detalle de la distribución de momento y rotación en los ejes X e Y. Se observa en general la misma distribución de esfuerzos y rotaciones en ambas direcciones en las secciones exteriores de la zona crítica de la losa, mientras que en el borde del muro se obtiene un valor subestimado de momento en el modelo de menor número de elementos respecto a los modelos MB y MB1 y valores divergentes de rotación para los tres casos estudiados.

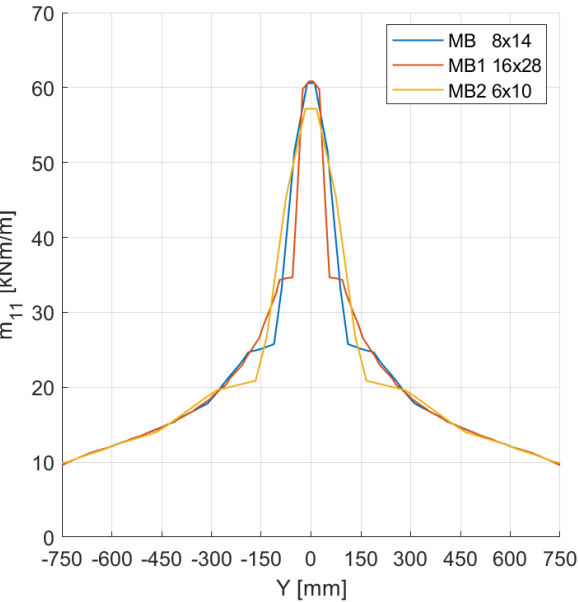
Tal como plantearon Coull, A., & Chee, W. Y. (1983) en su estudio numérico, existen importantes concentraciones de momento en los bordes de los muros. Estos valores resultan ser puntos teóricamente infinitos cuando se aplican aproximaciones de muros lineales, pero tienden a ser valores finitos a medida que se aumenta el espesor de los muros, presentándose como un par de peaks de momentos simétricos a una pequeña distancia del centro de los muros tal como se observa en las Figura B.13.c y Figura B.13.d. Sin embargo, en este



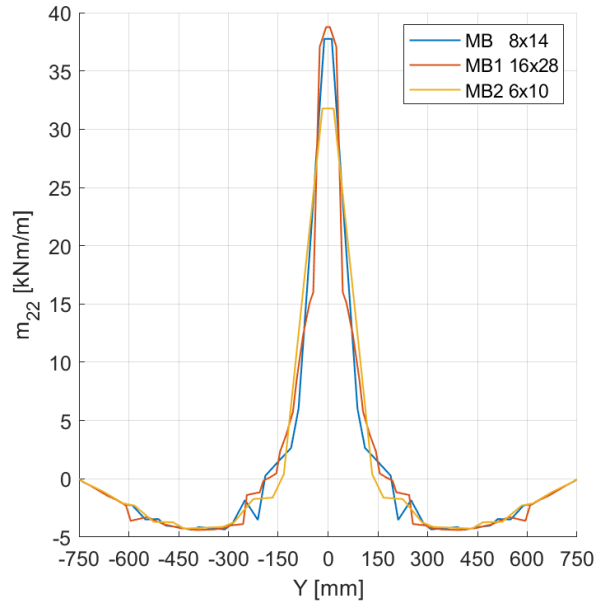
(a) r_{11} vs Y



(b) r_{22} vs Y



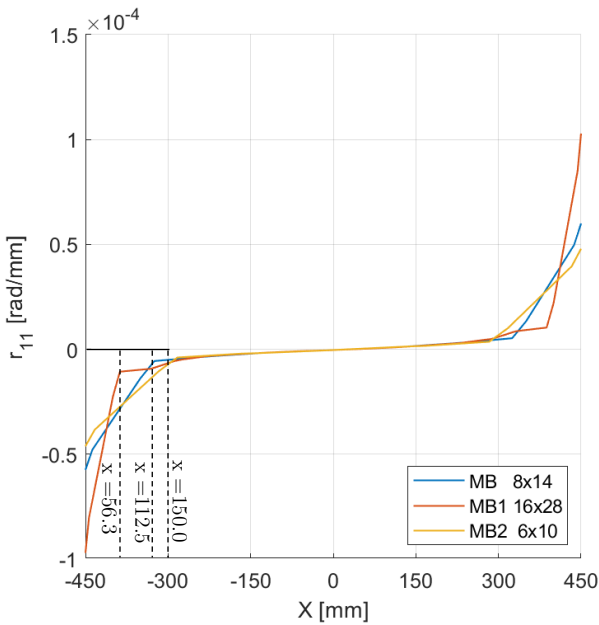
(c) m_{11} vs Y



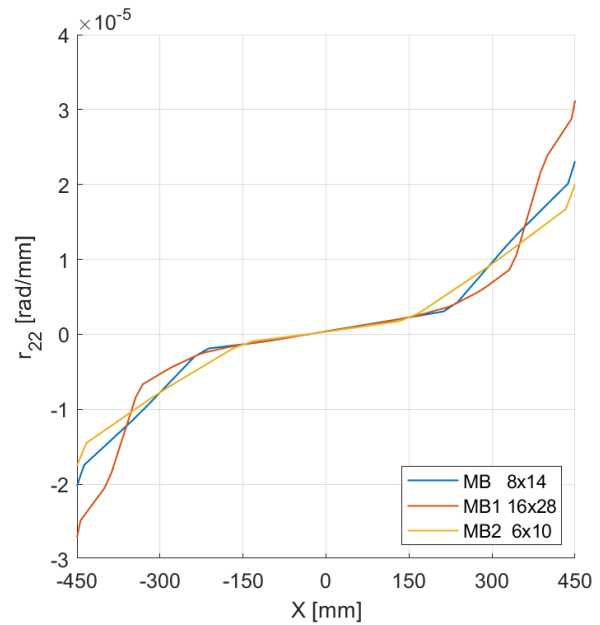
(d) m_{22} vs Y

Figura B.13. Distribución de rotación y momento en dirección Y , para distintos mallados de losa.

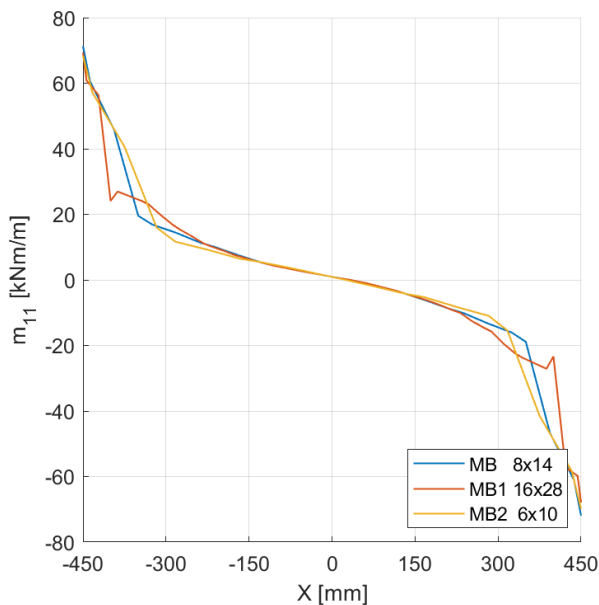
mismo documento se hace énfasis en que, aunque resulten ser valores finitos, el refinamiento de la malla conlleva a la aparente divergencia de los resultados en los bordes de los muros, de lo cual se concluye que existe una singularidad de tensión teórica a lo largo de la pared que puede ser el resultado de la aplicación de condiciones de borde que generan una unión infinitamente rígida. Así entonces, los valores finitos obtenidos en estos puntos deben ser debidamente estudiados y no ser utilizados como referencias de diseño. La divergencia de los



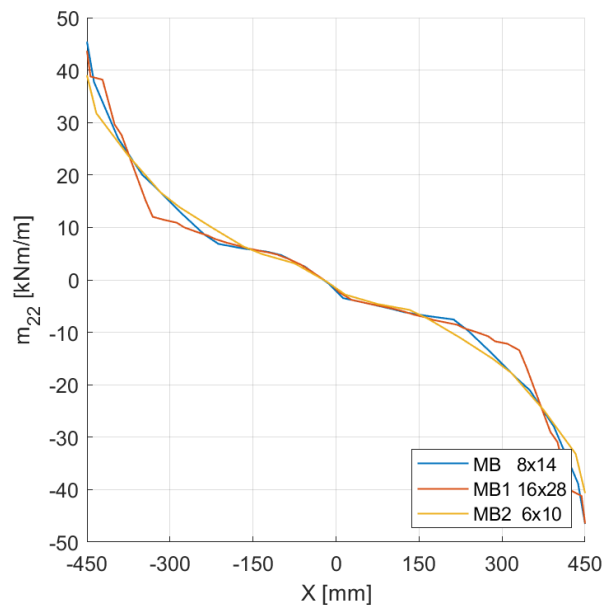
(a) r_{11} vs X



(b) r_{22} vs X



(c) m_{11} vs X



(d) m_{22} vs X

Figura B.14. Distribución de rotación y momento en dirección X, para distintos mallados de losa.

resultados es aún más notoria al estudiar la rotación de la losa, donde se observa que al subdividir la malla la rotación en los puntos críticos se duplica (Figura B.13.a). Este resultado no es más que una expresión matemática del modelo que indica la falla o extrema fluencia del elemento. Como el modelo resulta en grandes desplazamientos de la unión rígida, al utilizar discretizaciones más pequeñas, todo el desplazamiento se distribuye en un elemento más corto, resultando en rotaciones significativamente mayores. La Figura B.14.a., muestra en líneas punteadas como la rotación singular decae rápidamente al término del elemento de borde y converge hacia el resto de los elementos centrales sin influencia del refinamiento de malla.

Estas observaciones resultan ser contraintuitivas, pues en general, el refinamiento de la malla permite obtener resultados más precisos. Coull, A., & Chee, W. Y. (1980), generaron modelos numéricos con distintas configuraciones de malla utilizados en otros artículos y compararon la respuesta con datos experimentales para un sistema de placa simplemente apoyado con carga uniforme, de lo que concluyeron que elementos más sofisticados de menor tamaño resultaban en aproximaciones mucho mejores que elementos rectangulares de orden mayor. Sin embargo, cuando se repitió tal ejercicio para la configuración de losa de acoplamiento con muros rectos y muros T, los resultados arrojaron mayor precisión en modelos con elementos más sencillos y de mayor tamaño, por lo que no es posible asegurar directamente que un mayor refinamiento permita obtener resultados más precisos en modelos complejos.

Lowes, L.N, et. al., (2016), estudiaron los efectos del refinamiento sobre muros de corte. Los resultados de simulaciones hechas con distintos niveles de refinamiento de malla mostraron que hasta el inicio de pérdidas de resistencia no existen variaciones importantes en la distribución de deformaciones, solo un aumento en la suavidad de las curvas a medida que aumenta el grado de discretización. Sin embargo, una vez iniciada la pérdida de capacidad, los modelos con mayor número de elementos generan desplazamientos y rotaciones mayores en el borde del muro que constituye el apoyo, aun cuando la respuesta de los modelos converge para los elementos superiores. Los resultados presentados en la Figura B.12 son consistentes con los resultados de este estudio, donde se muestra que el aumento en el refinamiento de la malla disminuye la capacidad y reducen la deriva de fluencia de la estructura.

Este efecto resulta ser consecuencia directa de la reducción del tamaño de los elementos. En las primeras etapas de deformación la rigidez de la losa es igual, independiente del refinamiento de la malla. La rotación del muro inducirá, por tanto, igual desplazamiento y giro en el elemento de borde. Si el elemento es de menor longitud, la deformación resultante es mayor que en elementos de mayor longitud. Como la relación esfuerzo-deformación es la misma, la pérdida de resistencia se alcanzará antes en elementos más pequeños, lo que provoca no solo la falla temprana del de la sección de losa, sino también una reducción de la capacidad neta de transmisión de momento. La Figura B.15, muestra la

distribución de rotación y momento en Y, para un 0.5% de deriva. A este punto de carga, los 3 modelos han sufrido pérdidas de capacidad. Se observa que al aumentar la rotación y superar la capacidad de los elementos centrales, los elementos laterales comenzaron a rotar con mayor rapidez en el modelo MB1 con mayor número de elementos. Esta rotación fuerza la propagación de esfuerzos por aquellos elementos más lejanos que aún no han superado su capacidad máxima, mientras los elementos centrales alcanzan rápidamente la fluencia, de modo que el momento neto integrado o momento transferido (que resulta ser el área bajo la curva de la Figura B.15.b) es menor.

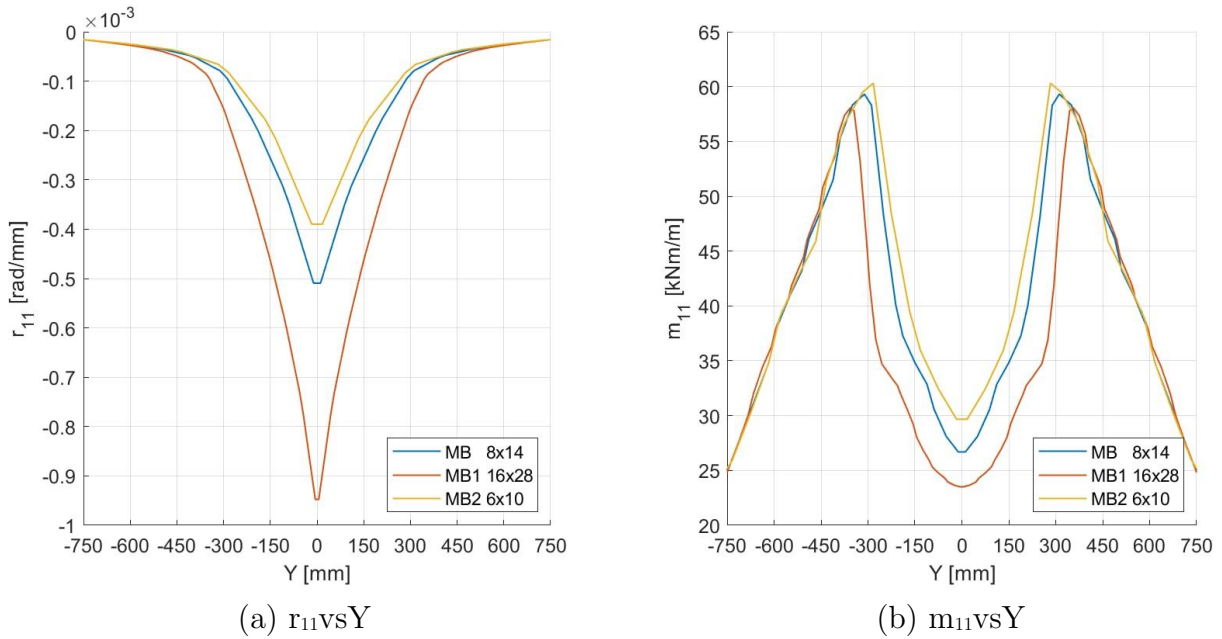


Figura B.15. Distribución de rotación r_{11} y momento m_{11} en dirección Y, para distintos mallados de losa.

A esta observación se suma el efecto de pérdida de capacidad local de los elementos debido al aumento en el refinamiento de la malla. La Figura B.16, muestra la relación esfuerzo deformación de los elementos de borde según se indicó en el capítulo 4, en este mismo apartado se observó que la relación momento-rotación de los elementos variaba en función de la posición Y, de forma que los elementos extremos de la losa alcanzan momentos máximos menores. Este efecto se hace significativamente mayor al reducir el tamaño de los elementos debido a la pérdida de rigidez lateral. De este modo, cuando se propagan los esfuerzos en el modelo de elementos menores, se alcanzan peaks de momentos menores y, en consecuencia, se reduce el momento integrado en relación con modelos de mayor refinamiento.

Tomando en cuenta lo anterior, se considera que el modelo con mayor número de elementos simula una respuesta global del sistema subestimada como resultado del importante grado de refinamiento de la malla.

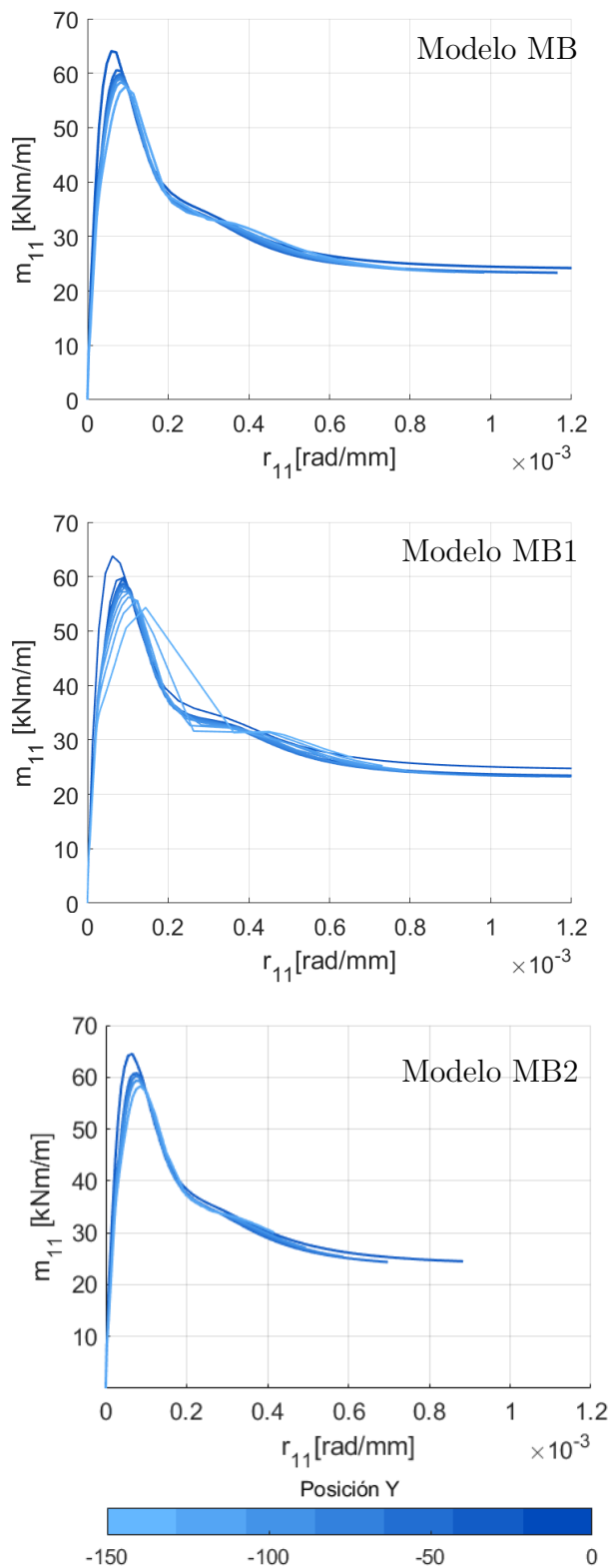


Figura B.16. Curvas m_{11} vs r_{11} para el set de elementos de borde, para los distintos refinamientos de malla.

Al observar la Figura B.16 es posible notar que las variaciones en los modelos MB y MB2 son considerablemente menores que las obtenidas en MB1, al mismo tiempo que las rotaciones de los elementos centrales tanto previo al inicio de pérdidas de resistencia como a grandes derivas, resulta en valores finitos de menor variación, por lo que resulta interesante considerar cualquiera de estos modelos para efectos de estudios paramétricos, sin perder de vista en cualquier caso, que los resultados específicos obtenidos en puntos singulares no deben ser considerados reales sino solo como una herramienta comparativa entre casos que guarden las mismas condiciones, hasta validar la capacidad del modelo para representar la transmisión de esfuerzos en los bordes de los muros mediante estudios experimentales.

Particularmente en este estudio se opta por el uso del mallado de MB para obtener curvas más suaves al generar un mayor número de puntos de cuadratura en las secciones de estudio, además, este modelo muestra valores de momento en el centro del muro convergentes a MB1, pese a la importante diferencia en rotación, lo que supone un resultado mejor estimado que el momento en el centro obtenido por el modelo MB2.

B.2.2. Disposición del punto de apoyo

A lo largo de este estudio se ha considerado el modelo de un piso descrito en el Capítulo 4 como una aproximación lo suficientemente razonable para describir el comportamiento de un piso típico inserto en un sistema de varios pisos. Particularmente, haciendo referencia al estudio de Henríquez (2020), el sistema de muros rectos es válido como aproximación de un sistema de muros acoplados de 10 pisos útil como herramienta de comparación en estudios paramétricos. La Figura B.17 muestra los resultados de la comparación de momento transmitido por la losa entre los pisos P1 al P10 y el modelo de 1 piso (M1P) en función del porcentaje de deriva y la rotación. Como se observa en esta, el modelo de un piso se comporta razonablemente bien si se compara con los pisos de mayor altura en deformaciones elásticas, posterior a ello se observa un exceso de capacidad del modelo de 1 piso, que sigue la tendencia general del sistema.

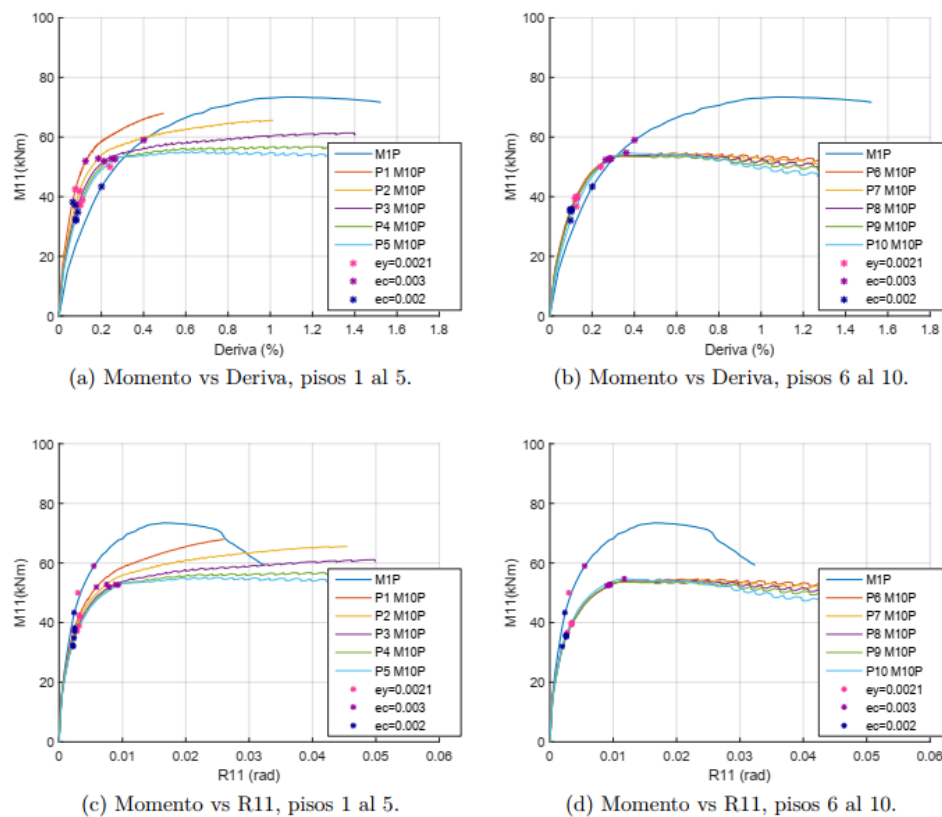


Figura B.17. Concentración del momento en la zona de acoplamiento, M1P y M10P. (Henríquez, 2020)

El diseño del modelo de 1 piso genérico requirió de elementos que permitiesen recrear el modo de rotación de los pisos en altura, para lo cual se incluyeron vigas rígidas en los extremos superior e inferior de los muros y un par de apoyos simple-deslizante que permitiesen la rotación de cada muro en torno a dicho punto.

En un sistema compuesto por varios pisos donde se incluye la fundación como parte del modelo, el desarrollo del eje de rotación en cada uno de los pisos es natural y depende únicamente de la geometría de los muros y la aplicación de cargas, sin embargo, en el modelo de un piso la disposición del apoyo fuerza el eje de rotación de los muros en ese punto específico, por lo que su ubicación resulta una variable en el comportamiento del modelo.

Entendiendo el muro continuo en los 10 pisos de altura como una columna sometida a flexión compuesta con variaciones de carga axial en altura, la ubicación del centro de rotación no necesariamente resulta en el centro de masas de la sección transversal, más aún, no en todos los pisos se encuentra ubicado en la misma posición. Muñoz, F (2018) en su estudio experimental y analítico de muros T de hormigón armado ante cargas cíclicas, determinó el perfil de deformación vertical en el alma de los muros T en 3 pisos ET1, ET2 y ET3 como se muestra en la Figura B.18., para la geometría estudiada y considerando una distribución homogénea del peso en los muros, el centro de gravedad del muro se encuentra cercano a los 400 [mm], sin embargo el eje neutro medido experimentalmente se encuentra en los 700[mm] para los pisos ET1 y ET2 y cercano a los 500 [mm] en el piso ET3.

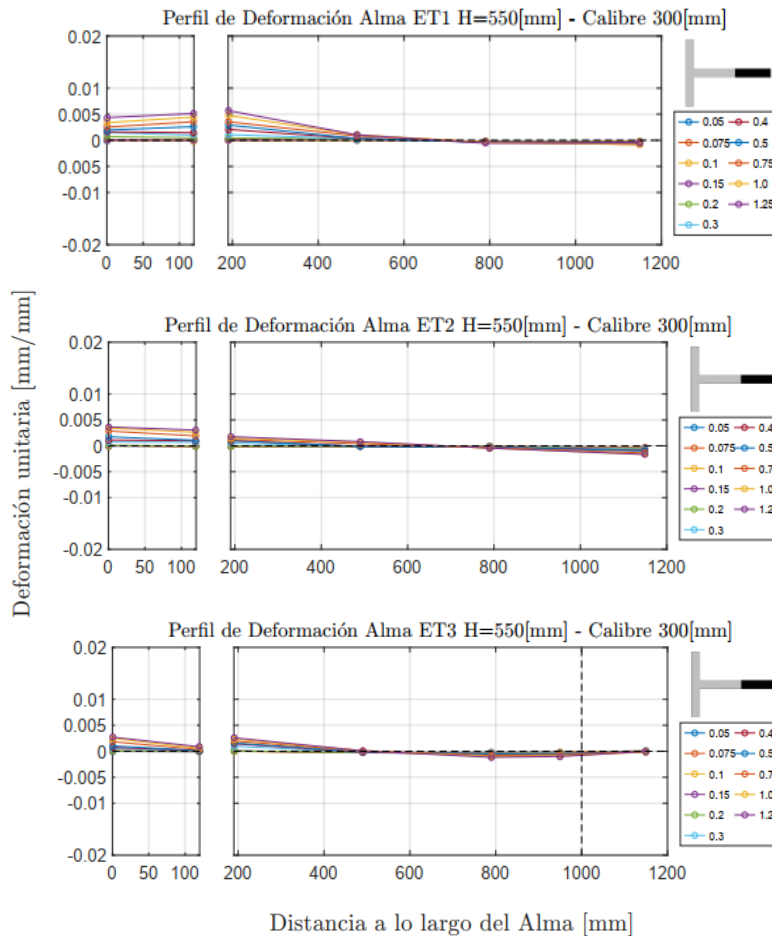


Figura B.18. Perfiles de deformación a lo largo del Alma Muro. Muñoz, F (2018)

Tomando en cuenta la dependencia del eje neutro respecto a la geometría y cargas, una posible solución para fijar el punto de apoyo es estudiar el perfil de deformaciones del modelo en cada piso y establecer su disposición en altura para cada una de las geometrías estudiadas. No obstante, no se puede perder de vista el motivo inicial para el uso del modelo aproximado de 1 piso, que es no incurrir en los altos costos de procesamiento de datos y tiempo que requiere ejecutar un modelo de varios pisos y que en algunos casos lo vuelve inviable.

Ahora, para estudiar el efecto de la ubicación del punto de apoyo en la respuesta del sistema se estudian a continuación tres variaciones del modelo M525 (con 150 [cm] de longitud de Ala), cuya disposición del apoyo se muestra en la Figura B.19. A partir de la geometría de los muros se determinó además que el centro de gravedad de la sección transversal se encuentra a 243.41 [cm] desde el centro del sistema, el error respecto a esta posición (por unidad de largo del muro) en cada modelo se muestra en la Tabla B.2.

Tabla B.2. Error en distancia respecto al centro de gravedad de la sección.

Modelo	M525	M525 V2	M525 V3
Error [%]	1.03%	0.23%	0.57%

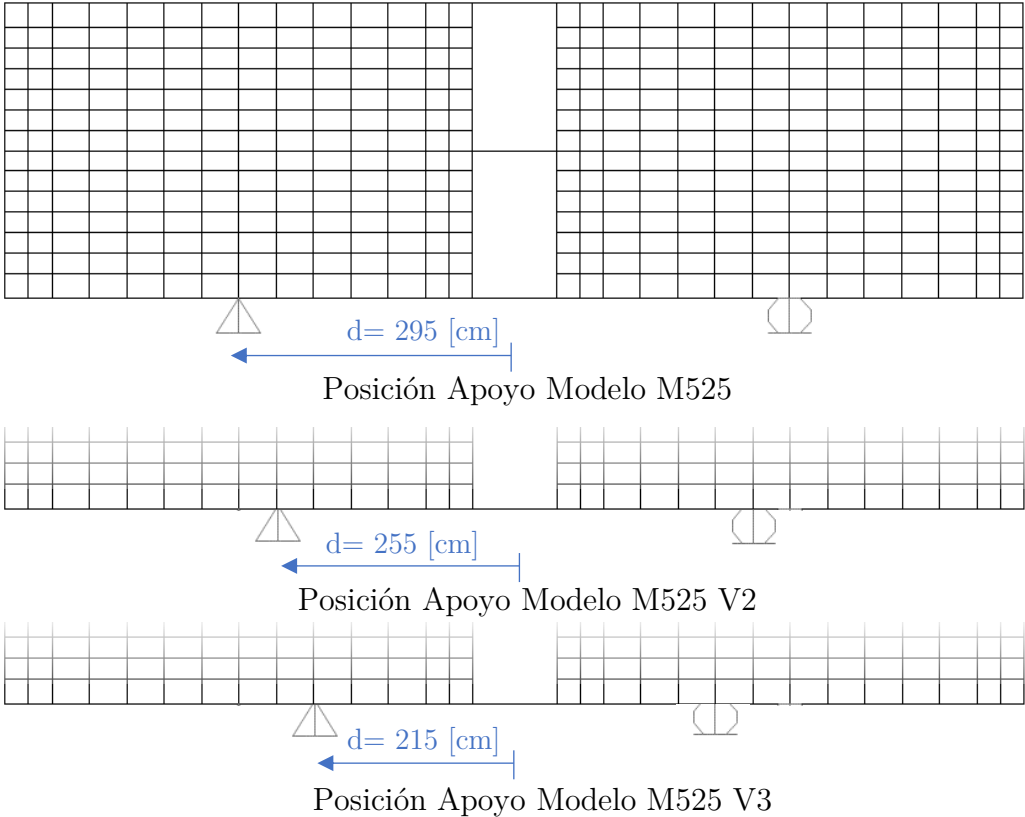


Figura B.19. Disposición de apoyos en modelo de sensibilidad.

Para los 3 casos de estudio se graficó la respuesta global del sistema y el momento transferido según se indicó en el capítulo 4, en las Figuras B.20 y B.21 respectivamente, donde se observa que la principal variación se encuentra en la respuesta global del sistema, sin embargo, en los tres casos, la tendencia se reproduce. Al estudiar particularmente el comportamiento de la losa, se obtienen resultados levemente desfasados pero que en cualquier caso resulta en la misma capacidad máxima de transmisión de momento.

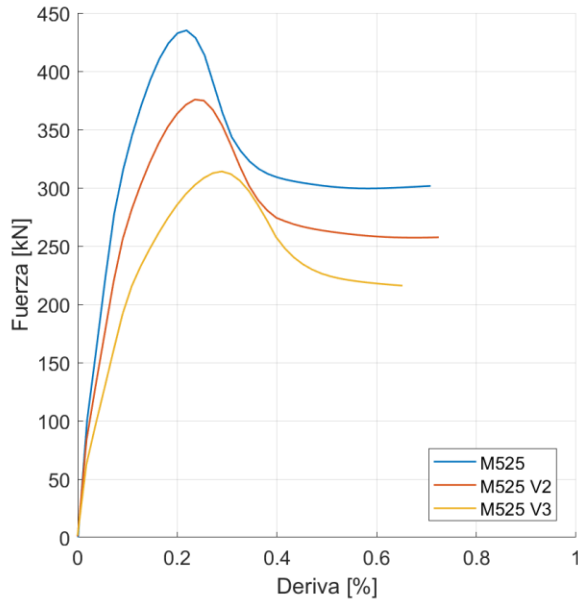


Figura B.20. Respuesta Global del sistema con distintas posiciones de apoyo.

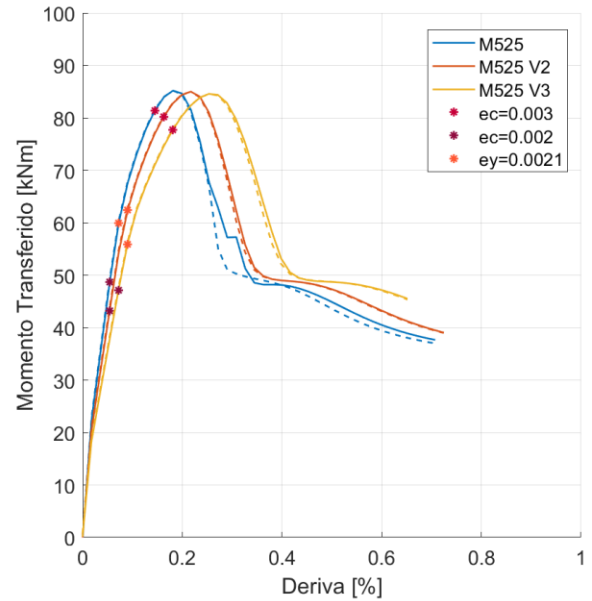
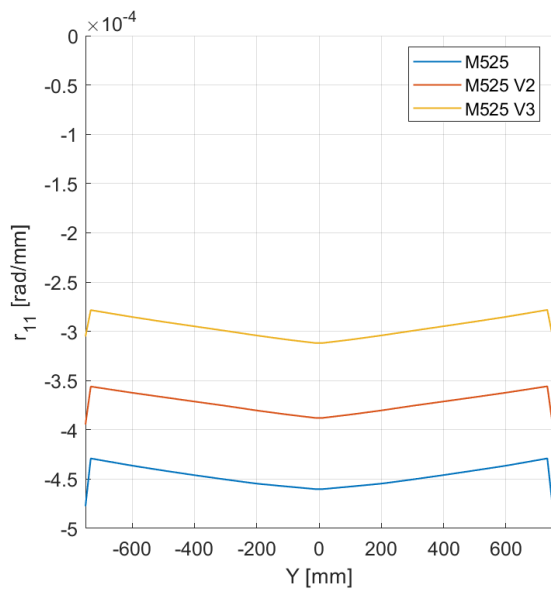


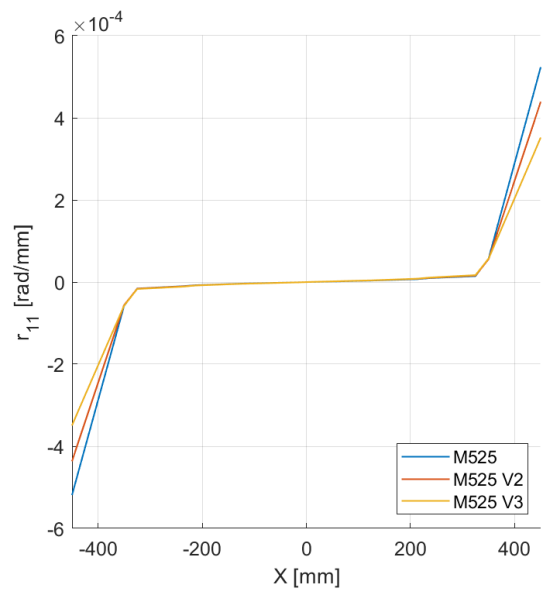
Figura B.21. Momento transmitido por la losa con distintas posiciones de apoyo.

La Figura B.22 muestra además la distribución de esfuerzos m_{11} y r_{11} en X e Y de la losa de acoplamiento para los tres casos de estudio en un 0.5% de deriva, donde se evidencia el mismo tipo de respuesta desfasada, mostrando que el modelo con apoyos en el centro del muro alcanza rotaciones mayores y por tanto la fluencia anticipadamente, pero con la tendencia a alcanzar eventualmente el mismo momento de fluencia de la sección completa.

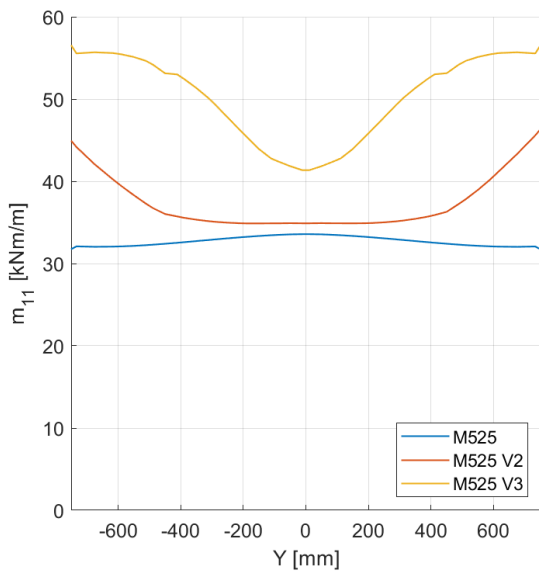
Teniendo en cuenta estos resultados y despreciando el desfase en rotación observado, resulta evidente que el comportamiento de la losa es similar independiente de la posición del apoyo aun cuando la respuesta global del sistema se ve afectada. De este modo, entendiendo que el objetivo es netamente comparativo, es posible utilizar el modelo con apoyos ubicados arbitrariamente en el centro de los muros para todas las geometrías como un modelo representativo del modelo de 10 pisos con suficiente precisión para los fines de esta memoria de título.



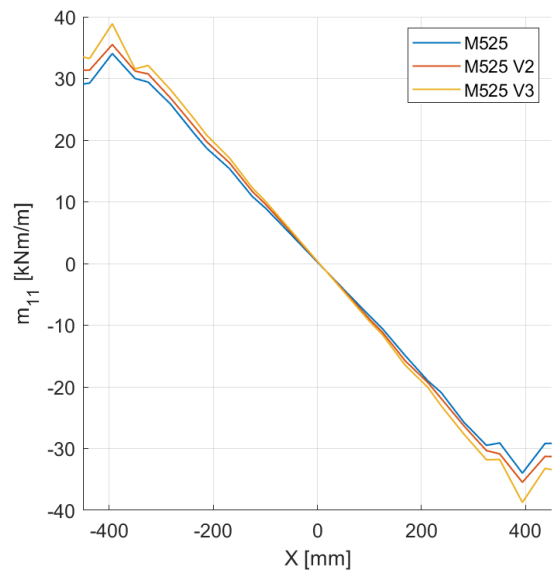
(a) r_{11} vs Y



(b) r_{11} vs X



(c) m_{11} vs Y



(d) m_{11} vs X

Figura B.22. Distribución de rotación y momento en dirección X e Y para un 0.5% de deriva con distintas posiciones de apoyo.

A partir de la discusión acerca de la posición real del eje de giro, se propone para futuros trabajos el estudio numérico del perfil de deformación medido en el alma de los muros con tal de establecer el perfil vertical de la disposición del eje de rotación de los muros para estudiar la respuesta global en términos de capacidad máxima con mayor exactitud y establecer una relación en función de la deformada del sistema que eventualmente permita mejorar la disposición del apoyo en modelos de 1 piso.