



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOSAS DE ACOPLA DE HORMIGÓN ARMADO EN
VANOS DE PUERTAS CON ALTA Y BAJA CUANTÍA MEDIANTE USO DE
SENSORES LVDT**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JUAN MATÍAS ROMERO JARA

PROFESOR GUÍA:
FABIÁN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

Este trabajo ha sido financiado por:
FONDECYD REGULAR N°1241970

SANTIAGO DE CHILE

2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

POR: JUAN MATÍAS ROMERO JARA

FECHA: 2024

PROFESOR GUÍA: FABIÁN ROJAS BARRALES

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOSAS DE ACOPLE DE HORMIGÓN ARMADO EN
VANOS DE PUERTAS CON ALTA Y BAJA CUANTÍA MEDIANTE USO DE
SENSORES LVDT**

Chile se caracteriza por su alta sismicidad, lo que hace esencial comprender el comportamiento sísmico de los elementos estructurales en rangos no lineales. La estructuración típica de edificios habitacionales de hormigón armado se compone, usualmente, por un pasillo principal con muros de corte en sus lados, acoplados mediante losas. En particular, este acoplamiento entre muros y losas en vanos de puerta mejora la ductilidad y la capacidad de disipación de energía del sistema estructural.

Esta investigación presenta un estudio experimental de losas de acople de hormigón armado asociadas a vanos de puerta, con alta y baja cuantía de refuerzo longitudinal en relación con los valores normales de la tipología de edificios chilenos. Esto con el fin de verificar la influencia de este refuerzo en la respuesta ante cargas cíclicas en rangos no lineales y a partir de ello generar recomendaciones de diseño.

La metodología experimental considera el diseño, la construcción y el ensayo de dos probetas de hormigón armado, con iguales dimensiones y características, diferenciándose únicamente la armadura de refuerzo longitudinal de la losa. Los ensayos experimentales se ejecutaron siguiendo un protocolo que considera dos controles iniciales por carga, para luego controlar mediante desplazamientos crecientes, con dos ciclos por nivel de deriva. La recolección de los datos experimentales se realizó utilizando sensores LVDT posicionados estratégicamente en puntos de interés.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que la cuantía de refuerzo longitudinal influye significativamente en el modo de falla de las losas de acople. El aumento de la cuantía longitudinal incrementa la capacidad de carga de las losas. Sin embargo, el elemento se vuelve más rígido, lo que reduce la ductilidad e induce una falla a corte por punzonamiento. En contraste, la disminución de la cuantía reduce la capacidad, pero el elemento es más dúctil y se induce una falla por flexión.

En memoria de mi abuelo Clodomiro

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi madre, quien siempre me ha apoyado y motivado a perseguir mis sueños y metas. A mi abuela Nelly, mi segunda madre, por todo el cariño que me ha dado. A mi padre, por siempre tener su respaldo. A mis hermanos que me alegran los días con sus locuras. A mi tío Clodo, por abrirme las puertas de su hogar en Santiago. A toda mi familia, por siempre incentivar me a seguir con mis estudios, en especial a mi abuelo Clodomiro, a quien siempre llevo en mi memoria y corazón.

Agradezco a mi novia Belén, por estar siempre a mi lado, apoyándome, entregándome su amor y motivándome a ser mejor. Gracias por alegrarme los días, ser mi refugio en los momentos difíciles y ayudarme con ideas para mejorar este documento. De igual forma agradecer a su madre y a su familia, por siempre recibirme de la mejor forma.

A mis amigos de plan común y de mención, en especial a Mario, Jaime, Oscar, Tomás, Diego, Manuel, Pablo, Violeta, Valeria y Marta, por todos los buenos momentos compartidos y las largas jornadas de estudio; gracias a ustedes, mi paso por la universidad fue mucho más grato. Igualmente, a Jazmín por su amistad incondicional desde la época del colegio.

Finalmente, quiero agradecer a mi profesor guía, Fabián Rojas, por brindarme la oportunidad de participar en este proyecto de investigación, por su constante disposición y por ayudarme a resolver todas mis dudas. También expreso mi agradecimiento al profesor Leonardo Massone y a Augusto Holmberg, quienes, con su retroalimentación, contribuyeron a mejorar la calidad de este documento. Asimismo, agradezco al profesor Pedro Soto, Rodrigo, Matías y Luís por las largas jornadas de trabajo compartidas en el laboratorio.

Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Organización	2
Capítulo 2: Antecedentes de Estudio	4
2.1. Estructuración de edificios habitacionales en Chile	4
2.2. Daños en edificios luego del Terremoto “27 F”	5
2.3. Estudios anteriores	7
2.4. Marco teórico	7
2.4.1. Relación deriva de techo y rotación de la losa.....	7
2.4.2. Resistencia de corte por punzonamiento.....	9
Capítulo 3: Metodología Experimental.....	11
3.1. Diseño de probetas.....	11
3.1.1. Geometría.....	11
3.1.2. Armadura	12
3.2. Construcción de probetas.....	14
3.2.1. Moldaje de losas	14
3.2.2. Enfierradura	14
3.2.3. Hormigonado	15
3.2.4. Descimbre	16
3.3. Caracterización de los materiales.....	16
3.3.1. Caracterización del hormigón.....	17
3.3.1. Caracterización del acero	17
3.4. Instalación experimental	19
3.4.1. Sistema de fundaciones.....	20
3.4.2. Sistema de carga	20
3.5. Instrumentación.....	21

3.4.1. Instalación de sensores LVDT	21
3.5. Protocolo de carga.....	24
3.6. Sistema de referencia	25
Capítulo 4: Resultados	26
4.1. Conversión y centrado de los datos de los sensores LDVT.....	26
4.2. Corrección por desplazamiento y rotación	26
4.3. Carga versus desplazamiento.....	27
4.4. Envolvente de carga.....	30
4.5. Rigidez secante	31
4.6. Energía	34
4.7. Perfil de deformación vertical.....	37
4.8. Daños en las probetas.....	39
4.8.1. Progresión de grietas en losa de alta cuantía	40
4.8.2. Progresión de grietas en losa de baja cuantía.....	43
4.9. Relación entre deriva de techo y rotación de losa.....	47
Capítulo 5: Conclusiones	49
Bibliografía	51
ANEXOS	53
Anexo A: Cálculos.....	53
A.1. Corrección de deformación vertical en franja central.....	53
A.2. Estimación de la cantidad de barras que trabajan en flexión	54
A.3. Estimación de resistencia a corte	55
A.4. Estimación de la cuantía que produce un cambio de tipo de falla	58
Anexo B: Metodología Experimental	60
B.1. Plano de Muros AC y BC.....	60
B.2. Recuperación de muros	61
B.3. Reparaciones	62
B.4. Caracterización de los materiales	63
B.4.1 Acero	63
B.4.2 Hormigón	65
B.5. Constantes y posiciones de los sensores LVDT.....	66

B.6. Grietas en la Probeta AC.....	67
Anexo C: Resultados.....	68
C.1. Punto estimado en el perfil de deformaciones de franja central de la losa BC	68
C.2. Análisis de sensibilidad de la ecuación (1)	69

Índice de Figuras

Figura 1. Estructuración típica de un edificio residencial en Chile (Mariman, 2018).....	4
Figura 2. Pandeo de barras y confinamiento deficiente en borde de muro (Youssef, 2010).....	6
Figura 3. Falla por punzonamiento en losas de acople.	6
Figura 4. Acciones estructurales de un muro sometido a cargas laterales (Coull & Chee, 1983)..	8
Figura 5. Perímetro crítico de losa de acople (Schwaighofer & Collins, 1977).	9
Figura 6. Perímetro crítico según Eurocódigo 2 (European Committee for Standardization, 2004).	10
Figura 7. Dimensiones de las probetas.	11
Figura 8. Plano de armaduras de las losas.	13
Figura 9. Moldaje de losas de acople.....	14
Figura 10. Armadura de probetas.....	15
Figura 11. Compactación del hormigón.....	15
Figura 12. Probetas construidas.	16
Figura 13. Ensayo de compresión a probeta de hormigón.....	17
Figura 14. Ensayo de tracción de barra con uso de extensómetro.	18
Figura 15. Laboratorio de Estructuras – Universidad de Chile (Manríquez, 2016).	19
Figura 16. Configuración del montaje experimental.	19
Figura 17. Sistema de postensado.....	20
Figura 18. Componentes de un sensor LVDT (Zhang, 2008).....	21
Figura 19. Disposición general de sensores LVDT en el montaje experimental.....	22
Figura 20. Sensores de control de desplazamiento horizontal en la zona superior de la losa.	22
Figura 21. Sensores de control de desplazamientos horizontales y verticales de las fundaciones y la probeta.....	23
Figura 22. Sensores de control de desplazamiento longitudinal de la franja central de la losa....	23
Figura 23. Protocolo de carga y desplazamiento nominal.	24
Figura 24. Sistema de referencia de ensayos cíclicos (Sarmiento, 2024).	25
Figura 25. Esquema de relaciones geométricas de sensor real y ficticio.....	37
Figura 26. Daños en la probeta AC.....	39
Figura 27. Daños en la probeta BC.....	39
Figura 28. Cara frontal de la losa de alta cuantía previo al ensayo.	40
Figura 29. Primeras grietas a una rotación de 0.022 [rad].	40

Figura 30. Avance de grietas a una rotación de 0.054 [rad].	41
Figura 31. Avance de grietas a una rotación de 0.097 [rad].	41
Figura 32. Avance de grietas a una rotación de 0.117 [rad].	42
Figura 33. Avance de grietas a una rotación de 0.139 [rad].	42
Figura 34. Avance de grietas a una rotación de 0.16 [rad].	43
Figura 35. Cara frontal de la losa de baja cuantía previo al ensayo.	43
Figura 36. Primeras grietas a una rotación de 0.037 [rad].	44
Figura 37. Avance de grietas 0.053 [rad].	44
Figura 38. Avance de grietas 0.095 [rad].	45
Figura 39. Avance de grietas 0.137 [rad].	45
Figura 40. Avance de grietas 0.16 [rad].	46
Figura 41. Avance de grietas 0.223 [rad].	46
Figura 42. Avance de grietas 0.351 [rad].	47
Figura 43. Esquema de las relaciones geométricas del sensor real y ficticio.	54
Figura 44. Perímetro crítico según Eurocódigo 2 dividido en sentido transversal y longitudinal.	57
Figura 45. Plano de Muro AC y BC (adaptado de Sarmiento, 2024).	60
Figura 46. Recuperación de los muros.	61
Figura 47. Proceso de reparación de probeta BC.	62
Figura 48. Agrietamiento de la losa AC.	67

Índice de Tablas

Tabla 1. Cuantías y dimensiones de las losas.	12
Tabla 2. Caracterización del hormigón.	17
Tabla 3. Caracterización de las barras de 8 mm de diámetro.	18
Tabla 4. Caracterización de las barras de 16 mm de diámetro.	18
Tabla 5. Distribución de los sensores.	22
Tabla 6. Protocolo de cargas y desplazamientos nominales.	24
Tabla 7. Rotaciones promedio asociadas a la rotación máxima.	31
Tabla 8. Rigidez secante para cada ciclo de carga.	33
Tabla 9. Energía disipada del sistema por ciclo y acumulada.	36
Tabla 10. Energía acumulada en hitos importantes.	36
Tabla 11. Resultados de análisis en flexión.	55
Tabla 12. Valores de estimaciones de resistencia a corte.	58
Tabla 13. Constantes y posiciones de los sensores LVDT	66

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Corrección por rotación y desplazamiento de la probeta AC.	27
Gráfico 2. Curva de carga versus desplazamiento de la probeta AC.	28
Gráfico 3. Curva de carga versus desplazamiento de la probeta BC.	29
Gráfico 4. Curvas de carga versus desplazamiento comparadas.	29
Gráfico 5. Envoltentes de carga de las probetas AC y BC.	30
Gráfico 6. Rigidez secante de la probeta AC.	31
Gráfico 7. Rigidez secante de la probeta BC.	32
Gráfico 8. Cambio de rigidez secante.	33
Gráfico 9. Energía disipada por ciclo.	35
Gráfico 10. Energía acumulada.	35
Gráfico 11. Perfil de deformación de la probeta AC.	38
Gráfico 12. Perfil de deformaciones de la probeta BC.	38
Gráfico 13. Relación de rotación y deformación de la losa (Geometría - Ensayo).	48
Gráfico 14. Relación deriva de techo y rotación de la losa.	48
Gráfico 15. Estimación de la capacidad a corte.	57
Gráfico 16. Cambio de tipo de falla.	59
Gráfico 17. Curvas de tensión versus deformación unitaria de las barras $\Phi 8$	63
Gráfico 18. Resistencia última de las barras $\Phi 8$	63
Gráfico 19. Curvas de tensión versus deformación unitaria de las barras $\Phi 16$	64
Gráfico 20. Resistencia última de las barras $\Phi 8$	64
Gráfico 21. Curvas de tensión versus deformación unitaria de las muestras de hormigón de la losa AC.	65
Gráfico 22. Curvas de tensión versus deformación unitaria de las muestras de hormigón de la losa BC.	65
Gráfico 23. Registro completo de los perfiles de deformación de la probeta BC.	68
Gráfico 24. Ponderación de deformaciones verticales.	69
Gráfico 25. Análisis de sensibilidad de la ecuación (1) con ancho de vano de puerta variable. ..	69
Gráfico 26. Análisis de sensibilidad de la ecuación (1) con largos de muros variables.	70

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del mundo debido a su ubicación en la zona de subducción de las placas de Nazca y Antártica bajo la placa del Pacífico. Según el Centro Sismológico Nacional (2024), desde 1985 hasta la fecha de redacción de este documento, se han registrado 10 sismos de magnitud igual o mayor a 7.0 en la escala de magnitud de momento [Mw], de los cuales 5 han igualado o superado los 8.0 [Mw].

Tras el terremoto del 27 de febrero de 2010, cuyo epicentro se localizó en el mar chileno, frente a la costa de la actual región de Ñuble, se evidenciaron fallas patológicas importantes en edificios en altura de la zona centro-sur del país. Una de estas fue la falla de corte por punzonamiento en las losas de acoplamiento en vanos de puertas.

Como resultado, se han realizado estudios sobre muros rectangulares acoplados a losas, considerando las particularidades del diseño estructural chileno. Sin embargo, dichos estudios se han enfocado en la respuesta estructural de los muros, utilizando la losa solo como un elemento de acoplamiento, sin profundizar en su comportamiento ante cargas de carácter cíclico.

En cuanto a losas de acople de vanos de puerta, solo se ha realizado un estudio que analizó la influencia del uso de trabas en la respuesta del sistema, sin considerar las variaciones de la armadura de refuerzo longitudinal. Adicionalmente, la normativa de diseño estructural ACI 318-19 no contempla la influencia de la armadura longitudinal en la capacidad a corte de estas losas. A nivel internacional, se han llevado a cabo estudios experimentales para evaluar la capacidad a corte de losas de acople, pero se han enfocado en acoplamientos de tipo columna-losa.

Por lo tanto, el presente estudio se realiza con el fin de realizar ensayos de cargas cíclicas, controladas por carga y desplazamiento, sobre probetas de losa de acoplamiento de vanos de puerta con alta y baja cuantía de refuerzo longitudinal. Los desplazamientos y deformaciones serán adquiridos mediante sensores LVDT.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudiar de forma experimental la influencia de losas de acople de vanos de puerta con baja y alta cuantía de refuerzo longitudinal.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Estudio de las armaduras longitudinales en losas de acople de vanos de puerta en edificaciones chilenas.
2. Desarrollar el montaje experimental, la instrumentación, el ensayo de dos probetas de losas de acople y analizar los resultados obtenidos mediante sensores LVDT.
3. Estimación de punzonamiento y estudio de patrón de grietas en las losas de acople.
4. Generar recomendaciones de diseño para componentes de acople tipo losas de vanos de puertas.

1.3. Organización

- *Capítulo 1: Introducción*

En este capítulo se tratan las motivaciones del estudio experimental, vinculadas a la alta actividad sísmica de Chile y las fallas observadas en los edificios habitacionales en altura tras el terremoto del 27 de febrero de 2010. Adicionalmente, se presentan el objetivo general, los objetivos específicos y la organización del informe.

- *Capítulo 2: Antecedentes de Estudio*

Se describen las características típicas de la estructuración de edificios en altura en Chile, se detallan los daños observados en edificios de la zona centro-sur del país luego del terremoto del 27 de febrero de 2010 y se exponen algunos de los estudios anteriores sobre losas de acople, junto con el marco teórico utilizado.

- *Capítulo 3: Metodología Experimental*

Se detallan las dimensiones, las cuantías y las etapas constructivas de las probetas, así como la caracterización de los materiales. También se describe la instalación experimental, los protocolos de carga y el sistema de referencia utilizado en los ensayos.

- *Capítulo 4: Resultados Experimentales*

Se presentan los resultados experimentales obtenidos tras ensayar las probetas, incluyendo las capacidades de carga, las rotaciones máximas, las rigideces secantes, la energía disipada por los sistemas, los perfiles de deformaciones verticales, los daños en las probetas y las relaciones de deriva de techo y rotación de la losa.

- *Capítulo 5: Conclusiones*

Se exponen y analizan los principales resultados obtenidos, junto con recomendaciones sobre el diseño de losas de acoples y posibles estudios futuros a realizar.

Capítulo 2: Antecedentes de Estudio

2.1. Estructuración de edificios habitacionales en Chile

Los edificios residenciales en Chile se caracterizan por presentar un sistema estructural basado en muros de corte acoplados con losas y vigas de hormigón armado. Estos edificios suelen tener un pasillo central, como se muestra en la Figura 1, conformado por muros estructurales a los costados y acoplados únicamente por losas, tanto de tipo pasillo como de vano de puerta.

Basado en el análisis de 15 edificios chilenos de hormigón armado, diseñados entre 2010 y 2014, con alturas que varían entre 10 y 25 pisos, Henríquez (2019) establece parámetros sobre las dimensiones y cuantías más frecuentemente utilizadas en el diseño de elementos tipo muro y losa de hormigón armado.

En cuanto a las características de las losas, el valor modal para el espesor de la losa es de 15 [cm], mientras que para el ancho es de 150 [cm]. Por su parte, los valores de largo para vanos de puerta o pasillo se concentran entre 80 [cm] y 100 [cm]. La armadura distribuida tanto en dirección longitudinal como transversal tiene una cuantía entre 0.18% y 0.2%, mientras que la cuantía predominante del refuerzo principal es entre 1.3% y 1.4%, considerando 6 barras.

Los muros presentan espesores variables en la altura, de entre 50 [cm] para pisos inferiores y 15 [cm] para pisos superiores, siendo 20 [cm] el espesor más común. La armadura es de tipo doble malla con igual cantidad para las direcciones longitudinal y transversal en la mayoría de los casos con cuantías entre 0.24% y 0.30%. La cuantía de borde de muro varía entre 2.5% a 2.75% para los primeros pisos y entre 1% a 1.25% para los niveles superiores.

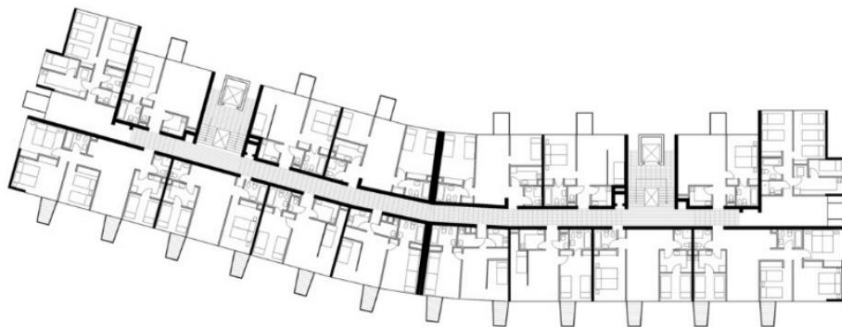


Figura 1. Estructuración típica de un edificio residencial en Chile (Mariman, 2018).

2.2. Daños en edificios luego del Terremoto “27 F”

Luego del terremoto del 27 de febrero de 2010 que tuvo epicentro en la actual Región de Ñuble, se realizaron múltiples visitas a los edificios de la zona centro-sur del país con el fin de realizar un catastro de los daños y evaluar el desempeño de los edificios en altura. A continuación, se mencionan los principales daños observados por los miembros de Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council (LATBSDC), descritos en los artículos de Youssef et al. (2010), Carpenter et al. (2010) y Rojas et al. (2010).

Uno de los principales daños observados fue el aplastamiento del hormigón y el pandeo de las barras longitudinales en columnas y en bordes de muros del primer piso y subterráneo, los cuales presentaban un detallamiento de confinamiento mínimo, inexistente y/o con problemas constructivos, con frecuencia en sectores de discontinuidades verticales en los muros de corte (ver Figura 2). Todo esto a pesar de la alta densidad de muros presentes en la estructuración chilena que se aproxima a cerca del 3%, evidenciando la importancia del confinamiento en los bordes de los muros.

Otros daños observados en fachadas y escaleras indican que elementos arquitectónicos que no estaban diseñados originalmente con propósitos estructurales se comportaron como tales. Las escaleras de hormigón armado y los elementos circundantes actuaron como diagonales de refuerzo. Además, fue usual la presencia de elementos con comportamiento de columna corta.

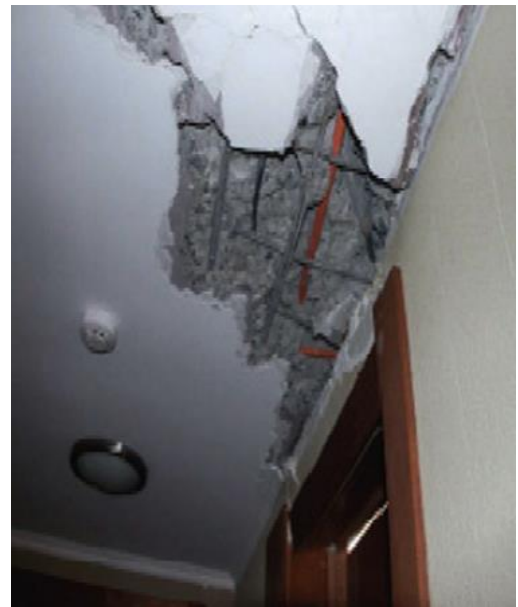
Los daños en los pisos “tipo” de niveles superiores se presentaron principalmente en las losas, debido a que estas actuaron como elementos de acoplamiento entre los muros paralelos del pasillo central y entre los muros de corte adyacentes en los vanos de puerta, siendo este último caso el foco del actual estudio. En las losas acopladas se presenciaron fallas por corte de tipo punzonamiento, con aplastamiento del hormigón en forma de “U” alrededor del borde del muro, tal como se muestra en la Figura 3.



Figura 2. Pandeo de barras y confinamiento deficiente en borde de muro (Youssef, 2010).



a) Falla en Torre Bosquemar, Concepción (Youssef et al., 2010).



b) Falla en edificio Antígona, Viña del Mar (Carpenter et al., 2010).

Figura 3. Falla por punzonamiento en losas de acople.

2.3. Estudios anteriores

Como consecuencia de los daños patológicos experimentados en edificios tras el terremoto del 27 de febrero de 2010, se realizaron múltiples estudios sobre la incidencia de la losa como elemento de acople en la respuesta estructural de los sistemas. Respecto a esto, en el estudio realizado por Valdivia (2023), se señala que las losas de acoplamiento tienen una influencia considerable en el desempeño estructural, permitiendo esfuerzos de corte y momentos basales menos demandantes para los muros, mejorando así la ductilidad y capacidad de disipación del sistema.

En la memoria de título realizada por Sarmiento (2024) se realiza un estudio experimental a losas de acople de hormigón armado de 12 [cm] de espesor con y sin trabas, donde el objetivo principal es comparar la capacidad de resistencia y deformación de las probetas representativas de una losa de vano de puerta de 90 [cm] con cuantía de refuerzo longitudinal de 1.51%, sometidas a cargas cíclicas simulando un sismo. Cabe señalar que esta cuantía se obtuvo a partir de los planos del estudio original, considerando una armadura longitudinal de 16 barras de 12 [mm] de diámetro por capa en una sección transversal de 100 [cm] de ancho y 12 [cm] de altura.

De las conclusiones del trabajo mencionado anteriormente, se destaca que la implementación de trabas induce un aumento del 24% en la capacidad de carga y un 78% en la capacidad de rotación, considerando la deformación máxima al 20% de degradación de la carga máxima. De igual forma, se señala que para ambos casos analizados se obtuvieron fallas por punzonamiento y se presenta una mayor deformación de la losa en las cercanías del muro. Además, el uso de trabas genera un confinamiento adicional que permite una mayor contribución del acero al aumentar el ancho colaborante.

2.4. Marco teórico

2.4.1. Relación deriva de techo y rotación de la losa

En el estudio sobre el diseño de losas de piso para acoplamiento de muros de corte realizada por Coull y Chee (1983), se menciona que es importante considerar los esfuerzos de corte en las losas para evitar fallas por corte punzante. Esto se debe a que el comportamiento de las losas de acople en edificios en altura es crucial para la resistencia de las cargas laterales. En un sistema de muros acoplados, las losas actúan como vigas de acoplamiento que resisten la acción de flexión independiente de los muros, desarrollando fuerzas cortantes en la losa y fuerzas axiales en los muros, tal como se grafica en la Figura 4. Adicionalmente, las tensiones de acoplamiento en la losa no son uniformes y tienden a concentrarse cerca de los bordes interiores de los muros transversales.

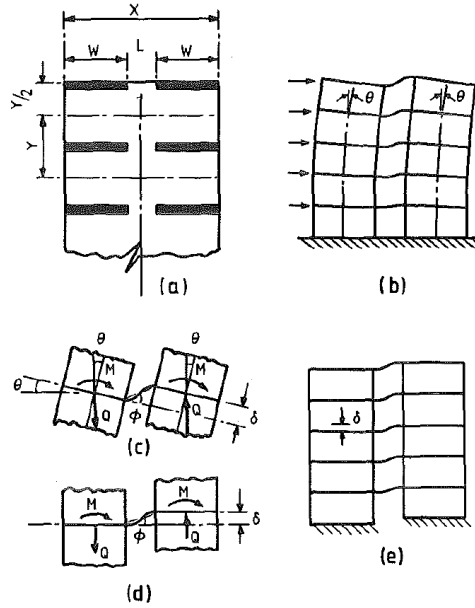


Figura 4. Acciones estructurales de un muro sometido a cargas laterales (Coull & Chee, 1983).

En este contexto, cobra interés establecer una relación entre la deriva de techo y la rotación de la losa. Estos conceptos pueden ser relacionados de forma simplificada por medio de relaciones geométricas y suponiendo que: los muros de acople tienen las mismas dimensiones, estos rotan en su línea neutra y la losa está rotulada en sus uniones a los muros. En el trabajo realizado por Sarmiento (2024) se establece la ecuación (1) en la que se relaciona la rotación de la losa ϕ y la deriva de techo θ que se aproxima a la relación entre el desplazamiento de techo δ y la altura de muro H al considerar pequeñas deformaciones.

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{l \cdot \sin(\theta)}{l + L - l \cdot \cos(\theta)}\right) \quad (1)$$

Donde:

- l es la longitud de los muros de acople.
- L es el ancho de vano de puerta.

Además, se presenta el desplazamiento en el centro de la losa δ , según la ecuación (3), derivado de la deformación de la losa causada por la rotación L' según la ecuación (2).

$$L' = \sqrt{(l + L - l \cdot \cos(\theta))^2 + (l \cdot \sin(\theta))^2} \quad (2)$$

$$\delta = \sin(\phi) \cdot \frac{L'}{2} \quad (3)$$

4.2.2. Resistencia de corte por punzonamiento

El punzonamiento en las losas de acople es un tipo de esfuerzo cortante que se desarrolla particularmente en zonas con cargas de corte concentradas alrededor del borde de una columna o muro. Para definir la zona donde las cargas de corte son críticas, se aplica el concepto de perímetro crítico o perímetro de control. Según la norma ACI 318-19 se considera una sección crítica idealizada a una distancia $d/2$ desde el borde de la columna o muro acoplado, donde “ d ” es la distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción en milímetros (American Concrete Institute, 2019). Sin embargo, esta norma se enfoca en definir la armadura de refuerzo requerida para acoples tipo columna-losa.

De acuerdo con el estudio experimental sobre losas acopladas a muros de corte realizada por Schwaighofer y Collins (1977), la manera en que se transfieren los esfuerzos de corte del muro a la losa es compleja. No obstante, a partir del modo de falla evidenciado experimentalmente, se puede estimar la capacidad de corte de la losa de acople usando un perímetro crítico en forma de “U” alrededor del borde del muro a una distancia de $d/2$. Ver Figura 5.

Luego, la resistencia al corte de la losa de acople se puede obtener de manera conservadora a partir de la ecuación (4), considerando un esfuerzo cortante último $V = 0.33\sqrt{f'c}$ [MPa] y un espesor de muro de corte “ t ”.

$$V_n = \frac{V}{3d(t+d)} \quad (4)$$

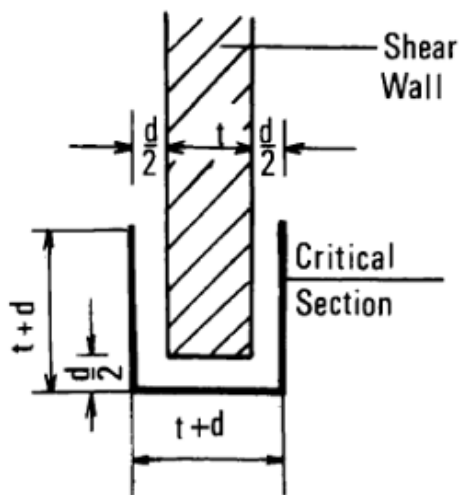


Figura 5. Perímetro crítico de losa de acople (Schwaighofer & Collins, 1977).

Las metodologías anteriores no consideran la incidencia de la cuantía de refuerzo longitudinal en la capacidad a corte. Sin embargo, el Eurocódigo 2 (European Committee for Standardization, 2004) sí considera este factor según la ecuación (5):

$$V = 0.18 \cdot k \cdot u_1 \cdot d \cdot (100 \cdot \rho \cdot f'c)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Donde:

- $k = \min\left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}}, 2\right)$
- u_1 : Perímetro crítico a una distancia de “2d” desde el borde de muro según la Figura 6.
- $\rho = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_t}$, con ρ_l y ρ_t las cuantías de acero en las direcciones longitudinal y transversal respectivamente.

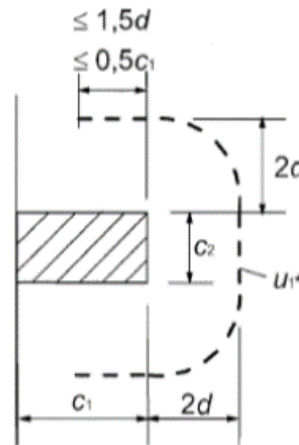


Figura 6. Perímetro crítico según Eurocódigo 2 (European Committee for Standardization, 2004).

Capítulo 3: Metodología Experimental

3.1. Diseño de probetas

El dimensionamiento de las dos probetas construidas se basa en el estudio experimental de losas de acople realizado por Sarmiento (2024), discutido en la sección 2.3. En el presente análisis, se mantienen las dimensiones de las probetas, así como las cuantías de los muros, de la armadura transversal y de las trabas, pero se modifica las cuantías del refuerzo longitudinal para evaluar su influencia en la respuesta de los sistemas acoplados en estudio.

A continuación, se detalla cada uno de los aspectos del diseño de las probetas.

3.1.1. Geometría

Las probetas están compuestas por tres elementos: muro, losa y viga de transferencia. Las dimensiones se muestran en la Figura 7, donde se destaca que la losa de acople tiene 12 [cm] de espesor, 100 [cm] de ancho y 130 [cm] de largo, incluida la viga de transferencia de 30 [cm]. Por otro lado, el muro tiene una geometría de 12 [cm] de espesor, 120 [cm] de altura y 150 [cm] de largo.

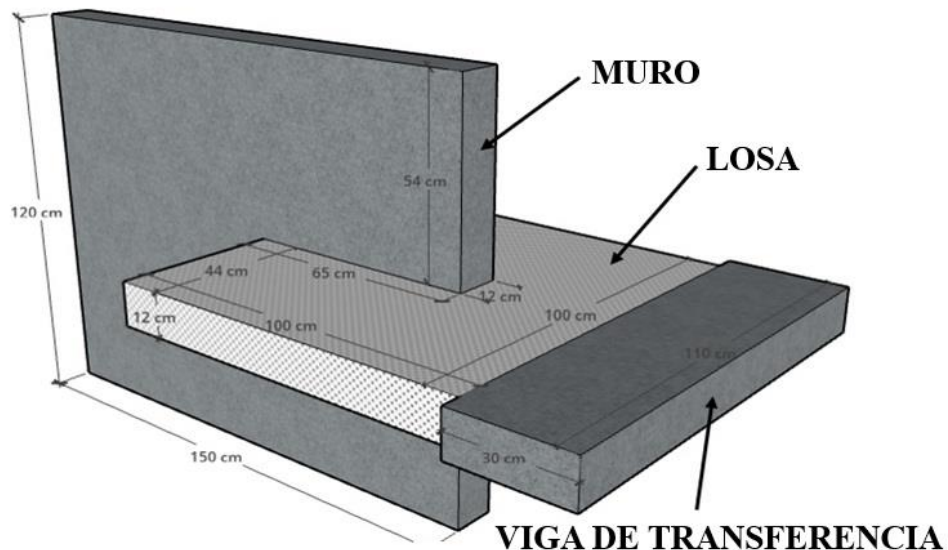


Figura 7. Dimensiones de las probetas.

3.1.2. Armadura

En el diseño de la armadura de las losas de acople de hormigón armado, se consideraron dos condiciones de refuerzo longitudinal: baja cuantía de 0,67% y alta cuantía de 2.68%. A partir de esta diferenciación, se denominará "BC" a la probeta con losa de baja cuantía y "AC" a la probeta con losa de alta cuantía. Los detalles de las cuantías y dimensiones de la losa de cada probeta se muestran en la Tabla 1.

Las losas de las probetas "BC" y "AC" tienen la misma armadura transversal y los mismos espaciamientos variables en la armadura longitudinal. No obstante, difieren en el diámetro de las barras: 8 mm para la losa BC y 16 mm para la losa AC. Asimismo, ambas probetas cuentan con trabas de barras de 6 mm en cada una de las intersecciones de armadura longitudinal y transversal. El plano de detalles de las armaduras de cada losa se presenta en la Figura 8, mientras que el plano de los muros se muestra en el Anexo B.1.

Tabla 1. Cuantías y dimensiones de las losas.

Elemento	Cuantía longitudinal	Cuantía transversal	Dimensiones de losa		
			Espesor	Ancho	Largo
Losa AC	2.68%	0.47%	12 [cm]	100 [cm]	130 [cm]
Losa BC	0.67%	0.47%	12 [cm]	100 [cm]	130 [cm]

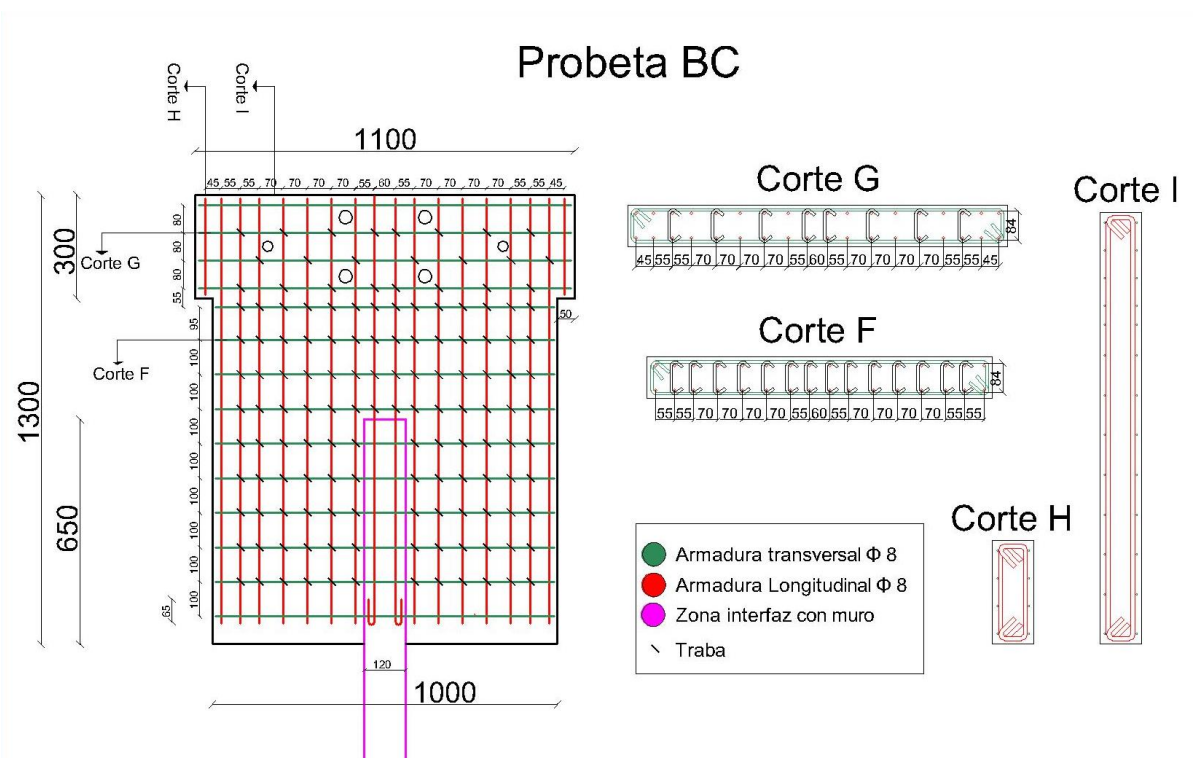
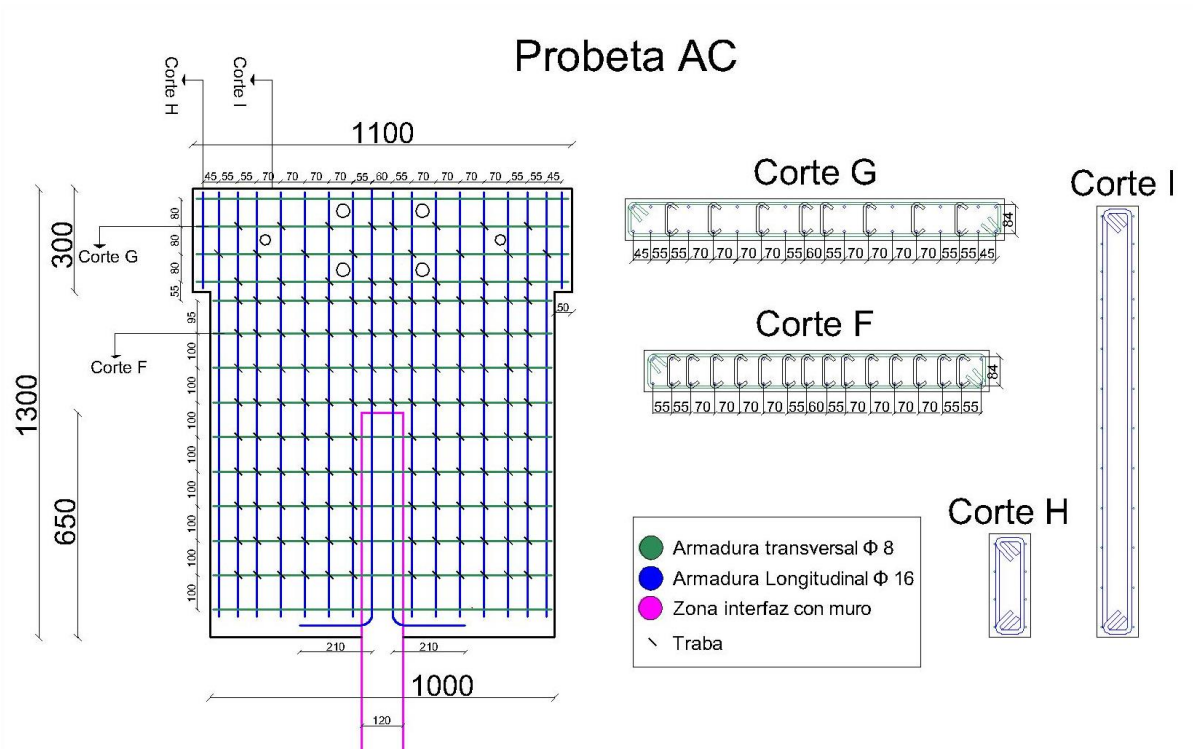


Figura 8. Plano de armaduras de las losas.

3.2. Construcción de probetas

Para el estudio experimental, se recuperaron íntegramente dos muros utilizados en ensayos anteriores a elementos tipo acople. Por lo tanto, se presenta únicamente la construcción de las losas. En el Anexo B.2 se muestra el detalle del proceso de recuperación de estos muros.

3.2.1. Moldaje de losas

El moldaje de las losas se construyó con tablero terciado con una película impermeable especial para encofrados, respetando las dimensiones establecidas de las probetas y considerando el espacio de intersección con el muro. En la Figura 9 se muestra uno de los moldajes construidos.



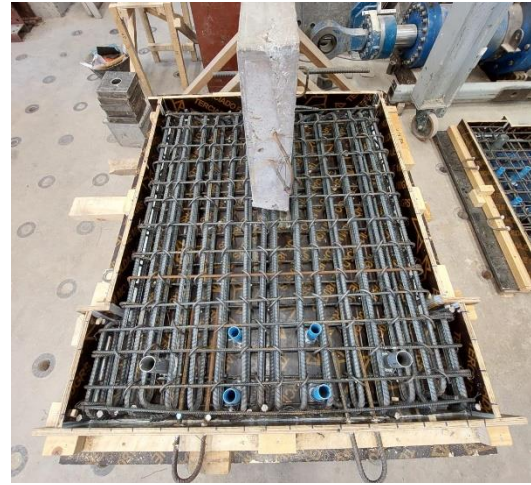
Figura 9. Moldaje de losas de acople.

3.2.2. Enfierradura

A partir de los planos de la Figura 8, se realizó el corte y doblado de las barras, para luego unir las diferentes piezas de la enfierradura con amarres de alambre in situ, lo que facilitó la colocación de las barras transversales que cruzan la zona de interfaz muro-losa. En la Figura 10 se muestra la enfierradura de cada una de las probetas.



a) Armadura de probeta BC.



b) Armadura de probeta AC.

Figura 10. Armadura de probetas.

3.2.3. Hormigonado

En el proceso de hormigonado se utilizó hormigón premezclado “BEMEZCLA H30”, preparado in situ con una mezcladora, siguiendo la relación agua/mezcla indicada por el fabricante. La compactación del hormigón se realizó mediante el uso de una sonda vibradora, tal como se muestra en la Figura 11, conforme a las indicaciones de la norma NCh 170:2016 para eliminar el exceso de aire atrapado y asegurar que las armaduras queden embebidas en el hormigón (Instituto Nacional de Normalización, 2016).



Figura 11. Compactación del hormigón.

3.2.4. Descimbre

Transcurrido más de 28 días de fraguado y curado, se realizó el descimbre de las probetas, evidenciando la geometría de las losas de acople. Cabe mencionar que se observaron nidos en las zonas laterales de la losa de acople con baja cuantía, producto de una compactación inadecuada, los cuales fueron debidamente reparados. El proceso de reparaciones se detalla en el Anexo B.3 y en la Figura 12 se muestran las dos probetas construidas.



Figura 12. Probetas construidas.

3.3. Caracterización de los materiales

Los materiales utilizados para la construcción de los elementos estructurales mencionados en las secciones anteriores incluyen, acero tipo A630-420H con valores nominales de tensión de fluencia de 420 MPa y resistencia a la tracción de 630 MPa, y hormigón tipo H30 o G25 con una resistencia nominal a compresión de 25 MPa.

Para determinar las propiedades reales de resistencia y deformación de los materiales, y así describir mejor el comportamiento de las probetas, se realizaron ensayos de tracción en muestras de barras de acero y de compresión en muestras de hormigón. Estos ensayos se llevaron a cabo utilizando una máquina hidráulica de ensayo universal INSTRON®, modelo 600LX, ubicada en el Laboratorio Francisco Domínguez del Departamento de Ingeniería Civil, perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Las curvas de tensión versus deformación obtenidas se presentan en el Anexo B.4.

3.3.1. Caracterización del hormigón

Las muestras de hormigón consisten en probetas cilíndricas de 21 [cm] de altura y 10.5 [cm] de diámetro, confeccionadas a partir de coladas de hormigón fresco durante el proceso de construcción. Luego del curado y refrentado fueron ensayadas en la máquina universal, utilizando un anillo metálico para medir la deformación por medio de sensores de tipo LVDT como se muestra en la Figura 13. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

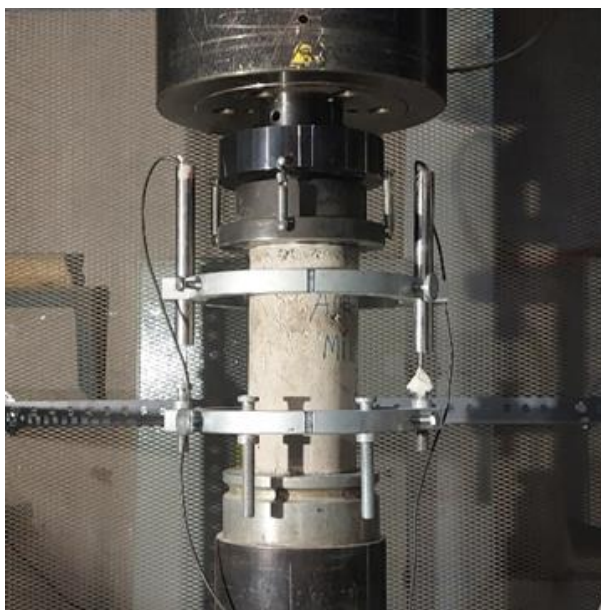


Figura 13. Ensayo de compresión a probeta de hormigón.

Tabla 2. Caracterización del hormigón.

Probeta	Resistencia a Compresión f'_c				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	f'_c Promedio
Probeta AC	28.87	22.98	25.66	-	25.8
Probeta BC	28.03	25.66	26.83	21.31	25.45

3.3.1. Caracterización del acero

Las muestras de acero utilizadas en los ensayos de tracción corresponden a tiras de 25 [cm] de largo con diámetros de 8 [mm] y 16 [mm], obtenidas del grupo de barras empleadas en la construcción de las probetas. El largo efectivo para el ensayo es de $L_0 = 10$ [cm] dado que la mordaza se posiciona en los primeros 7.5 [cm] de cada extremo.

Además, para medir de forma precisa las deformaciones en el rango lineal se utilizó un extensómetro EPSILON®, modelo 3542, debido a que durante el ensayo la barra tiende a acomodarse entre las mordazas, modificando las lecturas de la máquina universal. En la Figura 14 se muestra la configuración del montaje para el ensayo de tracción.

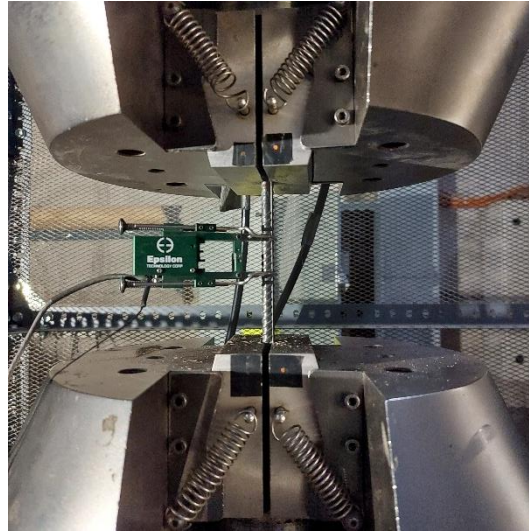


Figura 14. Ensayo de tracción de barra con uso de extensómetro.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3 y en la Tabla 4.

Tabla 3. Caracterización de las barras de 8 mm de diámetro.

Muestra	E [GPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	ϵ_y [-]	ϵ_u [-]
Muestra 1	242	563	776	0.0024	0.19
Muestra 2	225	554	781	0.0024	0.17
Muestra 3	233	558	768	0.0023	0.16
Muestra 4	231	565	774	0.0025	0.16
Promedio	233	560	775	0.0024	0.17

Tabla 4. Caracterización de las barras de 16 mm de diámetro.

Muestra	E [GPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	ϵ_y [-]	ϵ_u [-]
Muestra 1	230	442	735	0.0021	0.25
Muestra 2	238	443	724	0.0019	0.24
Muestra 3	250	442	709	0.0037	0.29
Promedio	239	443	723	0.0026	0.26

3.4. Instalación experimental

En esta sección se detalla lo referente a la instalación experimental empleada en el presente estudio, realizada en el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, el cual presenta un muro y una losa de reacción (ver Figura 15). La configuración del montaje experimental se muestra en la Figura 16.



Figura 15. Laboratorio de Estructuras – Universidad de Chile (Manríquez, 2016).

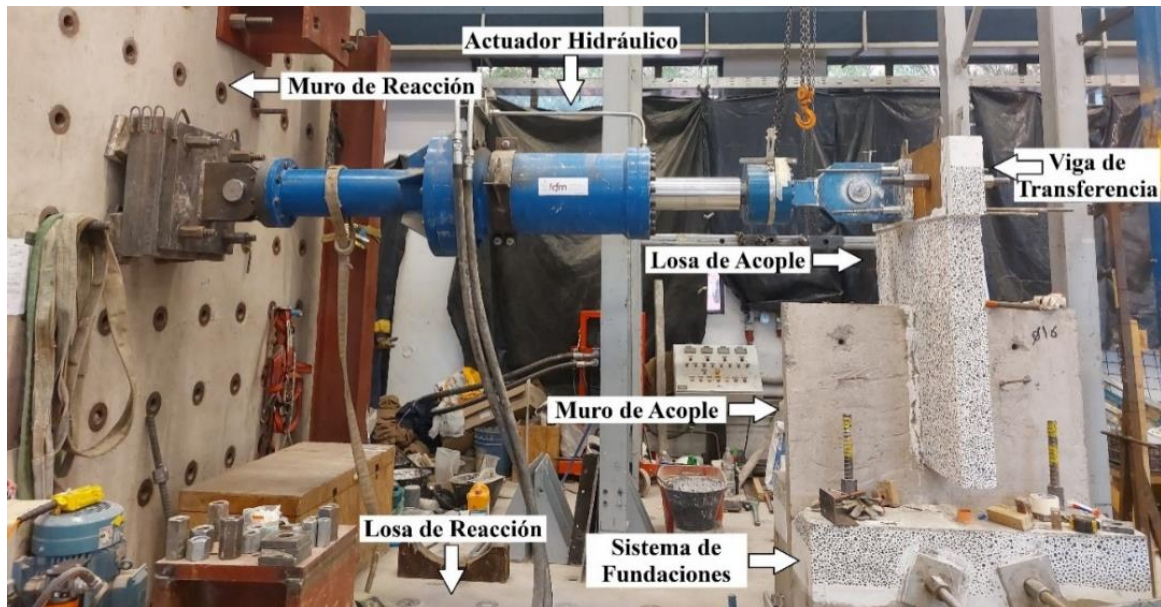


Figura 16. Configuración del montaje experimental.

3.4.1. Sistema de fundaciones

Para llevar a cabo el estudio experimental, se requiere de un sistema de fundaciones que actúe como empotramiento. Para esto, se utilizan dos bloques de hormigón armado colocados uno al frente de otro, entre los cuales se posiciona la probeta.

Para empotrar el sistema de fundaciones tanto a la losa de reacción como a la probeta se usan 8 pernos helicoidales de acero del tipo Dywidag de diámetro 32 mm, los cuales son postensados. El proceso de postensado se realizó con un gato hidráulico, utilizando una celda de carga entre dos placas y tuercas hexagonales. Se aplicó una carga de 20 [tonf] en cada uno de los pernos, ajustando las tuercas para asegurar el buen comportamiento del empotramiento. El sistema de postensado se muestra en la Figura 17.

En adición a lo anterior, se emplea un sistema de cuñas de acero para restringir aún más el desplazamiento de la probeta. Estas cuñas se posicionan contra el pedestal y se aseguran mediante barras de acero fijadas a la losa de reacción.



Figura 17. Sistema de postensado.

3.4.2. Sistema de carga

El sistema de carga consiste en un actuador hidráulico entre dos rótulas, una posicionada en el muro de carga y otra posicionada en la viga de transferencia de la probeta (ver Figura 16). El posicionamiento tanto de las rótulas como del actuador se realiza mediante el uso del puente grúa del laboratorio de estructuras.

Para fijar la rótula al muro de carga se emplean cuatro barras helicoidales de 32 [mm] de diámetro. En el caso de la rótula de la viga de transferencia, primero se coloca una placa de acero en cada una de las caras, tras lo cual, se asegura la rótula con cuatro barras helicoidales de 12 [mm] de diámetro. El posicionamiento del actuador hidráulico se realiza mediante dos cilindros de acero que se insertan entre las rótulas colocadas en los extremos del actuador.

3.5. Instrumentación

La adquisición de los datos experimentales se realiza a partir de dos métodos de instrumentación: Fotogrametría y Transformadores Diferenciales de Variación Lineal, conocidos como sensores LVDT. En este estudio se presentarán los resultados obtenidos a partir de este último método.

3.4.1. Instalación de sensores LVDT

Un LVDT consiste en un tubo metálico hueco que contiene un núcleo móvil, el cual está unido a una varilla de longitud variable según las necesidades. El núcleo se desplace libremente dentro del tubo, convirtiendo su movimiento lineal en una variación de voltaje lineal. A través de la calibración de los sensores, esta variación de voltaje se puede traducir en un registro de desplazamientos. Para medir el desplazamiento entre dos puntos, se fija el sensor en uno de ellos y la punta de la varilla en el otro, permitiendo registrar con precisión el movimiento relativo entre estos. En la Figura 18 se muestra un sensor LVDT con sus distintos componentes.

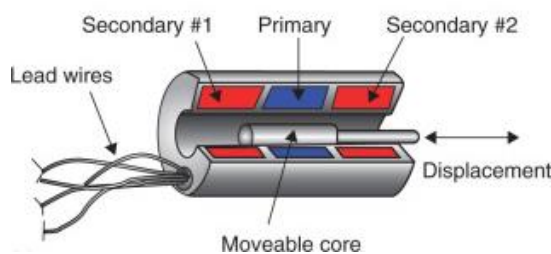


Figura 18. Componentes de un sensor LVDT (Zhang, 2008).

Los sensores son posicionados en distintos puntos del montaje experimental, según los desplazamientos que se deseen registrar. En la Tabla 5 se presenta la distribución de sensores utilizados. Del mismo modo, la Figura 19 muestra de manera gráfica la disposición general de los sensores.

Tabla 5. Distribución de los sensores.

Numeración sensores	Tipo de desplazamiento
0 - 1 - 2	Desplazamiento horizontal en la zona superior de la losa.
3 - 4 - 5	Desplazamiento horizontal de las fundaciones y la probeta.
6 - 7 - 8 - 9 - 10	Desplazamiento vertical de las fundaciones y de la probeta.
11 - 12 - 13 - 14 - 15	Desplazamiento longitudinal de la franja central de la losa.

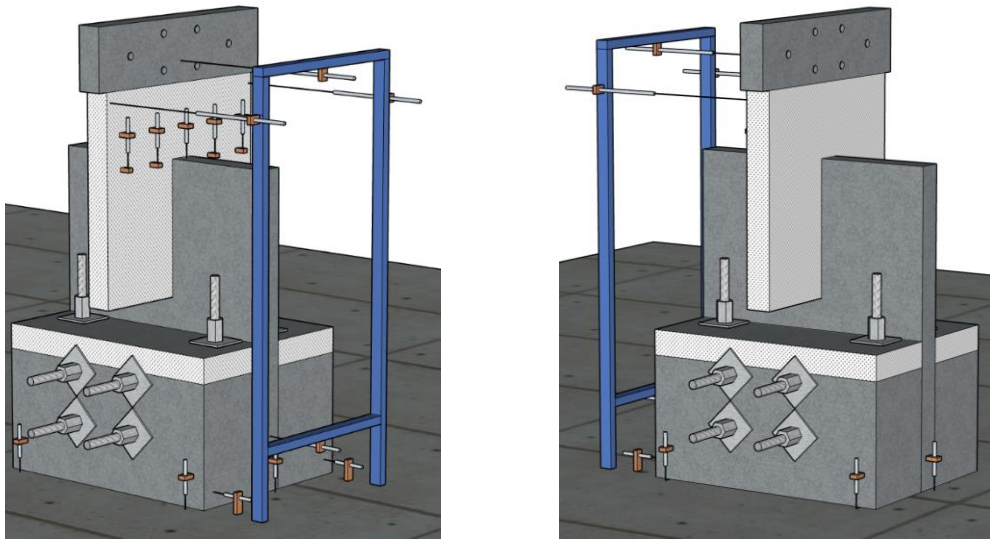


Figura 19. Disposición general de sensores LVDT en el montaje experimental.

En la Figura 20, Figura 21 y Figura 22 se describen las posiciones específicas de los sensores utilizados.

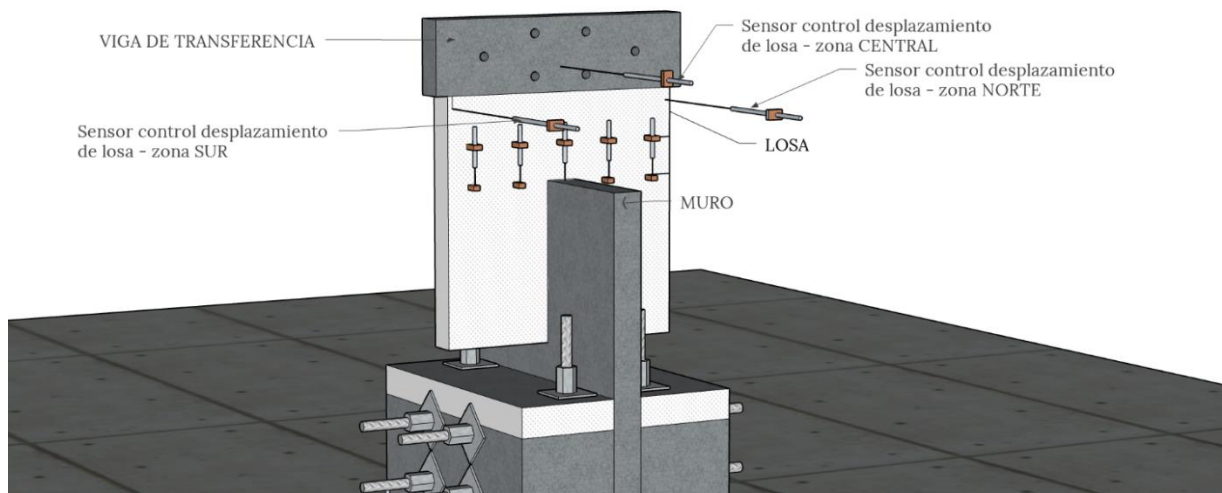


Figura 20. Sensores de control de desplazamiento horizontal en la zona superior de la losa.

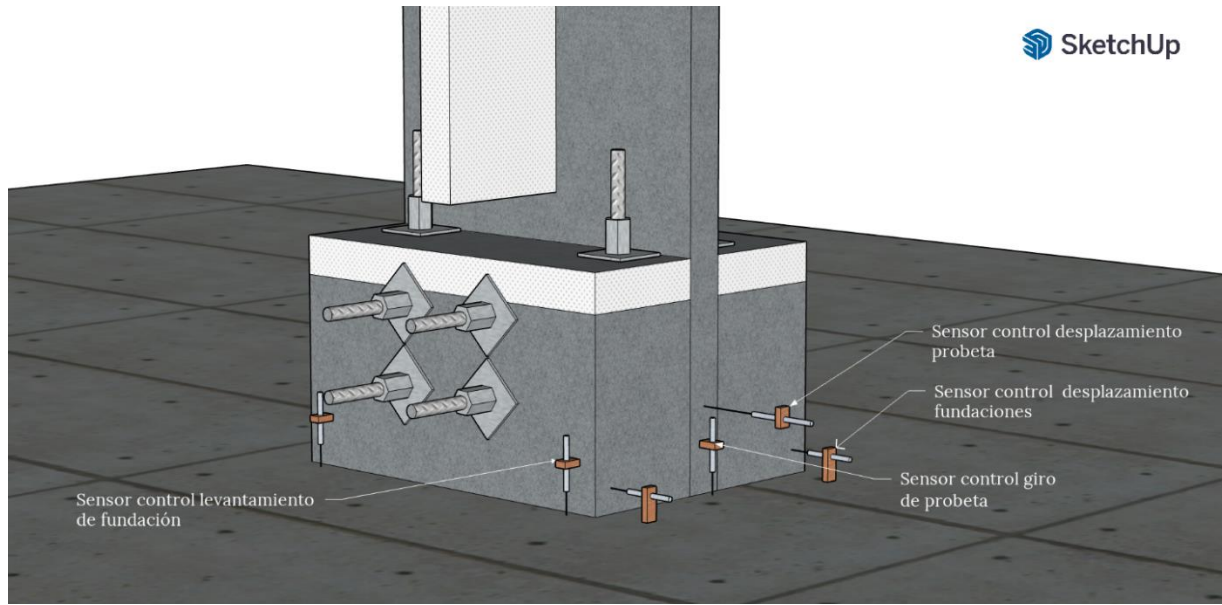


Figura 21. Sensores de control de desplazamientos horizontales y verticales de las fundaciones y la probeta.

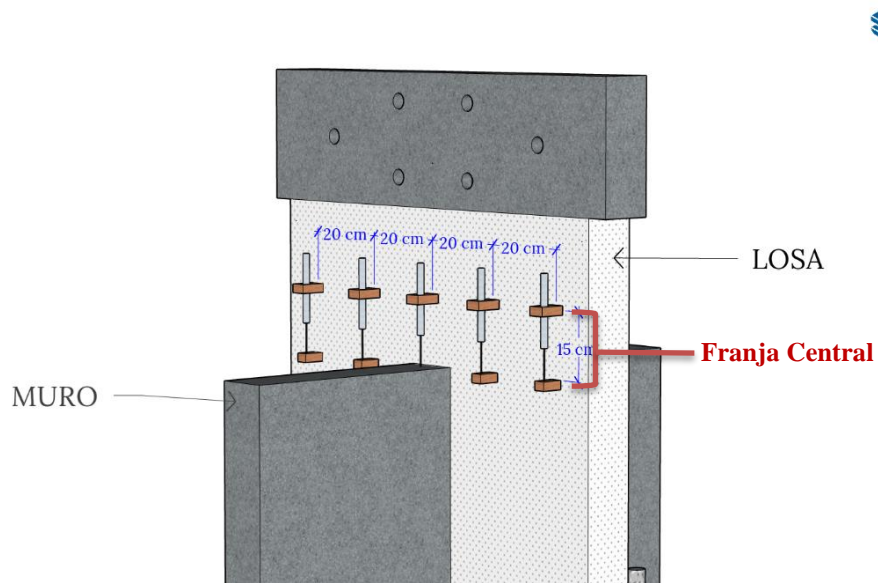


Figura 22. Sensores de control de desplazamiento longitudinal de la franja central de la losa.

3.5. Protocolo de carga

El protocolo de carga de los ensayos experimentales se define a partir de las indicaciones de la norma ACI 374-13, la cual establece una guía para probar elementos estructurales de hormigón armado bajo cargas sísmicas simuladas. En esta se especifica que el ensayo se controla en una primera instancia por dos niveles de carga distintos en el rango lineal y luego se controla a partir de desplazamientos específicos para dar incursión en el rango no lineal en derivas superiores (American Concrete Institute, 2013). En la Tabla 6 se presenta el protocolo de carga establecido y en la Figura 23 se muestra de forma gráfica.

Tabla 6. Protocolo de cargas y desplazamientos nominales.

Ciclos	Control (nominal)		Rotación [rad]
1 - 2	Carga	2000 [kgf]	-
3 - 4	Carga	8000 [kgf]	-
5 - 6	Desplazamiento	10 [mm]	0.022
7 - 8	Desplazamiento	15 [mm]	0.033
9 - 10	Desplazamiento	25 [mm]	0.056
11 - 12	Desplazamiento	35 [mm]	0.078
13 - 14	Desplazamiento	45 [mm]	0.100
15 - 16	Desplazamiento	55 [mm]	0.122
17 - 18	Desplazamiento	65 [mm]	0.144
19 - 20	Desplazamiento	75 [mm]	0.167
21 - 22	Desplazamiento	85 [mm]	0.189
23 - 24	Desplazamiento	105 [mm]	0.233
25 - 26	Desplazamiento	125 [mm]	0.278
27	Desplazamiento	165 [mm]	0.367

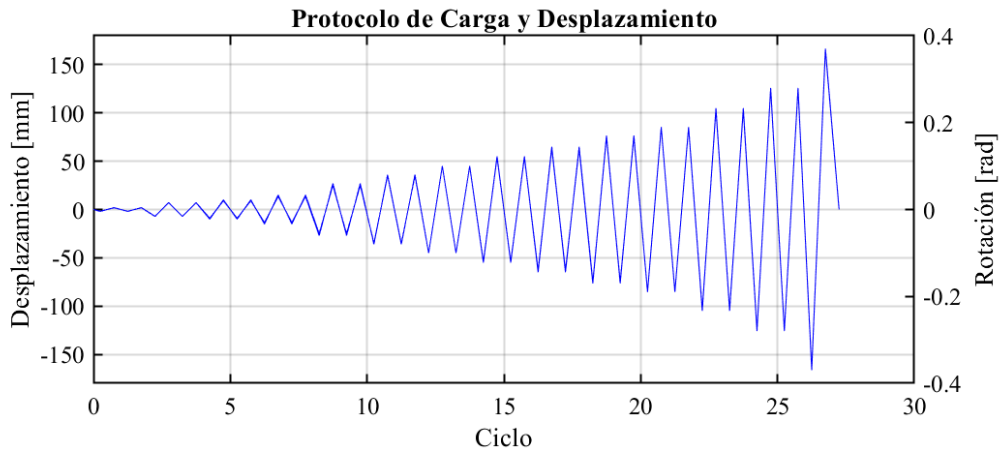


Figura 23. Protocolo de carga y desplazamiento nominal.

Es importante mencionar que, debido a las complejidades inherentes propias de la experiencia experimental, tanto las cargas como los desplazamientos de control presentaron ligeras variaciones respecto a lo planificado. En el caso del ensayo de la probeta BC, se observó que bajo una carga de 8000 [kgf], la probeta comenzó a deformarse en el rango inelástico, excediendo los desplazamientos de control previstos. Por esta razón, solo se realizó un control de carga de 8000 [kgf], omitiendo la rotación de 0.022 [rad] y se procedió con el control de desplazamiento a partir de la rotación de 0.033 [rad].

3.6. Sistema de referencia

En los ensayos se considera el sistema de referencia mostrado en la Figura 24. En este sistema, los desplazamientos hacia el sentido “Este” se consideran negativos, mientras que los movimientos hacia el sentido “Oeste” se consideran positivos. Se utiliza esta convención de signos por la forma en que los sensores registran los desplazamientos.

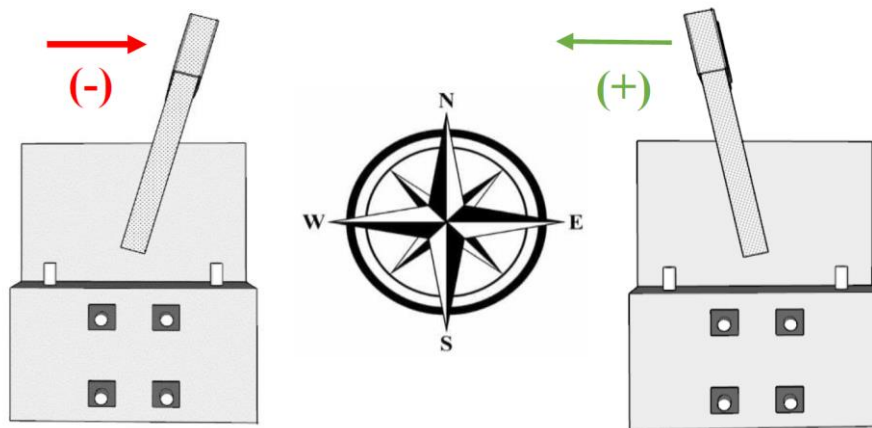


Figura 24. Sistema de referencia de ensayos cíclicos (Sarmiento, 2024).

Capítulo 4: Resultados

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos del análisis de datos mediante Matlab, adquiridos con sensores LVDT y celdas de carga. También, se incluirán algunos de los resultados obtenidos por Sarmiento (2024) en su probeta “CT” como punto de comparación, ya que esta comparte las mismas características de las probetas en estudio, con la única diferencia de que su armadura longitudinal es del 1.51%, asociado a un valor típico en la estructuración de edificios en Chile.

4.1. Conversión y centrado de los datos de los sensores LDVT

Los datos obtenidos mediante sensores LVDT se registran en unidades de voltaje, por lo que es necesario convertir estos datos a unidades de longitud. Esta conversión se realiza utilizando la ecuación (6), considerando las constantes "m" y "n" específicas para cada uno, las cuales se obtienen a partir de calibraciones individuales y se detallan en el Anexo B.5.

$$Datos [mm] = Datos [Volt] \cdot m \left[\frac{mm}{Volt} \right] + n [mm] \quad (6)$$

Realizada la conversión se procede a realizar un off-set para cada una de las señales con el fin de tener los datos de desplazamiento en cero al momento de comenzar con el ensayo experimental.

4.2. Corrección por desplazamiento y rotación

Durante la ejecución del ensayo, a pesar de contar con un sistema de empotramiento postensado, las probetas experimentan desplazamientos tanto rotacionales como horizontales debido a las altas cargas aplicadas. Es por esto que, para eliminar los excedentes de los desplazamientos registrados por los sensores y obtener los desplazamientos reales $\Delta_{LosaReal}$ de la probeta durante el ensayo, se utiliza la ecuación (7).

$$\Delta_{LosaReal} = \Delta_{Losa} - \Delta_{H_Probeta} - \frac{(\Delta_{V_Este} - \Delta_{V_Oeste}) \cdot H}{L} \quad (7)$$

Donde:

- Δ_{Losa} : Desplazamiento horizontal en la zona superior de la losa.
- $\Delta_{H_Probeta}$: Desplazamiento horizontal de la probeta.
- Δ_{V_Este} : Desplazamiento vertical de la probeta lado Este.
- Δ_{V_Oeste} : Desplazamiento vertical de la probeta lado Oeste.
- H : Altura del sensor de desplazamiento horizontal en la zona superior de la losa.
- L : Distancia entre los sensores verticales de la probeta.

En el Gráfico 1 se muestra la corrección por rotación y desplazamiento resultante de la probeta AC, donde se observa que los valores corregidos siempre son menores a los valores medidos.

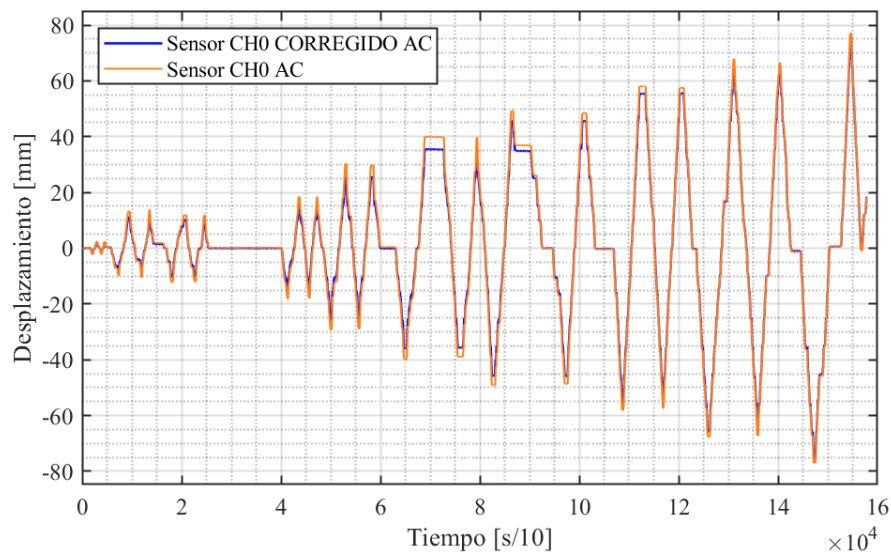


Gráfico 1. Corrección por rotación y desplazamiento de la probeta AC.

4.3. Carga versus desplazamiento

A partir de los datos corregidos se generan las curvas de carga versus desplazamiento, también conocidas como curvas de histéresis, para ambas probetas. En el Gráfico 2 se presenta la curva correspondiente a la probeta de alta cuantía (AC), mientras que en el Gráfico 3 se muestra la curva de la probeta de baja cuantía (BC).

Respecto a la curva de histéresis del ensayo de la probeta AC, se observa simetría en el desplazamiento, pero asimetría en la carga. Esto se debe a que la probeta presentó diferentes espesores de recubrimiento entre las caras de la losa de acople al momento de ser ensayada. Esta variación se originó debido al elevado peso de la armadura, lo cual sumado a la dificultad para posicionar correctamente los separadores para hormigón, generó este desajuste.

En cuanto a las características de resistencia, se destaca que en el sentido Oeste se obtuvo una carga máxima de 12492 [kgf] a una rotación de 0.054 [rad]. En el sentido Este, se obtuvo un plató en las cargas máximas, con peaks de 15021 [kgf] a una rotación de 0.054 [rad] y de 15145 [kgf] a una rotación de 0.076 [rad]. Además, para las derivas superiores a las de carga máxima, se observa una degradación pronunciada de la resistencia, entre el 16% y 36% en los desplazamientos de control. Del mismo modo, para los ciclos del mismo nivel de desplazamiento se tienen reducciones de resistencia entre el 11% y 28%.

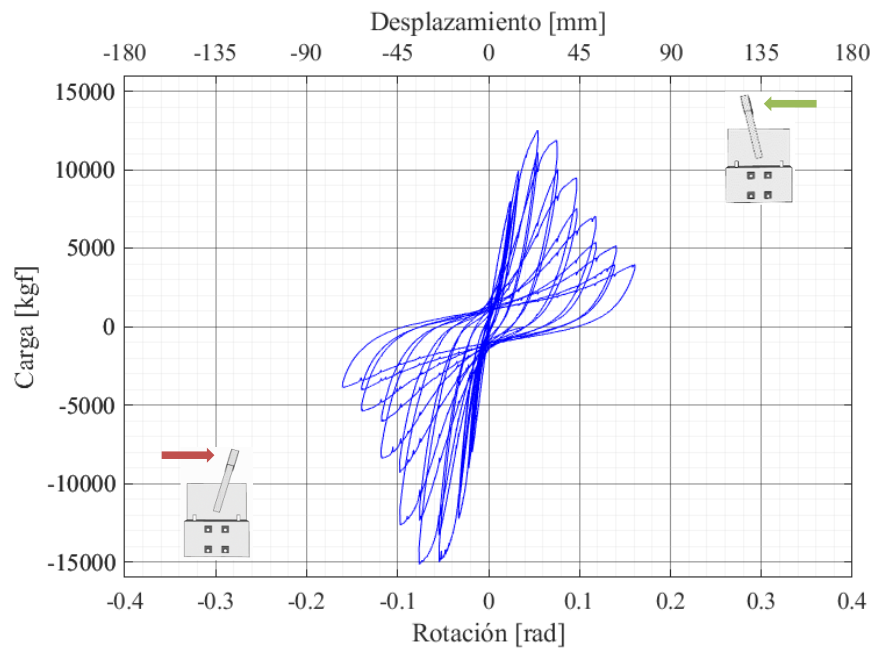


Gráfico 2. Curva de carga versus desplazamiento de la probeta AC.

En la curva de carga versus desplazamiento de la probeta BC, se observa simetría tanto en los desplazamientos como en las cargas. Además, en comparación con la probeta AC, se alcanza una menor capacidad de carga, pero se logra una mayor rotación de falla.

Para el caso de baja cuantía, se obtuvo una carga máxima de 7982 [kgf] a una rotación de 0.037 [rad] en el sentido Este y una carga máxima de 7840 [kgf] a una rotación de 0.078 [rad] en el sentido Oeste. A diferencia del caso de alta cuantía, se observa una degradación menos pronunciada de la resistencia, entre el 3% y 26% en los desplazamientos de control. Asimismo, para los ciclos del mismo nivel de desplazamiento se tienen reducciones de resistencia entre el 6% y 23%.

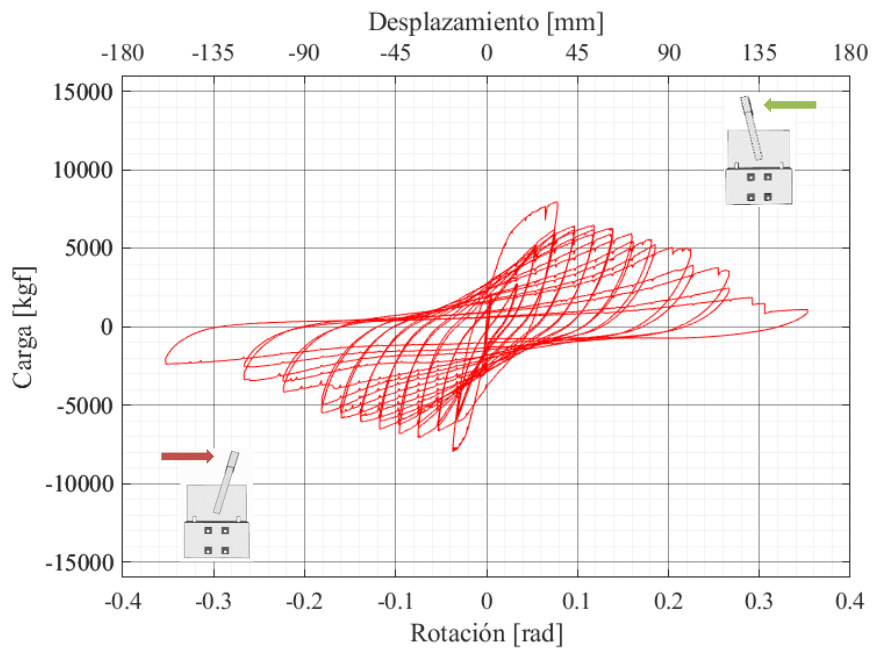


Gráfico 3. Curva de carga versus desplazamiento de la probeta BC.

El Gráfico 4 muestra la comparación de las curvas de carga versus desplazamiento para ambos ensayos, evidenciando la mayor resistencia de la probeta con alta cuantía y su rápida degradación de capacidad de carga. En contraste con la probeta con baja cuantía, que presenta una resistencia más baja, pero una capacidad de rotación mayor.

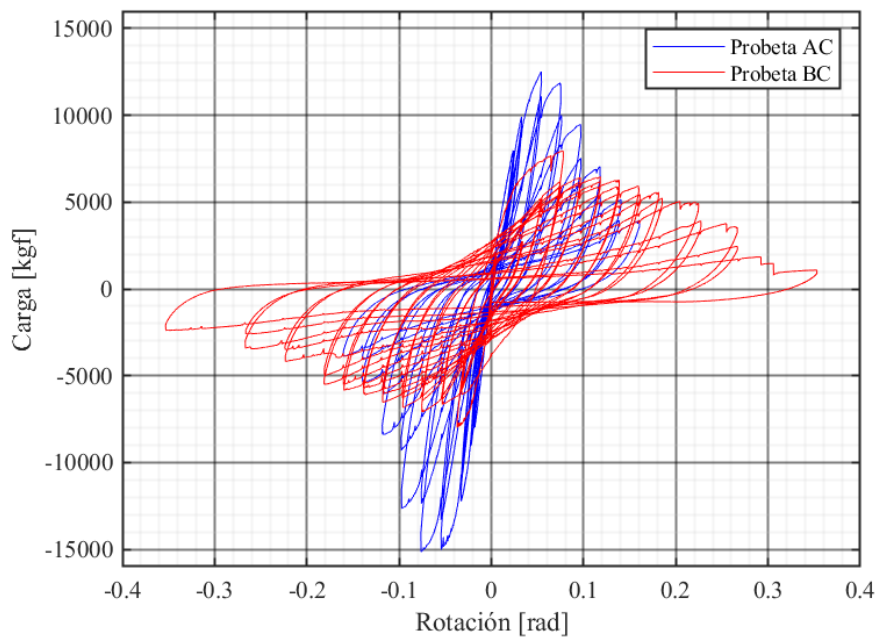


Gráfico 4. Curvas de carga versus desplazamiento comparadas.

4.4. Envolverte de carga

En el Gráfico 5 se muestra la envolverte de carga obtenida para los casos de alta y baja cuantía de refuerzo longitudinal. Esta conecta los picos de carga del primer ciclo histórico de cada una de las derivas de desplazamiento ejecutadas. Se observa una pendiente inicial similar en ambos ensayos, tanto para ciclos positivos como negativos, pero luego de alcanzar las cargas máximas, el comportamiento difiere entre ambos ensayos, mostrando tasas de decaimiento de la carga notoriamente distintos como ya se mencionó anteriormente.

Definiendo la rotación máxima admisible de la losa como la rotación asociada a la reducción del 20% de la capacidad de carga máxima, se obtienen los datos de la Tabla 7, donde se presenta la rotación máxima promedio para los dos casos en estudio. Considerando estas rotaciones máximas, se puede establecer que el caso de baja cuantía de refuerzo longitudinal tiene un 36% más de capacidad de rotación. El Gráfico 5 también presenta los valores de las rotaciones máximas, representados con puntos azules para la probeta AC y puntos rojos para la probeta BC, respectivamente.

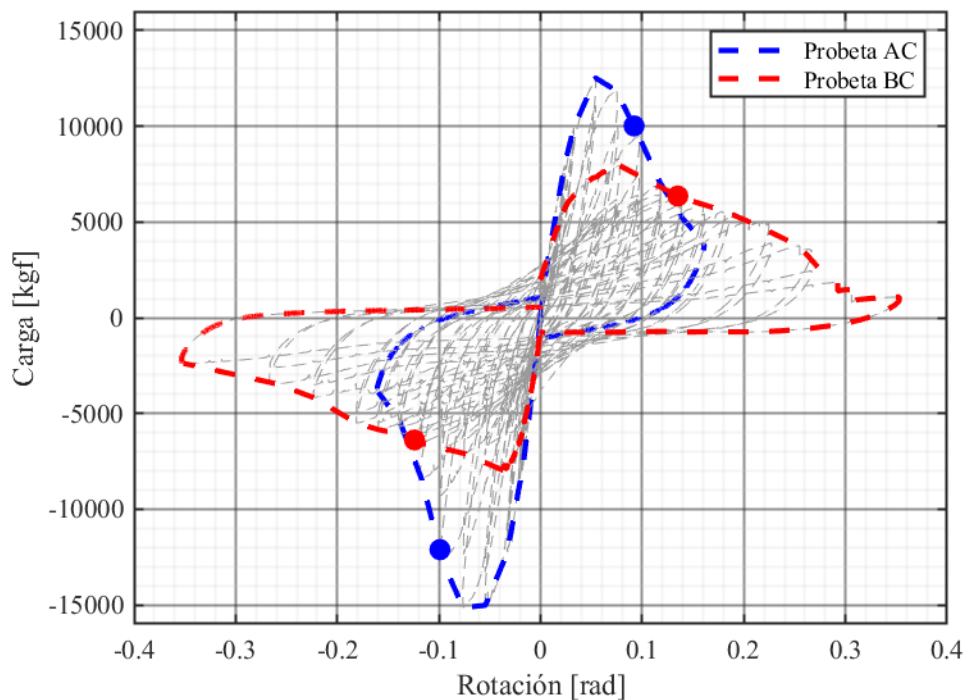


Gráfico 5. Envolvertes de carga de las probetas AC y BC.

Tabla 7. Rotaciones promedio asociadas a la rotación máxima.

Probeta	Sentido	80% de Carga máxima [kgf]	Rotación [rad]	Rotación máxima admisible [rad]
AC	Oeste	10016	0.092	0.096
	Este	12116	0.099	
BC	Oeste	6356	0.135	0.130
	Este	6386	0.124	

4.5. Rigidez secante

En el Gráfico 6 y en el Gráfico 7 se presenta la rigidez secante resultante de los casos de alta cuantía y baja cuantía respectivamente.

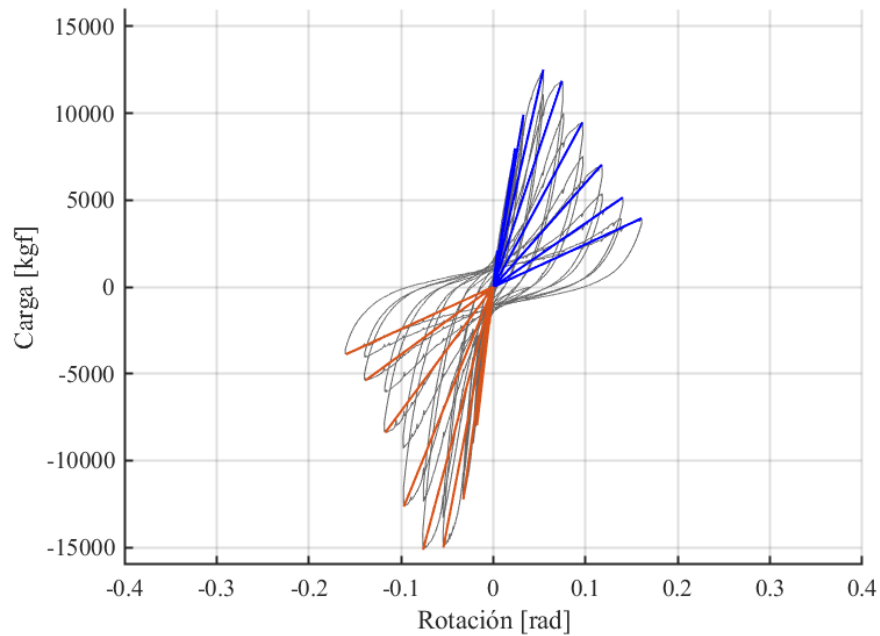


Gráfico 6. Rigidez secante de la probeta AC.

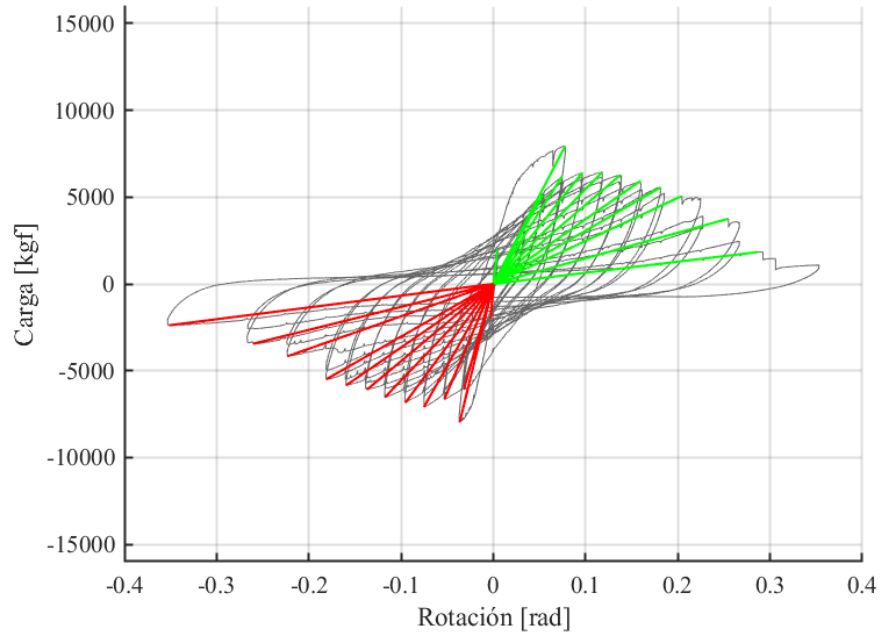


Gráfico 7. Rigidez secante de la probeta BC.

En la Tabla 8 se muestran los valores de rigidez secante obtenidos durante los ensayos de las probetas AC y BC para cada nivel de deriva. Adicionalmente, en el Gráfico 8 se muestra la variación de la rigidez en función de la rotación de la losa. Se añadieron los datos obtenidos por Sarmiento (2024) como punto de comparación. Para el caso AC, se tiene una rigidez inicial inferior, lo cual se debe a que la probeta presentó agrietamientos por retracción plástica y/o por manipulación inadecuada en el transporte e instalación. Esto se detalla en el Anexo B.6.

El Gráfico 8 también muestra que en el rango de rotación entre 0.037 y 0.076 [rad] asociado a las cargas máximas obtenidas, el caso AC presenta una mayor rigidez tangencial, el caso BC una menor rigidez y el caso CT una rigidez intermedia entre ambos. Se destaca que a partir de rotaciones de 0.15 [rad] los valores de rigidez se tornan prácticamente insignificantes.

Tabla 8. Rigidez secante para cada ciclo de carga.

Probeta Alta Cuantía			
Oeste		Este	
Rotación [rad]	Rigidez [kgf/mm]	Rotación [rad]	Rigidez [kgf/mm]
0.004	1079	0.004	1111
0.024	754	0.018	998
0.022	649	0.022	923
0.033	674	0.033	836
0.054	513	0.054	616
0.074	355	0.076	442
0.097	218	0.097	290
0.118	133	0.117	159
0.140	82	0.139	86
0.161	55	0.160	54

Probeta Baja Cuantía			
Oeste		Este	
Rotación [rad]	Rigidez [kgf/mm]	Rotación [rad]	Rigidez [kgf/mm]
0.005	961	0.003	1576
0.078	227	0.037	486
0.034	180	0.032	423
0.053	212	0.053	278
0.075	185	0.075	210
0.097	148	0.095	160
0.118	121	0.118	124
0.138	101	0.137	99
0.159	83	0.160	81
0.181	68	0.181	67
0.204	55	0.223	42
0.254	33	0.260	29
0.286	14	0.351	15

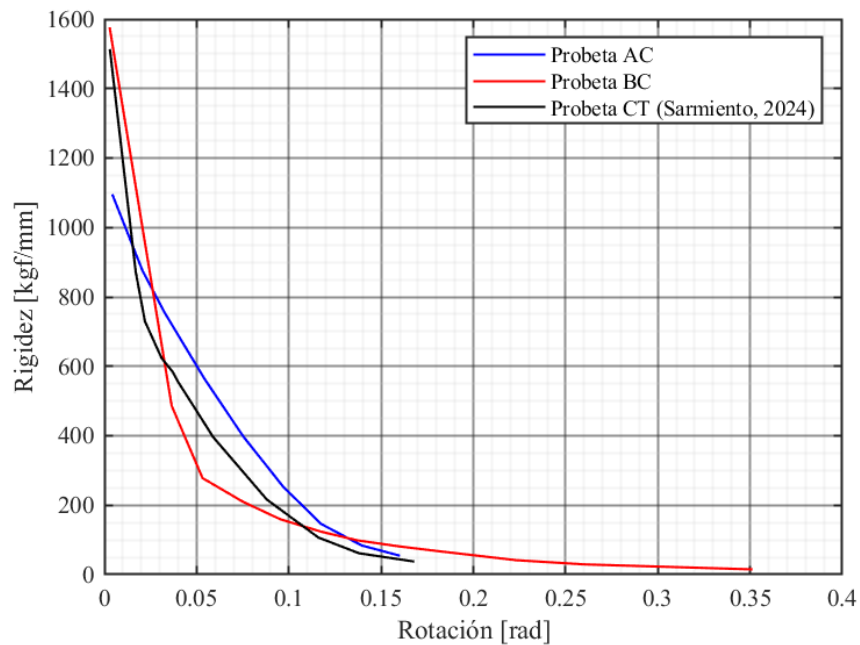


Gráfico 8. Cambio de rigidez secante.

4.6. Energía

A partir de las curvas de carga versus desplazamiento, se obtiene la energía disipada por el sistema a lo largo de los ensayos experimentales. En el Gráfico 9 se muestra la energía disipada en cada uno de los ciclos y en el Gráfico 10 se muestra la energía acumulada. De manera adicional, se presentan los datos numéricos en la Tabla 9.

En el Gráfico 9 se observa que para bajos niveles de rotación la probeta BC disipó una cantidad de energía considerablemente grande. Esto se debe a que, durante el desarrollo del ensayo experimental, se entró en el rango inelástico para la carga de control de 8000 [kgf], lo que provocó una disipación temprana y significativa de energía. Sin embargo, este fenómeno fue puntual y se estabilizó al controlar por derivas, dado que las resistencias fueron menores a lo esperado hasta alcanzar la rotación asociada a la carga máxima. Posterior a esto, los valores de energía y resistencia se normalizaron.

A pesar de lo mencionado anteriormente, los tres casos de cuantía longitudinal presentan valores de energía disipada por ciclo similares hasta rotaciones del orden de 0.1 [rad]. A partir de este punto, los casos AC y CT comienzan a experimentar un descenso de la energía disipada por ciclo, que coincide con las rotaciones máximas admisibles de estos casos. Para el caso BC, una vez alcanzada las rotaciones máximas de la losa de 0.13 [rad], los valores se mantienen relativamente constantes hasta los 0.25 [rad], lo que evidencia la gran ductilidad de la probeta de baja cuantía de refuerzo longitudinal.

En cuanto a la energía acumulada, los valores asociados a los principales hitos de los ensayos se muestran en la Tabla 10. Aquí, se detalla la energía acumulada en los peaks de carga, en los desplazamientos máximos admisibles y en los últimos ciclos de fallo. Respecto a eso, se puede mencionar que, para el hito de carga máxima, el caso AC y CT presentan valores similares, mientras que el caso BC es un 27% inferior. Para los hitos de rotación máxima admisible y falla, los valores de energía acumulada del caso de baja cuantía son superior al caso de alta cuantía en un 140% y 181% respectivamente.

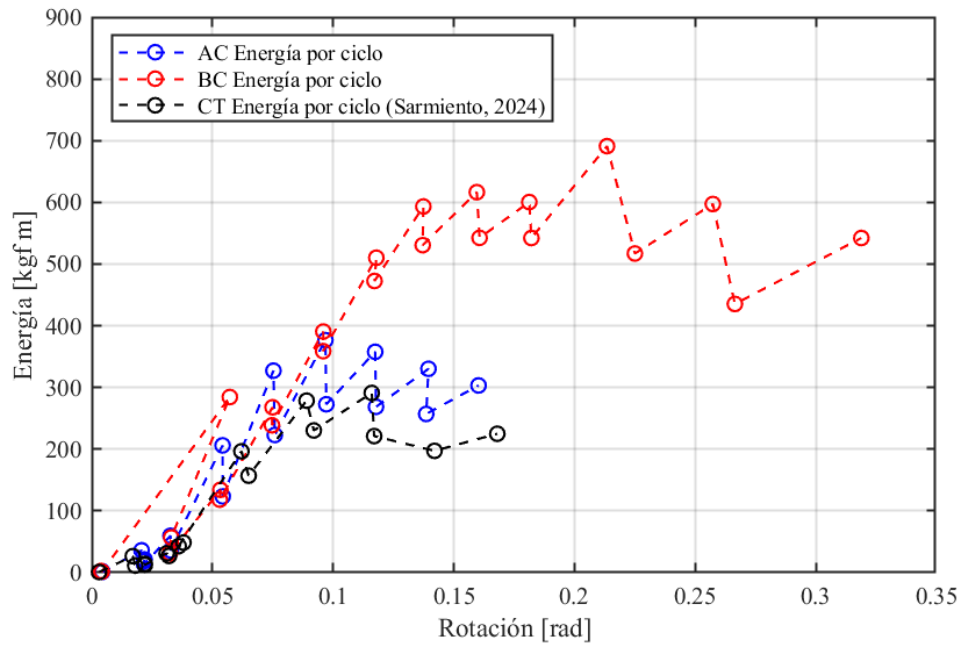


Gráfico 9. Energía disipada por ciclo.

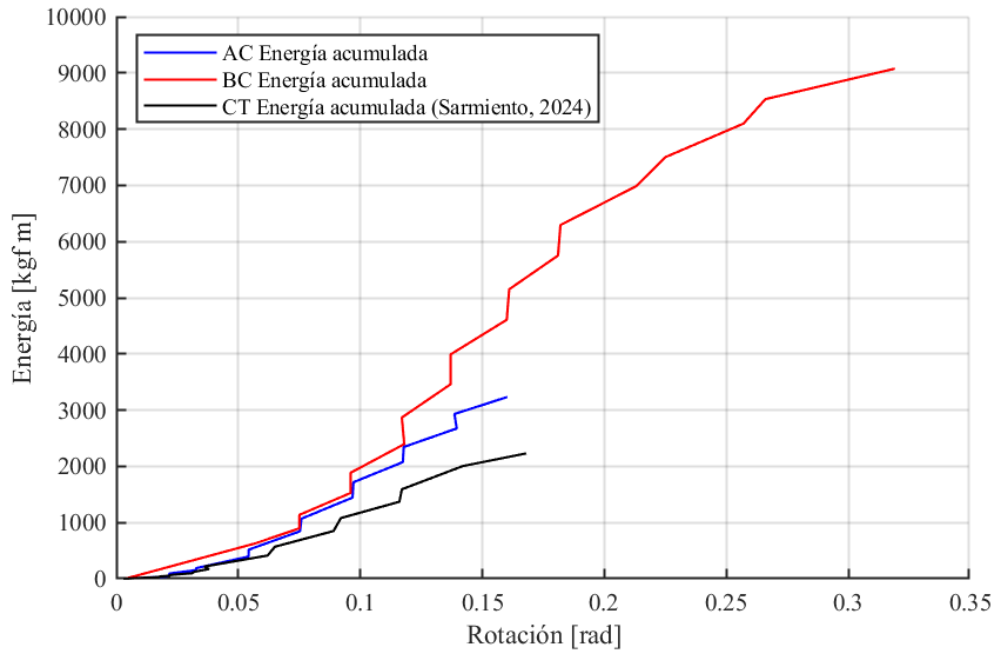


Gráfico 10. Energía acumulada.

Tabla 9. Energía disipada del sistema por ciclo y acumulada.

Alta Cuantía			Baja Cuantía		
Rotación [rad]	Energía [kgf m]	Acumulada [kgf m]	Rotación [rad]	Energía [kgf m]	Acumulada [kgf m]
0.004	2.1	2.1	0.004	2.6	2.6
0.004	1.1	3.3	0.004	1.6	4.3
0.021	36.1	39.4	0.057	284.4	288.7
0.022	21.4	60.8	0.033	56.9	345.6
0.022	18.5	79.3	0.032	31.5	377.1
0.022	13.4	92.7	0.053	134.2	511.3
0.033	59.8	152.5	0.053	118.3	629.6
0.033	35.8	188.3	0.075	267.9	897.4
0.054	206.2	394.5	0.075	238.8	1136.2
0.054	123.5	518.0	0.096	390.6	1526.8
0.075	327.2	845.2	0.096	358.8	1885.6
0.076	223.0	1068.2	0.118	510.2	2395.8
0.097	376.6	1444.8	0.117	472.5	2868.3
0.097	272.7	1717.5	0.137	593.2	3461.5
0.117	357.8	2075.3	0.137	530.6	3992.1
0.118	268.6	2343.9	0.160	616.4	4608.5
0.139	330.2	2674.1	0.161	542.4	5150.8
0.139	257.1	2931.2	0.181	600.4	5751.2
0.160	303.2	3234.4	0.182	542.1	6293.3
			0.213	690.9	6984.2
			0.225	517.0	7501.3
			0.257	597.2	8098.5
			0.266	435.3	8533.7
			0.319	542.1	9075.9

Tabla 10. Energía acumulada en hitos importantes.

Probeta	Energía Acumulada [kgf m]		
	Peak de carga	Rotación máxima admisible	Último ciclo (Fallo)
AC	394	1445	3234
BC	289	3462	9076
CT (Sarmiento, 2024)	413	1079	2230

4.7. Perfil de deformación vertical

Al realizar el perfil de deformación vertical se consideran los datos registrados en la franja central de la losa. Sin embargo, debido a que los sensores utilizados se posicionan a 30 mm del borde de la losa, los datos obtenidos no son completamente representativos de la deformación en el borde. Por esta razón, se lleva a cabo una corrección por geometría para obtener el estiramiento real en el borde de la cara (Δ_R), la cual se muestra de manera gráfica en la Figura 25.

La corrección utiliza los datos de estiramiento (Δ_E) y recogimiento (Δ_O) registrados por un mismo sensor a igual nivel de rotación, pero se realiza de forma que los datos de recogimiento se colocan ficticiamente en la cara Oeste de la losa. De este modo, es posible determinar el punto de giro ubicado a una distancia "x" desde el borde de losa. El desarrollo matemático de la corrección se muestra en el Anexo A.1.

Los perfiles de deformación obtenidos para las probetas AC y BC se muestran en el Gráfico 11 y en el Gráfico 12 respectivamente. A partir de estos se observa que la probeta AC presenta peaks de deformaciones notoriamente mayor en el centro de la losa, donde se forma la interfaz con el muro. En cambio, la probeta BC muestra una mayor homogeneidad de las deformaciones a lo ancho de la losa, lo que evidencia un modo de falla distinto.

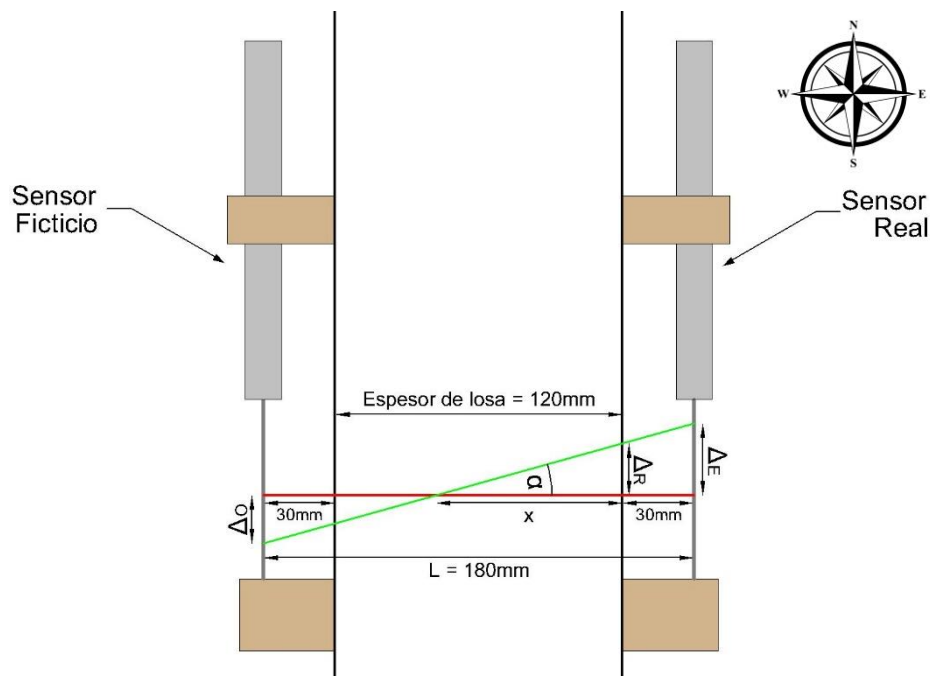


Figura 25. Esquema de relaciones geométricas de sensor real y ficticio.

Es importante señalar que el valor en la posición central del perfil de deformación BC correspondiente a una rotación de 0.0533 [rad] fue estimado mediante la ponderación de los resultados obtenidos para rotaciones superiores. Esto se debe a la desconexión del sensor central durante ese rango de rotación, por lo que dicho valor debe considerarse únicamente como referencia. El procedimiento para la obtención de este valor se detalla en el Anexo C.1.

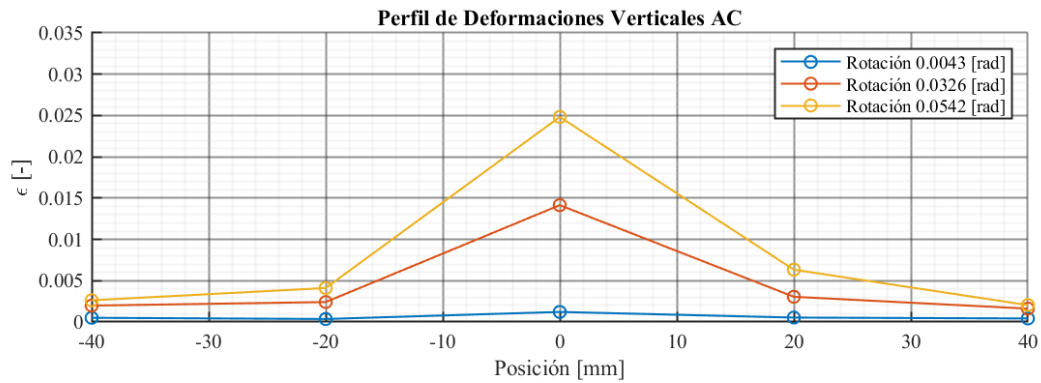


Gráfico 11. Perfil de deformación de la probeta AC.

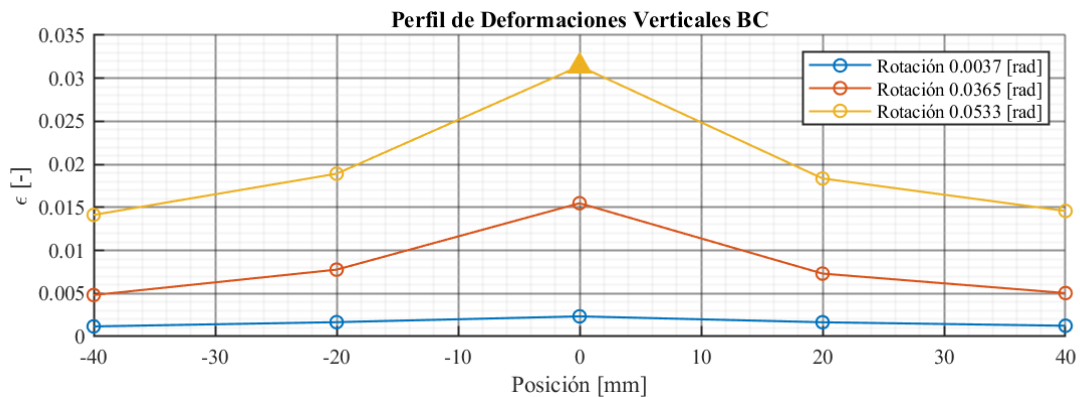


Gráfico 12. Perfil de deformaciones de la probeta BC.

4.8. Daños en las probetas

En la Figura 26 y en la Figura 27 se muestran los daños observados en las probetas AC y BC respectivamente al finalizar los ensayos experimentales. Se evidencia que los casos analizados presentan distintos modos de falla. La losa de alta cuantía de refuerzo longitudinal sufrió una falla por punzonamiento en torno al perímetro del muro, mientras que la losa de baja cuantía experimentó una falla por flexión en torno al eje transversal de la losa.

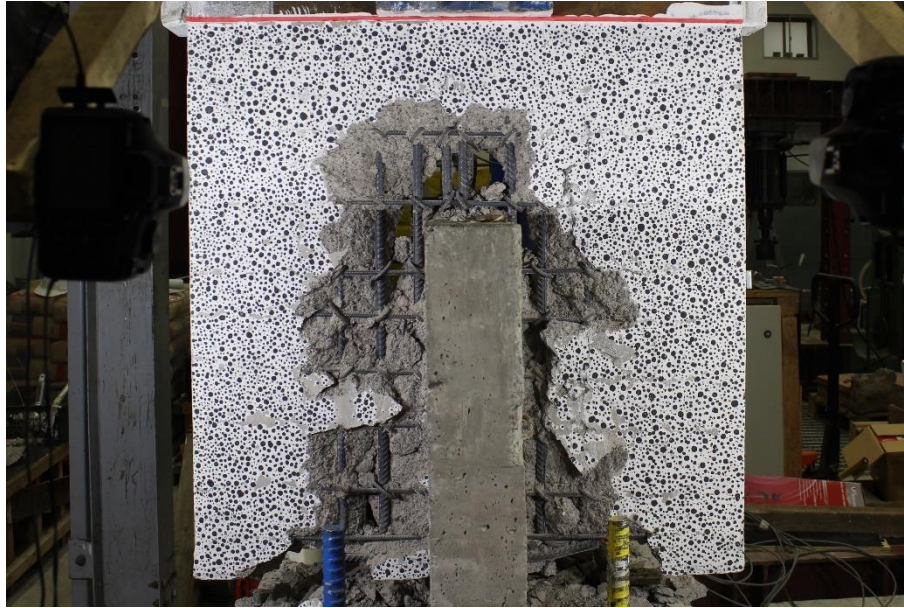


Figura 26. Daños en la probeta AC.

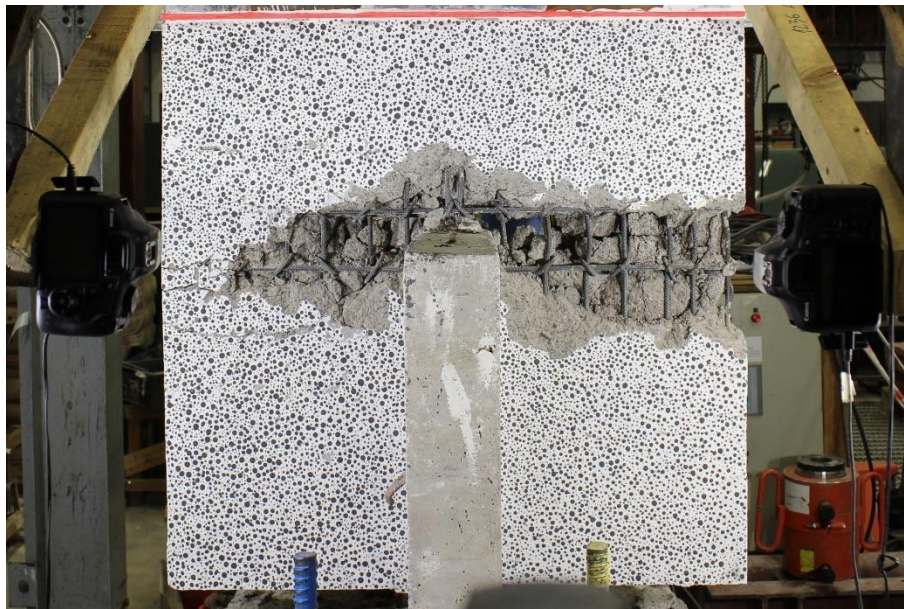


Figura 27. Daños en la probeta BC.

A continuación, se presenta la progresión de grietas de la cara frontal de las losas de alta y baja cuantía, correspondientes a grietas que se formaron por tracción durante los primeros ciclos de carga a distintos niveles de rotación. Las líneas de color rojo representan grietas nuevas y las líneas de color azul corresponden a grietas que se formaron en rotaciones anteriores.

4.8.1. Progresión de grietas en losa de alta cuantía

En la Figura 28 se muestra el estado de la cara frontal de la losa previo al ensayo.



Figura 28. Cara frontal de la losa de alta cuantía previo al ensayo.

En la Figura 29 se muestran las primeras grietas visibles obtenidas a una rotación de 0.022 [rad]. Se aprecia la aparición de grietas verticales y horizontales en la zona superior del borde de muro.



Figura 29. Primeras grietas a una rotación de 0.022 [rad].

En la Figura 30 se muestra la aparición de grietas horizontales que atraviesan el ancho de la losa. Además, aparecen nuevas grietas tanto verticales como diagonales en la zona superior de la interfaz muro-losa. Adicionalmente, comienzan a formarse grietas diagonales en la parte inferior de la losa.



Figura 30. Avance de grietas a una rotación de 0.054 [rad].

En la Figura 31 se muestra una importante ramificación de las grietas en todas las direcciones en la zona de borde de muro.



Figura 31. Avance de grietas a una rotación de 0.097 [rad].

En la Figura 32 se muestra el inicio del desprendimiento del hormigón de recubrimiento a una rotación de 0.117 [rad], tanto en la zona superior de la interfaz muro-losa como en la zona inferior. También se aprecia una ramificación de grietas que se extiende por gran parte de la superficie.



Figura 32. Avance de grietas a una rotación de 0.117 [rad].

En la Figura 33 se muestra el aplastamiento del hormigón alrededor del borde del muro en forma de “U”, característico de una falla por punzonamiento. Además, en la zona superior de la interfaz muro-losa se aprecia un desprendimiento completo del hormigón, permitiendo incluso ver a través de la losa hacia el otro lado. Esto a una rotación de 0.139 [rad].

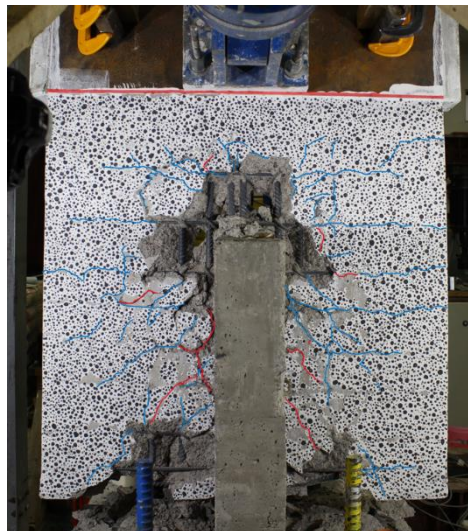


Figura 33. Avance de grietas a una rotación de 0.139 [rad].

En la Figura 34 se muestra el avance del aplastamiento y desprendimiento del hormigón en todo el borde del muro, correspondiente a una rotación de 0.16 [rad].



Figura 34. Avance de grietas a una rotación de 0.16 [rad].

4.8.2. Progresión de grietas en losa de baja cuantía

En la Figura 35 se muestra el estado inicial de la cara frontal de la losa de baja cuantía.

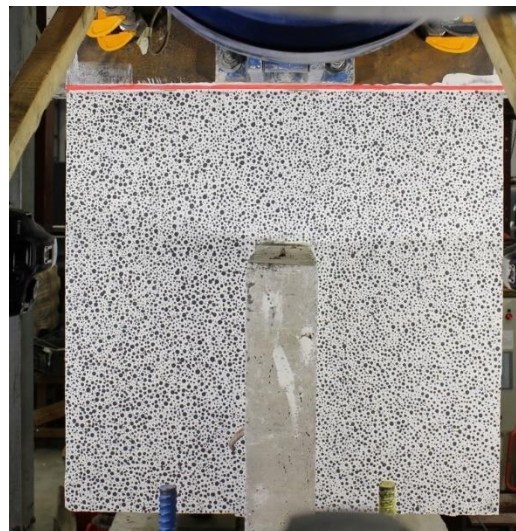


Figura 35. Cara frontal de la losa de baja cuantía previo al ensayo.

En la Figura 36 se muestran las primeras grietas visibles, que se presentaron a una rotación de 0.037 [rad], este nivel de giro se relaciona con el primer ciclo de control por carga nominal de 8000 [kgf]. Se observa el desarrollo de grietas horizontales a lo ancho de la losa y el inicio de grietas diagonales que se originan desde la zona superior de la interfaz muro-losa.

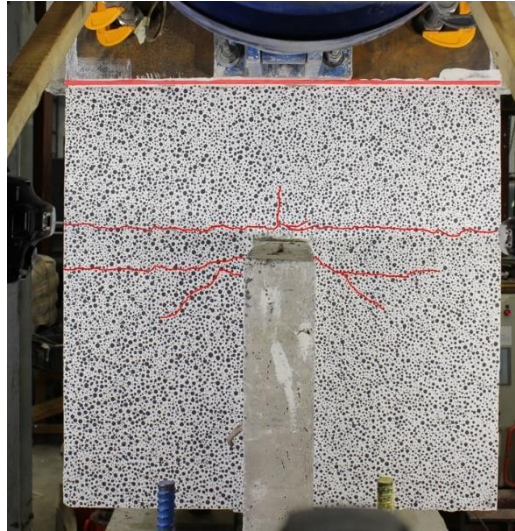


Figura 36. Primeras grietas a una rotación de 0.037 [rad].

En la Figura 37 y en la Figura 38 se muestra un desarrollo limitado de nuevas grietas, con una orientación predominante en la dirección horizontal.

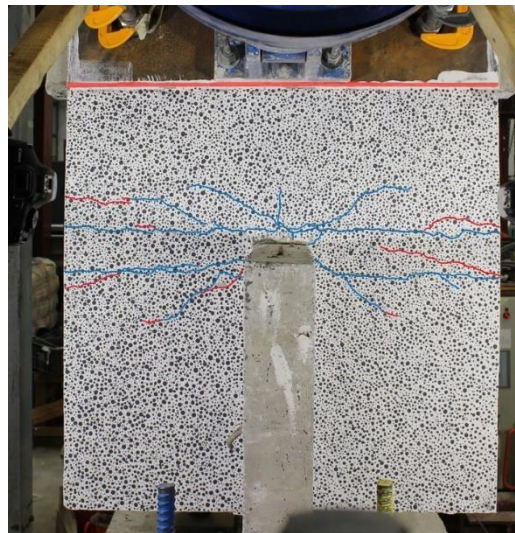


Figura 37. Avance de grietas 0.053 [rad].

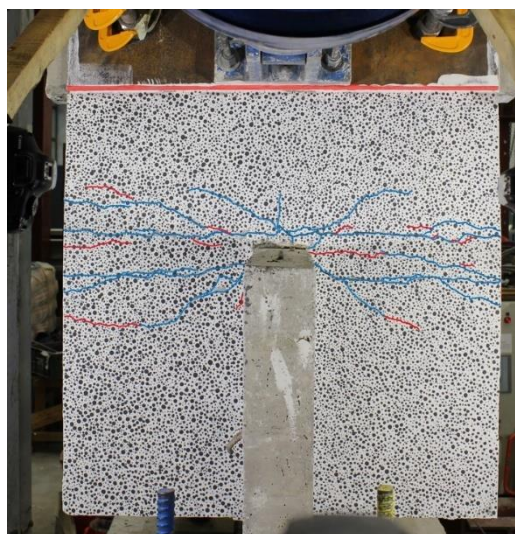


Figura 38. Avance de grietas 0.095 [rad].

En la Figura 39 se muestra un mayor desarrollo de grietas en las direcciones horizontal y diagonal, además de la profundización de las grietas horizontales preexistentes. Es importante destacar que para este nivel de rotación de 0.137 [rad] aún no se presenta desprendimiento del hormigón, en contraste con la losa de alta cuantía, que para niveles de rotación semejantes presenta un notable aplastamiento y desprendimiento del hormigón en forma de “U” alrededor del borde del muro.

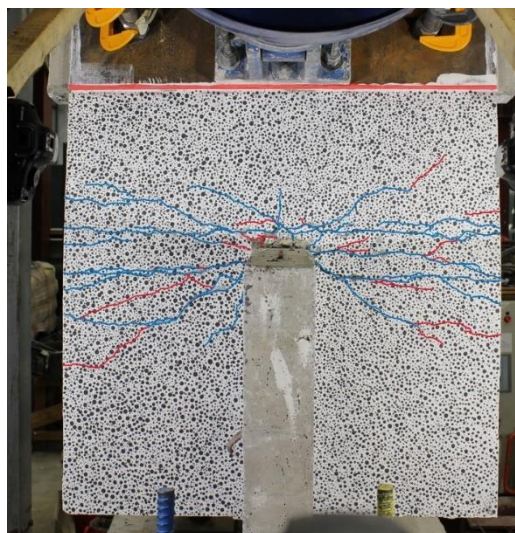


Figura 39. Avance de grietas 0.137 [rad].

En la Figura 40 se muestra el inicio del desprendimiento del hormigón en la zona superior de la interfaz muro-losa. Además, el desarrollo de nuevas grietas es notablemente reducido.

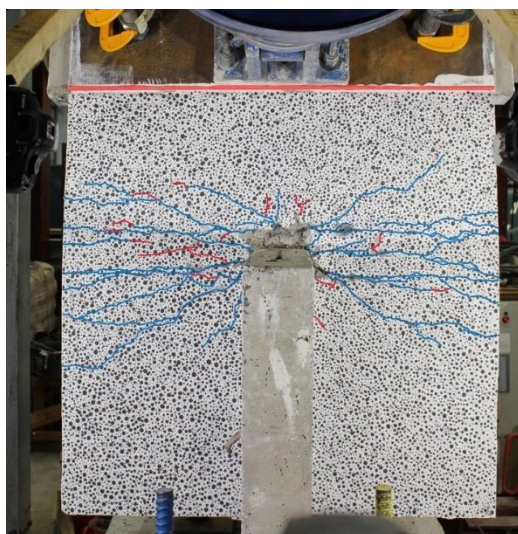


Figura 40. Avance de grietas 0.16 [rad].

En la Figura 41 se muestra desprendimiento del hormigón, que avanza predominantemente en sentido horizontal, junto con una profundización de las grietas preexistentes en la franja central.

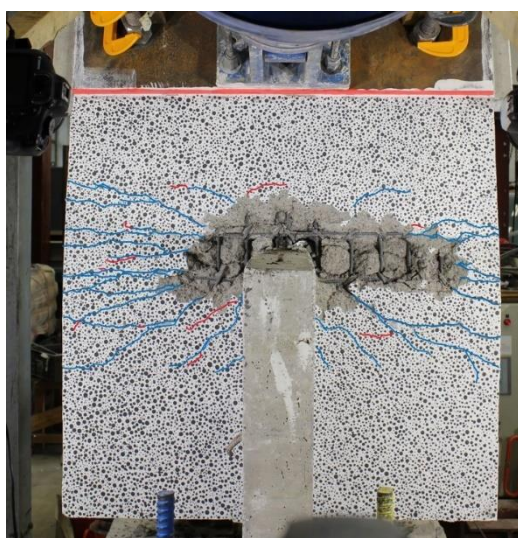


Figura 41. Avance de grietas 0.223 [rad].

En la Figura 42 se muestra el resultado de la progresión de grietas para una rotación de 0.351 [rad] correspondiente al último nivel de rotación ejecutado, donde se evidencia de forma notoria la falla por flexión en la dirección horizontal.

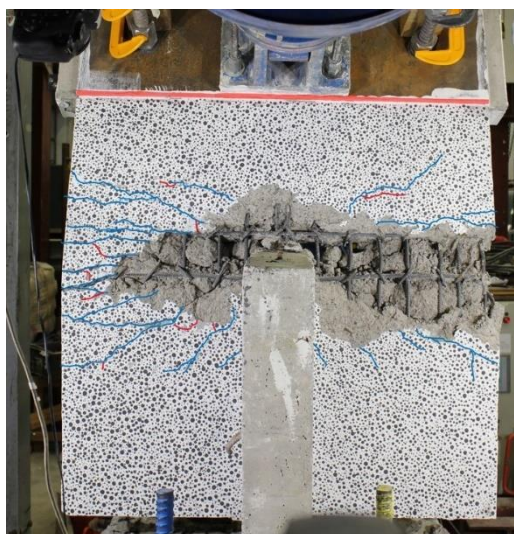


Figura 42. Avance de grietas 0.351 [rad].

4.9. Relación entre deriva de techo y rotación de losa

Se presenta la comparación del desplazamiento tanto geométrico como experimental de la losa acoplada de vano de puerta. Para el caso de desplazamiento por geometría se utilizó la ecuación (1) descrita en la sección 2.4.1, considerando los parámetros de largo de muro $l = 5$ [m] y ancho de vano de puerta $L = 90$ [cm]. Por otra parte, los datos de desplazamiento registrados durante los ensayos representan el desplazamiento de la losa a 45 [cm] del borde de muro. A partir del Gráfico 13, se observa que los datos registrados en los ensayos coinciden con los valores geométricos esperados.

Luego, a partir de la ecuación (1) se obtiene una expresión que relaciona la deriva de techo con la rotación de la losa. Considerando los parámetros de largo de muro y ancho de vano de puerta mencionados anteriormente, se obtiene el Gráfico 14, en el que adicionalmente se presenta la relación en hitos importantes como las cargas máximas y las rotaciones máximas admisibles.

En el caso de alta cuantía, la carga máxima se alcanzó con una rotación de losa de 0.054 [rad], lo que representa una deriva de techo del 0.82%, mientras que la rotación máxima admisible fue de 0.096 [rad], equivalente a una deriva de techo del 1.46%. Por otro lado, para el caso de baja cuantía la carga máxima se logró a una rotación promedio de 0.058 [rad], con una deriva de techo de 0.88%, y la rotación máxima admisible alcanzó los 0.130 [rad], representando una deriva de techo del 1.99%.

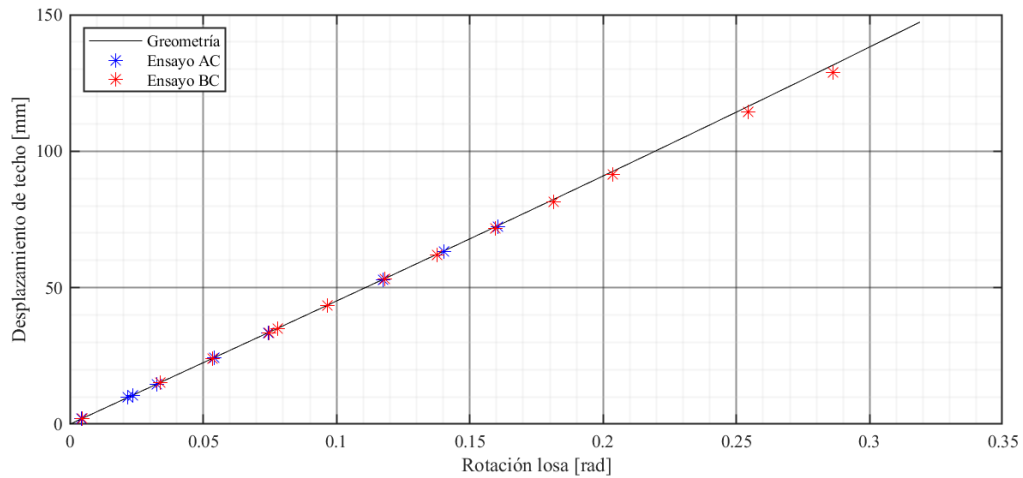


Gráfico 13. Relación de rotación y deformación de la losa (Geometría - Ensayo).

Para diferentes valores de largo de muro y ancho del vano de puerta, se tienen distintas relaciones entre la deriva de techo y la rotación de la losa. En particular, el análisis de sensibilidad de la ecuación (1) permite establecer que, para un nivel de deriva de techo constante, la rotación de la losa es directamente proporcional al largo de muro, mientras que es inversamente proporcional al ancho del vano de la puerta. Es decir, un mayor largo de muro resultará en una mayor rotación de la losa, mientras que un mayor ancho del vano de puerta llevará a una menor rotación de la losa. En el Anexo C.2 se presenta el análisis de sensibilidad para distintos valores de los parámetros de largo de muro y ancho de vano de puerta.

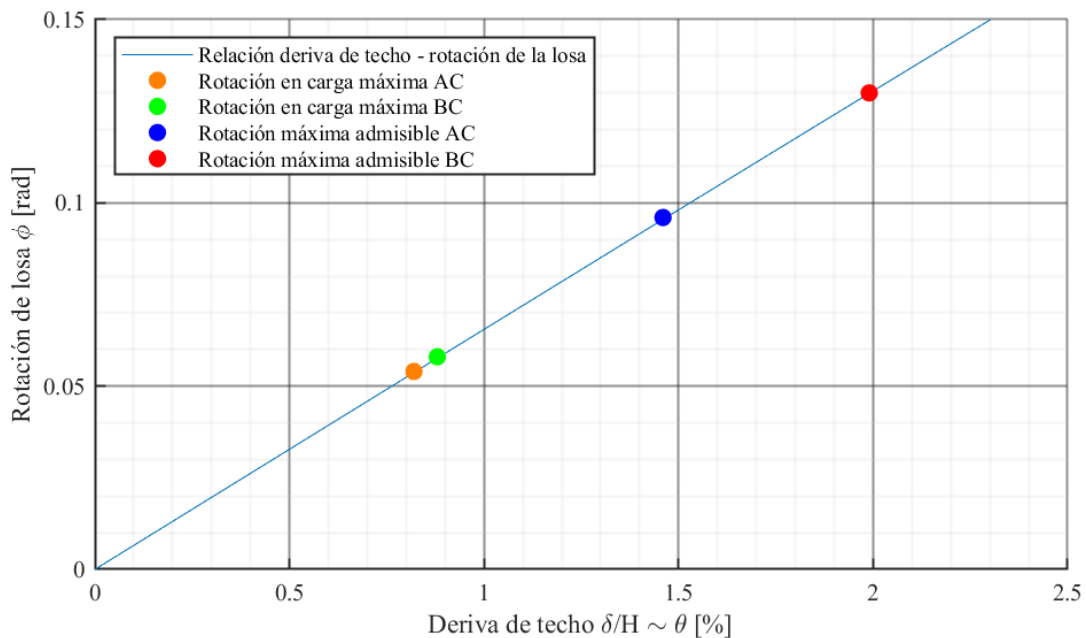


Gráfico 14. Relación deriva de techo y rotación de la losa.

Capítulo 5: Conclusiones

Se realizó la construcción de dos losas de acople de hormigón armado correspondientes a vanos de puerta; una con alta cuantía de refuerzo longitudinal y otra con baja cuantía. Se llevó a cabo el montaje experimental, la instrumentación mediante sensores LVDT y se ejecutaron los ensayos experimentales bajo cargas cíclicas. A partir de los resultados obtenidos se presentan las principales conclusiones relacionadas con la influencia de la cuantía de refuerzo longitudinal en la resistencia, ductilidad y modos de falla observados.

El uso de refuerzo longitudinal de alta cuantía aumenta la capacidad de carga en un 57%. Sin embargo, el caso de baja cuantía presenta un comportamiento más dúctil, lo que genera una capacidad de rotación 35% mayor, asociada a una degradación del 20% de la capacidad máxima.

Los casos estudiados muestran una capacidad de disipación de energía similar hasta alcanzar una rotación de 0.1 [rad] aproximadamente. Superado este umbral, la losa con baja cuantía de refuerzo longitudinal logra una disipación de energía de hasta un 42% mayor para iguales niveles de rotación, así como un 181% más de energía acumulada en total.

Es importante destacar que la variación en la cuantía de refuerzo longitudinal influye significativamente en el modo de falla de las losas de acople, dado que con una alta cuantía la falla ocurre por punzonamiento alrededor del borde de muro, mientras que con una baja cuantía la falla es por flexión.

Los distintos modos de falla implican una respuesta diferente de las losas de acople. En el caso de baja cuantía, la cantidad de barras de armadura longitudinal que trabaja en flexión es superior, debido al mayor ancho colaborante (ver Anexo A.2). Asimismo, el perfil de deformaciones verticales muestra una mayor homogeneidad a lo ancho de la losa, contrario al caso de alta cuantía, en el que las deformaciones se concentran en la zona central. Además, a partir de la progresión de grietas realizada se obtuvo que los daños son más pronunciados en la losa de alta cuantía para iguales niveles de rotación.

Se estimó la capacidad de resistencia a corte (ver Anexo A.3) y los resultados indican que los enfoques basados en la norma ACI 318-19 tienden a sobrestimar la capacidad en losas con baja cuantía de refuerzo y a subestimarla en losas con alta cuantía, debido a que su formulación no considera este factor. En contraste, el método basado en el Eurocódigo 2 mostró un ajuste adecuado y conservador dentro del rango de cuantías del estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en el diseño de losas de acople en vanos de puertas es importante evitar las fallas a corte por punzonamiento. Por ello, se recomienda utilizar una cuantía de refuerzo longitudinal mayor a 0.18%, correspondiente al refuerzo mínimo, y menor a 0.75%, dado que este valor representa el límite en el que se produce el cambio de falla, de flexión a corte y viceversa, según lo indicado en el Anexo A.4.

En conclusión, se cumplió el objetivo de estudiar de forma experimental el comportamiento de las losas de acople en vanos de puerta con baja y alta cuantía de refuerzo longitudinal, lo que permitió comprender la influencia de este tipo de refuerzos y generar recomendaciones de diseño considerando las particularidades de la estructuración típica de Chile.

Finalmente, se sugiere la realización de nuevas investigaciones en losas de acople con configuraciones de refuerzo longitudinal concentrado, así como analizar el efecto de las trabas colocadas solo en la zona del vano de puerta o en el área delimitada por el perímetro crítico que rodea el borde de muro.

Bibliografía

- ACI Committee 318. (2019). ACI CODE-318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. *American Concrete Institute*.
- ACI Committee 374. (2013). ACI PRC-374.2-13: Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads. *American Concrete Institute*.
- Carpenter, L. D., Naeim, F., Lew, M., Youssef, N. F., Rojas, F., Saragoni, G. R., & Schachter Adaros, M. (2011). Performance of tall buildings in Viña del Mar in the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(1), 17-36.
- Centro Sismológico Nacional. (2024), Grandes terremotos en Chile. *Centro Sismológico Nacional*. Recuperado el 16 de septiembre de 2024. <https://www.sismologia.cl/informacion/grandes-terremotos.html>
- Coull, A., & Chee, W. Y. (1983). Design of floor slabs coupling shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 109(1), 109-125.
- European Committee for Standardization. (2004). EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. *CEN*.
- Henríquez, C. F. (2019). Estudio de la respuesta numérica de losas acopladas con muros rectangulares de hormigón armado. *Universidad de Chile*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2016). NCh170:2016 Hormigón - Requisitos generales. *Instituto Nacional de Normalización*.
- Manríquez Rojas, I. A. (2016). Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal-tensor. *Universidad de Chile*, p.29.
- Mariman, C. (2018). Clásicos de Arquitectura: Edificio Montecarlo II / Schapira Eskenazi Arquitectos. *ArchDaily*. <https://www.archdaily.cl/cl/898360/clasicos-de-arquitectura-edificio-montecarlo-ii-schapira-eskenazi-arquitectos>
- Rojas, F., Naeim, F., Lew, M., Carpenter, L. D., Youssef, N. F., Saragoni, G. R., & Schachter Adaros, M. (2011). Performance of tall buildings in Concepción during the 27 February 2010 moment magnitude 8.8 offshore Maule, Chile earthquake. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(1), 37-64.

- Sarmiento, D. (2024). Estudio experimental de losas de acople de hormigón armado con y sin trabas de refuerzo utilizando LVDT. *Universidad de Chile*.
- Schwaighofer, J., & Collins, M. P. (1977). Experimental study of the behavior of reinforced concrete coupling slabs. *ACI Journal*, 74(12), 123-127.
- Valdivia, M. (2023). Análisis no lineal del sistema de muros rectangulares acoplados frente a cargas cíclicas y diseño de su montaje experimental. *Universidad de Chile*.
- Youssef, N. F., Tunick, D., Naeim, F., Lew, M., Carpenter, L. D., Rojas, F., Saragoni, G. R., & Schachter Adaros, M. (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.
- Zhang, P. (2008). Industrial control technology. *William Andrew*, p. 23.

ANEXOS

Anexo A: Cálculos

A.1. Corrección de deformación vertical en franja central

Para la corrección de deformación vertical del borde de losa en la franja central se consideran las ecuaciones (8), (9) y (10) que surgen a partir de las relaciones geométricas de triángulos de la Figura 43.

$$\alpha = \operatorname{atan}\left(\frac{\Delta_E + \Delta_O}{L}\right) \quad (8)$$

$$x = \frac{\Delta_E}{\tan(\alpha)} - s \quad (9)$$

$$\Delta_R = x \cdot \frac{\Delta_E}{x + s} \quad (10)$$

Donde:

- Δ_E : Desplazamiento de estiramiento medido.
- Δ_O : Desplazamiento de recogimiento medido.
- L : Distancia entre los sensores, la cual es de 180 [mm].
- s : Distancia entre el sensor y el borde de losa, la cual es de 30 [mm].
- α : Ángulo de giro.
- x : Distancia entre el punto de giro y el borde de la losa.
- Δ_R : Desplazamiento real de borde de losa.

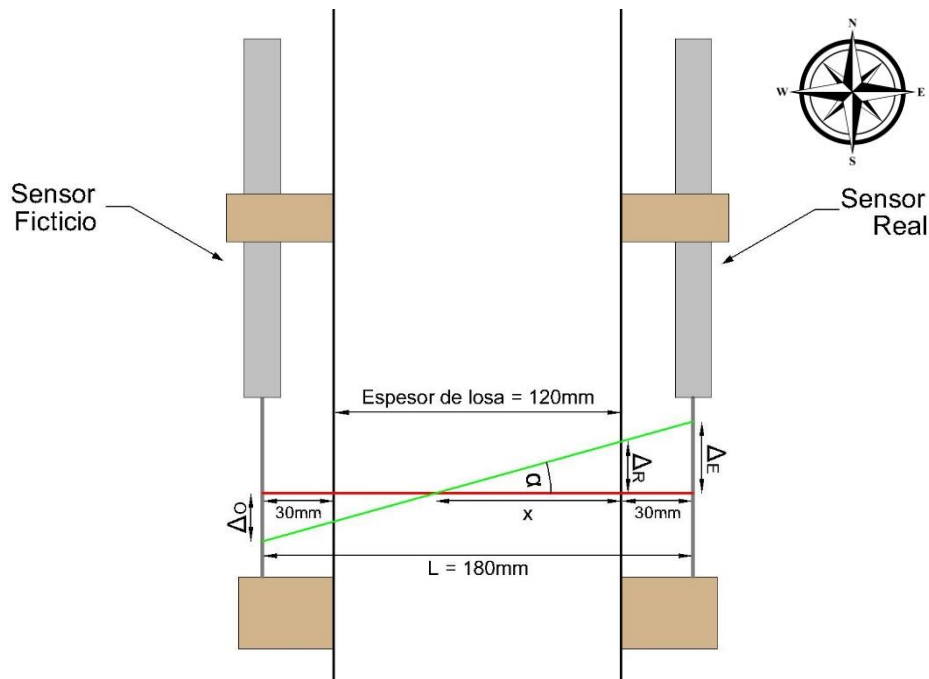


Figura 43. Esquema de las relaciones geométricas del sensor real y ficticio.

A.2. Estimación de la cantidad de barras que trabajan en flexión

La estimación de la cantidad de barras que trabajan en flexión se realiza a partir de variar ficticiamente el ancho de la losa “b”, y con esto, variar el área de armadura, para luego comparar el momento solicitante M_u y el momento de resistencia nominal M_n , según las ecuaciones (11) y (12) respectivamente. Se considera el sentido de carga “Oeste” y “Este” para la probeta AC debido a la asimetría de las cargas máximas.

Para el cálculo de M_u se consideran las cargas máximas y un brazo de palanca L de 450 [mm], mientras que, para el cálculo de M_n se toman en cuenta los valores de resistencia f'_c y f_y de la Tabla 2, la Tabla 3 y la Tabla 4, utilizando los valores de altura efectiva de la losa “d” reales y un factor de confinamiento asociado al uso de trabas $\alpha = 1.25$. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 11.

$$M_u = P \cdot L \quad (11)$$

$$M_n = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (12)$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot \alpha \cdot f'_c \cdot b} \quad (13)$$

Tabla 11. Resultados de análisis en flexión.

Probeta	Carga P [kgf]	Momento Mu [kgf m]	N° Barras	d [mm]	Ancho b [mm]	Resistencia Mn [kgf m]
AC Oeste	12492	5621	10	79	600	4940
AC Este	15021	6759	10	95	600	6393
BC	7980	3591	14	100	910	3697
CT (Sarmiento, 2024)	10963	4933	10	-	660	4894

A.3. Estimación de resistencia a corte

Se realiza la estimación de la resistencia a corte de las losas de acople utilizando diferentes enfoques y verificando su ajuste a los resultados experimentales obtenidos. Los métodos considerados en el análisis son: la guía ACI 318-19, el método modificado de la guía ACI 318-19 propuesto por Sarmiento (2024) y el Eurocódigo 2. Se evalúa la eficacia de los métodos para estimar el corte considerando un caso base, con una resistencia a compresión $f'_c = 25 [MPa]$, una tensión de fluencia $f_y = 420 [MPa]$, un factor de confinamiento asociado al uso de trabas $\alpha = 1.25$ y una altura efectiva de la losa $d = 96 [mm]$.

1. ACI 318-19:

Este método emplea la ecuación (14), en la que se considera un esfuerzo cortante último $V = 0.33 \sqrt{\alpha \cdot f'_c} [MPa]$, un espesor de muro $t = 120 [mm]$ y un perímetro crítico a una distancia $d/2$ del borde del muro según la Figura 5.

$$V_n = \frac{V}{3d(t + d)} \quad (14)$$

2. Método modificado de la ACI 318-19 propuesto por Sarmiento (2024):

Este método también usa la ecuación (14), pero se considera un esfuerzo cortante último $V = 0.17 \sqrt{\alpha \cdot f'_c} [MPa]$, un espesor de muro $t = 120 [mm]$ y un perímetro crítico a una distancia d desde el borde de muro.

3. Método Eurocódigo 2:

El método del Eurocódigo 2 considera la ecuación (15) que se muestra a continuación:

$$Vn = 0.18 \cdot k \cdot u_1 \cdot d \cdot (100 \cdot \rho \cdot f'c)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Donde:

- $k = \min\left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}}, 2\right)$
- u_1 : Perímetro crítico según la Figura 6.
- $\rho = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_t}$, con ρ_l y ρ_t las cuantías de acero en las direcciones longitudinal y transversal respectivamente.

Sin embargo, este método está diseñado para aplicarse en losas acopladas a columnas con cuantías semejantes en las direcciones “z” e “y”. Para representar de mejor forma el caso en estudio, se dividió el perímetro crítico en las direcciones longitudinal u_l y transversal u_t según se muestra en la Figura 44. Luego, se considera el siguiente set de ecuaciones:

$$u_1 = u_t + u_l \quad (16)$$

$$u_t = t + \frac{\pi \cdot (2 d)}{2} \quad (17)$$

$$u_l = 2 \cdot (1.5 \cdot d) + \frac{\pi \cdot (2 d)}{2} \quad (18)$$

$$Vn_t = 0.18 \cdot k \cdot u_t \cdot d \cdot (100 \cdot \rho_t \cdot (\alpha \cdot f'c))^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

$$Vn_l = 0.18 \cdot k \cdot u_l \cdot d \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot (\alpha \cdot f'c))^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

$$Vn = Vn_t + Vn_l \quad (21)$$

Donde:

- Vn : Resistencia a corte.
- Vn_t : Resistencia a corte en la dirección transversal.
- Vn_l : Resistencia a corte en la dirección longitudinal.

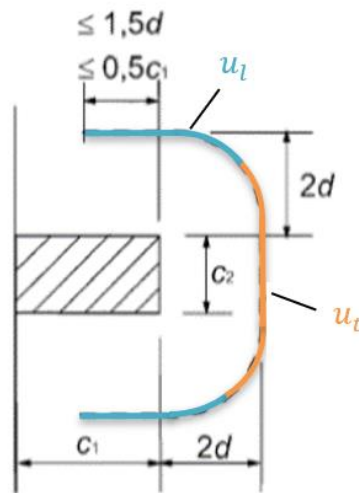


Figura 44. Perímetro crítico según Eurocódigo 2 dividido en sentido transversal y longitudinal.

En el Gráfico 15 se muestran los resultados obtenidos de los distintos métodos de estimación de la capacidad a corte y los cortes máximos alcanzados en los ensayos experimentales. De aquí se destaca que el método modificado del Eurocódigo 2 muestra un ajuste adecuado, contrario a los métodos en base a la guía ACI 318-19, que no consideran la cuantía de refuerzo longitudinal en su formulación. En adición a lo anterior, en la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos a partir de cada método para las cuantías en estudio.

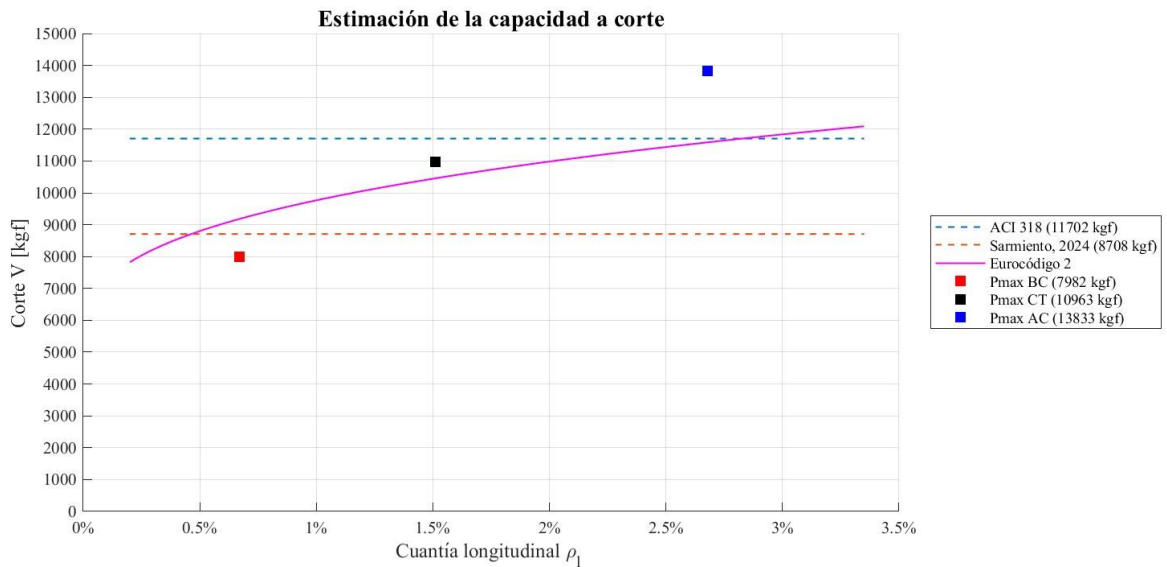


Gráfico 15. Estimación de la capacidad a corte.

Tabla 12. Valores de estimaciones de resistencia a corte.

Probeta	BC	CT	AC
Cuantía	0.67%	1.51%	2.67%
Corte máximo experimental [kgf]	7982	10963	13833
Estimación corte ACI 318-19 [kgf]	11702	11702	11702
Estimación corte Sarmiento (2024) [kgf]	8708	8708	8708
Estimación corte Eurocódigo 2 (modificado) [kgf]	9180	10454	11585

A.4. Estimación de la cuantía que produce un cambio de tipo de falla

Se estimó la cuantía límite de refuerzo longitudinal ρ_l de una losa de acople asociada a un vano de puerta, en la que ocurre el cambio de falla, de flexión a corte o viceversa. Esto se realizó a partir de obtener la cuantía que genera que se igualen el corte predicho por el método del Eurocódigo 2 que se detalla en el Anexo A.3, y el corte asociado a la resistencia nominal de momento V_{Mn} que se determina según la ecuación (22). Para el cálculo se consideró la tensión de fluencia esperada f_{y_e} y un factor de confinamiento asociado al uso de trabas $\alpha = 1.25$.

$$V_{Mn} = \frac{Mn}{L} \quad (22)$$

Donde:

- $Mn = \rho_l \cdot b \cdot e \cdot f_{y_e} \left(d - \frac{a}{2} \right)$
- $a = \frac{\rho_l \cdot b \cdot e \cdot f_{y_e}}{0.85 \cdot \alpha \cdot f'c \cdot b}$
- $L = 450 \text{ mm}$, distancia entre el borde de muro y el centro del vano.
- $f_{y_e} = 1.25 \cdot 420 \text{ MPa}$.

Siendo “b” el ancho de la losa de 1000 [mm], “e” el espesor de la losa de 120 [mm], $f'c$ la resistencia a compresión nominal de 25 [Mpa], α un factor de confinamiento asociado al uso de trabas igual a 1.25 y “d” la altura efectiva de la losa de 96 [mm].

En el Gráfico 16 se muestran las curvas asociadas a la estimación de corte usando el método modificado del Eurocódigo 2 y el corte asociado a la resistencia de momento nominal. Se obtiene que para una cuantía de refuerzo longitudinal de 0.75% las estimaciones de corte se igualan. Por lo tanto, cuantías inferiores a este valor producen fallas a flexión, mientras que cuantías superiores inducen fallas por punzonamiento.

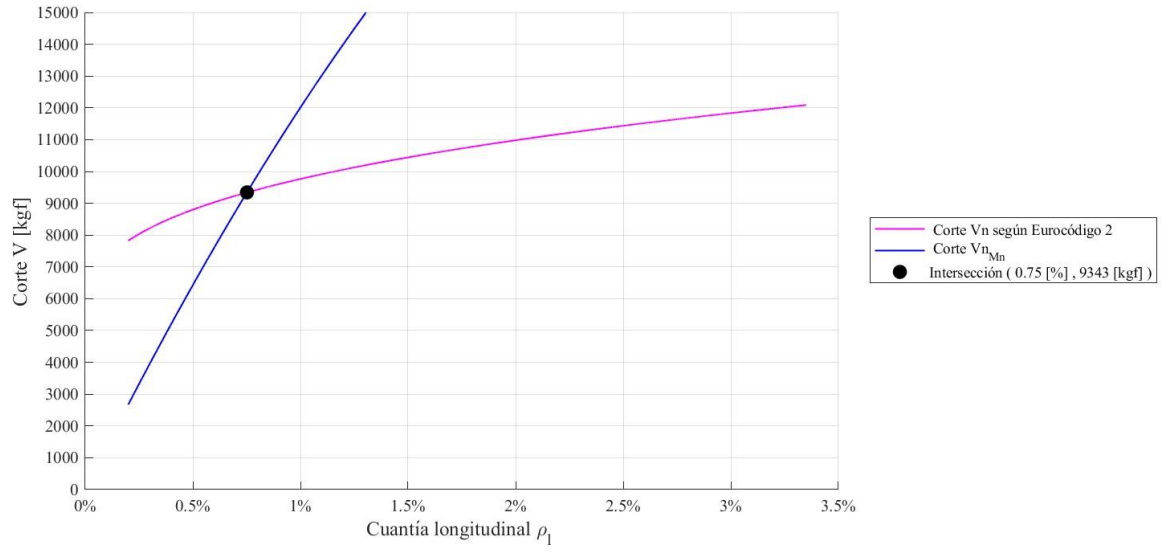


Gráfico 16. Cambio de tipo de falla.

Anexo B: Metodología Experimental

B.1. Plano de Muros AC y BC

Los muros asociados a las probetas AC y BC presentan las mismas características de dimensiones, cuantías y distribuciones de armadura. Los detalles se muestran en la Figura 45.

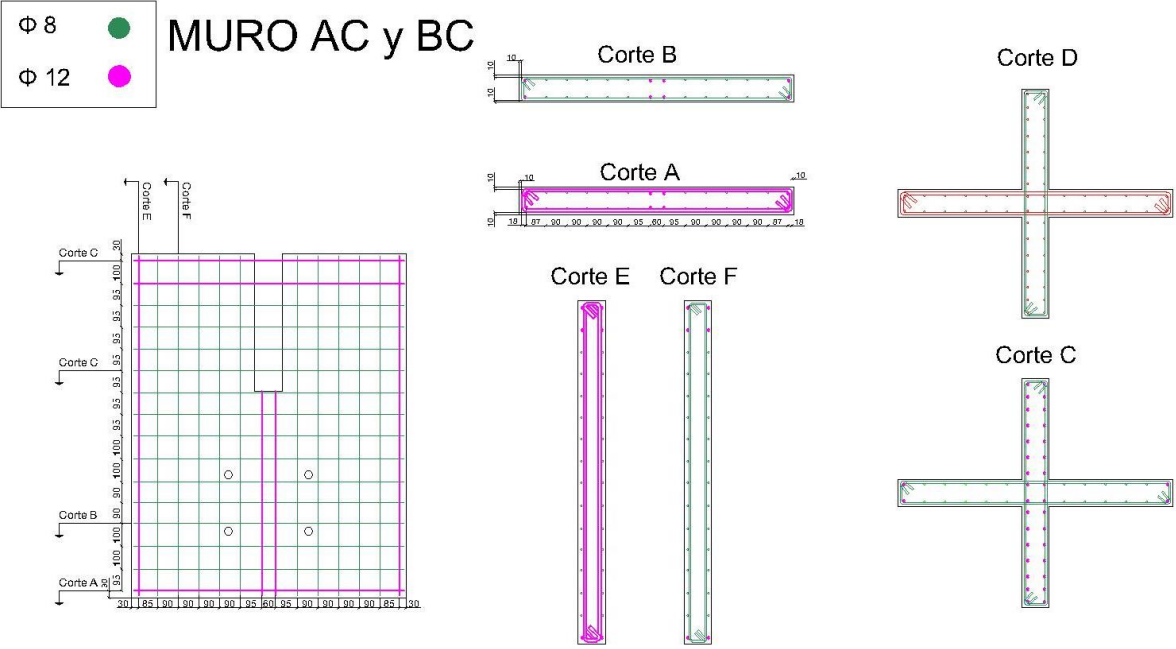


Figura 45. Plano de Muro AC y BC (adaptado de Sarmiento, 2024).

B.2. Recuperación de muros

Los muros que conforman las probetas fueron reutilizados en su totalidad a partir de probetas tipo acople muro-losa, previamente construidas para ensayos anteriores. Esto se realizó con el objetivo de minimizar el uso de materiales y reducir los tiempos de construcción. En la Figura 46 se muestra el proceso ejecutado. Primero, se picó el hormigón de la zona de falla por punzonamiento; luego, se cortaron las barras transversales y longitudinales, utilizando un napoleón para las barras de 8 [mm] y un esmeril angular para las de mayor diámetro. Después, se desacopló la losa. Finalmente, se eliminaron todos los restos de hormigón en la zona de interfaz, asegurando que las barras del muro quedaran en buen estado.



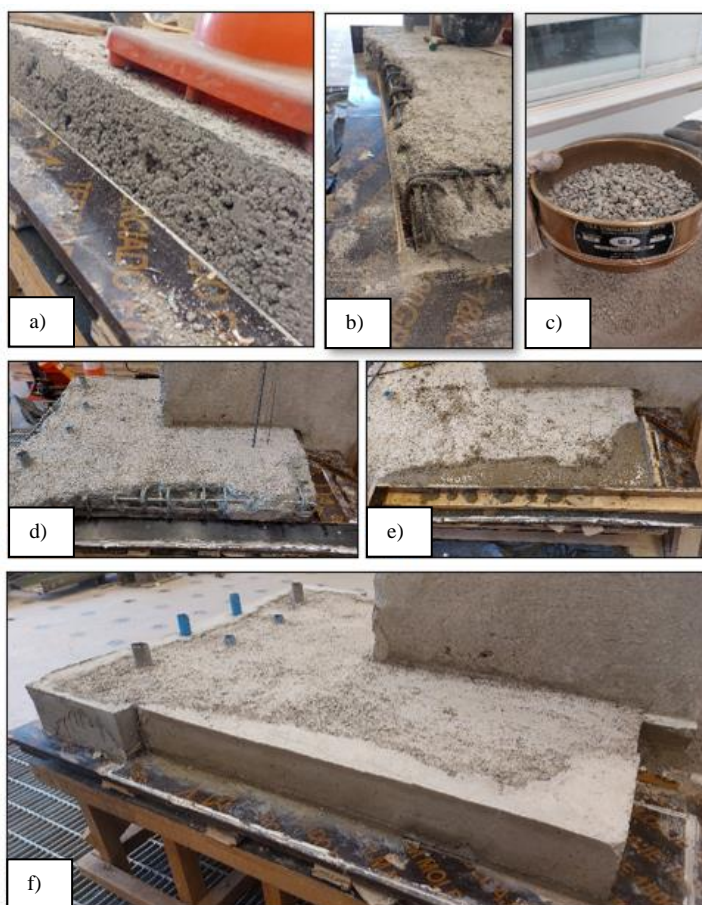
a) Picado del hormigón en la zona de falla por punzonamiento. b) Corte de las armaduras transversales y longitudinales. c) Desacople de la losa. d) Picado del hormigón en la zona de interfaz muro-losa.

Figura 46. Recuperación de los muros.

B.3. Reparaciones

Debido a errores de vibrado durante el proceso de construcción, en una de las caras laterales de la losa de baja cuantía se evidenciaron zonas de nidos. Ante esto, se realizó el proceso de reparación que se muestra en la Figura 47. El material de relleno utilizado fue el mismo hormigón preparado BEMEZCLA H30 con el que se construyó la probeta, al cual se le realizó un tamizado con malla N°4 de 4.75 [mm], con el fin de penetrar de mejor forma en los espacios pequeños entre la armadura y el hormigón existente.

El proceso de reparación inicia con la extracción de todo el hormigón con evidencia de segregación o baja resistencia, para luego limpiar la superficie de cualquier material fino y aplicar el puente adherente Sikadur®-32 Gel. Finalmente, se realiza el proceso de hormigonado y posterior curado del hormigón.



a) Zona lateral de la losa con hormigón desagregado. b) Extracción del hormigón desagregado. c) Tamizado del hormigón preparado BEMEZCLA H30 con malla N°4. d) Aplicación del puente adherente Sikadur®-32 Gel. e) Hormigonado de la reparación. f) Probeta luego de la reparación.

Figura 47. Proceso de reparación de probeta BC.

B.4. Caracterización de los materiales

B.4.1 Acero

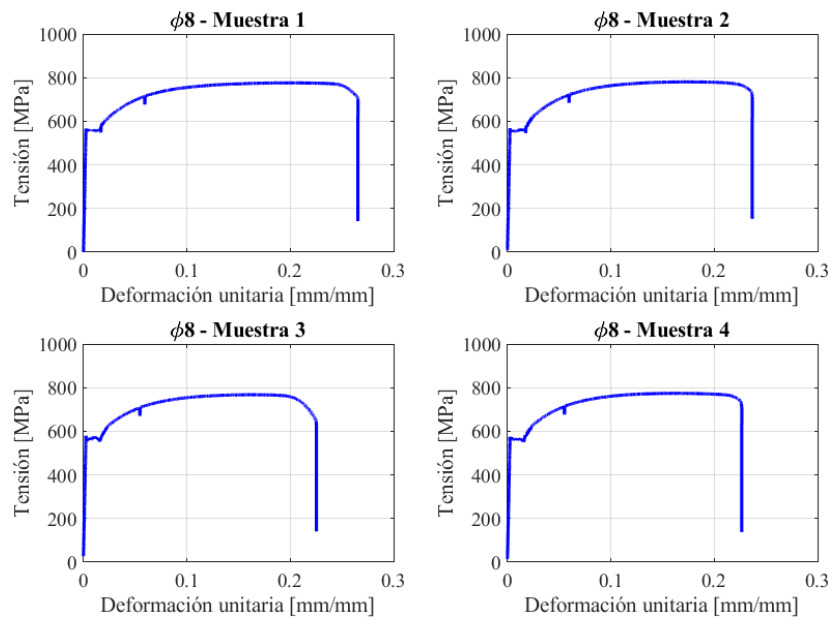


Gráfico 17. Curvas de tensión versus deformación unitaria de las barras $\Phi 8$.

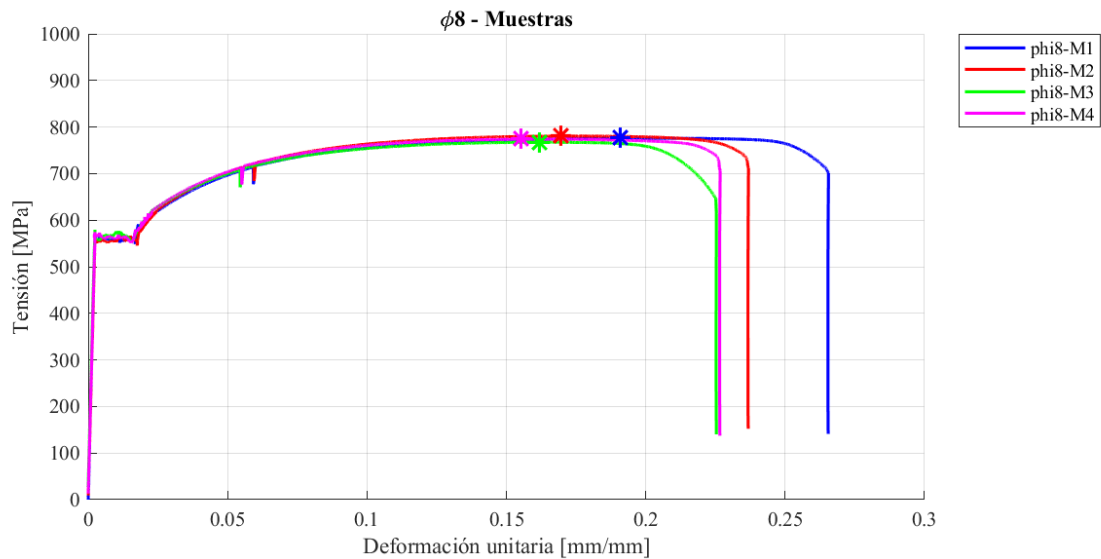


Gráfico 18. Resistencia última de las barras $\Phi 8$.

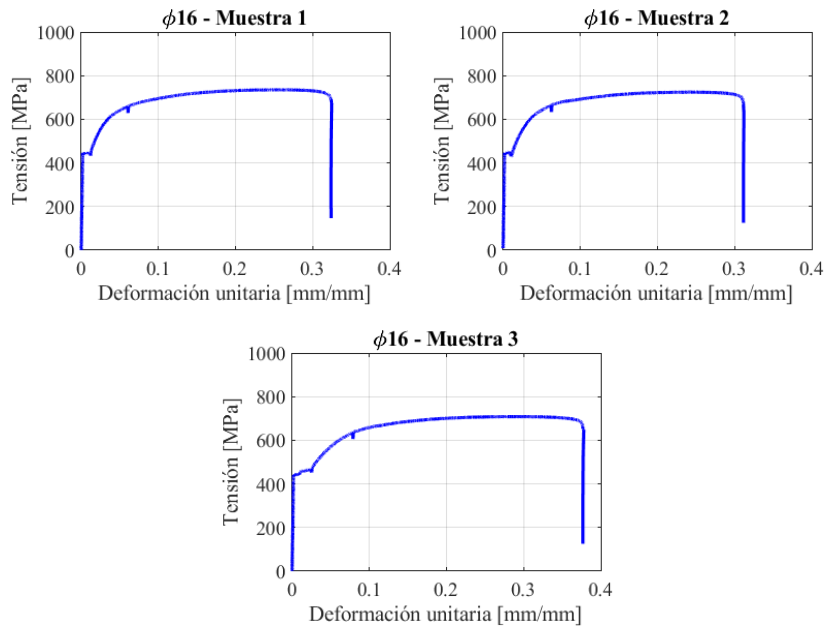


Gráfico 19. Curvas de tensión versus deformación unitaria de las barras $\Phi 16$.

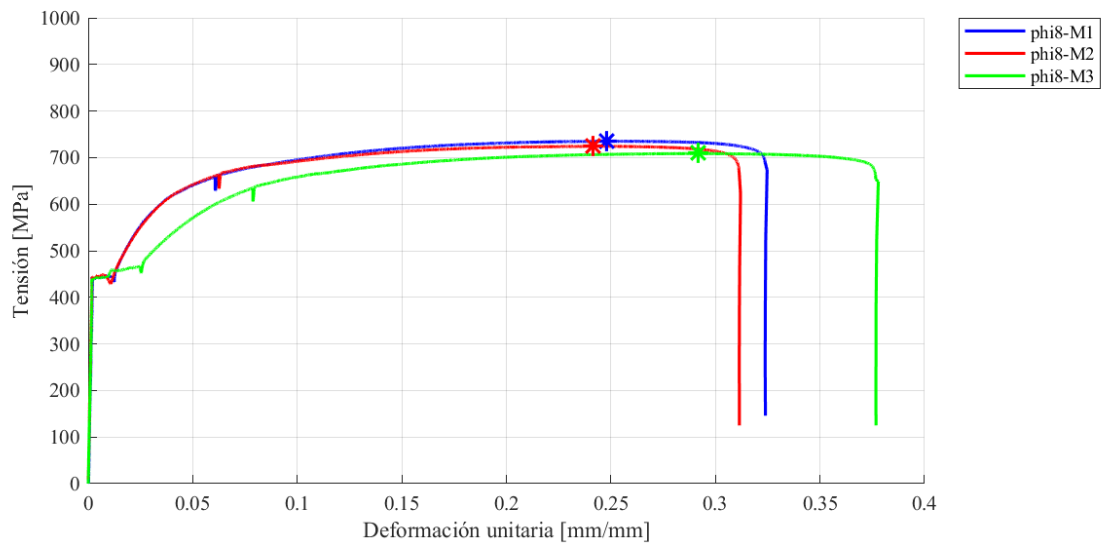


Gráfico 20. Resistencia última de las barras $\Phi 8$.

B.4.2 Hormigón

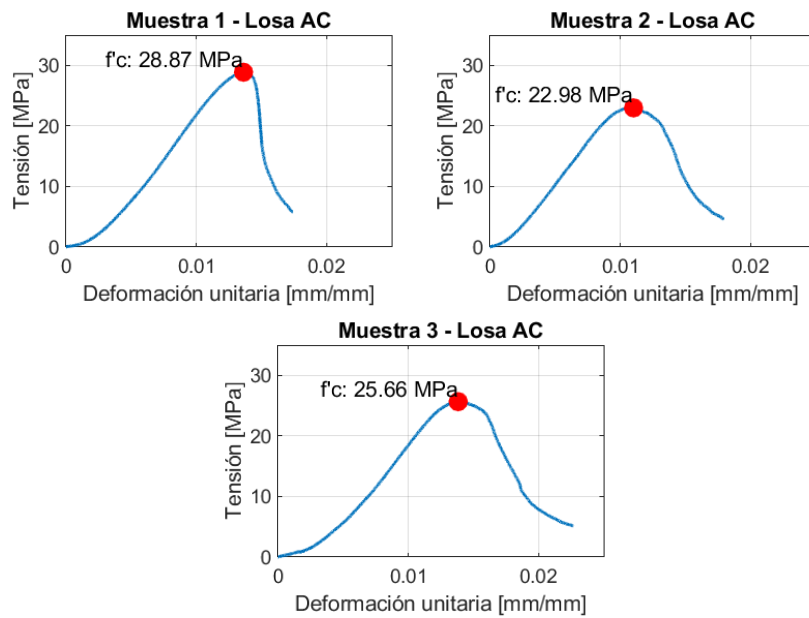


Gráfico 21. Curvas de tensión versus deformación unitaria de las muestras de hormigón de la losa AC.

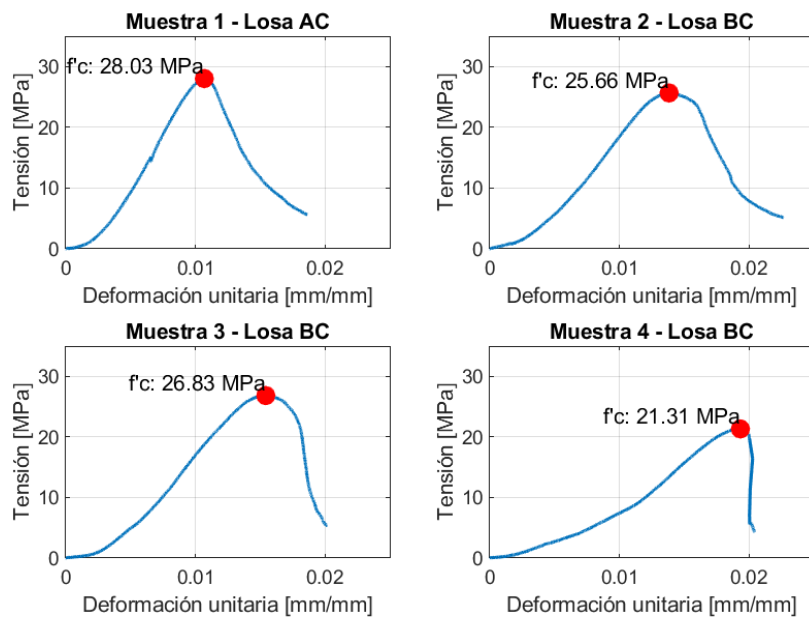


Gráfico 22. Curvas de tensión versus deformación unitaria de las muestras de hormigón de la losa BC.

B.5. Constantes y posiciones de los sensores LVDT

Tabla 13. Constantes y posiciones de los sensores LVDT

N° Canal	N° ID	m	n	Detalle
CH 0	3	-29.511	576.47	Control desplazamiento central superior (viga de transferencia)
CH 1	6	-5.2655	349.57	Control desplazamiento probeta
CH 2	17	-2.6013	136.7	Control giro probeta (ESTE)
CH 3	14	-2.5963	160.91	Control giro probeta (OESTE)
CH 4	2	-31.089	408.8	Desplazamiento losa (SUR)
CH 5	1	-27.638	566.62	Desplazamiento losa (NORTE)
CH 6	22	-2.6014	286.26	Desplazamiento fundación (Sur)
CH 7	10	-2.6364	300.61	Desplazamiento fundación (Norte)
CH 8	18	-2.6338	125.46	Giro fundación (NORTE - ESTE)
CH 9	11	-2.7314	92.662	Giro fundación (SUR - ESTE)
CH 10	19	-2.6375	183.11	Giro fundación (SUR - OESTE)
CH 11	9	-2.6664	358.99	Giro fundación (NORTE - OESTE)
CH 12	29	-1.2594	314.49	Deformación vertical de losa (EXTREMO NORTE)
CH 13	26	-1.3515	98.498	Deformación vertical de losa (CENTRO - NORTE)
CH 14	28	-1.3455	256.89	Deformación vertical de losa (CENTRO)
CH 15	23	-1.3378	384.14	Deformación vertical de losa (CENTRO - SUR)
CH 16	30	-1.2968	332.27	Deformación vertical de losa (EXTREMO SUR)

B.6. Grietas en la Probeta AC

Se evidenció un agrietamiento en la probeta AC debido a retracción plástica y/o manipulación inadecuada, tal como se muestra en la Figura 48. Estas grietas atravesaban de forma transversal la losa, provocando la pérdida de rigidez inicial.



Figura 48. Agrietamiento de la losa AC.

Anexo C: Resultados

C.1. Punto estimado en el perfil de deformaciones de franja central de la losa BC

Debido a la desconexión del sensor central de la losa BC durante el ensayo para el rango de rotaciones de 0.0533 [rad], se realizó un ajuste mediante ponderaciones a las deformaciones verticales de la losa en rotaciones superiores, con el fin de obtener un valor representativo. En el Gráfico 23, se muestra el registro completo de los perfiles de deformación de la probeta BC, donde se evidencia la ausencia del valor central para la rotación de 0.0533 [rad].

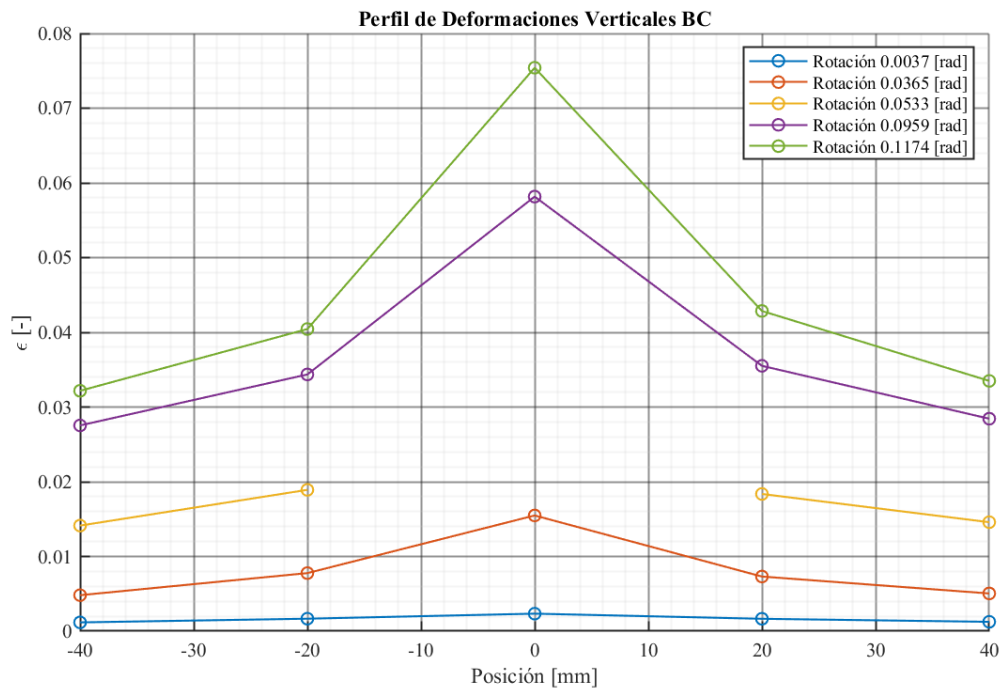


Gráfico 23. Registro completo de los perfiles de deformación de la probeta BC.

Luego de aplicar las ponderaciones, se obtuvieron los perfiles de deformación ajustados, tal como se observa en el Gráfico 24. En estos perfiles, los valores de las posiciones laterales para rotaciones superiores al 0.0533 [rad] se ajustan adecuadamente. Por lo tanto, se considera que el valor de la posición central de la deformación vertical para una rotación de 0.0533 [rad] puede estimarse como el promedio de las deformaciones centrales ponderadas para rotaciones superiores, resultando en un valor específico de 0.0314.

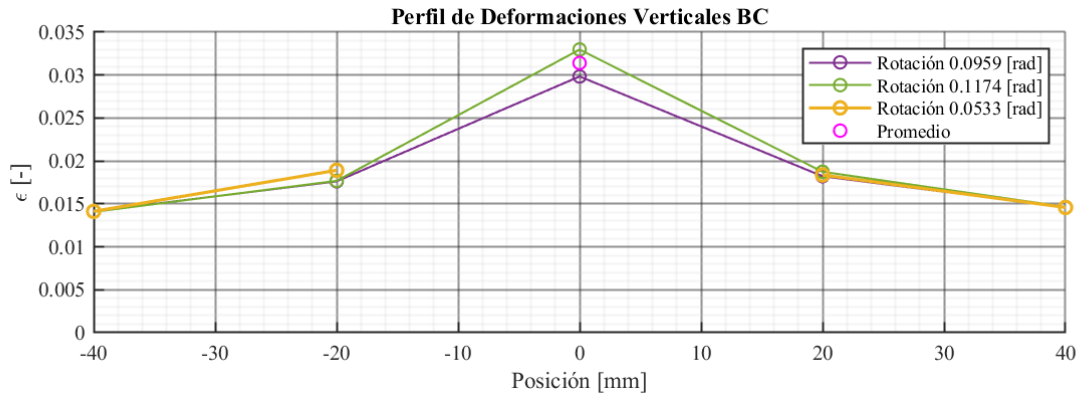


Gráfico 24. Ponderación de deformaciones verticales.

C.2. Análisis de sensibilidad de la ecuación (1)

Se realiza el análisis de sensibilidad de los parámetros de la ecuación (1). En el Gráfico 25 se muestra el caso de una longitud de muro constante de 5000 [mm], con valores de ancho de vano de puerta variables entre 700 [mm] y 1500 [mm]. Mientras que, en el Gráfico 26 se presenta el caso de un ancho de vano de puerta constante de 900 [mm] y longitud de muro variable entre 1500 [mm] a 5000 [mm].

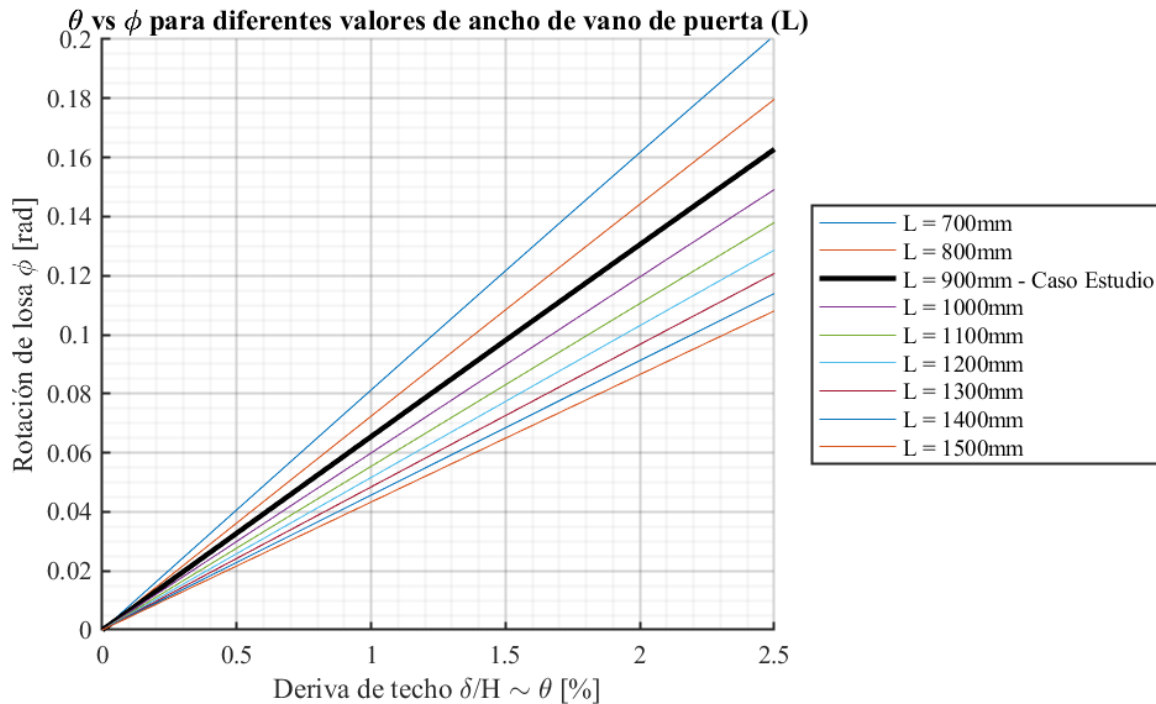


Gráfico 25. Análisis de sensibilidad de la ecuación (1) con ancho de vano de puerta variable.

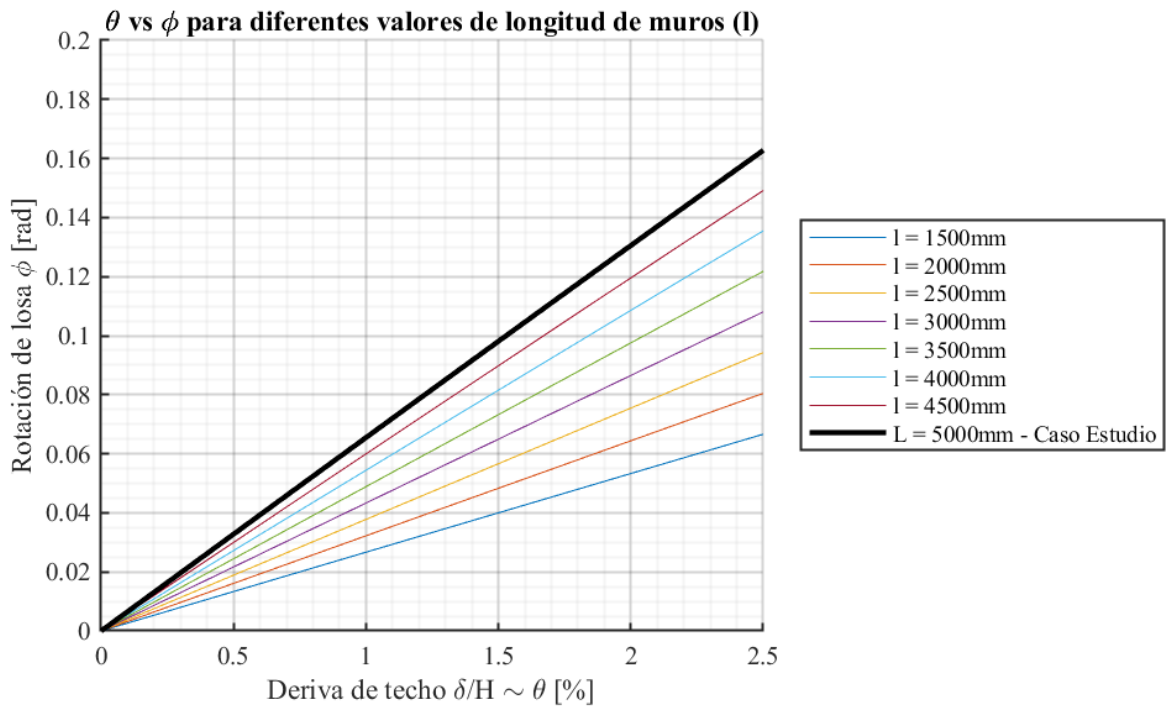


Gráfico 26. Análisis de sensibilidad de la ecuación (1) con largos de muros variables.