



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOSAS DE ACOPLA DE HORMIGÓN
ARMADO CON Y SIN TRABAS DE REFUERZO UTILIZANDO LDVT**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DAVID FRANCISCO SARMIENTO BAEZA

PROFESOR GUÍA:
FABIAN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ
TOMAS YAÑEZ CELEDÓN

ESTE TRABAJO HA SIDO FINANCIADO POR FONDECYT REGULAR N°1200709

SANTIAGO DE CHILE
2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia
ESTUDIANTE: David Francisco Sarmiento Baeza
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: Fabián Rojas

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOSAS DE ACOUPLE DE HORMIGÓN ARMADO CON Y SIN TRABAS DE REFUERZO UTILIZANDO LDVT

Los edificios en Chile son diseñados, en su mayoría, con sistemas de muros de hormigón armado que son acoplados por vigas y losas. Estos elementos deben ser diseñados para resistir la demanda de desplazamiento cuando son sometidos a la acción de la carga lateral debido al sismo. Es por lo anterior que se realiza el siguiente trabajo de título, cuyo objetivo es entender el comportamiento de una losa de hormigón armado acoplada del marco de una puerta construida con y sin trabas, para estudiar la influencia en el efecto de resistencia y capacidad de deformación.

Para cumplir el objetivo, se estudian dos probetas de igual dimensiones y cuantía longitudinal que representan la mitad del ancho del ancho de la puerta, diferenciándose en la presencia de trabas entre los nodos de la malla superior e inferior y cuantía transversal. Se aplica una carga cíclica llevando a distintos niveles de desplazamiento el extremo de la losa en voladizo, provocando que esta rote. La toma de datos se realiza con sensores LDVT para medir desplazamientos y calcular deformaciones.

De los resultados se tiene que ambas probetas fallan por punzonamiento, observándose grietas por corte en la zona de la losa cercana al muro. La diferencia es en la resistencia y deformación alcanzada, donde la losa *Sin Trabas* llegó a una carga máxima de 8821[kgf] a una rotación de 0.025[rad], calculada como la razón entre el desplazamiento medido con el sensor sobre la distancia del borde de muro y extremo de la losa. Por otro lado, la carga máxima alcanzada en la probeta *Con Trabas* fue de 10963[kgf] al nivel de rotación de 0.061[rad], medido de la misma manera. Los resultados representan un aumento del 24% de resistencia.

Además, en el estudio se describe una relación geométrica válida para pequeñas deformaciones, entre la rotación de la losa (ϕ) y la razón entre desplazamiento de techo y altura del edificio ($\Delta/H \sim \theta$). La expresión asume muros idénticos de largo acoplados por una losa rotulada en los extremos de la conexión. Para el estudio realizado, la rotación de 0.025[rad] de la probeta *Sin Trabas* se esperaría para un edificio con deriva de 0.38%, mientras que en el caso *Con Trabas* la deriva esperada es de 0.93% según la rotación de 0.061[rad].

Las conclusiones indican que el uso de trabas mejora el comportamiento de las losas de acople del marco de puertas, debido al aumento de resistencia y capacidad de deformación por el confinamiento del hormigón, siendo la zona recomendada para agregar estos elementos la cercana a dos veces el espesor a la conexión con el muro debido a la concentración de deformaciones que ocurre.

AGRADECIMIENTO

Comenzar el agradecimiento al profesor Pedro y Rodrigo por su disposición y apoyo en el laboratorio para poder instalar y ensayar. Asimismo, agradezco a Tomás Navarrete y Nicolas Masse por la confección y montaje de las probetas.

Extiendo mi gratitud al profesor Fabian Rojas y Leonardo Massone quienes han sido guías en la construcción de esta memoria, su disposición a explicar en detalle y compartir su conocimiento es sumamente valorable para el desarrollo de mi etapa final de la carrera. También agradezco a Tomás Yañez por ser una de las personas que más me ha motivado con la carrera, su capacidad de enseñar con sencillez me empujó a aprender más sobre el diseño estructural.

Quisiera agradecer a mi grupo de civil por las horas de compañía en estudio, de risas, de carretes y de planes espontáneos que han hecho esta etapa increíble, sin ustedes la carrera no habría sido lo mismo. Gracias Benja, Carli, Seba, Cata, Rorro, Mari, Renzo y Rodrigo por todo.

A mis queridos amigos Valen, Simón y Vale por ser la necesaria distracción que me ha permitido escapar de la universidad y descansar.

Finalmente, agradezco a mi hogar, mi Mamá y Agus que han sido mis modelos a seguir desde siempre. Gracias por entender mis noches de estudio y entregarme lo que necesitaba.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 : Introducción.....	1
1.1. Introducción.....	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. Edificación en Chile	4
2.1.1. Característica de losa típica	4
2.2. Fallas en edificios después del terremoto 27F de 2010.....	5
2.3. Marco Teórico.....	7
2.3.1. Relación geométrica entre deriva de techo y rotación de la losa	7
2.3.2. Resistencia de Corte	9
Capítulo 3 : Descripción del Ensayo.....	10
3.1. Descripción de las probetas en estudio.....	10
3.1.1. Geometría	10
3.1.2. Materiales	12
3.2. Montaje.....	15
3.3. Instrumentación	18
3.4. Ejecución del ensayo	22
Capítulo 4 : Resultados.....	23
4.1. Procesamiento de datos.....	23
4.1.1. Conversión de Voltímetro a Milímetro	23
4.1.2. Centrado de los sensores.....	23
4.1.3. Corrección por rotación y desplazamiento horizontal.....	24

4.2. Ensayo Cíclico	26
4.2.1. Carga versus desplazamiento.....	26
4.2.2. Envolvente	29
4.2.3. Rigidez.....	30
4.2.4. Energía.....	32
4.3. Perfil de deformación vertical	34
4.4. Daños en las probetas	38
4.5. Relación entre deriva de techo y rotación de losa	39
4.5.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros.....	40
Capítulo 5 : Conclusiones	41
Bibliografía.....	43
Anexo	44
Anexo A: Cálculos.....	44
A.1 Desarrollo de relación deriva de techo y rotación de losa.....	44
A.2 Estimación de área de enfierradura en flexión	45
Anexo B: Comentarios	46
B.1 Problema en el ensayo de la probeta Con Trabas	46
B.2 Código de los Sensores LDVT	47
Anexo C: Planos	48
C.1 Losa Sin Trabas.....	48
C.2 Losa Con Trabas	49
Anexo D: Curvas de Resistencia	50
D.1 Acero.....	50
D.2 Hormigón.....	52

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Dimensiones y cuantía de la losa	10
Tabla 2: Muestras de la probeta Sin Trabas	13
Tabla 3: Muestras de la probeta Con Trabas	13
Tabla 4 Resistencia barras $\Phi 8$	14
Tabla 5 Resistencia barras $\Phi 12$	14
Tabla 6 Control de carga y desplazamiento (Deriva) de cada ensayo.	22
Tabla 7 Rigidez Secante de cada ciclo	31
Tabla 8 Energía disipada del sistema por ciclo	33
Tabla 9: Resultado del análisis a flexión	45

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Daño observado en muro de hormigón armado por flexo – compresión (Rojas & Massone, 2012)	5
Fig. 2 Daño por corte en elemento de acople (Rojas & Massone, 2012)	6
Fig. 3 Daño en losas de acople de pasillos y marcos de puertas (John Wiley & Sons, 2010)	6
Fig. 4 Acción de los muros a cargas laterales (Coull, ASCE, & Yang Chee, 1983)	7
Fig. 5 Representación geométrica de la rotación de los muros.	7
Fig. 6 Perímetro Critico (Schwaighofer & P. Collins, 1977)	9
Fig. 7 Dimensiones de la probeta en centímetros	11
Fig. 8 Plano de probeta Con Trabas	12
Fig. 9 Maquina universal y extensómetro.	13
Fig. 10 Representación del movimiento de la fundación	15
Fig. 11 Sistema de postensado de la fundación con la probeta.	15
Fig. 12 Viga de transferencia y Actuador hidráulico	16
Fig. 13 Representación de la probeta preparada para ser ensayada, modelo en Sketchup16	

Fig. 14 Vista Lateral – Probeta conectada a la fundación y actuador	17
Fig. 15 Vista Frontal – Barras postensadas (1) conecta la fundación a la probeta y (2) conectan la fundación al piso.	17
Fig. 16 Sensor LDVT	18
Fig. 17 Sensores horizontales superiores de la losa	19
Fig. 18 Sensores verticales de la losa	19
Fig. 19 Sensores de la fundación lado este.....	20
Fig. 20 Sensores de la fundación lado oeste.....	20
Fig. 21 Distancia entre sensores verticales.....	21
Fig. 22 Fotografía de los sensores verticales instalados.....	21
Fig. 23 (a) Rotación de la fundación,	24
Fig. 24 Sistema de referencia considerado	26
Fig. 25 Desprendimiento del hormigón.....	34
Fig. 26 Relación geométrica para determinar el desplazamiento real del muro	34
Fig. 27 Franjas de grupos de sensores de una misma cota.	35
Fig. 29 Daño presentado en la Losa Con Trabas.....	38
Fig. 28 Daño presentado en la Losa Sin Trabas	38
Fig. 30 Representación geométrica de la rotación de los muros.	44

INDICE DE GRAFICOS

Graf. 1 Rotación de la losa del modelo de 1 piso (Henriquez Pizarro, 2019), siendo el eje X asociado al ancho de puerta.....	8
Graf. 2 Comparación entre relación geométrica y modelo numérico. Siendo la deriva de techo y el desplazamiento de la losa	9
Graf. 3 Protocolo de carga de cada ensayo.....	22
Graf. 4 Ejemplo de centrado de la señal de los sensores.....	23
Graf. 5 Corrección del desplazamiento horizontal	25
Graf. 6 Histéresis probeta Sin Trabas.....	27
Graf. 7 Histéresis probeta Con Trabas	27
Graf. 8 Carga versus desplazamiento comparativa de ambos ensayos	28
Graf. 9 Envoltorio del grafico de carga versus deformación	29
Graf. 10 Rigidez secante – Sin Trabas	30
Graf. 11 Rigidez secante – Con Trabas	30
Graf. 12 Cambio de rigidez	31
Graf. 13 Energía disipada del sistema	32
Graf. 14 Ejemplo de datos considerados	34
Graf. 15 Perfil de deformación vertical de la losa – Sin Trabas	36
Graf. 16 Perfil de deformación vertical de la losa – Con Trabas	37
Graf. 17 Relación de rotación y deformación de la losa (Geometría / Ensayo).....	39
Graf. 18 Análisis de sensibilidad de la relación geométrica.	40
Graf. 20 Corrección del primer set de datos de la probeta con trabas. En rojo es el comportamiento inusual.....	46
Graf. 21 Corrección del primer set de datos de la probeta con trabas. En rojo es el comportamiento inusual	46
Graf. 21 Resistencia ultima de barras $\Phi 8(b)$	46
Graf. 22 Resistencia ultima de barras $\Phi 8$	50
Graf. 23 Fluencia de barras $\Phi 8$ Graf.	50

Graf. 24 Resistencia ultima de barras $\Phi 12$	51
Graf. 25 Fluencia de barras $\Phi 12$	51
Graf. 26 Curva de las mezclas utilizadas en la confección de las probetas y el promedio de cada una.....	52

Capítulo 1: Introducción

1.1. Introducción

En Chile, los edificios de gran altura se construyen principalmente mediante un sistema de muros de hormigón armado diseñados para resistir tanto las cargas gravitacionales como las laterales, demostrando ser eficaz para reducir los desplazamientos de techo. En líneas generales, estos muros están conectados por vigas para mantener la rigidez de la estructura. Sin embargo, en zonas como pasillos o dinteles de puertas, se omiten, dejando únicamente la losa acoplada para cumplir el papel de resistir las demandas gravitacionales y laterales.

Posterior al terremoto del 27 de Febrero de 2010 en la región del Maule, Chile, se evidenciaron daños considerables en bordes de muros por su bajo confinamiento y en las losas de pasillos y puertas de los edificios debido a que estas actuaban como elementos de acople, sin ser diseñadas para resistir las demandas de desplazamiento lateral (John Wiley & Sons, 2010). La razón detrás de este suceso radica en que, ante la acción de un sismo, los muros de los edificios son los responsables de resistir la carga lateral, generando una rotación, que al estar conectado entre si con elementos de acople, estos transmiten los esfuerzos de corte y flexión a los otros muros. Lo que significa que los muros inducen a la deformación y rotación en las losas y vigas de acople.

Particularmente, los estudios numéricos y experimentales de losas de acople se enfocan en entender el comportamiento, su capacidad de deformación y resistencia máxima alcanzada. Sin embargo, las recomendaciones para el diseño estructural se encuentran desactualizada, dejando a criterio del ingeniero las decisiones. Entre los estudios más referenciados, se encuentra el de la Universidad de Toronto (Schwaighofer & P. Collins, 1977) donde se describe el comportamiento de la losa acoplada debido al desplazamiento de los muros.

Por lo anterior se lleva a cabo un estudio experimental de dos probetas de losa de acople a un muro de hormigón armado representativas al vano de una puerta, ensayadas a una carga cíclica a distintos niveles de deformación. Ambas poseen la misma geometría y cuantía longitudinal, pero se diferencian en que una se construye con trabas entre los nodos de mallas superior e inferior y distinta cuantía transversal, con la hipótesis de mejorar la resistencia. La toma de datos se realiza con sensores LVDT en distintos puntos de la losa que miden el desplazamiento producido durante el ensayo. A partir de los resultados obtenidos se calcula la deformación para construir gráficos de carga versus desplazamiento y perfil de deformación para ser analizados y entregar recomendaciones sobre la construcción de losas acopladas con trabas.

En el presente documento se hace referencia a cada probeta como *Sin Trabas (ST)* y *Con Trabas (CT)*.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un estudio experimental para comparar la capacidad de resistencia y deformación de dos probetas representativas de losa de acople con y sin trabas, de la puerta en un edificio de hormigón armado conformado por muros, sometida a cargas cíclicas simulando un sismo. El muestreo de datos se realiza con sensores LDVT para medir el desplazamiento y calcular la deformación en distintos puntos de la losa.

1.2.2. Objetivos específicos

- Revisión bibliográfica específica al tema de estudio experimental de losa de acople.
- Revisión bibliográfica de estimación de resistencia de las losas de acople.
- Preparación del montaje experimental para el ensayo e instalación de sensores LDVT.
- Realizar el ensayo de probetas de losas de acople con cargas cíclicas.
- Analizar los datos del ensayo, en particular la relación de deformación y capacidad.
- Determinar una relación entre la deriva de techo y la rotación de la losa.
- Entregar recomendación sobre el uso de trabas en las losas de acople.

1.3. Organización

- *Capítulo 2: Antecedentes de Estudio*

Se presenta un contexto de la construcción de edificios de hormigón armado en Chile, con un enfoque en las dimensiones usuales de las losas. Se abordan los daños documentados en estas estructuras debido al terremoto del 27F de 2010. Además, se describe el marco teórico, que incluye un análisis de la relación entre la rotación de la losa y la deriva de techo, y la resistencia al punzonamiento de la losa.

- *Capítulo 3: Descripción del Ensayo*

En el capítulo se describe la geometría de las probetas construidas, propiedades de los materiales, descripción del montaje, instrumentación utilizada y ejecución del ensayo.

- *Capítulo 4: Resultados*

Comenzando con la explicación del procesamiento de datos, para luego presentar los resultados obtenidos. En esta sección se presentan curvas comparativas de carga versus desplazamiento, energía, rigidez y perfiles de deformación vertical. Además, de fotografías del daño en las probetas y la discusión de la relación deriva de techo/rotación de losa para el caso particular.

- *Capítulo 5: Conclusiones*

En el último capítulo se realiza la conclusión de los resultados, agregando recomendaciones sobre la confección de las losas del maro de puertas acopladas y también sobre los ensayos e instrumentación del laboratorio.

Capítulo 2: Antecedentes de Estudio

2.1. Edificación en Chile

La edificación en altura en el país se conforma principalmente por muros rígidos de hormigón armado, los cuales han resultado en una respuesta eficiente ante las exigentes sollicitaciones sísmicas. Esta estrategia de diseño sísmico resistente, conocida como "Edificio Chileno", implica la presencia de un núcleo de muros de hormigón, generalmente ubicado en áreas que albergan ascensores y escaleras, conectado a columnas o muros perimetrales mediante vigas. La normativa chilena de diseño estructural NCh430-2008 basada en la ACI318-2005, detalla las características de los miembros como dimensiones mínimas, armadura de refuerzo y elementos de borde con detallamiento especial requeridos para confinar al hormigón con el objetivo de resistir las fuerzas gravitacionales y laterales.

La metodología de construir con muros en altura apenas ha variado sus características fundamentales, según lo describe Calderón en su memoria (Calderón Corail, 2007). La densidad del área de muros por área de piso ha permanecido constante en un 3% en ambas direcciones entre los edificios estudiados desde 1939 hasta 2006. Sin embargo, el cambio significativo en la construcción en altura es el aumento del número de pisos, generando mayor carga axial en los primeros niveles y, en consecuencia, un mayor peso de la propia estructura, lo que se traduce en una mayor magnitud de la fuerza sísmica aplicada.

Agregando a lo anterior, en la evolución de la construcción en Chile se han prescindido de los dinteles de las puertas en los nuevos edificios, los cuales actuaban como elementos de acople entre muros, es decir, elementos que unen a los muros entre sí. Con su ausencia, la función de acoplamiento entre los muros de pasillos y puertas recae en la losa.

2.1.1. Característica de losa típica

Para ser representativa, las probetas incorporan las características propias de una losa típica de los edificios, en particular en la zona de interés del marco de puerta.

En base a diversos estudios realizados, se comenta que las losas poseen un espesor entre 14-16[cm], un ancho de pasillo entre 130[cm] a 180[cm] y ancho de vano de puerta entre 80-100[cm]. Con respecto a la cuantía que se utiliza para confeccionar las losas, estas rondan los valores entre 1.3% y 1.45%.

Lo anterior se respalda en memorias en donde se han analizado los planos de edificios entre 2010 y 2014 (Henriquez Pizarro, 2019) y también estructuras más recientes de 2018 y 2019 (Díaz Bustos, 2023) y (Díaz Sanhueza, 2023))

2.2. Fallas en edificios después del terremoto 27F de 2010

Después del terremoto que afectó a la zona centro-sur de Chile, miembros del Consejo de Diseño Estructural de Edificios en Altura de Los Ángeles. (*Los Angeles Tall Building Structural Design Council*) llevaron a cabo visitas a varios edificios con el objetivo de identificar los daños. Entre las fallas comúnmente encontradas se destacan las siguientes:

- Grietas horizontales en el alma de los muros en forma de T, ocasionadas por las mayores deformaciones por compresión en los extremos. Este fenómeno conduce a la pérdida del recubrimiento, dejando al descubierto las barras que experimentaron pandeo debido a los ciclos de compresión y tracción. La armadura transversal de diámetro 8 o 10 [mm], separación de 20[cm] y dobleces en 90° no impidieron el pandeo de las barras longitudinales, evidenciando el bajo confinamiento. (Rojas & Massone, 2012)
- Aparición de fisuras diagonales en fachadas y elementos de acople asociado al corte debido a la relación de aspecto entre 1 y 2 (ancho/largo). (Rojas & Massone, 2012)
- Grietas en las losas paralelas a los muros de pasillos en diversos pisos, requiriendo reparación del hormigón aplastado y del marco de las puertas que experimentaron deformaciones (John Wiley & Sons, 2010). Provocando que las puertas quedaran trabadas, siendo este daño el enfoque de la memoria.



Fig. 1 Daño observado en muro de hormigón armado por flexo – compresión (Rojas & Massone, 2012)



Fig. 2 Daño por corte en elemento de acople (Rojas & Massone, 2012)



Fig. 3 Daño en losas de acople de pasillos y marcos de puertas (John Wiley & Sons, 2010)

2.3. Marco Teórico

El cálculo estructural es la base técnica esencial para estimar la resistencia de los elementos y estimar el comportamiento de las edificaciones. En este estudio, se abordan los siguientes aspectos de cálculo.

2.3.1. Relación geométrica entre deriva de techo y rotación de la losa

Cuando los muros acoplados resisten la carga lateral, experimentan curvaturas y actúan como voladizos, provocando rotaciones en su sección transversal. En consecuencia, la losa se ve forzada a flexionar y rotar en las conexiones, generando esfuerzos de corte y flexión. Lo anterior se explica en el estudio de Alexander Coull (Coull, ASCE, & Yang Chee, 1983) donde se presenta de manera gráfica el comportamiento del muro en la Fig. 4.

Suponiendo que los muros acoplados son de la misma dimensión, rotan con un punto de apoyo y la losa es rotulada en la conexión, se puede determinar una relación geométrica (Ec. (1)) entre la razón del desplazamiento de techo sobre la altura de muro ($\Delta/H \sim \theta$) y la rotación de la losa (ϕ) a partir de la Fig. 5. En otras palabras, para una cierta deriva de techo es posible calcular el valor de rotación de la losa esperada. Siendo H la altura de muro, Δ el desplazamiento de techo, L el ancho de pasillo o de puerta y l es la longitud de los muros acoplados, el detalle del procedimiento se encuentra en el anexo 0.

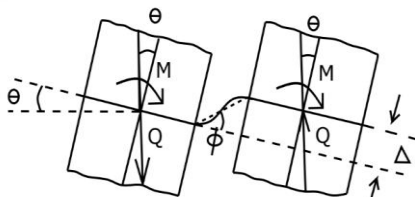


Fig. 4 Acción de los muros a cargas laterales
(Coull, ASCE, & Yang Chee, 1983)

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

Donde:

- $\Delta/H \sim \theta$: Deriva de techo
- ϕ : Rotación de losa

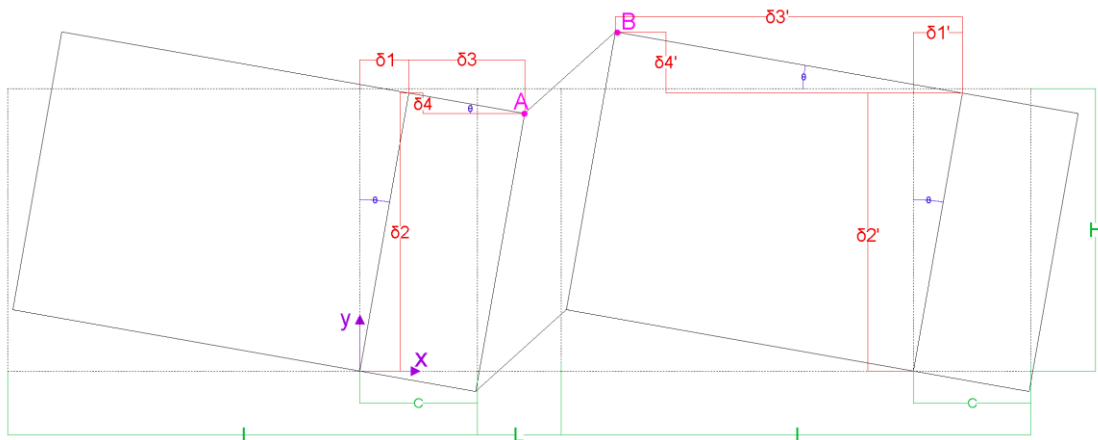
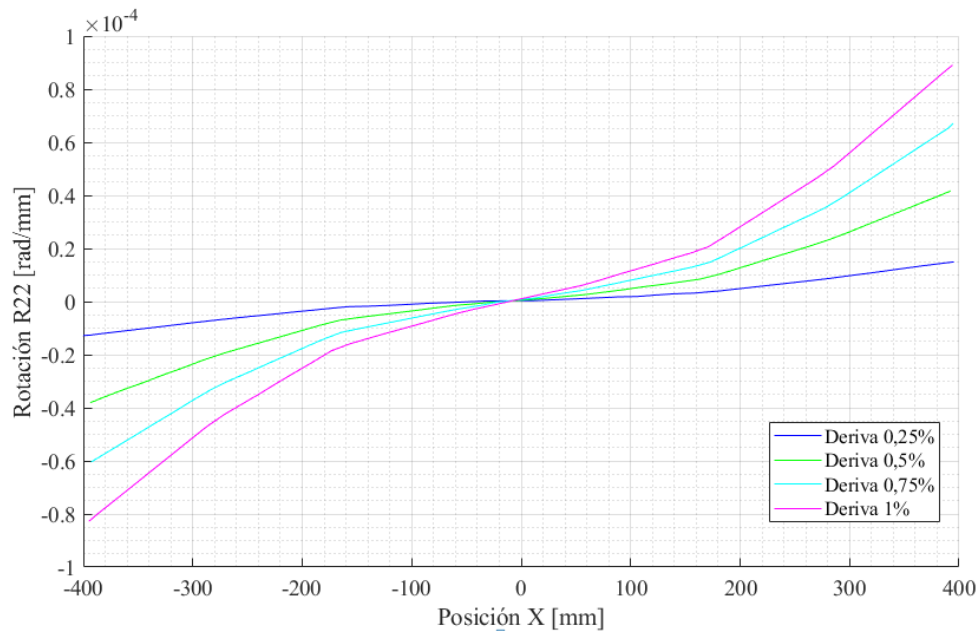


Fig. 5 Representación geométrica de la rotación de los muros.

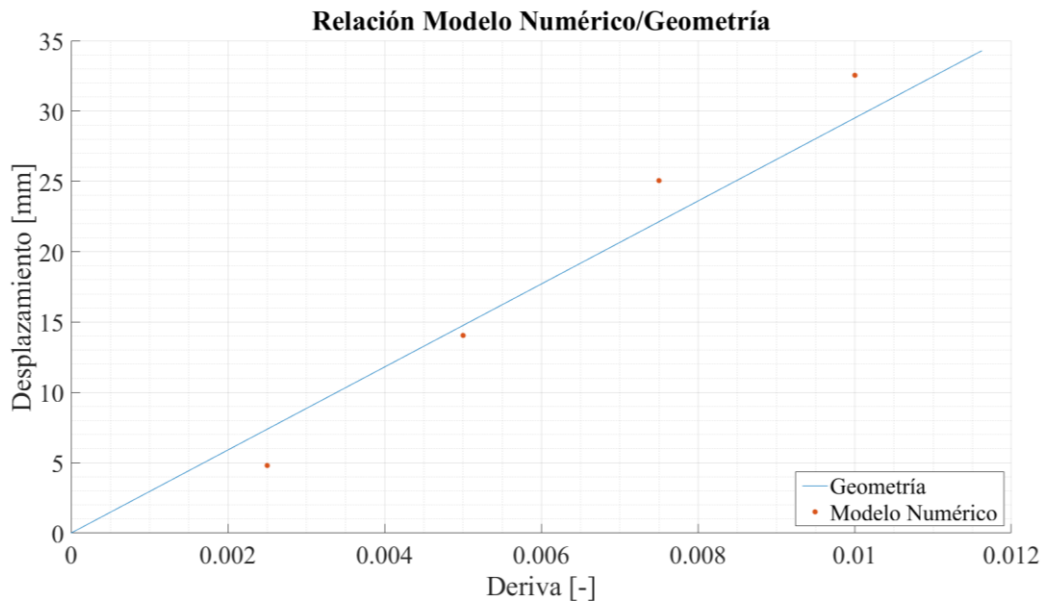
2.3.1.1. Verificación con modelo numérico

La relación geométrica anterior es verificada con los resultados obtenidos en el modelo numérico del estudio de Consuelo Henríquez (Henríquez Pizarro, 2019). En esta investigación, se construye un modelo de elementos finitos de 1 y 10 pisos de losas acopladas a dos muros de hormigón armado, en particular los datos obtenidos para el caso de 1 piso con cuantía de 1.3% son los utilizados para comparar. El Graf. 1 representa la rotación de los segmentos de la losa para distintos niveles de deriva de la memoria de Consuelo Henríquez.

Entonces, se determina el desplazamiento en el centro de la losa mediante el cálculo de la doble integral de la parte positiva del Graf. 1 con el propósito de ser comparada con la relación geométrica de la Ec. (1). Se considera la misma geometría del modelo, es decir, muros de 5[m] de largo y un ancho de puerta de 90[cm]. Se presenta la comparación en el Graf. 2, destacando que para los niveles de derivas estudiados se obtiene un desplazamiento de la losa similar según ambos enfoques.



Graf. 1 Rotación de la losa del modelo de 1 piso (Henríquez Pizarro, 2019), siendo el eje X asociado al ancho de puerta.



Graf. 2 Comparación entre relación geométrica y modelo numérico. Siendo la deriva de techo y el desplazamiento de la losa

2.3.2. Resistencia de Corte

En las conexiones del estilo columna-losa o muro-losa existe un modo de falla que en general se deja de lado, el *Punzonamiento*, siendo una falla por corte debido a cargas concentradas. Para determinar su resistencia, diversos códigos y estudios definen un perímetro crítico que depende de la geometría de los elementos y la resistencia del hormigón. Por ejemplo, en el código de Estados Unidos (ACI Committee 318, 2014) describe la sección crítica b_0 a una distancia $d/2$ del borde de la columna o muro. Similar es el Eurocode 2 (Institution BS, 2004) que define el perímetro de control u_1 a una distancia $2d$ del borde de muro.

En el estudio de Schwaighofer (Schwaighofer & P. Collins, 1977) también define el perímetro crítico a una distancia $d/2$ del muro tal como se representa en la Fig. 6, donde la resistencia al corte es igual a la ecuación presente en la imagen, con la tensión de corte igual a $0.33\sqrt{f'c}$ [MPa].

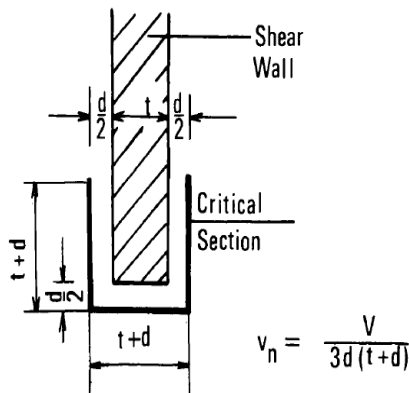


Fig. 6 Perímetro Crítico (Schwaighofer & P. Collins, 1977)

Capítulo 3: Descripción del Ensayo

3.1. Descripción de las probetas en estudio

3.1.1. Geometría

La geometría de las probetas bajo estudio, tanto la configuración *Con Trabas (CT)* como *Sin Trabas (ST)*, se basa en las dimensiones típicas de una losa, aunque se ve limitada por las restricciones del espacio disponible para realizar el ensayo. El laboratorio está equipado con un sistema de fundación reutilizable postensado al piso, diseñado para asegurar la probeta y evitar movimientos de la base durante el ensayo.

En la Fig. 7, se observa la probeta sujeta por la fundación, que generan un empotramiento debido al roce. El espacio entre las fundaciones limita el espesor y tamaño de la losa y el muro. En la misma figura se puede notar que la losa se encuentra rotada, ubicándose de manera vertical y no horizontal como en la realidad estaría, esto se debe por la posición del actuador, que solo ejerce un movimiento horizontal, siendo necesaria orientar la losa de esta manera para simular el desplazamiento que esta tendría.

Las dimensiones del ancho y largo de la Tabla 1 hacen relación a la mitad de la distancia de pasillo y marco de la puerta en un sistema real, además la cuantía utilizada representa a la de una losa típica del marco de la puerta en los edificios de Chile.

La principal diferencia entre las dos probetas es la presencia de trabas, ubicadas en cada nodo de intersección de las barras longitudinales y transversales. Estas trabas conectan la malla superior con la inferior de la losa, como se ilustra en la Fig. 8.

Los detalles específicos se proporcionan en el 0 con los planos correspondientes.

Tabla 1 Dimensiones y cuantía de la losa

Espesor	12 [cm]
Ancho	100 [cm]
Altura	125 [cm]
Cuantía	1.7 % (longitudinal $\Phi 12$) 0.50 % (ST transversal $\Phi 8$) 0.54 % (CT transversal $\Phi 8$)

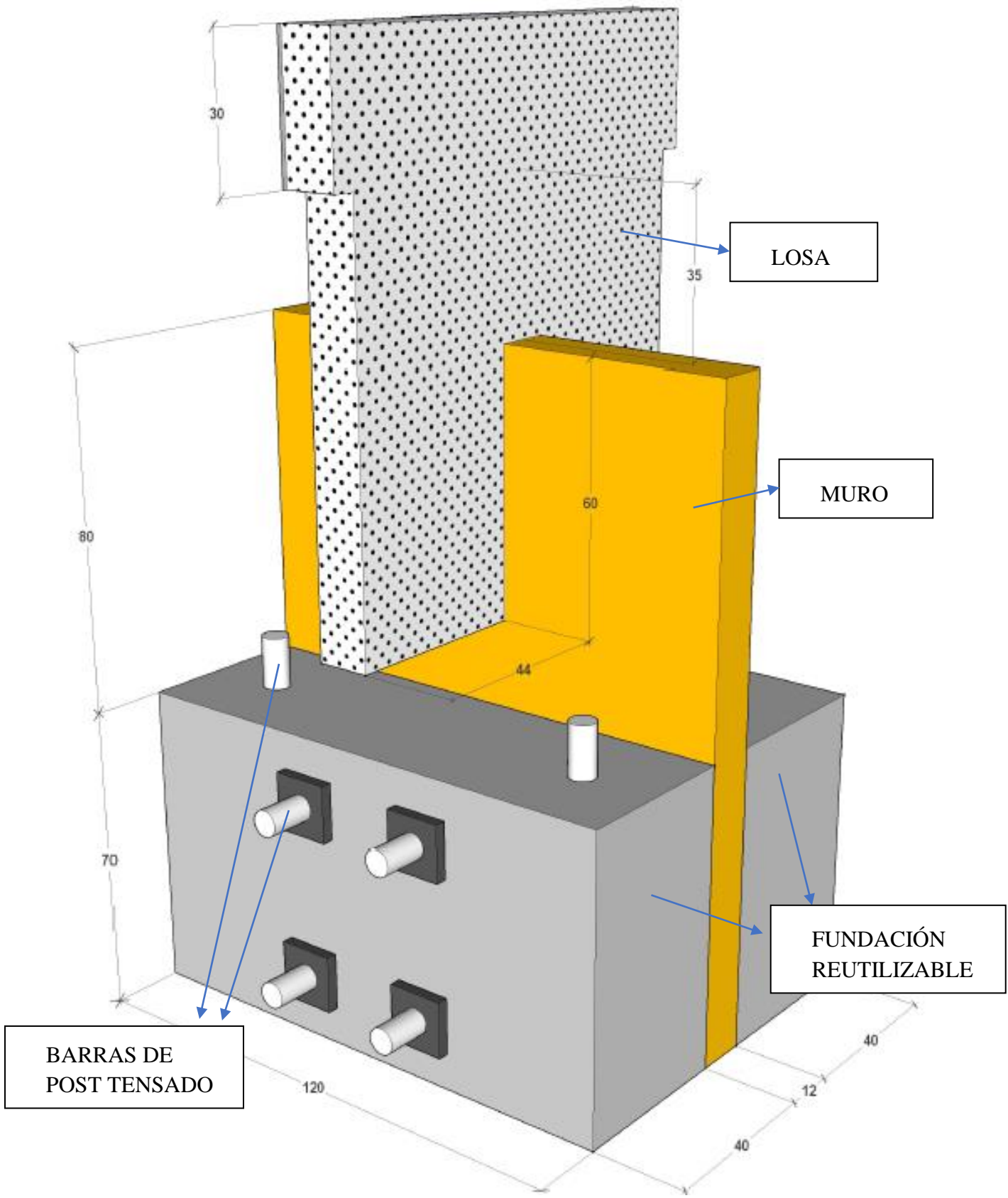


Fig. 7 Dimensiones de la probeta en centímetros

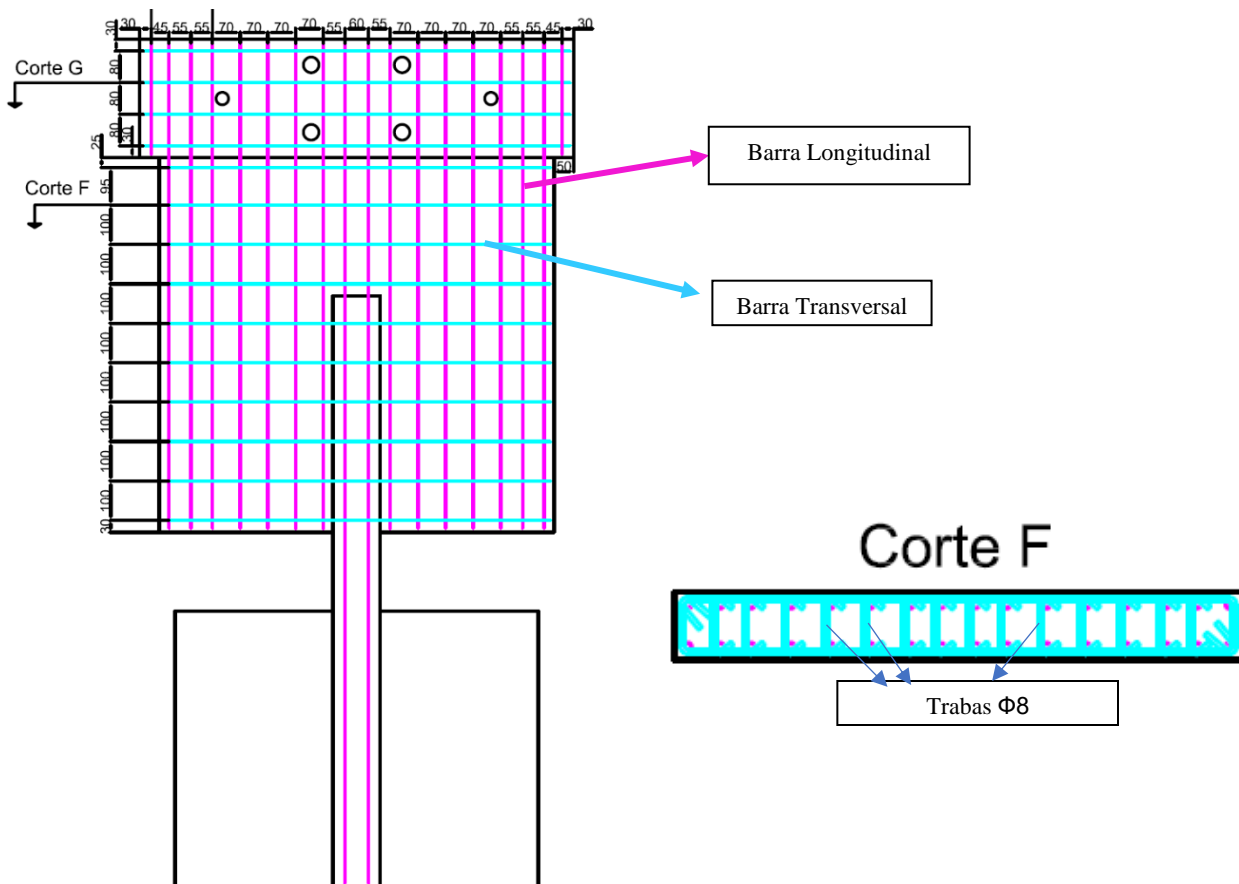


Fig. 8 Plano de probeta Con Trabas

3.1.2. Materiales

Las probetas son confeccionadas con hormigón H30 de BEMEZCLA y barras de acero A630-420H. A continuación, se detalla las propiedades de cada material según el ensayo de laboratorio de las muestras.

- *Hormigón*

La resistencia del hormigón viene del ensayo de las muestras de cada conjunto de mezcla utilizadas para la confección de las probetas. En total se realizaron 4 mezclas por cada probeta, dos para la confección del muro y dos para la losa, presentando el valor de cada muestra y un promedio final.

Tabla 2: Muestras de la probeta Sin Trabas

		Resistencia, $f'c$ [MPa]			$f'c$ promedio [MPa]
	Mezcla	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
Muro	M1	16.76	19.15	21.69	20.89
	M2	21.99	23.31	22.44	
Losa	M1ST	26.32	17.68	24.94	22.82
	M2ST	23.81	20.63	23.56	

Tabla 3: Muestras de la probeta Con Trabas¹

		Resistencia, $f'c$ [MPa]			$f'c$ promedio [MPa]
	Mezcla	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
Muro	M3	22.69	16.64	20.62	19.57
	M4	18.32	-	-	
Losa	M3CT	23.17	16.81	20.34	20.64
	M4CT	21.57	-	21.31	

- Acero

La resistencia de las barras de acero proviene del ensayo a tracción de seis muestras de 20[cm] por cada barra ($\Phi 8$ y $\Phi 12$). Para las lecturas de carga y desplazamiento se utilizó la maquina universal del laboratorio de dinámica de estructuras y el extensómetro *Epsilon-modelo 3541*.

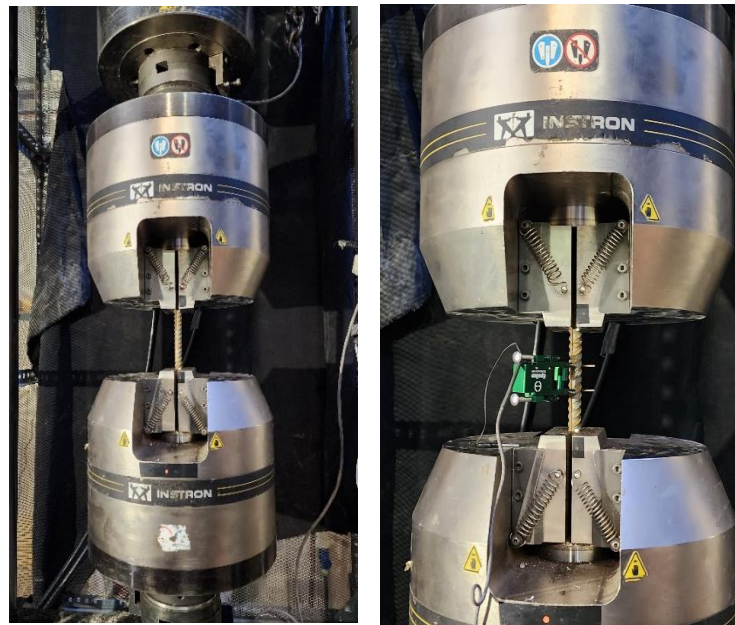


Fig. 9 Maquina universal y extensómetro.

¹ No son considerados los datos de las probetas faltantes debido a que presentaban fallas en su confección

Tabla 4 Resistencia barras $\Phi 8$

<i>Muestra</i>	<i>E [GPa]</i>	<i>f_y [MPa]</i>	<i>f_u [MPa]</i>	<i>ε_y[-]</i>	<i>ε_u[-]</i>
N1	318.5	637	833	0.002	0.089
N2	302.4	635	833	0.0021	0.089
N3	289.5	637	824	0.0022	0.087
N4	335.3	637	849	0.0019	0.085
N5	192.4	635	824	0.0033	0.086
N6	358.9	646	821	0.0018	0.088
Promedio	299.5	637.8	830.7	0.0022	0.087

Tabla 5 Resistencia barras $\Phi 12$

<i>Muestra</i>	<i>E [GPa]</i>	<i>f_y [MPa]</i>	<i>f_u [MPa]</i>	<i>ε_y[-]</i>	<i>ε_u[-]</i>
N1	300.6	541	830	0.0018	0.07
N2	360.7	541	834	0.0015	0.08
N3	380.0	494	810	0.0013	0.09
N4	266.5	533	809	0.002	0.08
N5	251.4	528	817	0.0021	0.08
N6	240.9	530	789	0.0022	0.07
Promedio	300.0	527.8	814.8	0.0018	0.078

3.2. Montaje

El montaje de las probetas en el laboratorio de IDIEM sigue un procedimiento idéntico para ambas configuraciones y se realiza con la asistencia del puente grúa. Inicia con el desplazamiento de la fundación a una posición específica, como se muestra en la Fig. 10. Posteriormente, se posiciona la probeta entre estas, creando un sistema empotrado mediante el roce de los miembros.

A continuación, los elementos se conectan mediante barras de acero que se postensan a una carga de 12 toneladas. Este proceso implica comprimir los elementos de hormigón entre sí, asegurándolos con barras de acero y pernos. Inicialmente se postensa la fundación al muro, luego se realiza lo mismo con la fundación y el piso del laboratorio. Finalmente se rectifica que el postensado del conjunto probeta-fundación esté en la carga esperada.

La Fig. 11 corresponde al sistema de postensado, que consta de un cajón de acero, el actuador naranja, encargado de ejercer la fuerza, y la celda de carga plateada, que permite medir los niveles de carga.

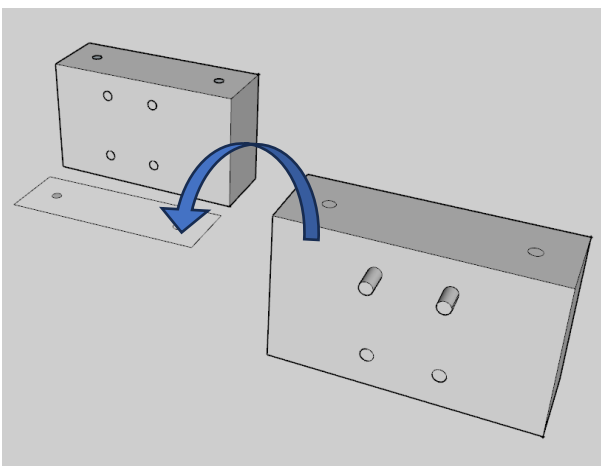


Fig. 10 Representación del movimiento de la fundación



Fig. 11 Sistema de postensado de la fundación con la probeta.

Continuando con el montaje, se instala la viga de transferencia de carga en la parte superior de la losa, como se muestra en la Fig. 12. Esta viga tiene la función de transmitir la carga de manera homogénea y conectar la probeta al actuador. La instalación se realiza manualmente al levantar la viga y apretar las tuercas.

Finalmente, se instala el actuador lateral conectado al muro de reacción del laboratorio y la probeta a través de pasadores (Fig. 13), simulando una conexión rotulada. El actuador tiene la función de ejercer la carga lateral a la losa para simular los movimientos sísmicos.

La Fig. 14 y Fig. 15 representan a dos vistas de la probeta instalada y conectada al actuador. Además, se señala el movimiento que tiene la losa durante el ensayo y el sistema de barras postensadas.

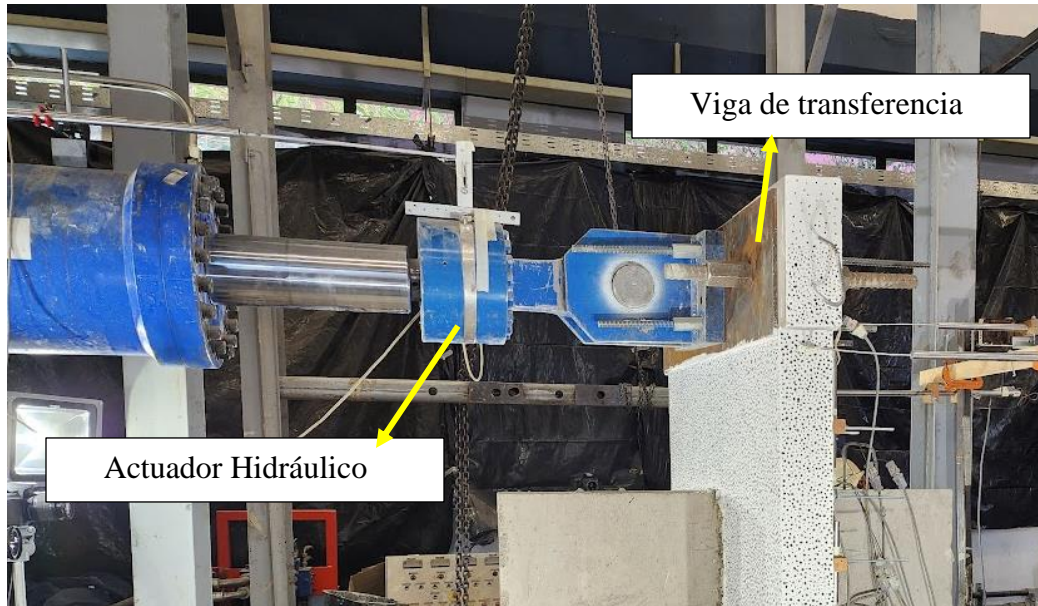


Fig. 12 Viga de transferencia y Actuador hidráulico

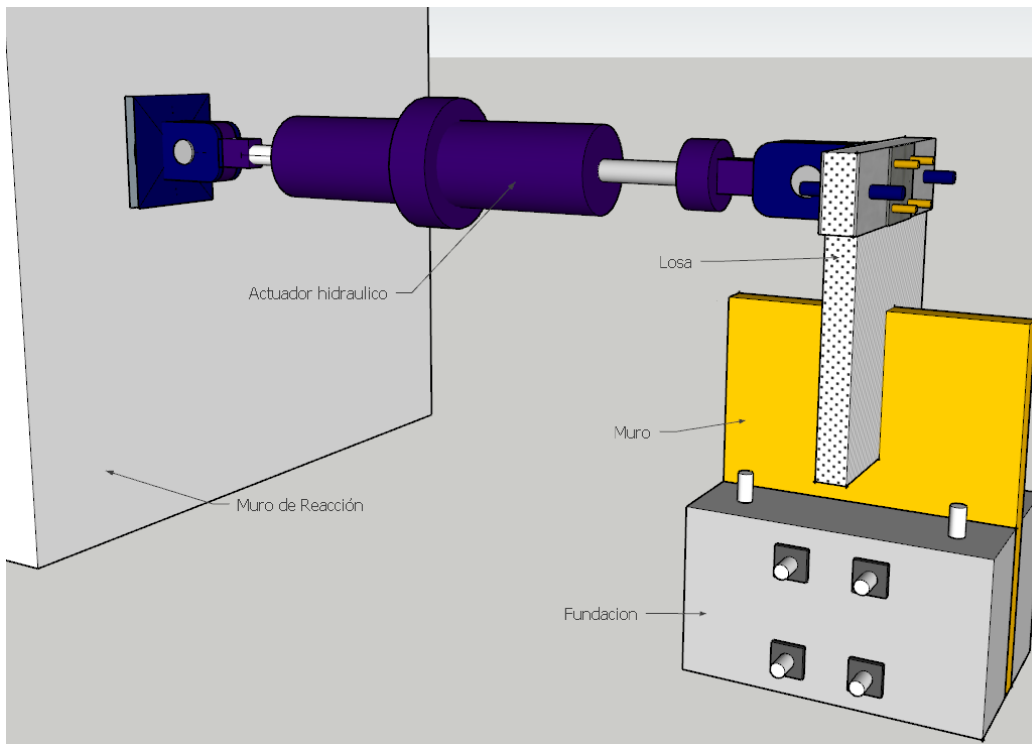


Fig. 13 Representación de la probeta preparada para ser ensayada, modelo en Sketchup

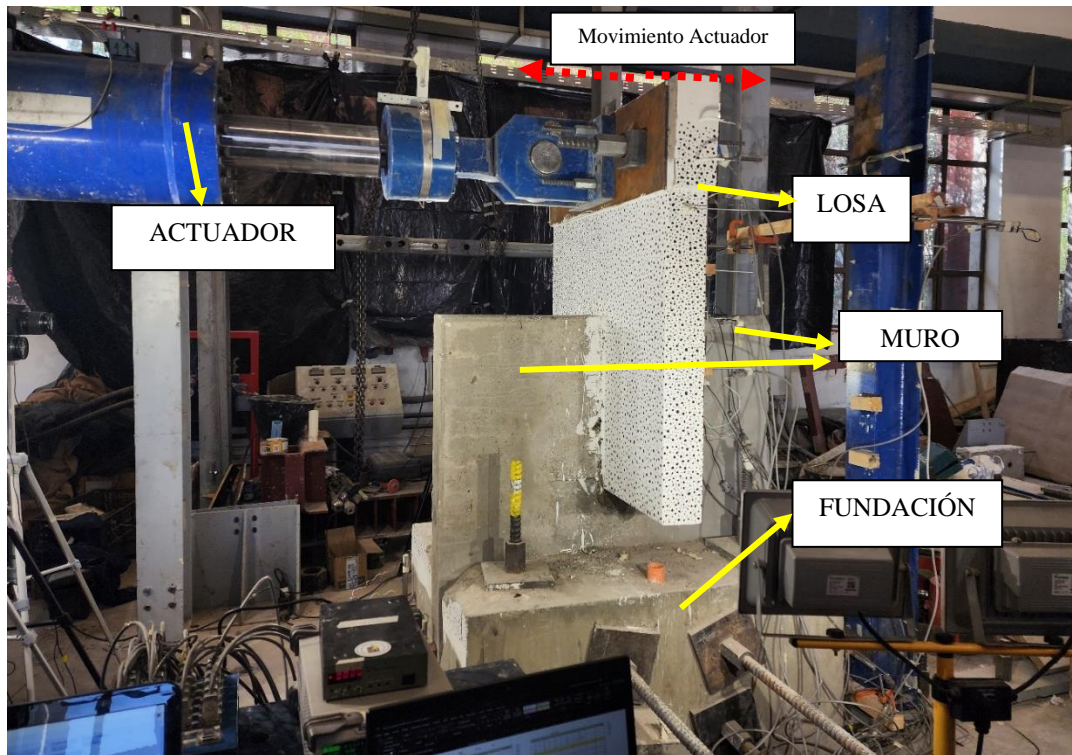


Fig. 14 Vista Lateral – Probeta conectada a la fundación y actuador

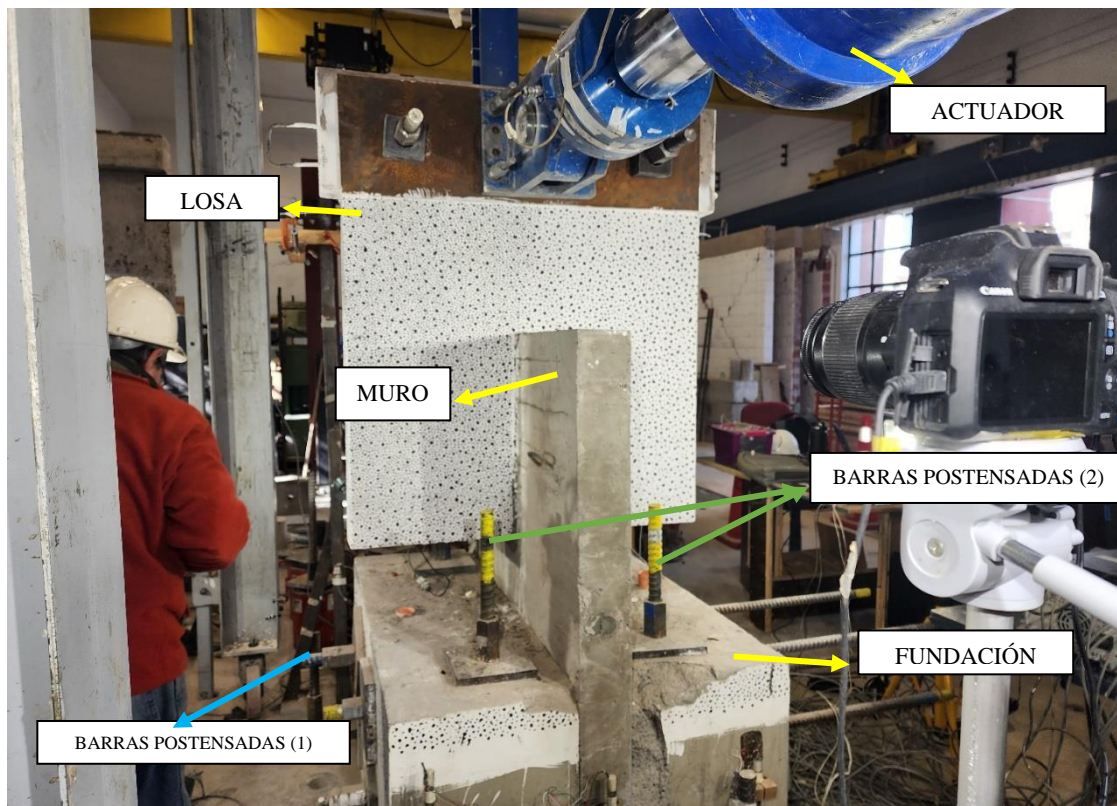


Fig. 15 Vista Frontal – Barras postensadas (1) conecta la fundación a la probeta y (2) conectan la fundación al piso.

3.3. Instrumentación

La probeta es instrumentada con cámaras para fotogrametría y sensores LVDT. El alcance de la memoria se enfoca en la medición de deformación con sensores LVDT, que son un dispositivo que transforma una señal de desplazamiento a una eléctrica que es almacenada. Luego, para manejar dichos datos se convierte la señal eléctrica nuevamente a desplazamiento con constantes que son únicas de cada aparato.

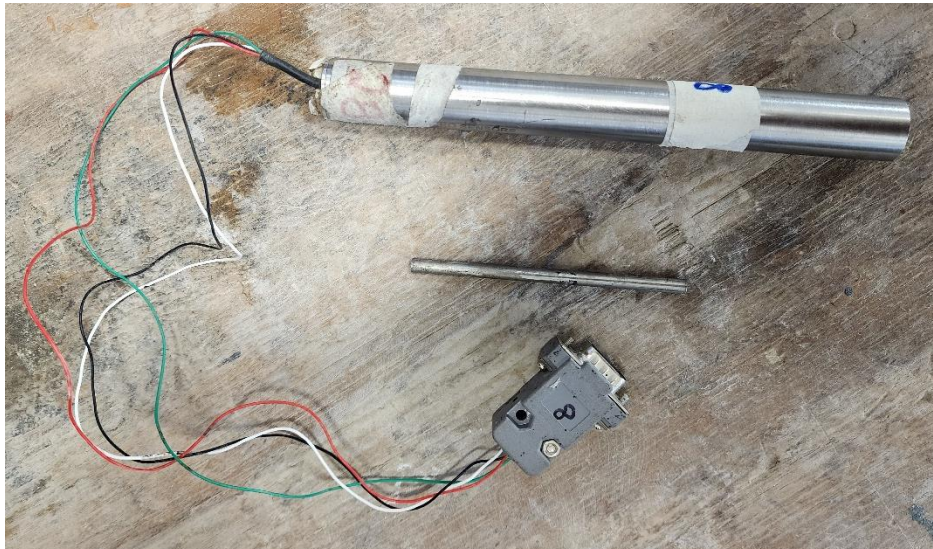


Fig. 16 Sensor LDVT

En total se disponen de 25 sensores de distintos tamaños dependiendo de su recorrido, es decir, el desplazamiento esperado que deben medir. La ubicación de cada uno se detalla en las siguientes figuras.

- *Sensores 0 a 2*: Desplazamiento horizontal de la zona superior de la losa
- *Sensores 3 a 16*: Desplazamiento vertical de la losa, permiten conocer cuánto se comprime y tracciona en cada ciclo a distintos niveles.
- *Sensores 18-19, 21-22, 23-24*: Deformación vertical de la fundación, cada par ubicado a un lado de la fundación con el objetivo de medir la rotación de esta.
- *Sensores 17 y 20*: Desplazamiento horizontal de la fundación, ubicado en cada una para saber si estas se trasladan debido a la aplicación de la carga.

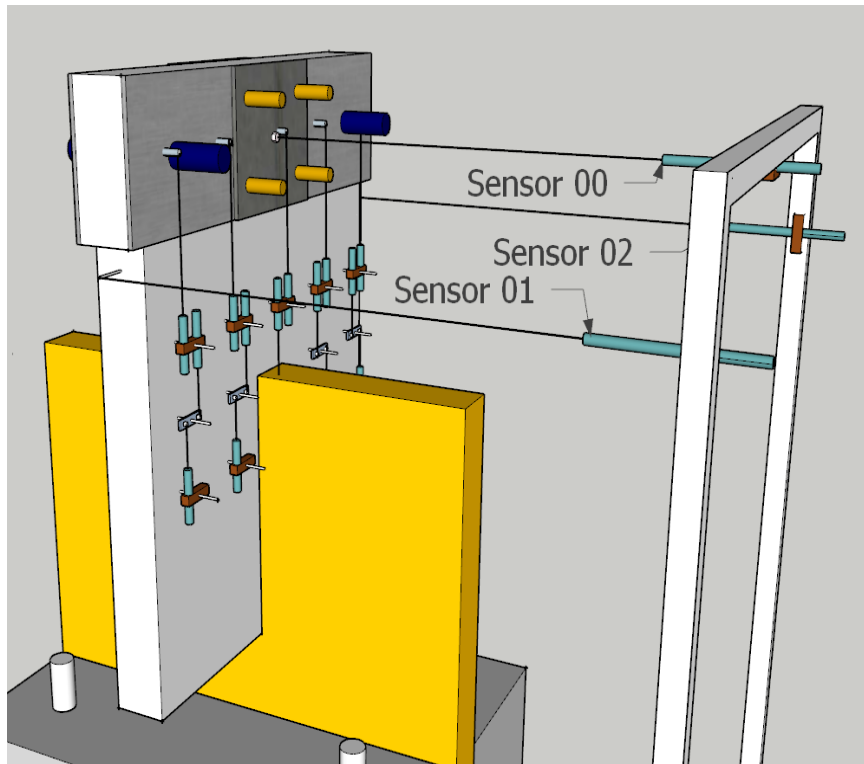


Fig. 17 Sensores horizontales superiores de la losa

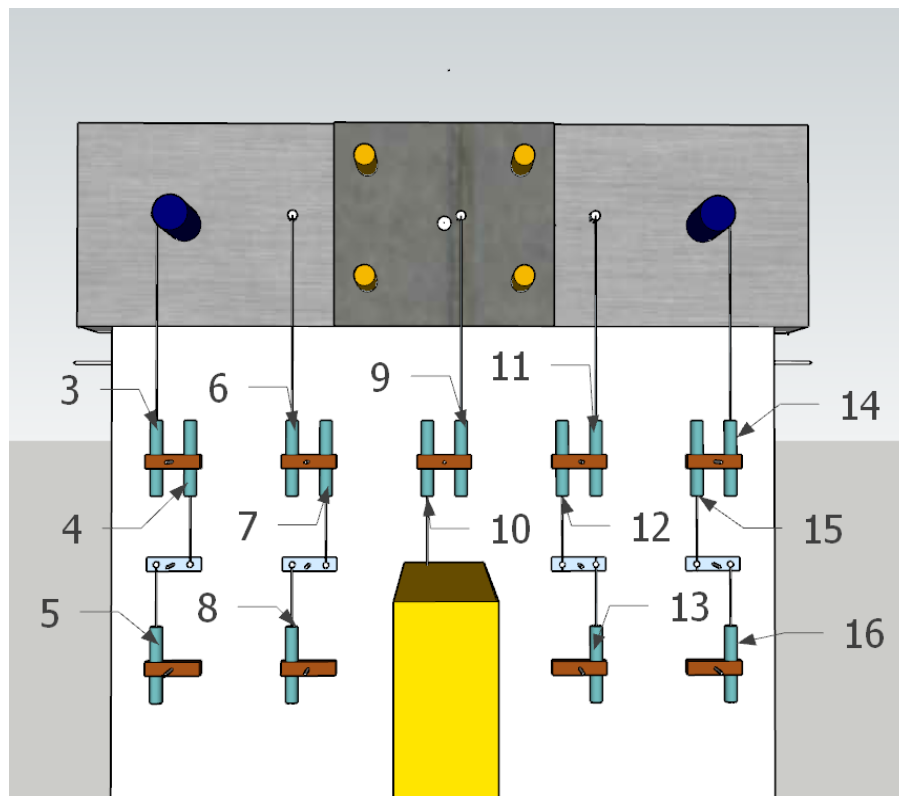


Fig. 18 Sensores verticales de la losa

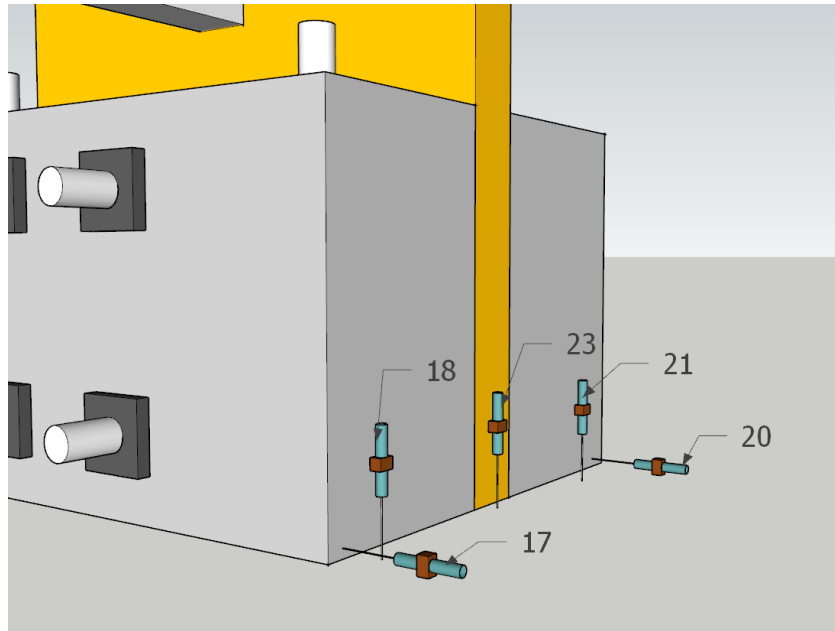


Fig. 19 Sensores de la fundación lado este

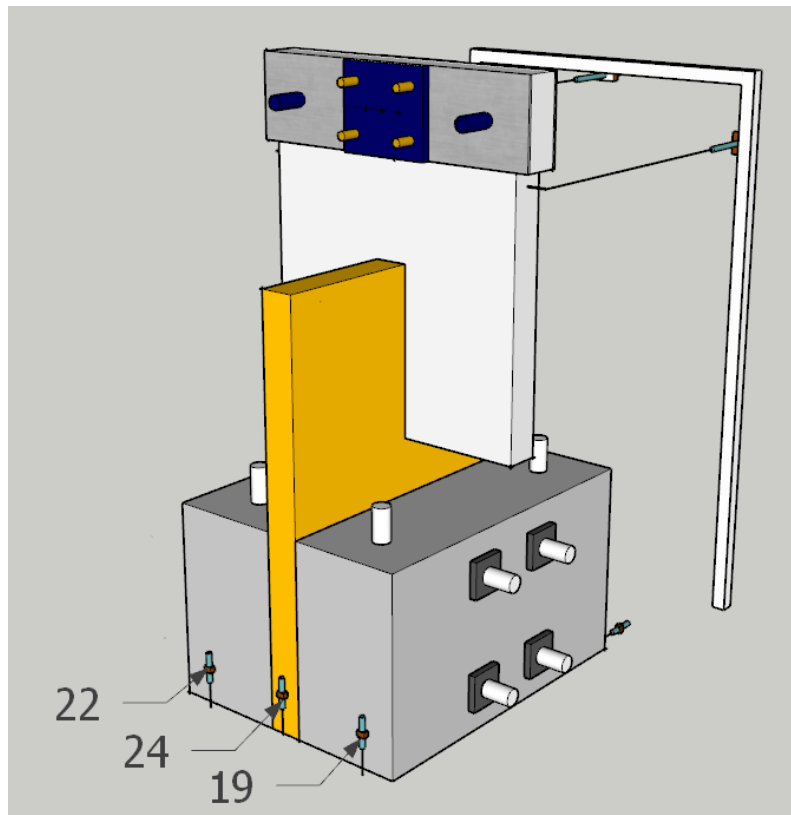


Fig. 20 Sensores de la fundación lado oeste

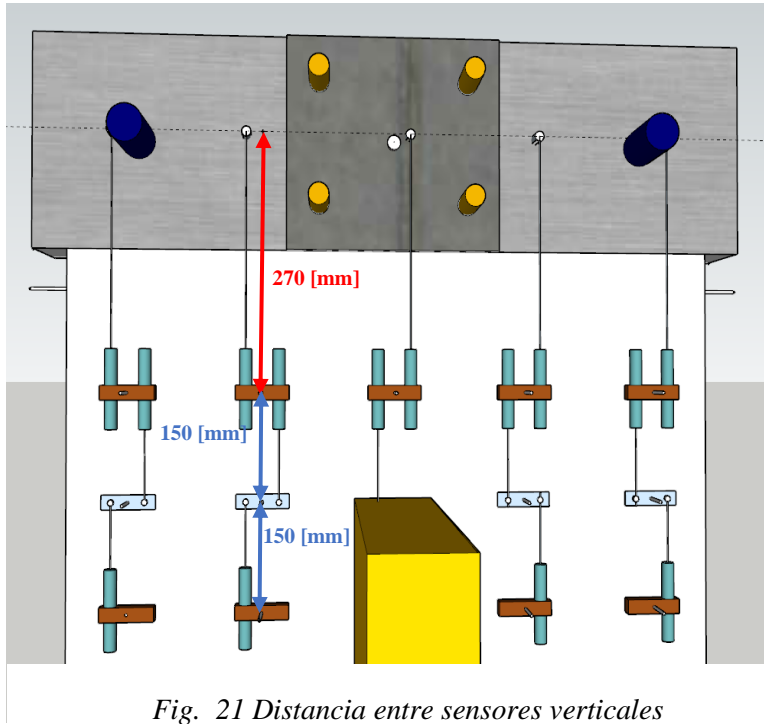


Fig. 21 Distancia entre sensores verticales

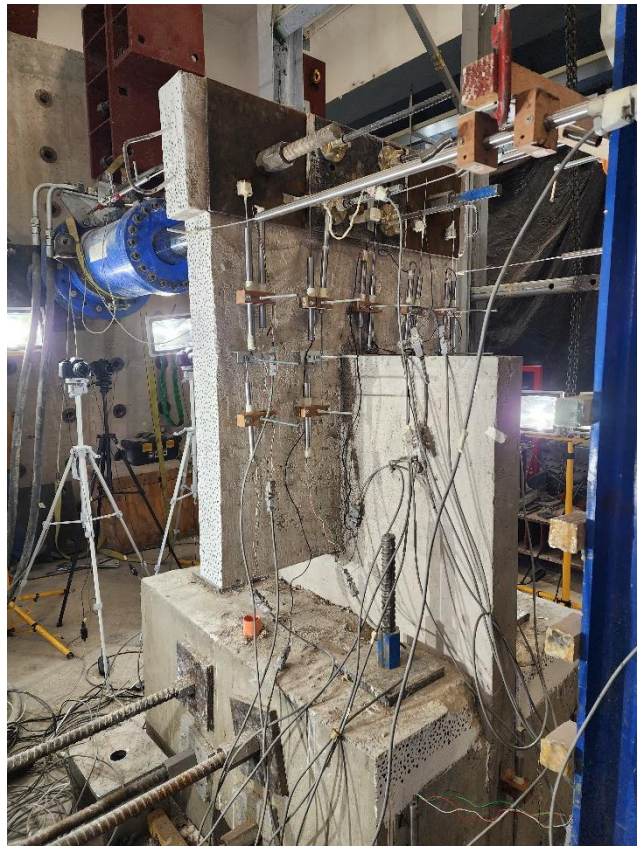


Fig. 22 Fotografía de los sensores verticales instalados

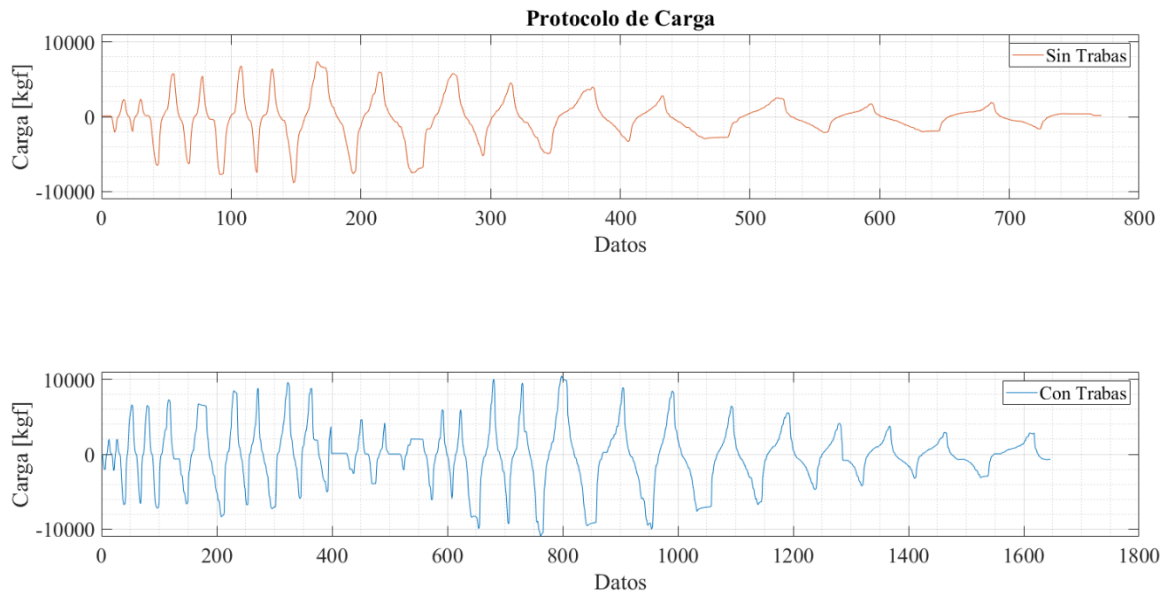
3.4. Ejecución del ensayo

Con la probeta posicionada se inicia el ensayo siguiendo el procedimiento de la guía de la ACI (ACI Committee 374, 2013). En ella se establece que el ensayo comienza con dos ciclos controlados a dos niveles de carga distintos. Luego, se controla el ensayo por desplazamiento a niveles específicos, como se detalla en la Tabla 6. Se realizan dos ciclos para cada nivel de deformación.

El Graf. 3 representa el protocolo de carga realizado en cada ensayo, siendo importante comentar que para el caso *Con Trabas* existen dos sets de datos debido a complicaciones durante la ejecución, el detalle del problema se encuentra en el Anexo 0.

Tabla 6 Control de carga y desplazamiento (Deriva) de cada ensayo.

<i>Sin Trabas</i>	<i>Con Trabas (1)</i>	<i>Con Trabas (2)</i>
2000 [kgf]	2000 [kfg]	2000 [kgf]
8000 [kgf]	8000 [kfg]	4000 [kgf]
10 [mm] (2.22 %)	20 [mm] (4.44 %)	25 [mm] (5.56 %)
15 [mm] (3.33 %)	30 [mm] (6.66 %)	35 [mm] (7.78%)
25 [mm] (5.56 %)	40 [mm] (8.89 %)	45 [mm] (10 %)
35 [mm] (7.78 %)	50 [mm] (11.11%)	55[mm] (12.22 %)
45 [mm] (10 %)		65 [mm] (14.44%)
55[mm] (12.22 %)		75 [mm] (16.67%)



Graf. 3 Protocolo de carga de cada ensayo

Capítulo 4: Resultados

4.1. Procesamiento de datos

En el marco de este estudio, el procesamiento de datos se lleva a cabo con Matlab, donde se implementan los siguientes procedimientos.

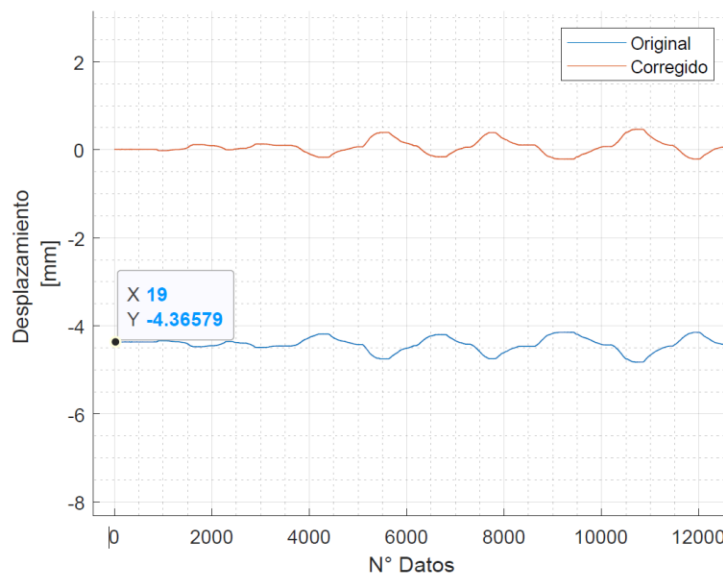
4.1.1. Conversión de Voltímetro a Milímetro

Los datos capturados por los sensores LDVT se almacenan en unidades de voltaje, Para realizar la conversión a milímetros, se emplea la Ec. (2), donde las constantes M y N son determinadas durante la calibración de cada dispositivo, ya que estas son únicas para cada sensor. En el anexo 0 se encuentra los valores de las constantes de cada sensor.

$$Datos [mm] = Datos [Volt] \cdot M [mm/Volt] + N [mm] \quad (2)$$

4.1.2. Centrado de los sensores

Después de la transformación de los datos a milímetros, se observa que los sensores no están inicialmente centrados en cero durante el muestreo. Para corregir esta desviación, se aplica un offset a cada señal. Un ejemplo de esto se ilustra en el Graf. 4, al cual se aplica un offset específico de +4.3658.



Graf. 4 Ejemplo de centrado de la señal de los sensores

4.1.3. Corrección por rotación y desplazamiento horizontal

Durante el ensayo, la fundación experimenta desplazamientos laterales y rotaciones, lo que impacta a la medición de los sensores horizontales superiores (sensores 00, 01 y 02²). En respuesta a este fenómeno, se procede a corregir dichos sensores, considerando tanto el desplazamiento horizontal de la fundación (sensores 17 y 20), como su rotación, medida con los pares de sensores 18-19 (fundación), 21-22 (fundación), 23-24 (muro). La corrección se realiza con la expresión (3), cuya aplicación se ilustra en el Graf. 5.

$$\Delta_{Corr} = \Delta_H - \Delta_{Fundación} - (\Delta_{V_der} - \Delta_{V_izq})/L \cdot H \quad (3)$$

Donde:

- Δ_H corresponde a lo medido por los sensores 00, 01 y 02 según corresponda.
- $\Delta_{Fundación}$ representa el desplazamiento horizontal de la fundación.
- $(\Delta_{V_der} - \Delta_{V_izq})/L = \theta_f$ rotación de la fundación, con L la distancia entre el par de sensores verticales, siendo $L=1275[\text{mm}]$.
- H es la distancia entre los sensores horizontales superiores e inferiores. Siendo $1885[\text{mm}]$ para el sensor 00 y $1750[\text{mm}]$ para los sensores 01 y 02.

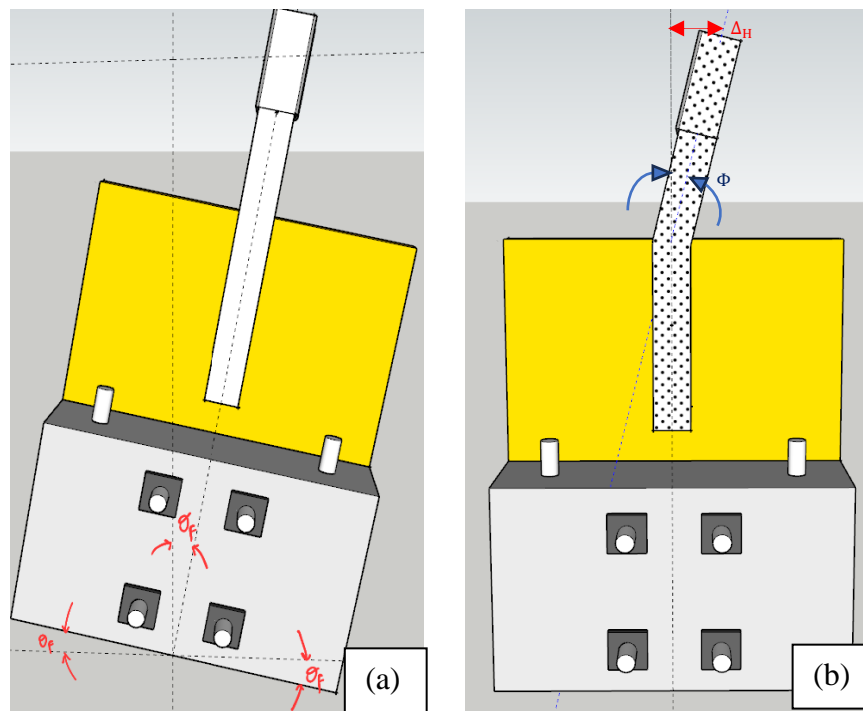
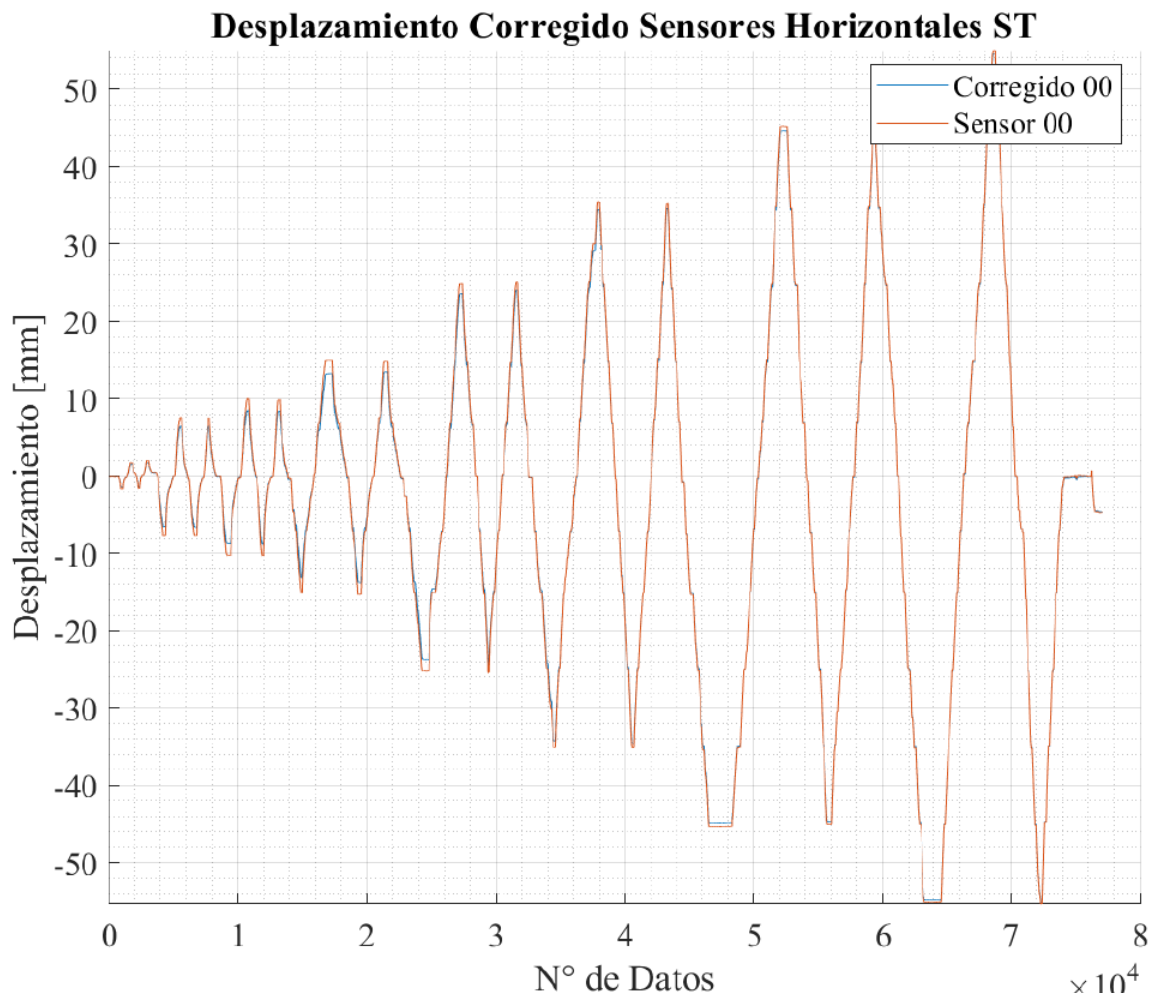


Fig. 23 (a) Rotación de la fundación,
(b) Rotación de la losa

² Ver las Fig. 17, Fig. 19 y Fig. 20 para conocer la ubicación de los sensores en la losa.



Graf. 5 Corrección del desplazamiento horizontal

4.2. Ensayo Cíclico

A continuación, se presentan las curvas de carga versus desplazamiento de cada ensayo, de las cuales se desprende información sobre el cambio de rigidez, envolvente y energía.

La elaboración de estos gráficos considera el sistema de referencia específico. Durante la ejecución del ensayo, cuando el actuador hidráulico se extiende (movimiento hacia el Este del laboratorio) los valores se consideran negativos. Por otro lado, los valores son positivos cuando el actuador se contrae (movimiento hacia el Oeste).

Es importante destacar que la altura utilizada para calcular la rotación se mide desde el sensor 0 hasta el muro, siendo constante en ambos ensayos con un valor de 445 [mm].

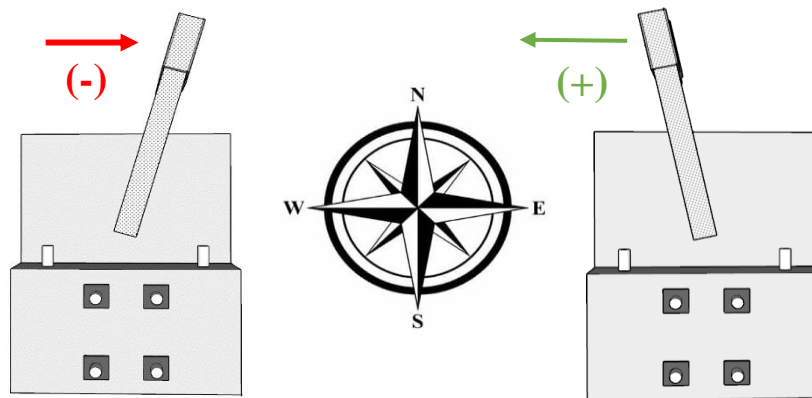


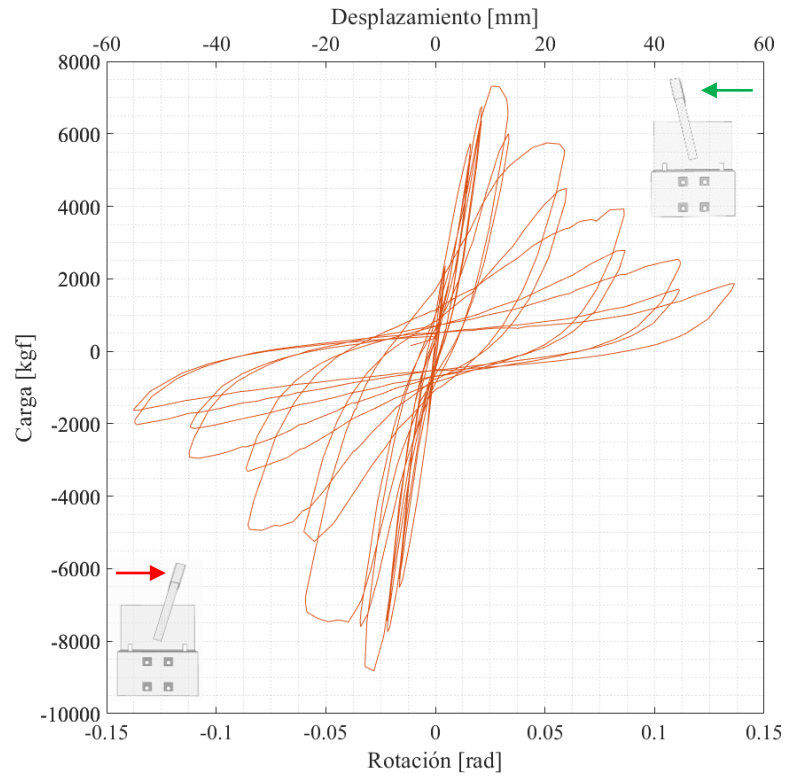
Fig. 24 Sistema de referencia considerado

4.2.1. Carga versus desplazamiento

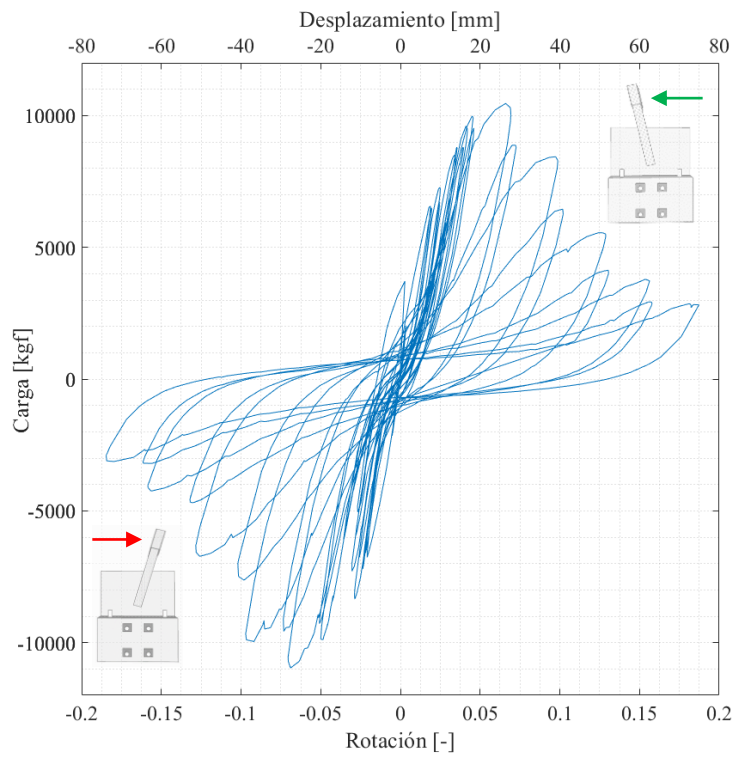
Tras realizar las correcciones mencionadas, se generan las curvas de carga versus desplazamiento presentadas en los Graf. 6 y Graf. 7. Notando que para el ensayo *Sin Trabas* se tiene simetría en el desplazamiento, pero asimetría en la carga. Mientras que el ensayo *Con Trabas* presenta simetría en ambos ejes.

En relación con el ensayo *Sin Trabas* (Graf. 6), en el sentido Oeste se alcanza una carga máxima de 7317[kgf] a una rotación de 0.02[rad] y en el sentido Este se llega a una carga máxima de (-) 8821[kgf] al mismo nivel de rotación. Posterior a este punto máximo, se observa una disminución en la capacidad de carga a medida que aumenta la deformación. Destacando que para dos ciclos del mismo nivel de desplazamiento se tiene una reducción de la resistencia entre el 14% y 33%.

De la misma manera, el ensayo *Con Trabas* (Graf. 7) presenta un comportamiento similar. Se alcanza un valor máximo de 10462[kgf] a una rotación de 0.06[rad] en el sentido de carga positivo y valor de carga máxima de (-)10963[kgf] al mismo nivel de deformación, pero en el sentido contrario. Al igual que el ensayo anterior, se presenta una degradación de la resistencia en cada par de ciclo, disminuyendo entre un 13% y 31% para un mismo nivel de desplazamiento.

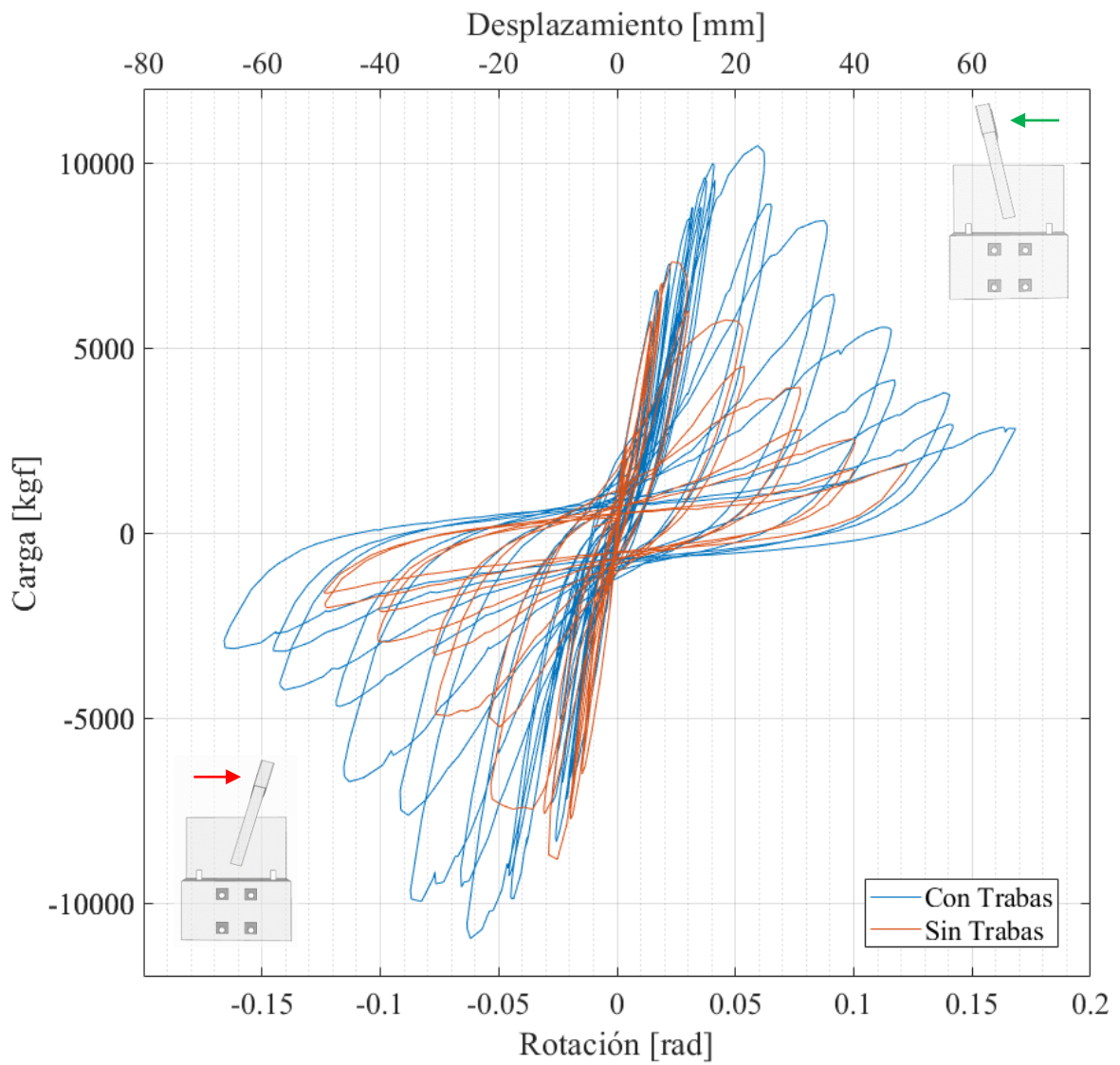


Graf. 6 Histéresis probeta Sin Trabas



Graf. 7 Histéresis probeta Con Trabas

Al comparar ambos ensayos en la Graf. 8 se evidencia el aumento de resistencia de la probeta *Con Trabas* para una misma deformación, pasando de una carga máxima de 8821[kgf] a 10963[kgf], lo que se traduce en un 24% más de resistencia.

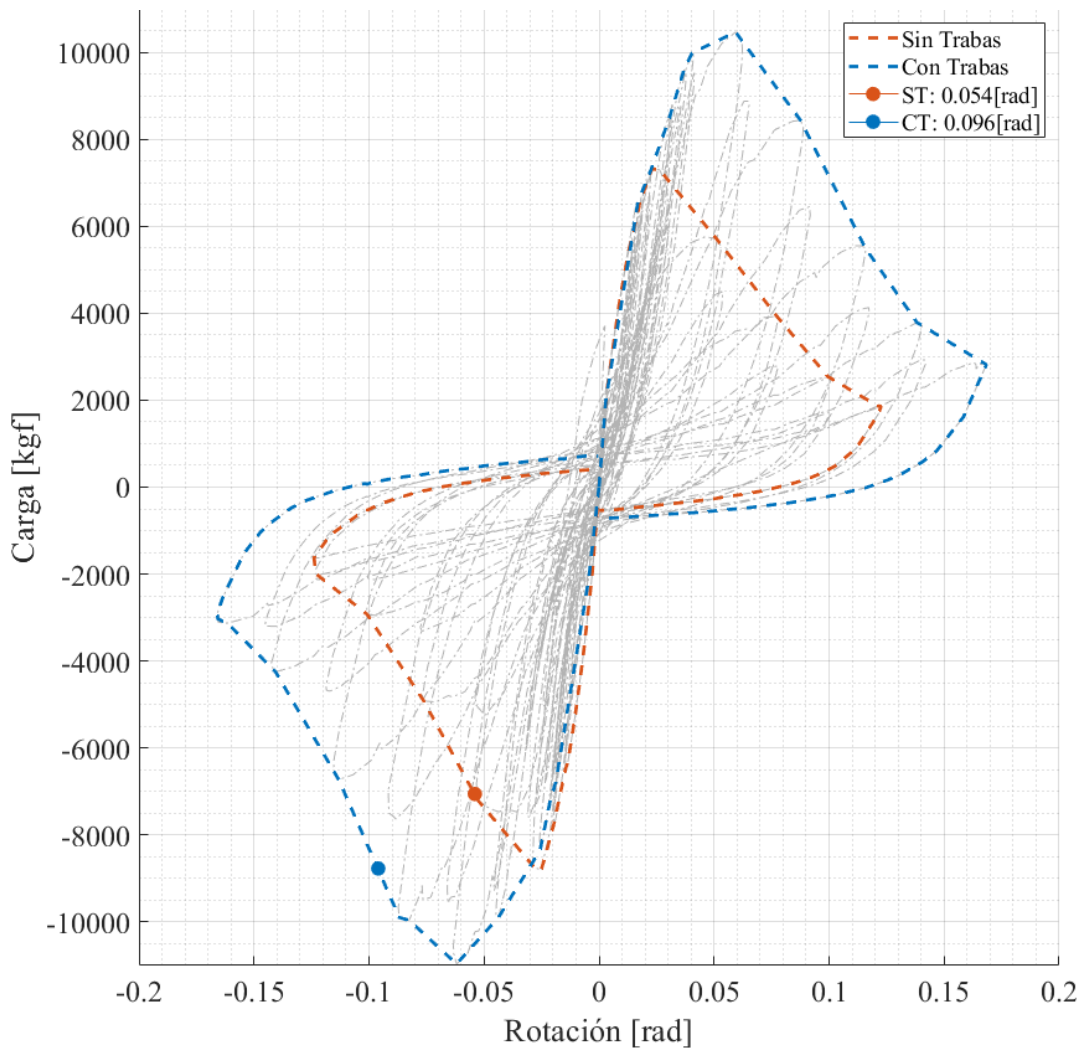


Graf. 8 Carga versus desplazamiento comparativa de ambos ensayos

4.2.2. Envoltente

El Graf. 9 representa la envoltente de ambos ensayos que es obtenida al conectar los picos de carga de cada ciclo histérico. En ella se observa una pendiente inicial similar en ambos ensayos para los ciclos positivos y negativo. Luego, una vez alcanzado la carga máxima, esta decae a una tasa similar en cada ensayo.

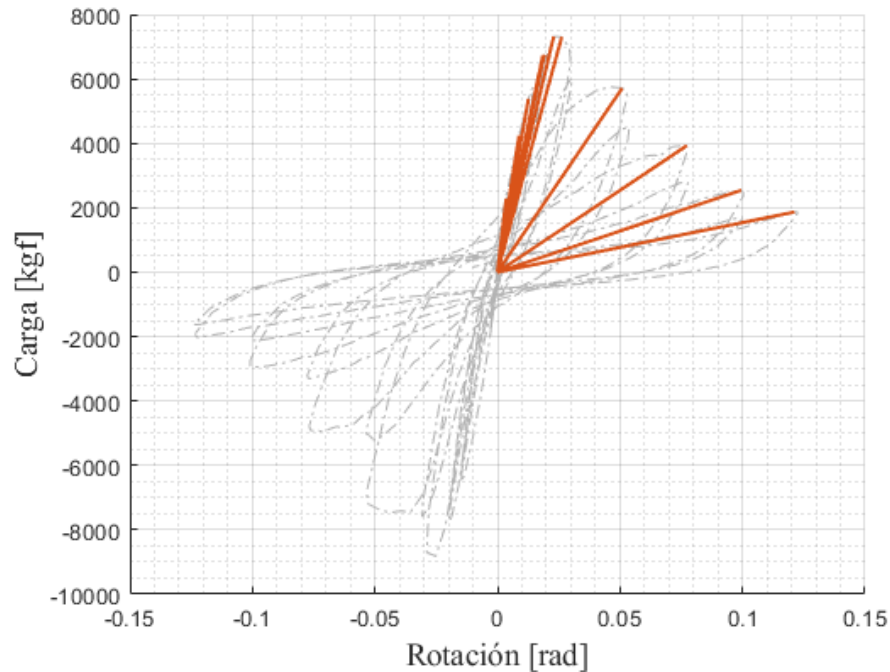
Para el estudio, se define la rotación máxima de la losa como la deformación asociada a la reducción del 20% de la carga máxima debido a la degradación. Entonces, utilizando la envoltente, en el caso de la probeta *Sin Trabas* la carga reducida corresponde a 7056[kgf] a una deformación de 0.054[rad], mientras que el caso *Con Trabas* la carga es igual a 8770[kgf] con una rotación de 0.096[rad]. Este cambio corresponde a un aumento de 78% de capacidad de deformación por el uso de trabas una vez alcanzado el 20% de degradación de resistencia de la losa.



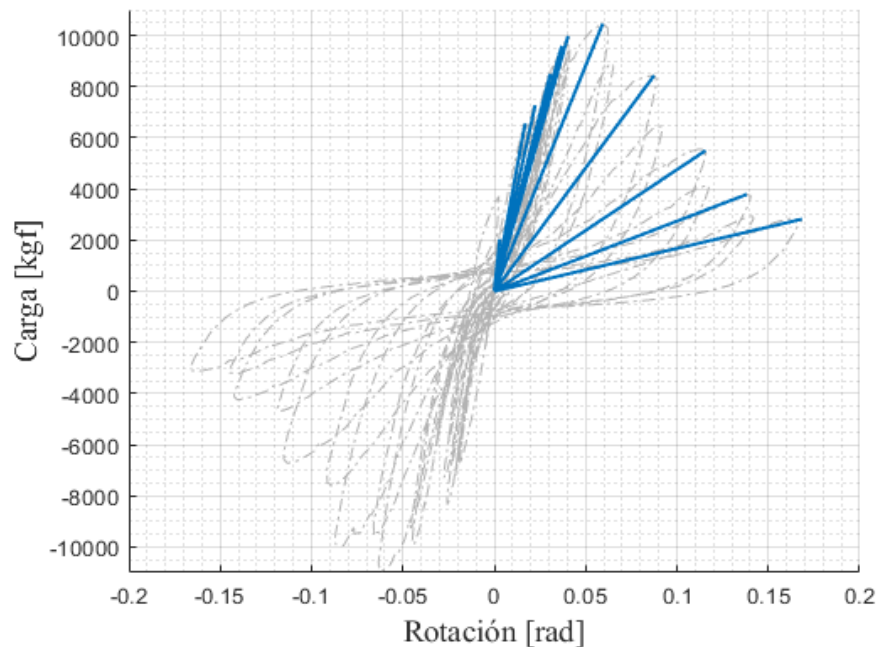
Graf. 9 Envoltente del grafico de carga versus deformación

4.2.3. Rigidez

Luego, en los Graf. 10 y Graf. 11 se presenta la rigidez secante de la losa para los distintos ciclos del ensayo. Para comparar se genera el Graf. 12 y la Tabla 7 que presenta el cambio de rigidez de cada probeta durante el ensayo, de los cuales se pueden concluir que ambas losas poseen una rigidez inicial similar, pero pasado el pico de carga del caso *ST* a una deformación de 10[mm] se observa una diferencia de la rigidez del elemento, siendo mayor para el caso *Con Trabas*.



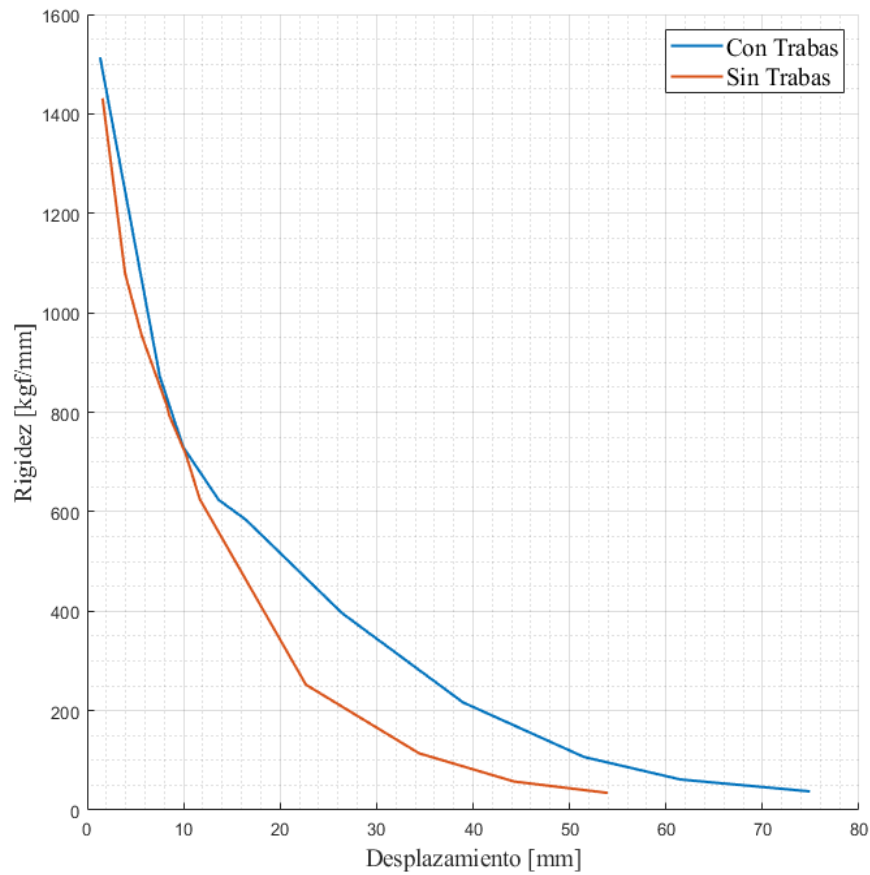
Graf. 10 Rigidez secante – Sin Trabas



Graf. 11 Rigidez secante – Con Trabas

Tabla 7 Rigidez Secante de cada ciclo

Con Trabas		Sin Trabas	
Giro [%]	Rigidez [kgf/mm]	Giro [%]	Rigidez [kgf/mm]
0.3	1513.5	0.4	1431.3
1.7	872.1	0.9	1079.2
2.2	729.6	1.3	955.3
3.1	623.8	1.8	815.9
3.7	584.2	1.9	793.6
4.0	554.9	2.3	715.6
5.9	396.0	2.6	625.1
8.8	216.6	5.1	252.1
11.6	106.8	7.7	114.2
13.8	61.6	9.9	57.4
16.8	37.6	12.1	34.6



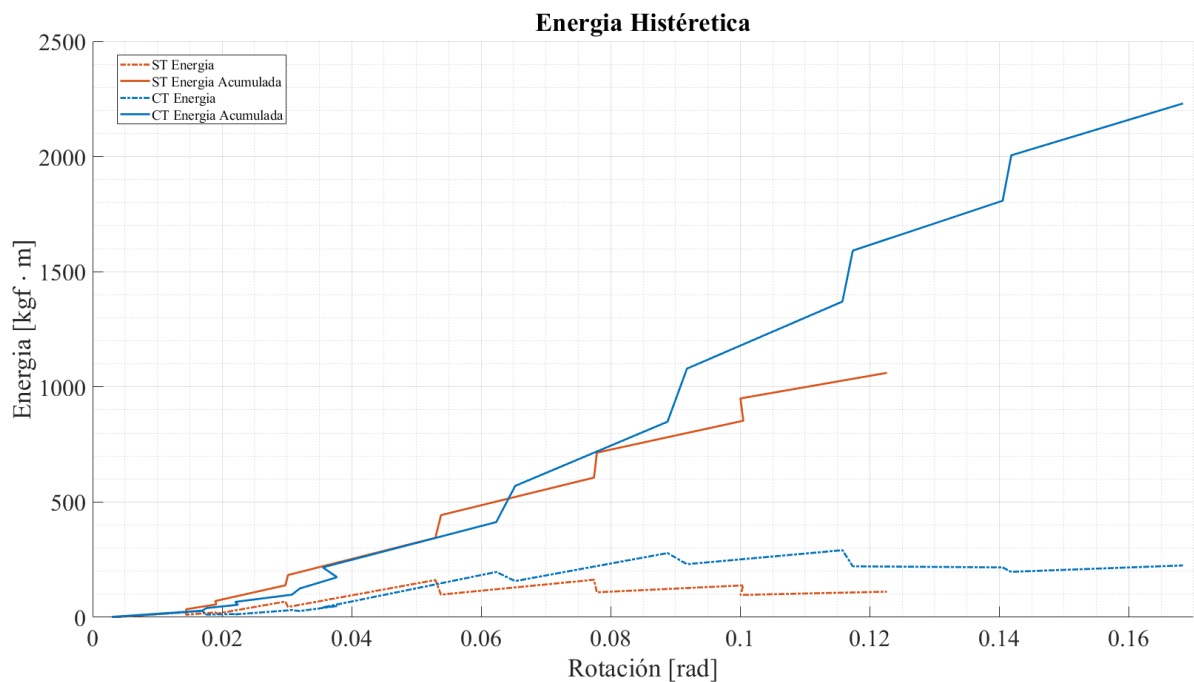
Graf. 12 Cambio de rigidez

4.2.4. Energía

La energía disipada por el sistema se muestra en el Graf. 13 y Tabla 8, el primero presenta la energía de cada ciclo con línea punteada y la energía acumulada durante el transcurso del ensayo con línea continua. Se observa que, a niveles bajos de rotación, la probeta *Con Trabas* posee menor energía, pero esto se debe a que el inicio del ensayo hubo complicaciones con el post tensado de la fundación, rotando y deslizándose más de lo esperado, siendo necesario reiniciar el ensayo, lo que significó en pérdida energía.

Posteriormente a una mayor deformación, se observa que la energía disipada por la probeta *Con Trabas* supera a la del ensayo *Sin Trabas*. Esto se relaciona directamente con la comparación de la histéresis, ya que la probeta con trabas logra alcanzar niveles de carga y deformaciones mayores, pasando de una energía acumulada de 1060[kgf m] a 2230 [kgf m], lo que significa un aumento de 110%.

Observando la energía de cada ciclo, ambos ensayos poseen el mismo comportamiento. Para los últimos ciclos, la capacidad de disipar energía se ve disminuida debido a que se ha perdido rigidez en el elemento por lo que no permite resistir más carga. Comparando el pico de energía contra la del último ciclo se tiene, en el ensayo *Sin Trabas* una disminución del 40% y para el caso *Con Trabas* una reducción de la energía del 32%.



Graf. 13 Energía disipada del sistema

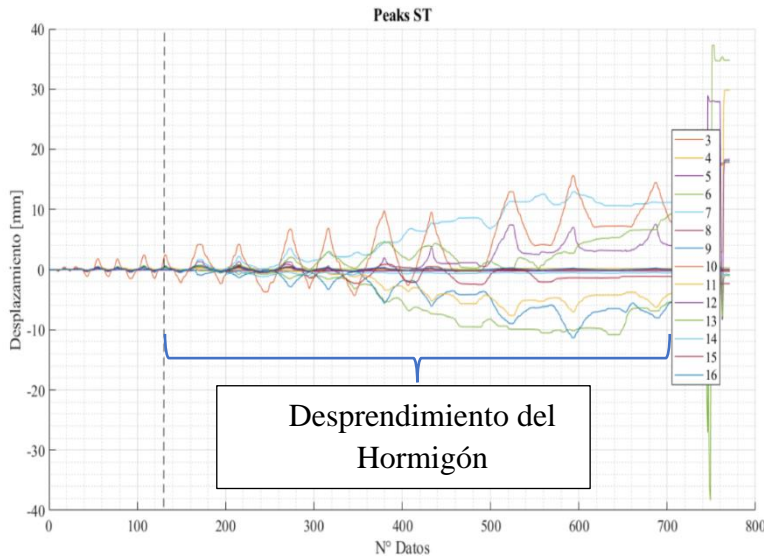
Tabla 8 Energía disipada del sistema por ciclo

<i>Con Trabas</i>		
Giro [%]	Energía [kgf m]	Acumulada [kgf m]
0.3	1.0	1.0
0.3	0.9	1.9
1.7	26.7	28.6
1.8	11.4	40.1
2.2	14.2	54.3
2.2	12.5	66.8
3.1	31.2	98.0
3.2	27.0	125.0
3.8	48.7	173.7
3.6	42.9	216.6
6.2	196.5	413.1
6.5	157.1	570.2
8.9	278.6	848.8
9.2	230.3	1079.1
11.6	291.1	1370.3
11.7	221.2	1591.5
14.1	216.4	1807.9
14.2	197.3	2005.2
16.8	225.0	2230.2

<i>Sin Trabas</i>		
Giro [%]	Energía [kgf m]	Acumulada [kgf m]
0.4	1.2	1.2
0.4	0.9	2.0
1.5	21.9	24.0
1.4	10.7	34.7
1.9	21.3	56.0
1.9	14.4	70.5
3.0	68.2	138.7
3.0	44.6	183.3
5.3	161.7	345.0
5.4	98.4	443.4
7.7	162.8	606.2
7.8	108.4	714.6
10.0	138.5	853.1
10.0	96.8	949.9
12.3	111.1	1061.0

4.3. Perfil de deformación vertical

Se mide el desplazamiento longitudinal en la losa para determinar un perfil de deformación. Se utilizan los datos provenientes de sensores de la losa ubicados a una misma cota, es decir, los sensores 3-6-9-11-14, 4-7-10-12-15 y 5-8-13-16 (ver Fig. 27) se relacionan entre sí. Luego, los datos consideran un periodo previo al desprendimiento del hormigón, que provocó que se movieran la fijación de estos sensores, ejemplificado en el Graf. 14, donde se consideran los datos hasta la línea punteada.



Graf. 14 Ejemplo de datos considerados



Fig. 25 Desprendimiento del hormigón

Para calcular la deformación en el borde del muro, se implementa una corrección por geometría de la siguiente manera. La deformación de un sensor vertical Δ_s mide el desplazamiento a 3[cm] del muro, por lo que para determinar la deformación real Δ_r se utiliza la semejanza de triángulos, asumiendo que el peak del ciclo anterior corresponde a la deformación en el otro sentido Δ_{s-1} .

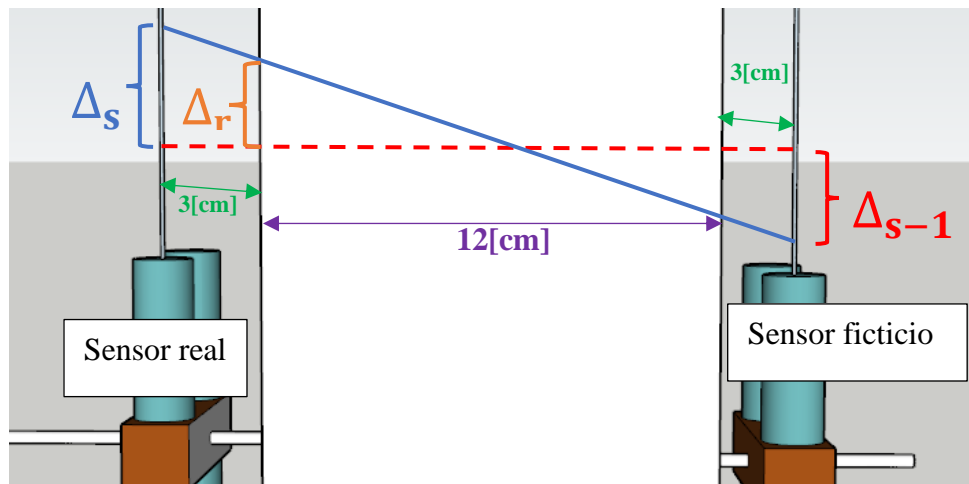


Fig. 26 Relación geométrica para determinar el desplazamiento real del muro

Con el procedimiento anterior, se obtienen el perfil de deformación vertical para ambos ensayos en la Graf. 15 y Graf. 16, identificando el nivel de deriva alcanzado por cada deformación presentada. De estos se observa que los picos de deformaciones de mayor magnitud se ubican en la franja central, en particular en el Sensor 10, relacionado a que posee menor distancia para distribuir las deformaciones en comparación a los sensores de los laterales.

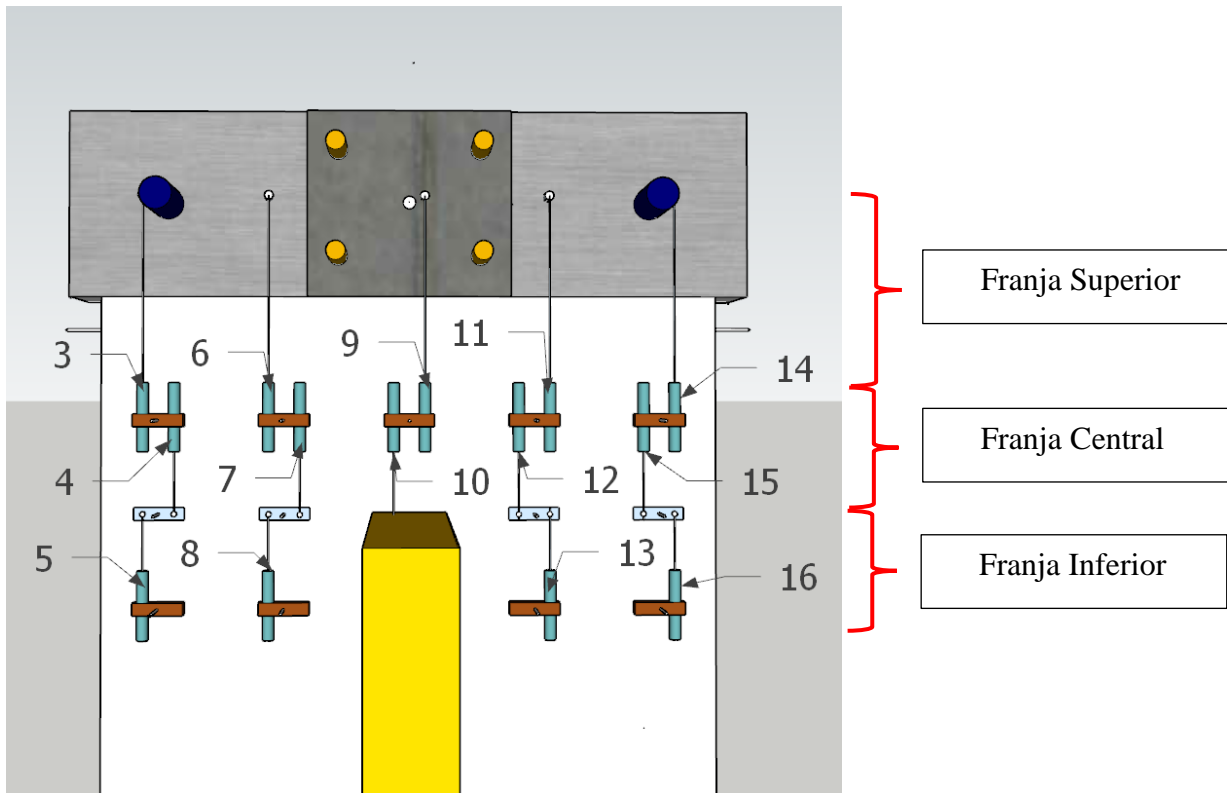
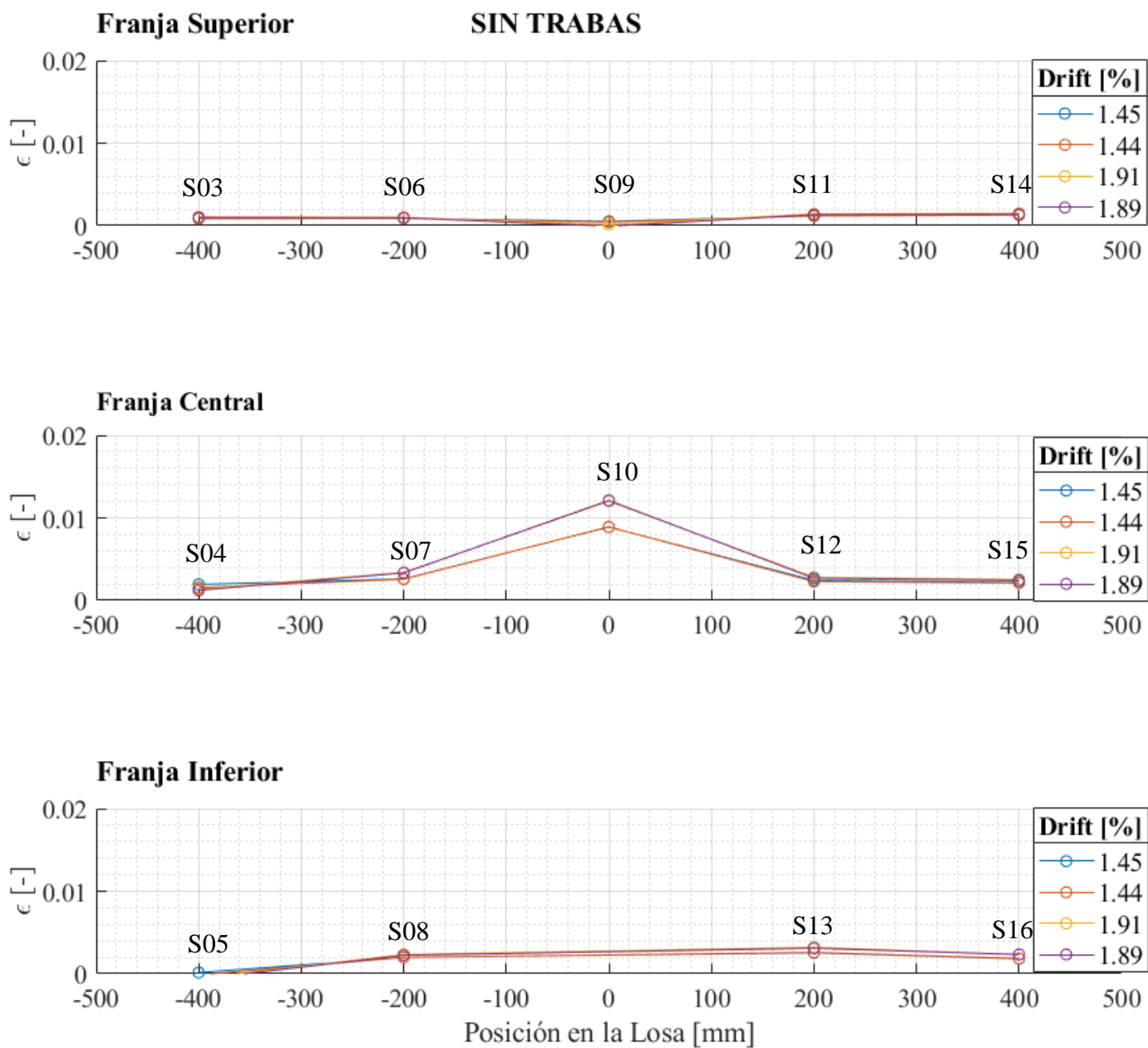
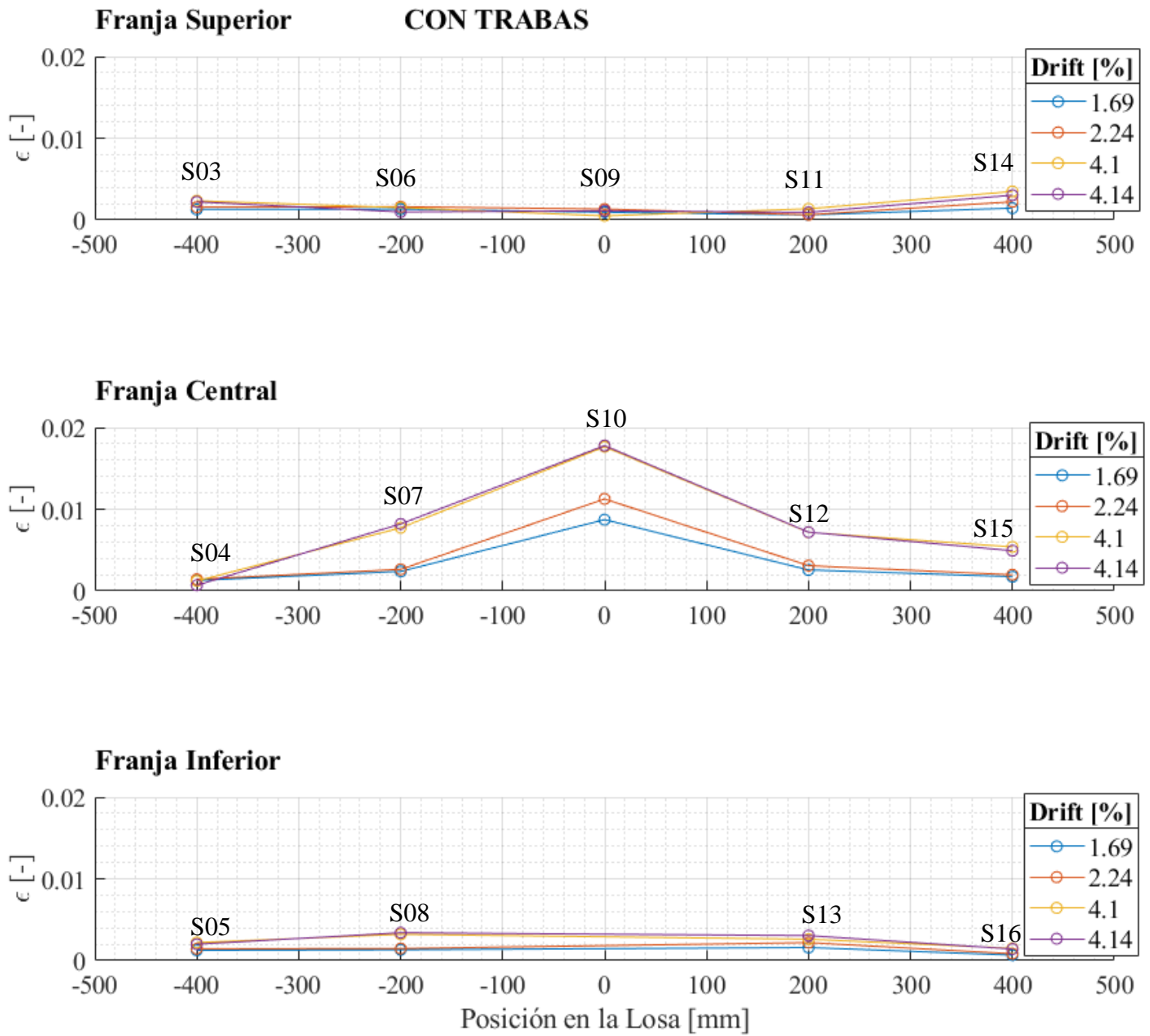


Fig. 27 Franjas de grupos de sensores de una misma cota.



Graf. 15 Perfil de deformación vertical de la losa – Sin Trabas



Graf. 16 Perfil de deformación vertical de la losa – Con Trabas

4.4. Daños en las probetas

Al finalizar los ensayos queda a la vista los daños producidos por la carga cíclica, notando la falla por punzonamiento en la zona de la losa cercana al muro en los dos casos.



Fig. 29 Daño presentado en la Losa Sin Trabas

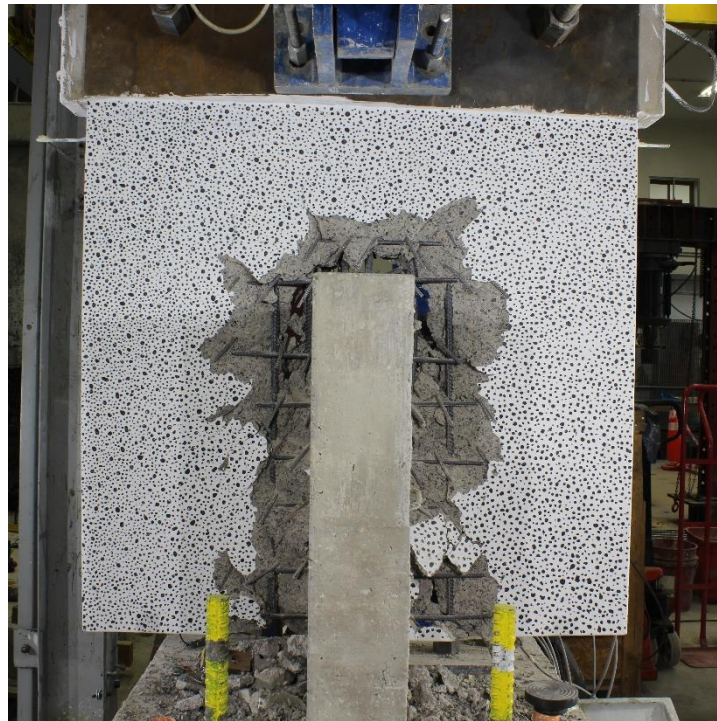


Fig. 28 Daño presentado en la Losa Con Trabas

4.5. Relación entre deriva de techo y rotación de losa

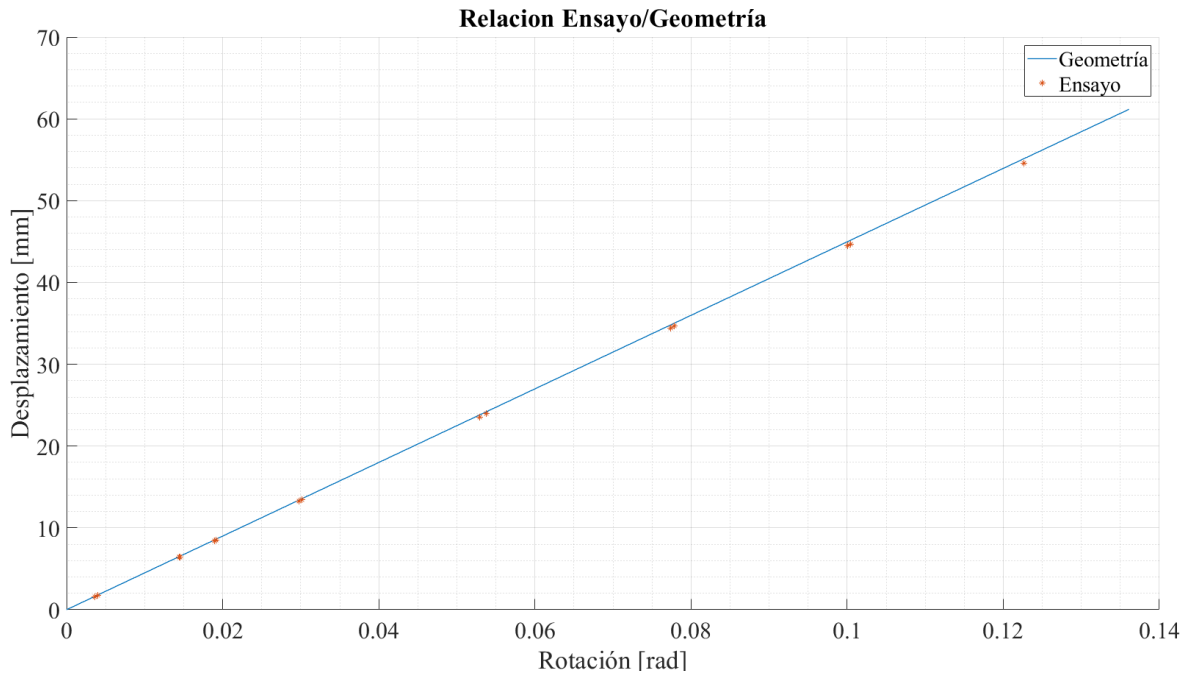
Según lo discutido en la sección 2.3.1, la relación geométrica es comparada con los resultados obtenidos de los ensayos. A partir de distintos niveles de deriva de techo se calcula con la expresión (1) la rotación de la losa, considerando el ancho de puerta $l=900[mm]$ y largo de muro igual a $L=5[m]$. Luego, el desplazamiento (Δ) en el centro de esta (por geometría) es calculado con la Ec. (5), siendo L' el largo de la losa deformada debido a la rotación (ver Fig. 5).

$$L' = \sqrt{\left((l + L - l \cdot \cos(\theta))^2 + (l \cdot \sin(\theta))^2\right)} \quad (4)$$

$$\Delta = \sin(\phi) \cdot L' / 2 \quad (5)$$

Lo anterior se considera para confeccionar el Graf. 17 para comparar la expresión con los datos del ensayo. Se concluye que, para el nivel de rotación de la losa alcanzado durante el ensayo, la relación geométrica es adecuada, siendo importante mencionar que la expresión es válida para derivas de techo hasta 2%.

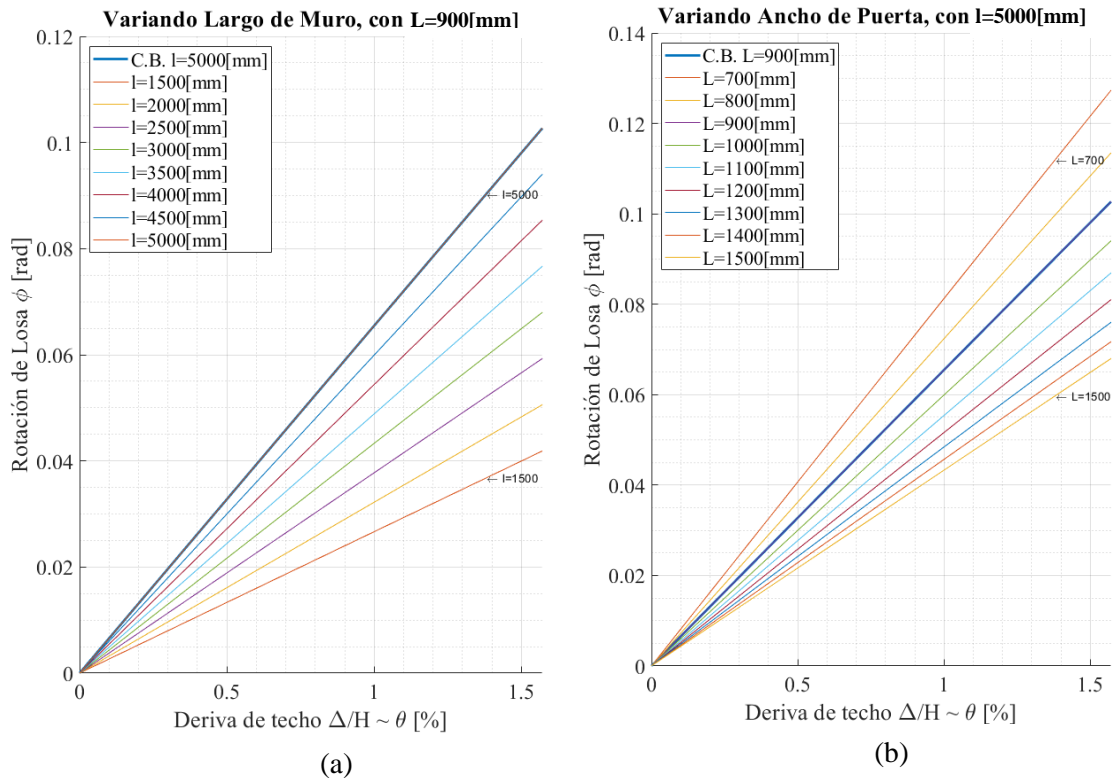
Entonces, se puede estimar la rotación de la losa a partir de la deriva de techo y viceversa. Para la rotación en el pico de carga, en el caso *Sin trabas* (0.025[rad]) se esperaría una deriva de 0.38[%] y para la probeta *Con Trabas* (0.061[rad]) se asocia a una deriva de 0.93%. En la misma línea, en el caso de deformación máxima descrita anteriormente en la sección 4.2.2, una rotación de 0.054[rad] (caso *Sin Trabas*) correspondería a la deriva de techo de 0.8% y una rotación de 0.096[rad] (caso *Con Trabas*) sería producido por un desplazamiento relativo de techo de 1.5%.



Graf. 17 Relación de rotación y deformación de la losa (Geometría / Ensayo)

4.5.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros

Al realizar un estudio de la sensibilidad de los parámetros de largo de muro y losa que influyen en la ecuación (1) se construye los Graf. 18. De este se concluye que considerando constante el largo de losa (L) y aumentando el largo de muro (l) se tiene que para un mismo nivel de deriva de techo se tiene mayor rotación de la losa (Graf. 18a). Caso contrario, al aumentar el ancho de losa manteniendo el largo de muro constante, la rotación de losa disminuye para un mismo nivel de deriva (Graf. 18b).



Graf. 18 Análisis de sensibilidad de la relación geométrica.

Capítulo 5: Conclusiones

En el estudio experimental realizado se analizó el comportamiento de dos probetas representativas a la losa acoplada del marco de puerta, construidas con y sin trabas entre los nodos de la malla superior e inferior. Utilizando sensores LDVT se midió el desplazamiento en el extremo de la losa para calcular su rotación y la deformación longitudinal del cual se construye un perfil de deformación para identificar las zonas de mayor sollicitación.

Del análisis se concluye que la incorporación de trabas en las losas acopladas conlleva una mejora del 24% en la capacidad de carga frente a las sollicitaciones de desplazamiento que los muros inducen y un aumento del 78% de la capacidad de rotación, considerando la deformación máxima una vez alcanzado el 20% de la degradación del pico de carga. Destacando que, en ambos ensayos, después del pico de carga, esta decae en el segundo ciclo de cada par asociado al mismo nivel de deformación.

La presencia de trabas genera un confinamiento del hormigón, logrando mejorar el comportamiento del elemento estructural, permitiendo una mayor contribución del acero en flexión debido al aumento del ancho colaborante. Al calcular el área de enfierradura en flexión ($\phi 12$) en función de la carga máxima alcanzada en cada ensayo (cálculo detallado en el Anexo 0), se observa que en el ensayo *Sin Trabas* trabajaron 8 barras, mientras que al agregar las trabas aumenta a 10, evidenciando el efecto del confinamiento del hormigón al usar trabas en la losa.

El análisis del perfil de deformación vertical revela que la zona donde se concentra mayor deformación es la cercana al muro. Los Graf. 15 y Graf. 16 presentan un triángulo de deformación en la franja central, siendo un indicio de la zona que se debe confinar. En consecuencia, se recomienda instalar trabas entre los nodos de la malla superior e inferior en la zona de la losa de la puerta cercana al muro, a una distancia de al menos 1 vez el espesor de losa.

Con respecto a la relación geométrica de la deriva de techo ($\Delta/H \sim \theta$) y la rotación de la losa (ϕ) se obtuvo la Ec. (1), la cual asume pequeñas deformaciones y la losa rotulada en su conexión. Para la geometría considerada de 2 muros idénticos, con largo $l=5[m]$ y ancho de puerta $L=90[cm]$ la expresión puede ser simplificada a $\theta \approx \phi/6.5$. Destacando que esta razón es precisa en un rango entre 0-2% de deriva, variando el factor para valores mayores de Θ . Al aplicar la relación geométrica al caso en estudio, se concluye que la rotación máxima de la losa de 0.054[rad] del caso *Sin Trabas* se puede esperar para una deriva de 0.81%, por otro lado, en el caso *Con Trabas* la rotación de 0.096[rad] se esperaría para una deriva de techo de 1.45%. La expresión anterior permite cuantificar el giro de la losa para una razón de desplazamiento de techo sobre la altura de piso.

Adicionalmente se hizo un estudio para calcular la resistencia, según la metodología de Schwaighofer y Collins (Schwaighofer & P. Collins, 1977), que considera un área crítica de $3d(d+t)$ y una tensión $v_c = 0.33\sqrt{f'_c}$ (con $f'_c = 23.9[MPa]$) entregando como resultado una resistencia de $V_n = 11413[kgf]$. Al contrastar con la carga máxima de 8821[kgf] en el caso *Sin Trabas*, se concluye que la expresión de los autores determina una sobre resistencia del elemento. En la búsqueda

de información del cálculo de resistencia del punzonamiento, no se encuentra alguna expresión actualizada que considere otra zona crítica, la degradación debido a cargas cíclicas o confinamiento del hormigón, aspectos que se podrían abordar en futuros trabajos.

En la misma línea, para el estudio se debe considerar la tensión de corte $v_c = 0.17\sqrt{f'_c}$ debido al actuar de la losa en flexión. Al proponer un área crítica de $3d(2d + t)$, debido a que los daños observados en las probetas se concentraron a un espesor de losa “d” del borde de muro, se determina que la resistencia al punzonamiento de la losa es igual a $8,623[kgf]$, valor cercano al pico de carga en el caso de la probeta sin trabas.

Para finalizar, en futuras memorias experimentales que requieran trabajo de construcción y ensayo de probetas de elementos estructurales se recomienda la verificación del post tensado del sistema de fundación para evitar problemas de desplazamiento de ella como los que se tuvieron en el ensayo *Con Trabas*. Además, recomendaría realizar una recalibración de los sensores LDVT para corroborar el funcionamiento correcto de estos.

Bibliografía

- ACI Committee 318. (2014). ACI (American Concrete Institute) 318. En *Building Code Requirements or Structural Concrete and Commentary*.
- ACI Committee 374. (2013). *ACI PRC-374.2-13 Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements Under Slowly Applied Simulated Seismic Loads*.
- Calderón Corail, J. A. (2007). ACTUALIZACIÓN DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES USADAS EN. *Memoria Universidad de Chile*.
- Coull, A., ASCE, F., & Yang Chee, W. (1983). Design of floor slabs coupling shear walls. *J. Struct. Eng.*
- Díaz Bustos, C. (2023). Estudio experimental de muros rectangulares con losas acopladas de hormigón armado con distintas cuantías de acero utilizando instrumentación estandar (LDVT). *Memoria Universidad de Chile*.
- Díaz Sanhueza, G. M. (2023). Estudio experimental de muros rectangulares acoplados con losas de hormigón armado sometido a cargas cíclicas, utilizando fotogrametría. *Memoria Universidad de Chile*.
- Henriquez Pizarro, C. F. (2019). Estudio de la respuesta numérica de losas acopladas con muros rectangulares de hormigón armado. *Memoria Universidad de Chile*.
- Institution BS. (2004). Eurocode 2 - Design of concrete Structures: Part 1-1 General Rules and Rules for Building.
- John Wiley & Sons, L. (2010). Performance of Torre Bosquemar and Olas buildings in San Pedro de la Paz and the Pedro de Valdivia building in Concepción during in the 27 February 210 moment magnitude 8.8 offshore Maule, Chile earthquake. *Wiley Online Library*.
- Rojas, F., & Massone, L. (2012). Capitulo 8: Comportamiento de Edificios de Hormigón Armado. En *Sismo del 27 Febrero 2010*.
- Schwaighofer, J., & P. Collins, M. (1977). Experimental Study of the Behavior of Reinforced Concrete Coupling Slabs. *ACI Journal*.

Anexo

Anexo A: Cálculos

A.1 Desarrollo de relación deriva de techo y rotación de losa

La relación entre la deriva del techo y rotación de la losa se establece considerando la geometría de los puntos A y B en la Fig. 30. Este supone que los muros tienen longitudes iguales, rotan en su línea neutra y la losa se encuentra rotulada en la conexión. La línea punteada en la figura representa la posición original del muro, que, al rotar un ángulo θ , provoca la rotación de la losa. Para determinar las coordenadas (x, y) de los puntos A y B en el sistema de referencia presentado y los valores correspondientes de se aplican las siguientes ecuaciones, donde H es la altura de muro, L es el ancho de pasillo y l el largo de muro:

$$\delta_1 = H \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

$$\delta_2 = H \cdot \cos(\theta) \quad (7)$$

$$\delta_3 = \frac{l}{2} \cdot \cos(\theta) \quad (8)$$

$$\delta_4 = \frac{l}{2} \cdot \sin(\theta) \quad (9)$$

El punto A desciende a la posición $\delta_2 - \delta_4$ y se desplaza lateralmente a la ubicación $\delta_1 + \delta_3$, mientras que el punto B asciende a la posición $\delta_2 + \delta_4$ y se desplaza a la ubicación $l + L + \delta_1 - \delta_3$. Luego, se emplea la relación del triángulo conformado por AB y la perpendicular a cada punto, obteniendo la siguiente relación:

$$\tan(\phi - \theta) = \frac{l \cdot \sin(\theta)}{L + l - l \cdot \cos(\theta)}$$

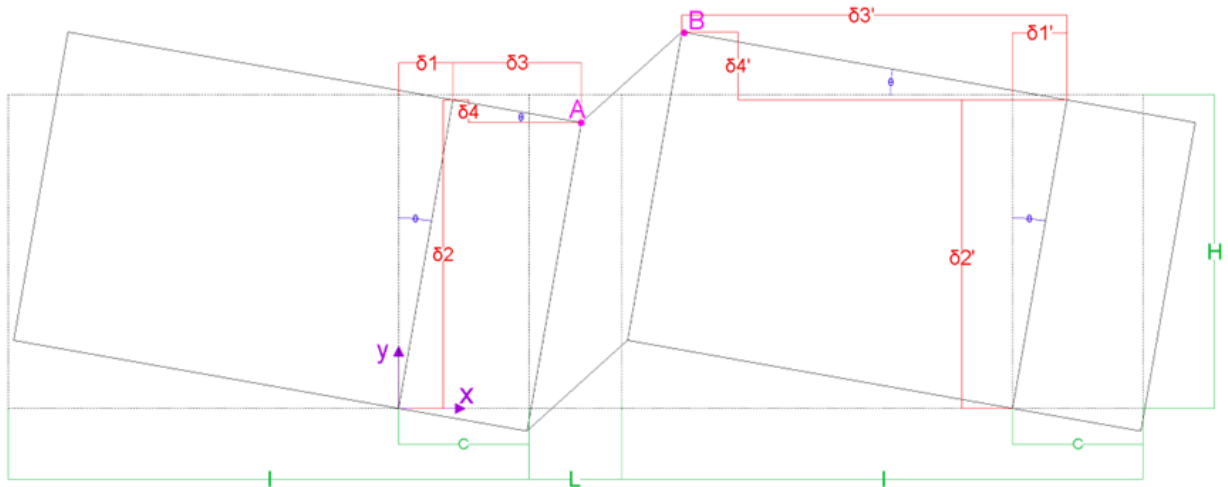


Fig. 30 Representación geométrica de la rotación de los muros.

A.2 Estimación de área de enfierradura en flexión

En cada ensayo se estima la cantidad de área de fierro que trabaja a flexión, según el análisis que se realiza considerando la carga máxima alcanzada. Para ello se determina la resistencia a flexión con la Ec. (10), que depende del factor “ a ” asociado al ancho del elemento (b) y la sollicitación $Mu = P \cdot l$, donde $l=450[mm]$ es la distancia del muro al punto de aplicación de la carga.

En la se presentan los resultados del análisis para cada caso de estudio, se considera los valores de resistencia promedio de los ensayos de materiales $f'_c = 21.7[MPa]$, $f_y = 527[MPa]$ y $d = 105[mm]$.

$$Mn = As \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (10)$$

$$a = \frac{As \cdot f_y}{0.85 f'_c \cdot b} \quad (11)$$

Tabla 9: Resultado del análisis a flexión

	Carga (P) [kgf]	Momento (Mu) [kgf m]	N° Barras	Ancho (b) [mm]	Resistencia (Mn) [kgf m]
<i>Sin Trabas</i>	8821	3969	8	520	3897
<i>Con Trabas</i>	10963	4933	10	660	4894

Anexo B: Comentarios

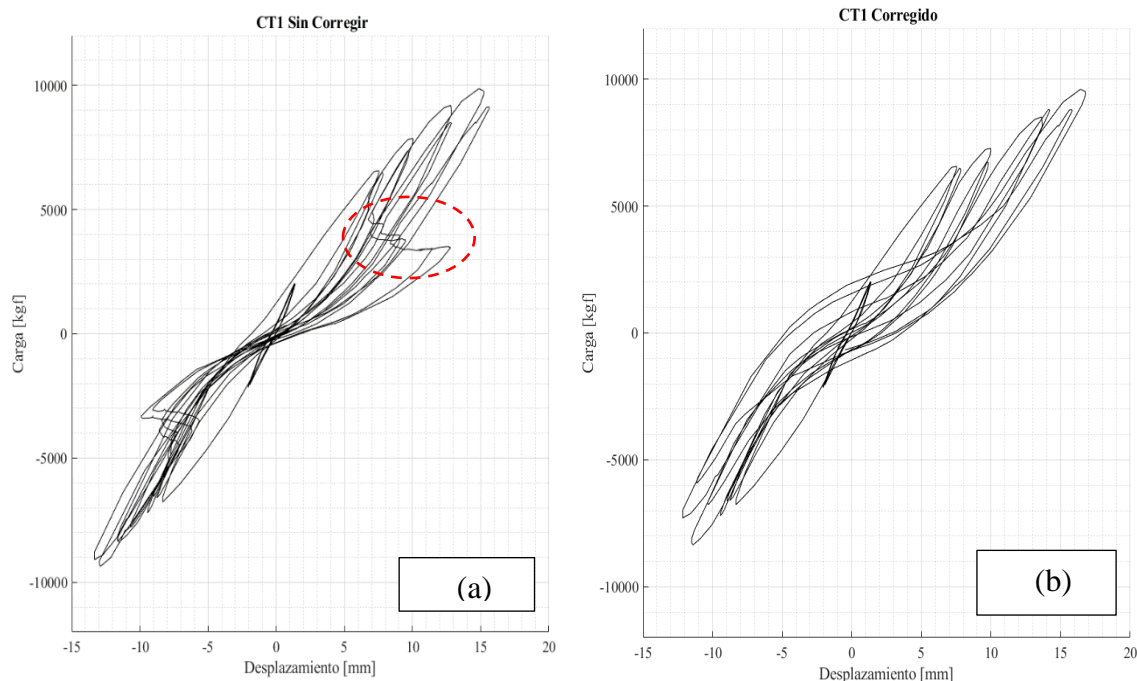
B.1 Problema en el ensayo de la probeta Con Trabas

Durante el transcurso del ensayo *Con Trabas*, el post tensado de la fundación fue menor al necesario, haciéndose notar en ciclos de mayor magnitud, generando una rotación y traslación de la probeta excesiva. Esto provocó que se tuviera que realizar dos veces el ensayo, con el post tensado correcto. Por lo anterior se tienen dos grupos de datos para este ensayo, que se corrigen y unen para obtener la información completa.

De los primeros datos se tiene la histéresis donde se observa un comportamiento inusual (Graf. 20 Corrección del primer set de datos de la probeta con trabas. En rojo es el comportamiento inusual

Graf. 21a), siendo corregido eliminando esos valores, obteniendo el Graf. 20 Corrección del primer set de datos de la probeta con trabas. En rojo es el comportamiento inusual

Graf. 21b.



Graf. 20 Corrección del primer set de datos de la probeta con trabas. En rojo es el comportamiento inusual

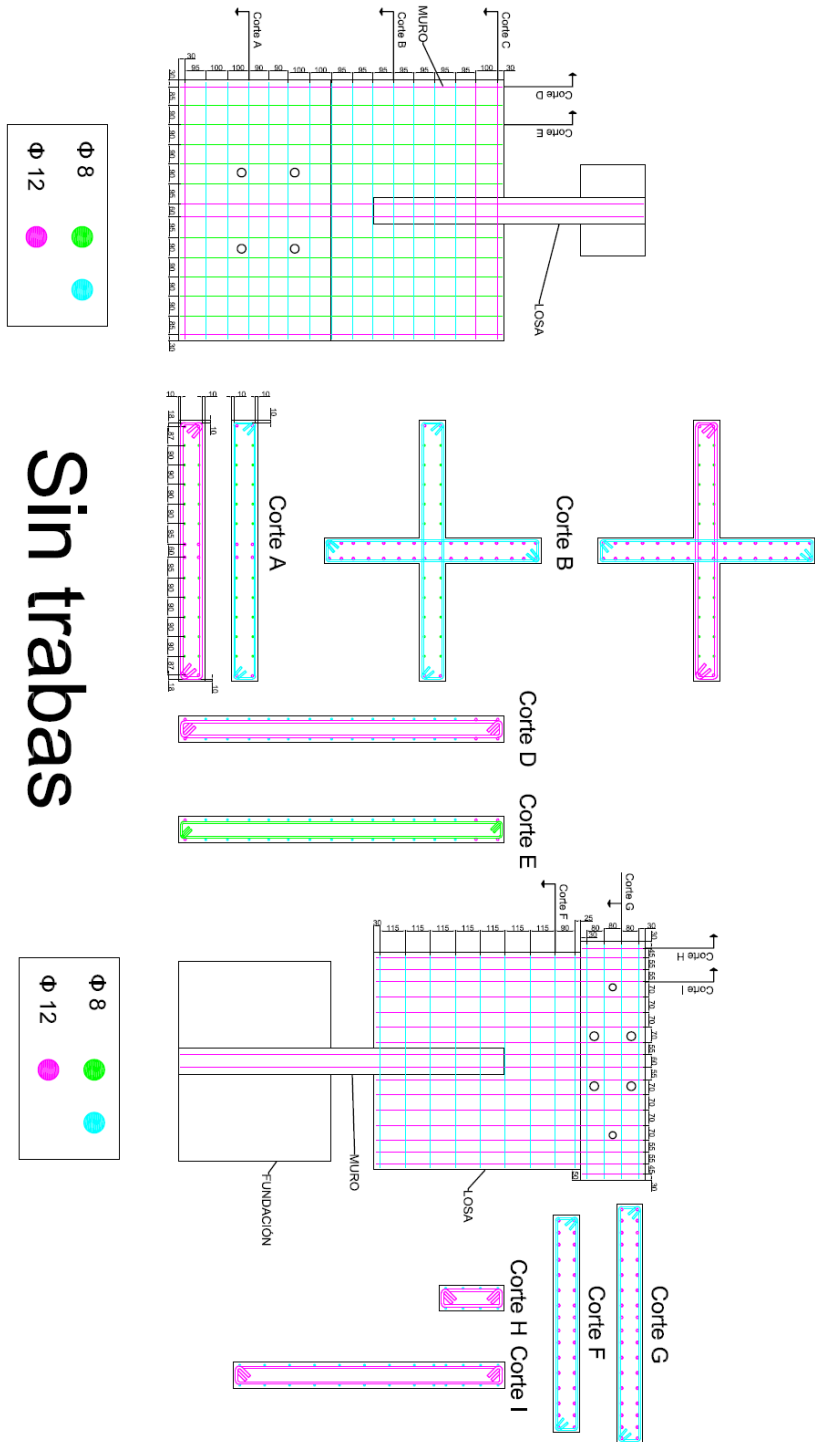
B.2 Código de los Sensores LDVT

Sensor	CODIGO	M [mm/V]	N [mm]
0	6165466	-28.9630	270.120
1	86005	-29.0610	257.860
2	6162298	-27.5810	209.050
3	6172318	-5.2435	49.573
4	6172317	5.1834	-19.579
5	6165449	-2.6780	24.904
6	J7530	-11.099	49.284
7	6172316	-5.2967	50.095
8	6165446	2.6145	-4.786
9	J7529	-11.759	46.154
10	J7531	-11.141	53.77
11	J7455	-11.314	50.354
12	J7528	-10.871	53.403
13	6165455	-2.8058	27.446
14	J7532	-11.596	59.098
15	J7573	-10.7360	63.379
16	6165448	-2.6892	26.661
17	6165454	-2.6004	23.705
18	6165456	-2.5995	25.424
19	6165450	2.6776	-4.197
20	6165452	2.3745	-0.783
21	6166560	2.6091	27.758
22	6165445	2.6769	29.212
23	6165451	2.5754	29.675
24	6165447	2.6819	23.903

Horizontal Superior
Vertical Losa
Horizontal Fundación
Vertical Fundación

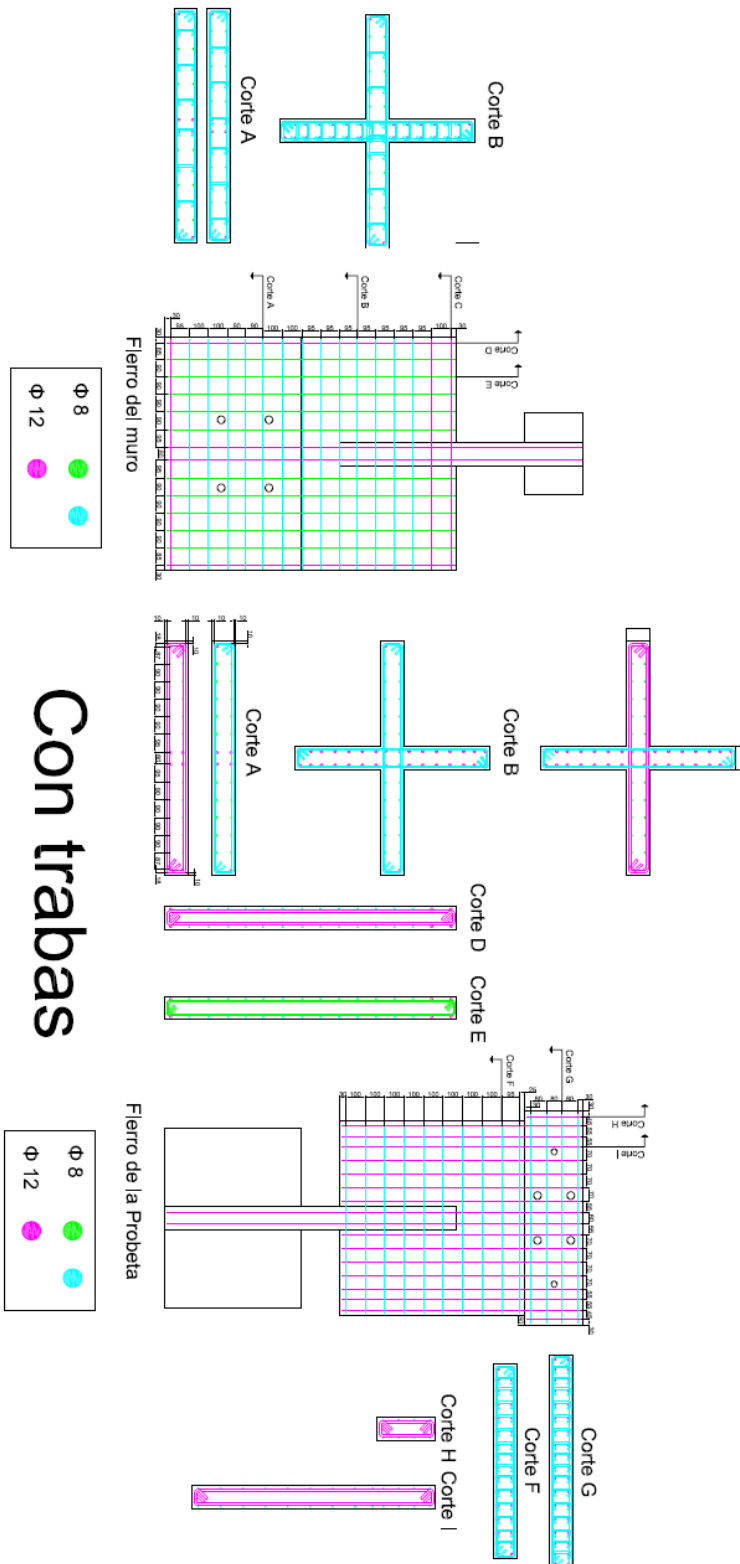
Anexo C: Planos

C.1 Losa Sin Trabas



Sin trabas

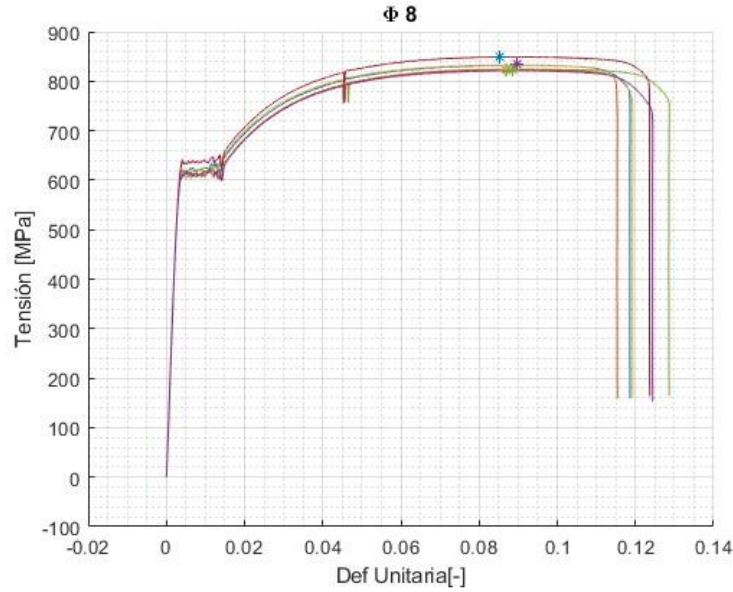
C.2 Losa Con Trabas



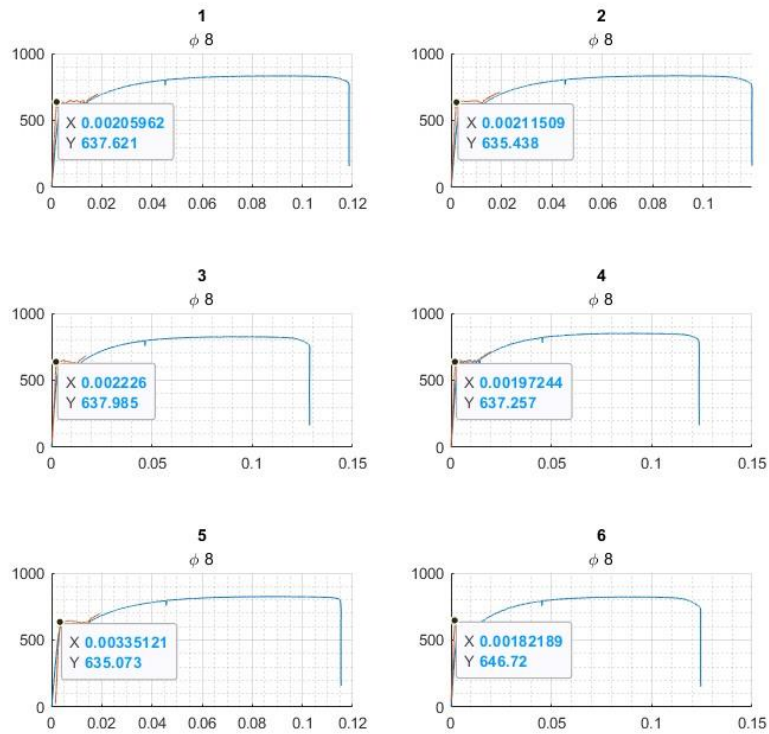
Con trabas

Anexo D: Curvas de Resistencia

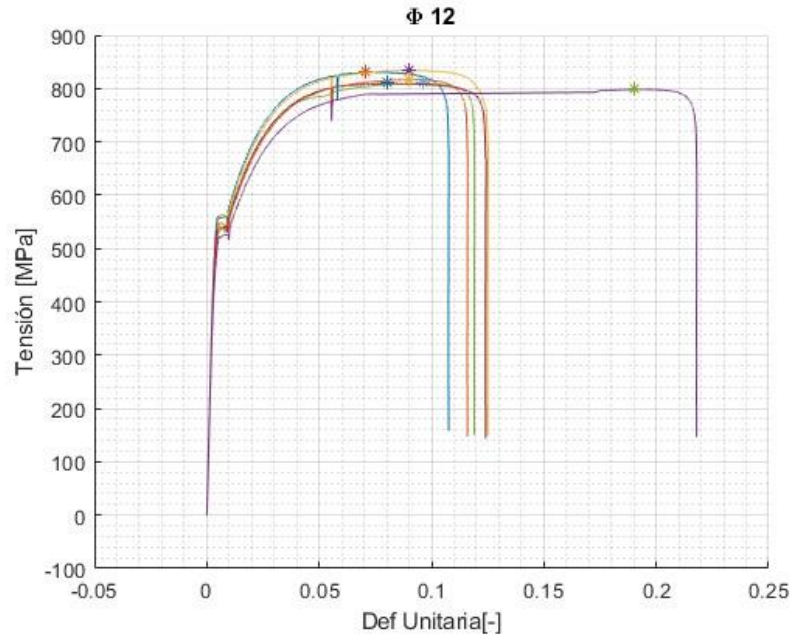
D.1 Acero



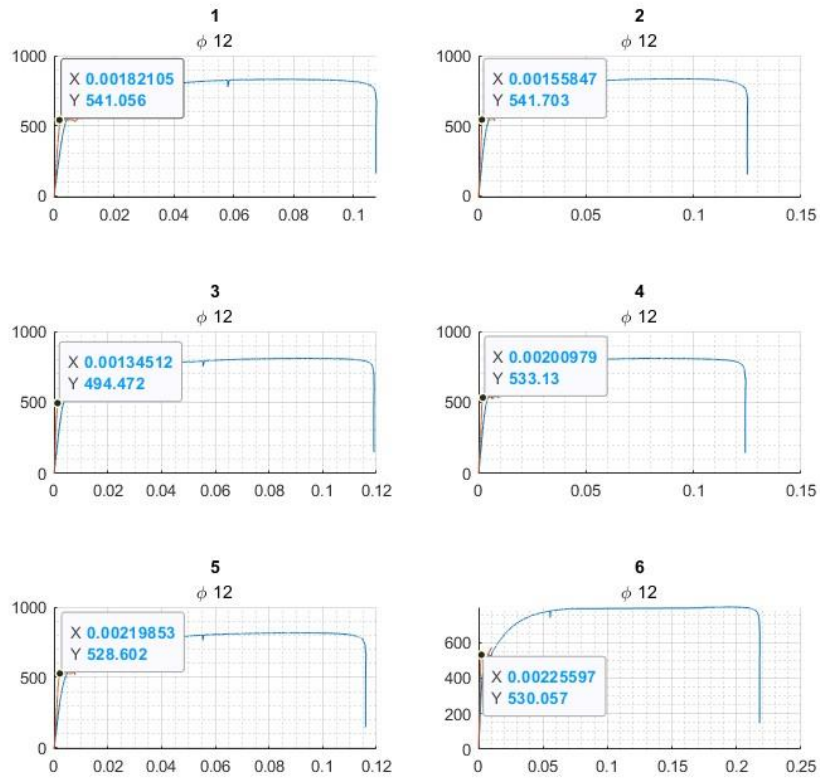
Graf. 22 Resistencia ultima de barras Φ8



Graf. 23 Fluencia de barras Φ8

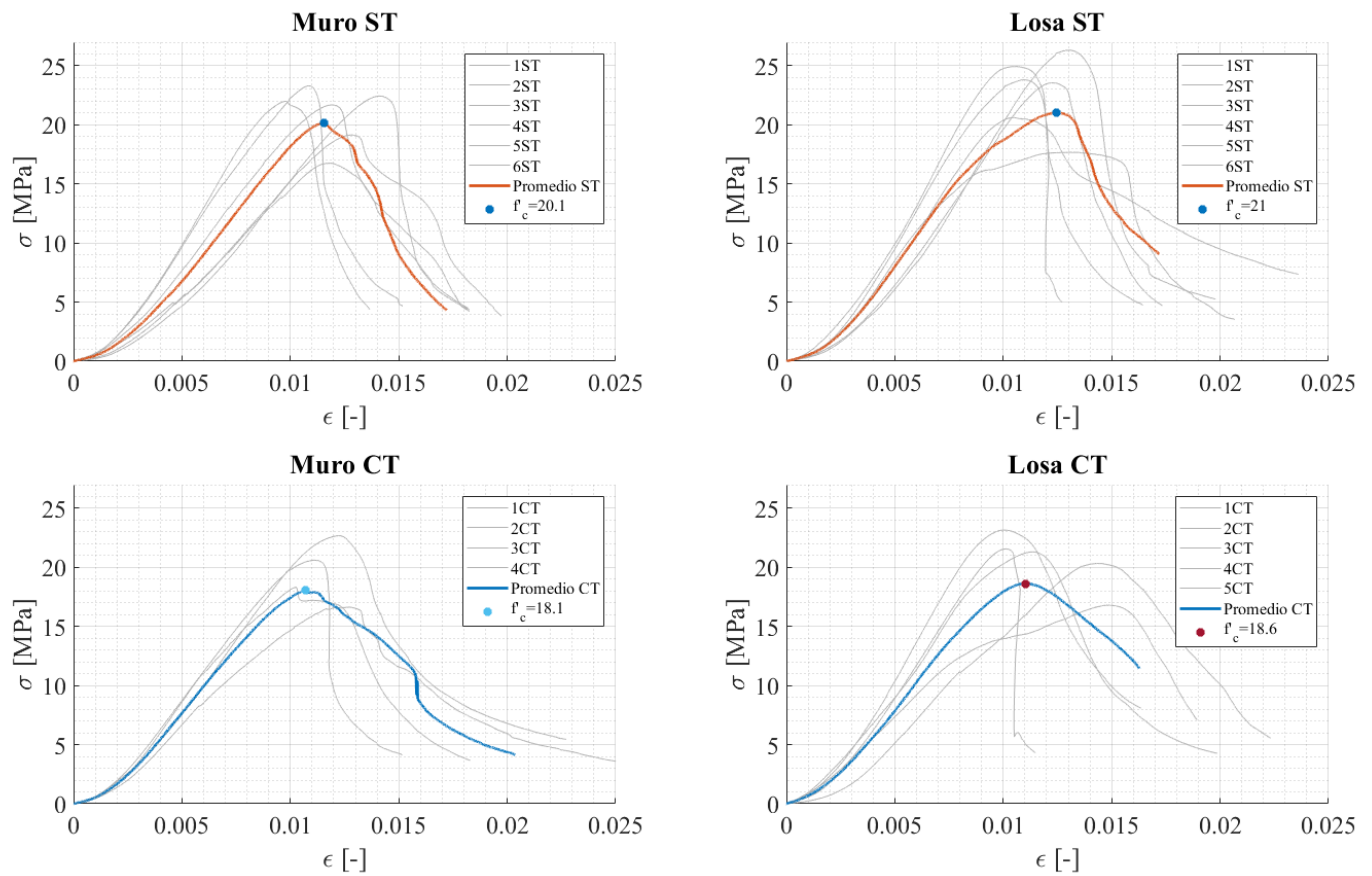


Graf. 24 Resistencia ultima de barras Φ12



Graf. 25 Fluencia de barras Φ12

D.2 Hormigón



Graf. 26 Curva de las mezclas utilizadas en la confección de las probetas y el promedio de cada una