



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

# **ESTRIBOS INCLINADOS EN DOS PLANOS PARA OPTIMIZAR EL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A SOLICITACIÓN SÍSMICA. ANÁLISIS EXPERIMENTAL**

Memoria de Título presentada por

**Alejandro Andrés Bermúdez Martínez**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
René Enrique Tobar Ramos

Abril de 2024



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**ESTRIBOS INCLINADOS EN DOS PLANOS PARA OPTIMIZAR EL  
COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO  
SOMETIDOS A SOLICITACIÓN SÍSMICA. ANÁLISIS EXPERIMENTAL**

AUTOR:

**Alejandro Andrés Bermúdez Martínez**

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de  
INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Prof. Guía ..... ..

Miembro 1 Comisión ..... ..

Miembro 2 Comisión ..... ..

Valparaíso, Chile, Abril de 2024

# 1 Resumen

La presente memoria es un trabajo que continua una serie de investigaciones realizadas en la UTFSM, centradas en el diseño de estribos inclinados. En estos estudios se hace frecuente la fractura del refuerzo longitudinal debido al pandeo de esta en la zona de rotula plástica. Para solucionar este problema se realiza un diseño con estribos inclinados en dos planos, que tiene como segundo propósito disminuir la cantidad de acero utilizado comparado a trabajos previos. También se verificó que este diseño cumpliera los requisitos de la ACI 318-19. Se construyeron dos probetas de hormigón armado a una escala cercana a la real, que incluyen en su armadura transversal el diseño propuesto. Estas fueron sometidas a ciclos de alta intensidad simulando un evento sísmico.

Los resultados del diseño muestran un menor daño por grietas de corte en la probeta comparado a los diseños de trabajos previos. Sin embargo, se encontró la fractura del refuerzo longitudinal en ambas probetas. Se comparo además entre varios diseños el daño observado junto a factores que influyeron. De este análisis resulta importante el efecto que tiene la resistencia del hormigón en el pandeo del refuerzo longitudinal elemento que no ha sido estudiado en investigaciones previas.

**Palabras clave:** Diseño sismorresistente, Armadura transversal inclinada, Fractura refuerzo longitudinal, Hormigón armado

# Contenido

|       |                                                                                          |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Resumen .....                                                                            | 3  |
| 2     | Introducción.....                                                                        | 10 |
| 2.1   | Contextualización .....                                                                  | 10 |
| 2.2   | Definición del problema .....                                                            | 11 |
| 3     | Estado del arte .....                                                                    | 12 |
| 3.1   | Antecedentes sobre el diseño con estribos inclinados.....                                | 12 |
| 3.2   | Fractura de barras longitudinales y deformación critica en barras de acero .....         | 14 |
| 3.3   | Estudios previos en línea de investigación .....                                         | 15 |
| 3.3.1 | C. Pino (2017) y comparación en estribos de 90° y 45° con variaciones de espaciado. .... | 15 |
| 3.3.2 | G. Reyes (2023), J. Maldonado (2023) y armadura complementaria.....                      | 16 |
| 3.3.3 | S. Rojas. H (2022), S. Rojas. R (2022) y deformación critica del acero. ....             | 19 |
| 3.3.4 | R. Lobera (2016) y desplazamientos máximos alcanzados. ....                              | 19 |
| 4     | Objetivos .....                                                                          | 21 |
| 4.1   | Objetivo General.....                                                                    | 21 |
| 4.2   | Objetivos Específicos.....                                                               | 21 |
| 5     | Fabricación e instrumentación de especímenes.....                                        | 21 |
| 5.1   | Diseño de propuesta de estribo .....                                                     | 21 |
| 5.2   | Características de Materiales .....                                                      | 22 |
| 5.2.1 | Hormigón.....                                                                            | 22 |
| 5.2.2 | Acero .....                                                                              | 23 |
| 5.3   | Especificaciones Probeta .....                                                           | 25 |
| 5.3.1 | Especificaciones Columna.....                                                            | 25 |
| 5.3.2 | Especificaciones Viga.....                                                               | 27 |
| 5.4   | Verificación diseño .....                                                                | 29 |
| 5.4.1 | Refuerzo longitudinal .....                                                              | 29 |
| 5.4.2 | Espaciamiento Mínimo y Máximo .....                                                      | 30 |
| 5.4.3 | Refuerzo transversal .....                                                               | 30 |
| 5.4.4 | Resistencia corte.....                                                                   | 31 |
| 5.4.5 | Resistencia a flexión.....                                                               | 31 |
| 5.4.6 | Calculo para vigas en pórticos especiales.....                                           | 32 |
| 5.4.7 | Anclaje.....                                                                             | 32 |
| 5.5   | Moldaje .....                                                                            | 32 |
| 5.6   | Hormigonado de probetas. ....                                                            | 33 |
| 5.7   | Montaje e Instrumentación .....                                                          | 34 |
| 5.7.1 | Plan de carga.....                                                                       | 34 |

|       |                                                             |    |
|-------|-------------------------------------------------------------|----|
| 5.7.2 | Montaje.....                                                | 34 |
| 6     | Resultados .....                                            | 38 |
| 6.1   | Aspectos generales.....                                     | 38 |
| 6.2   | Probeta ALEJ-1.....                                         | 38 |
| 6.2.1 | Curva Histéresis.....                                       | 38 |
| 6.2.2 | Registro Fotográfico ALEJ-1 (Desplazamiento máximo).....    | 39 |
| 6.2.3 | Comentarios.....                                            | 43 |
| 6.3   | Probeta ALEJ-2.....                                         | 45 |
| 6.3.1 | Curva Histéresis.....                                       | 45 |
| 6.3.2 | Registro Fotográfico ALEJ-2 (Máximos desplazamientos) ..... | 46 |
| 6.3.3 | Comentarios.....                                            | 49 |
| 6.4   | Comentarios adicionales de los ensayos .....                | 50 |
| 6.5   | Comparación con memoristas previos .....                    | 54 |
| 6.5.1 | Cantidad de acero utilizado .....                           | 54 |
| 6.5.2 | Calidad de Hormigón y espaciamiento de estribos.....        | 55 |
| 6.5.3 | Espaciamiento similar.....                                  | 58 |
| 6.5.4 | Maldonado y Reyes (2023).....                               | 62 |
| 6.5.5 | Verificación por ACI.....                                   | 66 |
| 7     | Conclusiones .....                                          | 67 |
| 7.1   | Conclusiones .....                                          | 67 |
| 7.2   | Recomendaciones a investigaciones futuras. ....             | 67 |
| 8     | Referencias .....                                           | 68 |
| 9     | Anexos.....                                                 | 70 |

## Índice de tablas

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Especímenes de prueba (Pino, 2017) .....                            | 15 |
| Tabla 2: Resultados desplazamientos máximos a escala 1:3 (Lobera, 2016)..... | 20 |
| Tabla 3: Dosificaciones Hormigón.....                                        | 23 |
| Tabla 4: Resistencias a compresión de probetas cilíndricas.....              | 23 |
| Tabla 5: Dimensiones Probeta.....                                            | 25 |
| Tabla 6: Propiedades mecánicas probeta.....                                  | 29 |
| Tabla 7: Geometría viga .....                                                | 29 |
| Tabla 8: Resumen valores utilizados para 22.5.8.5.4 .....                    | 31 |
| Tabla 9: Factores para 25.4.2.3 .....                                        | 32 |
| Tabla 10: Bitácora ensayo probeta ALEJ-1.....                                | 43 |
| Tabla 11: Bitácora ensayo probeta ALEJ-2.....                                | 49 |
| Tabla 12: Cantidad de acero en primeros 13 [cm] de viga.....                 | 54 |
| Tabla 13: Resumen probetas a comparar.....                                   | 55 |
| Tabla 14: Resumen probetas BS y ALEJ .....                                   | 58 |
| Tabla 15: Resumen probetas GJ y ALEJ.....                                    | 62 |
| Tabla 16: Resumen del cálculo de corte de probetas según ACI 318-19 .....    | 66 |
| Tabla 17: Resumen Esfuerzo y Deformación Acero utilizado .....               | 70 |
| Tabla 18: Variación resistencia y deformación unitaria AISI-304.....         | 70 |
| Tabla 19: Refuerzo para verificación columna fuerte .....                    | 70 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Representación de zona de estudio (Silva, 2022) .....                                                              | 10 |
| Figura 2: Fractura de refuerzo longitudinal en probetas a) MVC1 (Matson, 2018) y b) MVC2 (Matson, 2018). (Rojas, 2022b)..... | 11 |
| Figura 3: Diseño estribos convencionales (DCM-CONVEN) (Azimi et al., 2015) .....                                             | 12 |
| Figura 4: Diseño estribos espiral simple (DCM-SIMPLE) (Azimi et al., 2015).....                                              | 12 |
| Figura 5: Diseño estribos espiral doble (DCM-DOUBLE) (Azimi et al., 2015).....                                               | 13 |
| Figura 6: Disipación porcentual de energía de las probetas (Azimi et al., 2015).....                                         | 13 |
| Figura 7: Curvas de histéresis de las probetas (Azimi et al., 2015) .....                                                    | 14 |
| Figura 8: Curva Histéresis CP1 (Pino, 2017).....                                                                             | 15 |
| Figura 9: Curva Histéresis CP2 (Pino, 2017).....                                                                             | 16 |
| Figura 10: Diseño de refuerzo complementario (Maldonado, 2023) .....                                                         | 17 |
| Figura 11: Curva de Histéresis GJ1 (Maldonado, 2023).....                                                                    | 17 |
| Figura 12: Curva de Histéresis GJ2 (Maldonado, 2023).....                                                                    | 18 |
| Figura 13: Curva de Histéresis GJ3 (Maldonado, 2023).....                                                                    | 18 |
| Figura 14: Curva de Histéresis GJ4 (Maldonado, 2023).....                                                                    | 18 |
| Figura 15: Camisa utilizada para impedir pandeo (Rojas H, 2022a).....                                                        | 19 |
| Figura 16: Sistema de marco con estribos convencionales, V21 (Lobera, 2016).....                                             | 20 |
| Figura 17: Sistema de marco con estribos inclinados, VC6 (Lobera, 2016) .....                                                | 20 |
| Figura 18: Dimensiones en mm. de estribo inclinado en dos planos .....                                                       | 21 |
| Figura 19: Disposición preliminar, Vista lateral .....                                                                       | 22 |
| Figura 20: Disposición preliminar, Vista superior .....                                                                      | 22 |
| Figura 21: Curva ensayo a tracción Acero A630-420H .....                                                                     | 24 |
| Figura 22: Curva ensayo a tracción AISI-304.....                                                                             | 24 |
| Figura 23: Curva ensayo a tracción AISI-304 soldado .....                                                                    | 25 |
| Figura 24: Detalle armadura columna .....                                                                                    | 26 |
| Figura 25: Detalle estribos en columna.....                                                                                  | 26 |
| Figura 26: Zona con estribos abiertos .....                                                                                  | 27 |
| Figura 27: Detalle estribos abiertos y trabas .....                                                                          | 27 |
| Figura 28: Detalle perfil de la viga.....                                                                                    | 28 |
| Figura 29: Vista lateral disposición estribos .....                                                                          | 28 |
| Figura 30: Vista superior disposición estribos .....                                                                         | 28 |
| Figura 31: Moldaje Espécimen Finalizado.....                                                                                 | 33 |
| Figura 32: Moldaje con refuerzo y desmoldante aplicado .....                                                                 | 33 |
| Figura 33: Probeta hormigonada .....                                                                                         | 33 |
| Figura 34: Probeta sin moldajes .....                                                                                        | 33 |
| Figura 35: Desplazamientos del ensayo cíclico.....                                                                           | 34 |
| Figura 36: Diagrama del sistema de ensayo (Maldonado, 2023) .....                                                            | 35 |
| Figura 37: Sistema de riel en probeta ALEJ-1 .....                                                                           | 36 |
| Figura 38: Montaje de probeta en Sistema de ensayo .....                                                                     | 37 |
| Figura 39: Curva de histéresis probeta ALEJ-1 .....                                                                          | 38 |
| Figura 40: Quinto ciclo de 10 [mm] - ALEJ 1 .....                                                                            | 39 |
| Figura 41: Quinto ciclo de 15 [mm] -ALEJ 1 .....                                                                             | 39 |
| Figura 42: Quinto ciclo de 20 [mm] - ALEJ 1 .....                                                                            | 40 |
| Figura 43: Décimo ciclo de 25 [mm] - ALEJ 1.....                                                                             | 40 |
| Figura 44: Quinto ciclo de 30 [mm] - ALEJ 1 .....                                                                            | 41 |
| Figura 45: Segundo ciclo de 35 [mm] - ALEJ 1 .....                                                                           | 41 |
| Figura 46: Caída de recubrimiento deja expuesto a refuerzo longitudinal. 3° ciclo de 30 [mm].....                            | 42 |
| Figura 47: Lado negativo presenta salida del carro con torsión desde ciclos de 30 [mm] .....                                 | 42 |
| Figura 48: Lado positivo no presenta salida del carro ni torsión en ciclos de 30 [mm] .....                                  | 42 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 49: Lado positivo no presenta salida del carro ni torsión en ciclos de 35 [mm] ..... | 42 |
| Figura 50: Máximo pandeo refuerzo longitudinal, primer ciclo de 35 [mm] .....               | 43 |
| Figura 51: Fractura del refuerzo longitudinal, comienzo de segundo ciclo de 35 [mm] .....   | 43 |
| Figura 52: Curva de histéresis probeta ALEJ-2 .....                                         | 45 |
| Figura 53: Quinto ciclo de 10 [mm] - ALEJ 2 .....                                           | 46 |
| Figura 54: Quinto ciclo de 15 [mm] - ALEJ 2 .....                                           | 46 |
| Figura 55: Quinto ciclo de 20 [mm] - ALEJ 2 .....                                           | 47 |
| Figura 56: Décimo ciclo de 25 [mm] - ALEJ 2 .....                                           | 47 |
| Figura 57: Quinto ciclo de 30 [mm] - ALEJ 2 .....                                           | 48 |
| Figura 58: Segundo ciclo de 35 [mm] - ALEJ 2 .....                                          | 48 |
| Figura 59: Máximo pandeo refuerzo longitudinal, quinto ciclo de 30 [mm] .....               | 49 |
| Figura 60: Fractura del refuerzo longitudinal, primer ciclo de 35 [mm] .....                | 49 |
| Figura 61: Salida de riel hacia sector del actuador, ALEJ-1 primer ciclo 35 [mm] .....      | 51 |
| Figura 62: Salida de riel hacia sector del actuador, ALEJ-2 primer ciclo 35 [mm] .....      | 51 |
| Figura 63: Correcta posición del riel al comienzo de los ensayos de ALEJ-2 .....            | 52 |
| Figura 64: Ligero movimiento al terminar medio ciclo de 35 [mm] en ALEJ-2 .....             | 52 |
| Figura 65: Vista frontal ALEJ-1 .....                                                       | 53 |
| Figura 66: Vista trasera ALEJ-1 .....                                                       | 53 |
| Figura 67: Vista frontal ALEJ-2 .....                                                       | 53 |
| Figura 68: Vista trasera ALEJ-2 .....                                                       | 53 |
| Figura 69: Curva de histéresis probeta CP1. Fuente: Pino (2017) .....                       | 56 |
| Figura 70: Curva de histéresis probeta CP2. Fuente: Pino (2017) .....                       | 56 |
| Figura 71: Curva de histéresis probeta P2. Fuente: Figueroa (2019) .....                    | 56 |
| Figura 72: Curva de histéresis probeta P3. Fuente: Figueroa (2019) .....                    | 56 |
| Figura 73: Curva de histéresis ALEJ-1 .....                                                 | 56 |
| Figura 74: Curva de histéresis ALEJ-2 .....                                                 | 56 |
| Figura 75: CP2, 3° ciclo de 20 [mm]. Pino (2017) .....                                      | 57 |
| Figura 76: ALEJ-2, 5° ciclo de 20 [mm] .....                                                | 57 |
| Figura 77: CP2, 5° ciclo 33[mm]. Pino (2017) .....                                          | 57 |
| Figura 78: ALEJ-2, 2° ciclo de 35 [mm] .....                                                | 57 |
| Figura 79: Curva de histéresis BS1 R-100. Silva (2022) .....                                | 59 |
| Figura 80: Curva de histéresis BS5 I-100. Silva (2022) .....                                | 59 |
| Figura 81: Curva de histéresis ALEJ-1 .....                                                 | 59 |
| Figura 82: Curva de histéresis ALEJ-2 .....                                                 | 59 |
| Figura 83: BS1, 5° ciclo de 20 [mm]. Silva (2022) .....                                     | 60 |
| Figura 84: ALEJ-2, 5° ciclo de 20 [mm] .....                                                | 60 |
| Figura 85: BS5, 5° ciclo de 20 [mm]. Silva (2022) .....                                     | 60 |
| Figura 86: BS1, 10° ciclo de 25 [mm]. Silva (2022) .....                                    | 60 |
| Figura 87: ALEJ-2, 10° ciclo de 25 [mm] .....                                               | 60 |
| Figura 88: BS5, 10° ciclo de 25 [mm]. Silva (2022) .....                                    | 60 |
| Figura 89: BS1, 5° ciclo de 30 [mm]. Silva (2022) .....                                     | 60 |
| Figura 90: ALEJ-2, 5° ciclo de 30 [mm] .....                                                | 60 |
| Figura 91: BS6, 5° ciclo de 30 [mm]. Silva (2022) .....                                     | 60 |
| Figura 92: Curva de histéresis GJ1. Maldonado (2023) .....                                  | 63 |
| Figura 93: Curva de histéresis GJ2. Maldonado (2023) .....                                  | 63 |
| Figura 94: Curva de histéresis ALEJ-1 .....                                                 | 63 |
| Figura 95: Curva de histéresis ALEJ-2 .....                                                 | 63 |
| Figura 96: GJ1, 5° ciclo de 20 [mm]. Maldonado (2023) .....                                 | 64 |
| Figura 97: ALEJ-2, 5° ciclo de 20 [mm] .....                                                | 64 |
| Figura 98: GJ2, 5° ciclo de 20 [mm]. Maldonado (2023) .....                                 | 64 |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 99: GJ1, 10° ciclo de 25 [mm]. Maldonado (2023) .....                                            | 64 |
| Figura 100: ALEJ-2, 10° ciclo de 25 [mm].....                                                           | 64 |
| Figura 101: GJ2, 10° ciclo de 25 [mm]. Maldonado (2023) .....                                           | 64 |
| Figura 102: GJ1, 5° ciclo de 30 [mm]. Maldonado (2023) .....                                            | 64 |
| Figura 103: ALEJ-2, 5° ciclo de 30 [mm].....                                                            | 64 |
| Figura 104: GJ2, 5° ciclo de 30 [mm]. Maldonado (2023) .....                                            | 64 |
| Figura 105: GJ1, 5° ciclo de 35 [mm]. Maldonado (2023) .....                                            | 65 |
| Figura 106: ALEJ-2, 2° ciclo de 35 [mm].....                                                            | 65 |
| Figura 107: GJ2, 5° ciclo de 35 [mm]. Maldonado (2023) .....                                            | 65 |
| Figura 108: Placa de fijación al actuador .....                                                         | 71 |
| Figura 109: Placa de fijación al espécimen junto a pernos de fijación.....                              | 71 |
| Figura 110: Pernos de fijación del zapato de apoyo junto a bolillas .....                               | 71 |
| Figura 111: Placa metálica de fijación para zapato de apoyo junto a sistema de bolillas utilizado ..... | 71 |
| Figura 112: Riel para fijación sistema de carro.....                                                    | 72 |
| Figura 113: Carro con configuración ALEJ-2 de ruedas.....                                               | 72 |
| Figura 114: Configuración ruedas para ALEJ-1 .....                                                      | 72 |
| Figura 115: Hilos de fijación a mesa para riel.....                                                     | 72 |

## 2 Introducción

### 2.1 Contextualización

Los estribos en 45°, empleados en lugar de los estribos ortogonales tradicionales como armadura transversal en elementos de hormigón armado, han sido el foco de diversas investigaciones realizadas durante la última década en el Departamento de Obras Civiles de la UTFSM. Estas se han orientado en la búsqueda de soluciones efectivas a la degradación del hormigón armado cuando es sometido a una intensa sollicitación sísmica. Se han encontrado resultados positivos para la disposición en 45°, algo que se detallará más adelante, sin embargo, presenta dificultades en temas de constructibilidad. Se encontró también un problema inesperado consistente en la frecuente ocurrencia de fractura de las barras longitudinales. Lo cual ocurre principalmente por las altas deformaciones asociadas al pandeo de las barras, que se comprimen en cada ciclo. Estas deformaciones llevan a los refuerzos longitudinales a un punto de deformación crítica, donde luego se produce la falla por tracción.

En esta memoria, se intentará mejorar el diseño con tal de evitar la fractura del refuerzo longitudinal, antes mencionada. Se ha visto que esta tiene relación con el pandeo de las barras, lo cual tiende a ocurrir después de la pérdida del recubrimiento en la zona de la viga próxima a la columna. Se llevará a cabo entonces un estudio experimental basado en el ensayo de especímenes de prueba consistentes en un segmento de viga anclado a un trozo de columna sometido a una carga alternada equivalente a la sollicitación sísmica, según la representación de la Figura 1.

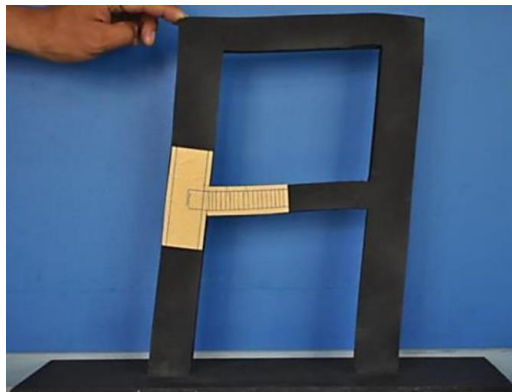


**Figura 1: Representación de zona de estudio (Silva, 2022)**

## 2.2 Definición del problema

En la Figura 2 se observa la fractura asociada al pandeo de los refuerzos longitudinales junto al desprendimiento de hormigón en la zona de la viga más cercana a la columna, que suele ocurrir ante solicitaciones sísmicas. La recomendación tradicional para prevenir el pandeo toma como estándar una separación entre los estribos de cuatro veces del diámetro de la barra longitudinal. Sin embargo, esto es solución para el pandeo solo en la dirección perpendicular a la de los estribos, ya que este puede verificarse en otras formas.

Trabajos recientes, Maldonado (2023) y Reyes (2023), lograron disminuir la ocurrencia de la fractura en las barras longitudinales aunque no en la totalidad de los casos. Esto se realizó implementando un sistema de refuerzo complementario que busca impedir las deformaciones en múltiples direcciones pero que a su vez aumentó la cantidad de acero involucrado en el diseño.

En el presente trabajo se busca perfeccionar lo propuesto por Maldonado (2023), racionalizando el acero en el diseño y reemplazando el sistema de refuerzos complementarios mediante estribos inclinados en dos planos. Se restringe de la misma forma la deformación que conduce al pandeo en las barras longitudinales, pero con un diseño más eficiente.

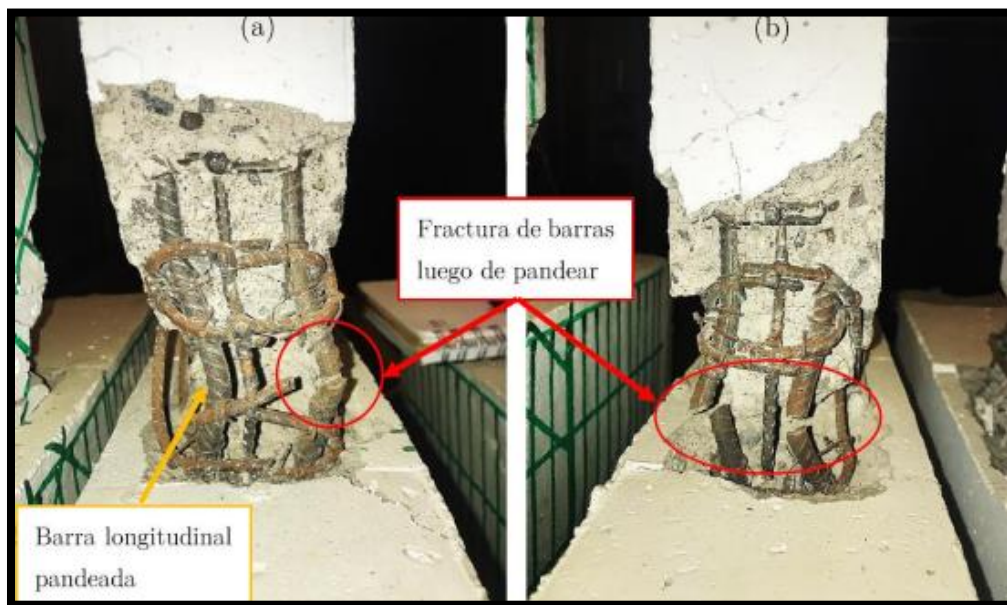


**Figura 2: Fractura de refuerzo longitudinal en probetas a) MVC1 (Matson, 2018) y b) MVC2 (Matson, 2018). (Rojas, 2022b)**



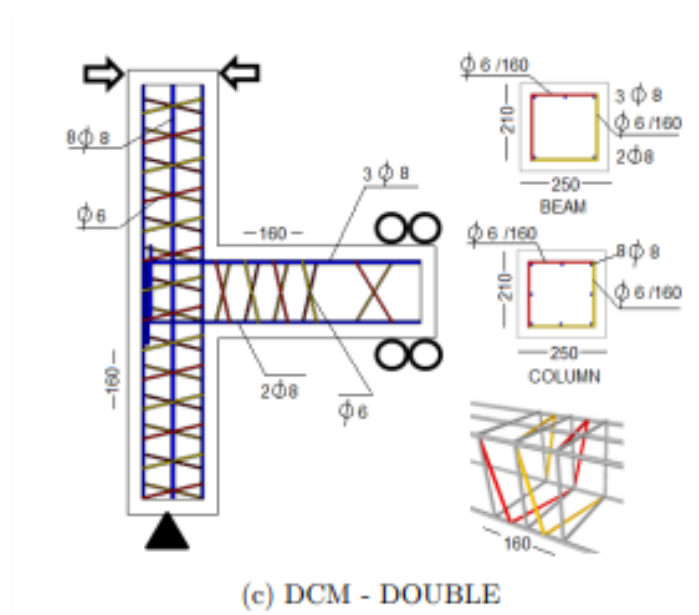


**Figura 5: Diseño estribos espiral doble (DCM-DOUBLE) (Azimi et al., 2015)**

De esta publicación se encontró que los diseños con espirales presentaron una mayor capacidad para contener el hormigón y no se obtuvieron grandes desprendimientos de material. Junto a esto también se evidencio mayor resistencia comparado al diseño de estribo convencional, esto se puede ver en las curvas de histéresis de la Figura 7. En resumen, Azimi menciona que las espirales tienen una mayor capacidad para disipar energía y que en particular el diseño DCM-DOUBLE presenta una disposición más eficiente de estribos.

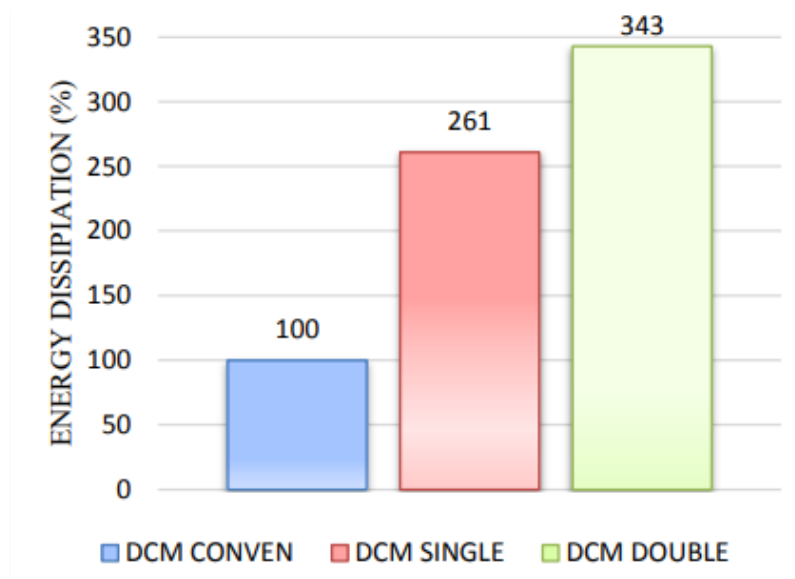


**Figura 6: Disipación porcentual de energía de las probetas (Azimi et al., 2015)**

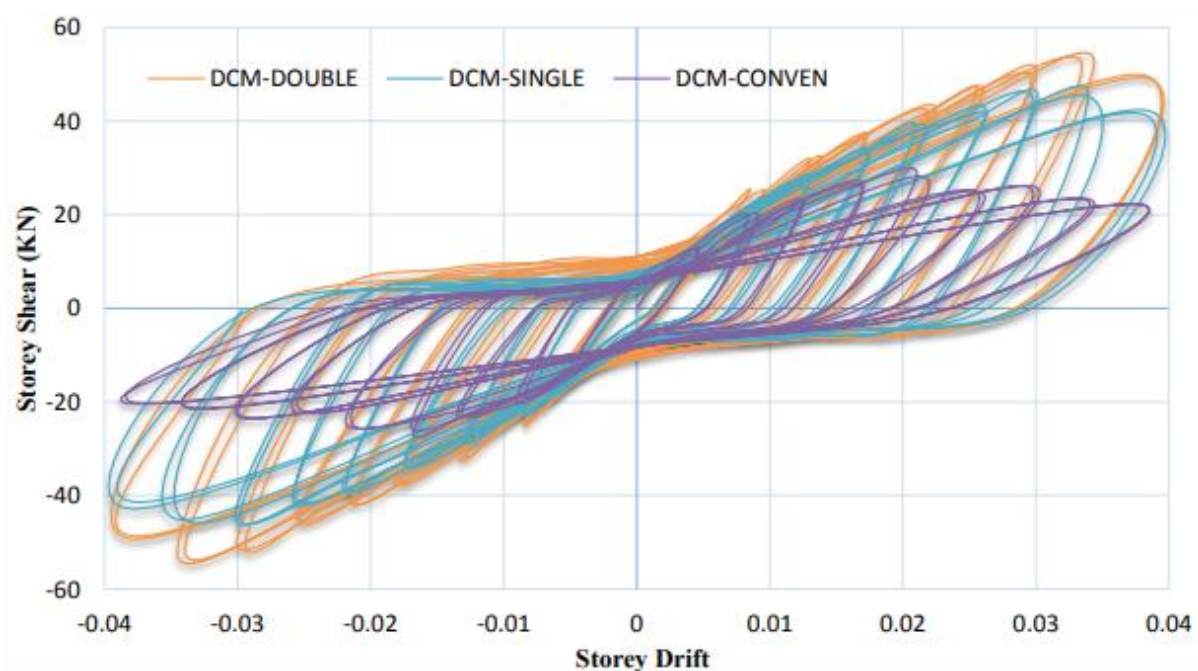


**Figura 7: Curvas de histéresis de las probetas (Azimi et al., 2015)**

Sin embargo todas las probetas fueron sometidas a un máximo sólo de 4% de “Storey Drift”, como se puede ver en la Figura 7, mientras que en los ensayos realizados en la UTFSM como se verá más adelante, llega a valores cercanos al 8%. Es más, las probetas de Azimi no llegan a experimentar la fractura del refuerzo longitudinal comúnmente encontradas en este tipo de estribos debido a estas sollicitaciones más bajas.

### **3.2 Fractura de barras longitudinales y deformación crítica en barras de acero**

Respecto a la fractura de las barras longitudinales en los experimentos desarrollados en la UTFSM, en la casi totalidad de los casos, se ha observado que la fractura tiene lugar en la zona donde ocurre el pandeo de las barras. Para la comprensión de este fenómeno la referencia más importante ha sido Barclay & Kowalsky (2019) que menciona el concepto de pandeo crítico definido como el punto de fractura de una barra de acero sometida a fuerzas de compresión. Este efecto ocurre durante la aplicación de cargas cíclicas a la barra donde se alcanza una deformación crítica durante la compresión y seguido se tiene la fractura de la barra al siguiente ciclo de tracción. El fenómeno también fue estudiado a través del ensayo BBT, que consiste en la aplicación de demandas de curvatura para luego ser traccionadas y llevadas a la fractura, que son luego clasificadas como falla dúctil o falla frágil. Esta clasificación se realiza según la elongación de la barra al momento de fractura.

La investigación de Barclay & Kowalsky (2019) en resumen confirma que las deformaciones impuestas aplicadas a una barra tienen una influencia en la capacidad de tracción, algo que se evidencia durante la aplicación de cargas cíclicas. Este fenómeno también fue estudiado por Rojas. R. (2022) lo cual se detalla más adelante.

### 3.3 Estudios previos en línea de investigación

A continuación, se detallan algunos resultados de estudios previos desarrollados en la UTFSM con respecto al comportamiento de elementos de hormigón armado con armadura transversal inclinada sometidos a solicitaciones sísmicas.

#### 3.3.1 C. Pino (2017) y comparación en estribos de 90° y 45° con variaciones de espaciado.

Para tener una comparación entre las probetas con estribos inclinados y convencionales, el estudio de Pino (2017) es muy importante, dado que se realizó con diversas combinaciones de espaciamiento entre estribos, como por ejemplo los que se señalan en la siguiente tabla:

**Tabla 1: Especímenes de prueba (Pino, 2017)**

| Espécimen | Estribos     |
|-----------|--------------|
| VCP1      | E90°@3 [cm]  |
| VCP2      | E45°@5 [cm]  |
| CP1       | E90°@2 [cm]  |
| CP2       | E45°@5 [cm]  |
| CP3       | E45°@5 [cm]  |
| CP4       | E45°@10 [cm] |

De esta prueba se presentan aquí las curvas de histéresis de dos probetas, CP1 y CP2.

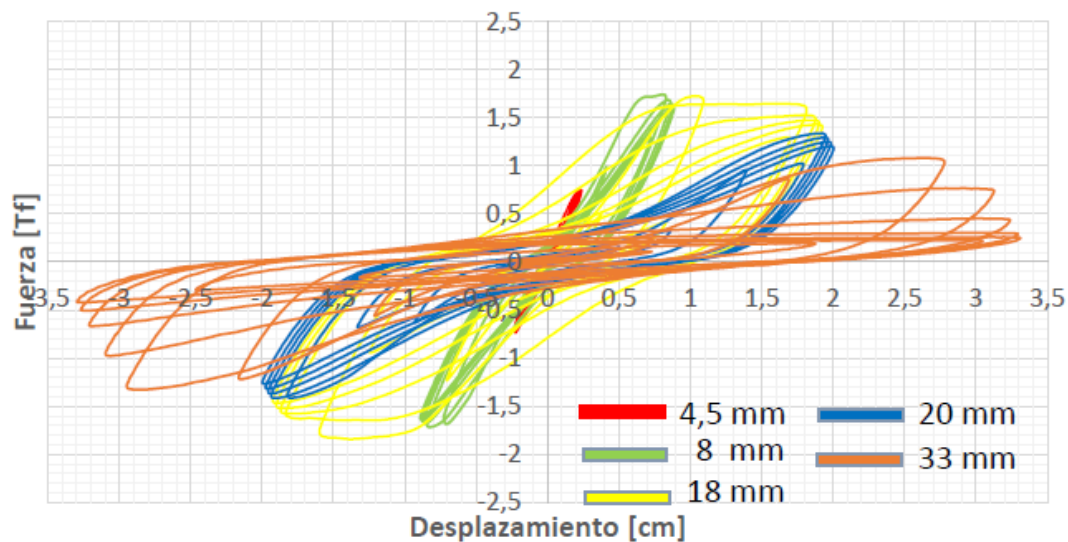


**Figura 8: Curva Histéresis CP1 (Pino, 2017)**

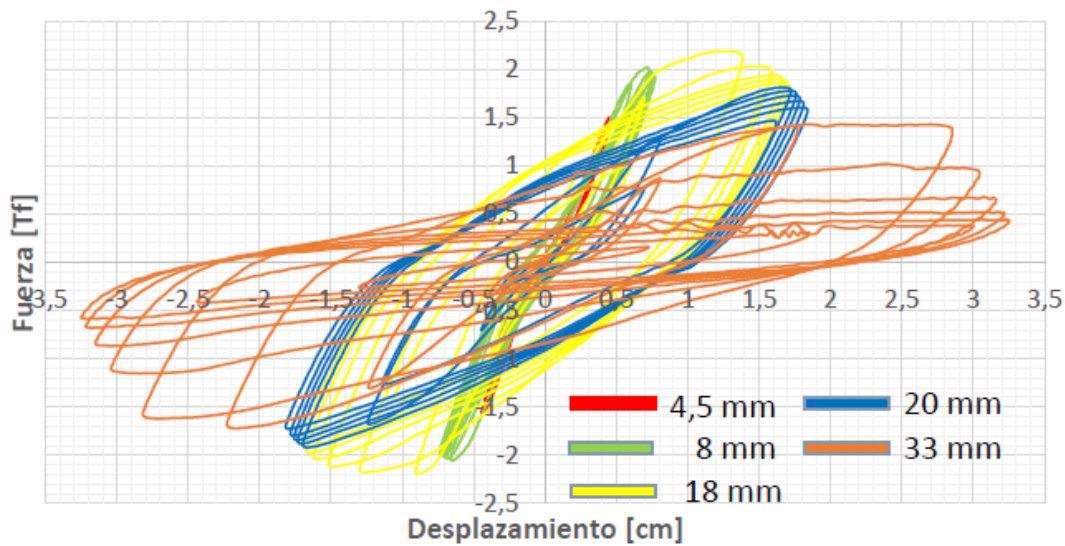


**Figura 9: Curva Histéresis CP2 (Pino, 2017)**

De estas dos curvas se puede observar claramente una mayor resistencia por parte de la probeta CP2 con estribos inclinados, que además terminó el ensayo con un desplazamiento máximo de 33 [mm] donde se presentó el pandeo de los refuerzos longitudinales. Para el caso de la probeta CP1 se tiene que el desprendimiento de material y eventual falla ocurrió a los 18 [mm]. Cabe destacar además que en las demás probetas se presentó un fenómeno similar, falla con desplazamientos cercanos a los 18 [mm] para estribos convencionales, mientras que fractura de los refuerzos longitudinales en desplazamientos cercanos a los 33 [mm] para las probetas con estribos en 45°.

Considerando por último la probeta CP4 con separación entre estribos inclinados de 10 [cm] se observó que la separación entre estos, afectó de forma directa la resistencia máxima que se observaba durante los desplazamientos sobre 18 [mm] de forma negativa, por lo que establecer estribos cercanos a una separación de 3 o cada 5 [cm] parece ser una configuración óptima, de esta forma evitando el pandeo excesivo de las barras por la pérdida del recubrimiento. Sin embargo, disminuir el tamaño entre estribos tampoco es una solución definitiva debido a que se aumenta la cantidad de acero empleado y esto no asegura que el pandeo no ocurra en otras direcciones.

### **3.3.2 G. Reyes (2023), J. Maldonado (2023) y armadura complementaria.**

Para resolver el pandeo de los refuerzos longitudinales en varias direcciones, es que Maldonado (2023) y Reyes (2023) realizan un efecto de contención de estas barras con un refuerzo complementario de acero galvanizado de 2 [mm] de diámetro en cuatro probetas. Este refuerzo complementario se posicionó en la zona de la viga más cercana a la columna tal como se observa en la Figura 10.

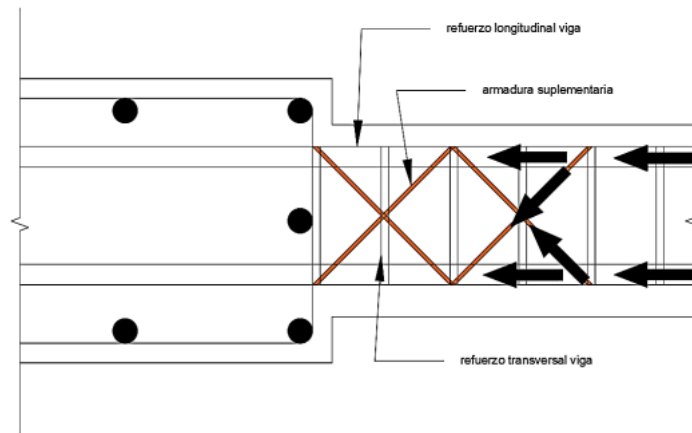


**Figura 10: Diseño de refuerzo complementario (Maldonado, 2023)**

Por parte de los resultados de estas probetas se observaron las siguientes curvas de histéresis.

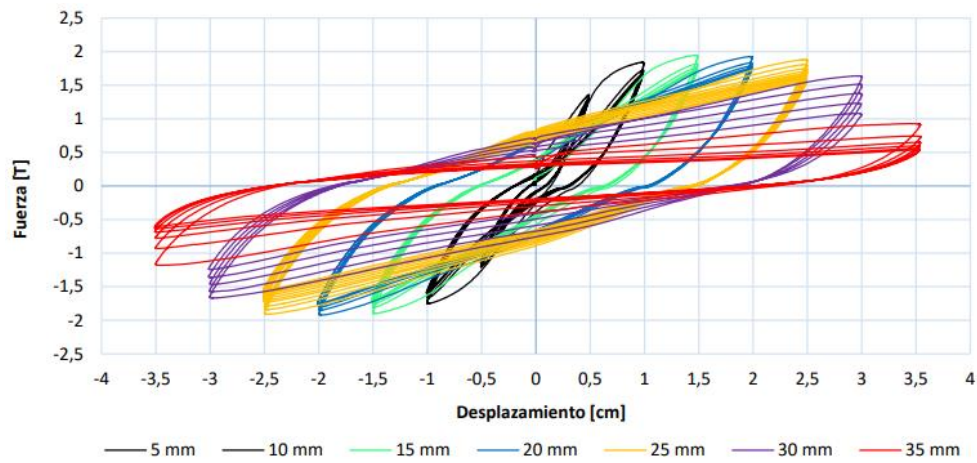


**Figura 11: Curva de Histéresis GJ1 (Maldonado, 2023)**

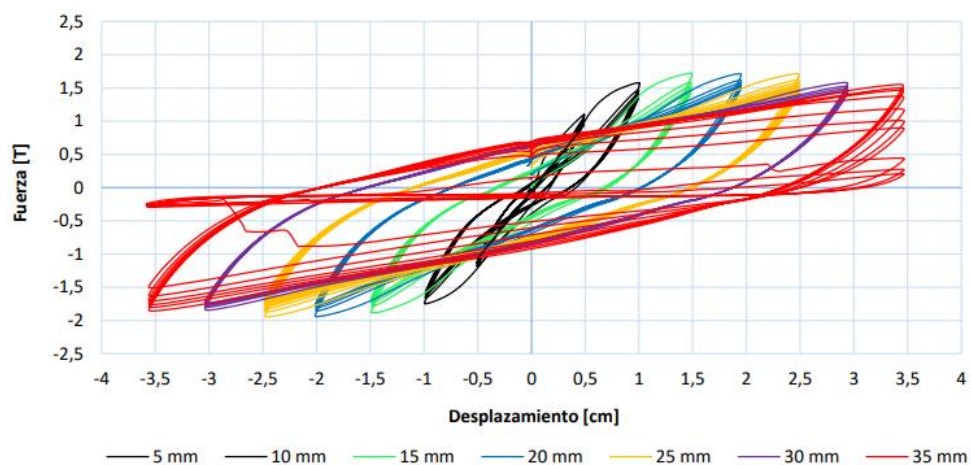


**Figura 12: Curva de Histéresis GJ2 (Maldonado, 2023)**

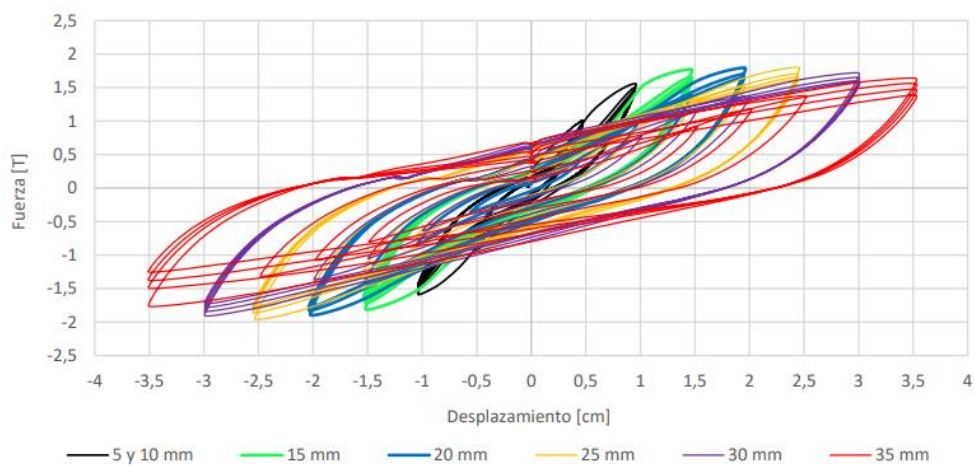


**Figura 13: Curva de Histéresis GJ3 (Maldonado, 2023)**

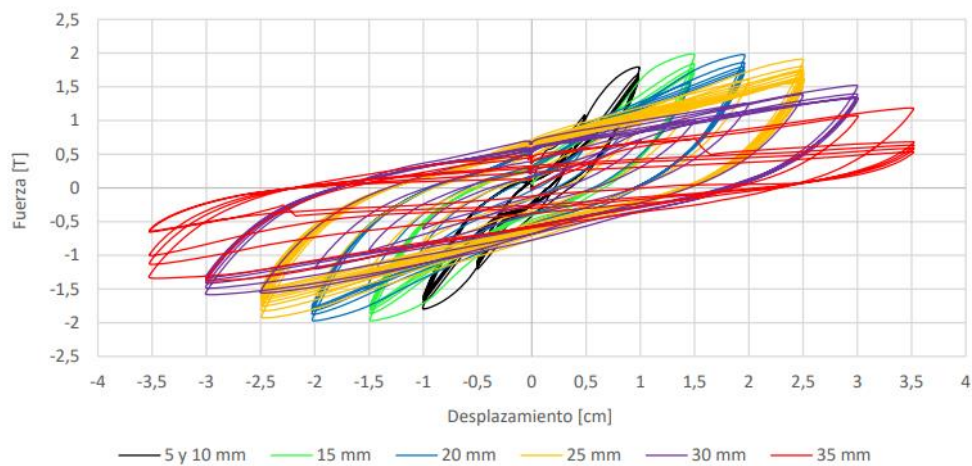


**Figura 14: Curva de Histéresis GJ4 (Maldonado, 2023)**

De lo anterior se puede observar un desplazamiento máximo en las cuatro probetas de 35 [mm] llegando a resistencias que rodean las 1.5 [T] donde vuelve a ocurrir el pandeo del refuerzo longitudinal en la mayor parte de las probetas. Sin embargo se tiene que la fractura del refuerzo no sucedió en GJ1 ni GJ3. Por lo que se demuestra de forma práctica lo investigado por Rojas H (2022) y Rojas R (2022) donde se mejoran los resultados obtenidos con la no rotura de los refuerzos longitudinales las probetas aplicando una restricción al pandeo pero aumentando la cantidad de acero utilizado en el diseño.

Cabe notar que las probetas fueron sometidas ante dos tipos de ciclos de cargas diferentes, el sugerido por la ACI-374 y otro con ciclos intermedios basados en las investigaciones realizadas para elementos de madera y albañilería (Krawinkler, 2009). Maldonado (2023) concluye que esta diferencia de ciclos no tuvo relevancia con las resistencias obtenidas o del daño observado, por lo que resultó ser un factor despreciable para los resultados del diseño.

### 3.3.3 S. Rojas. H (2022), S. Rojas. R (2022) y deformación crítica del acero.

La investigación de ambos memoristas se centró en la respuesta de los refuerzos longitudinales ante la compresión y su falla por pandeo. Esto se realizó colocando una camisa externa que impide el pandeo, como se puede ver en la Figura 15 y así comprobar si se presentaban diferencias en su comportamiento con barras con pandeo libre de ocurrir como señala S. Rojas H. (2022).

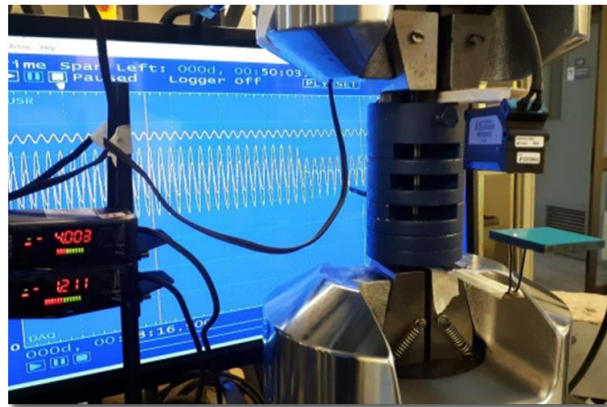


**Figura 15: Camisa utilizada para impedir pandeo (Rojas H, 2022a)**

Dentro de la investigación se pudo confirmar que la principal razón de las fallas por pandeo en los refuerzos longitudinales observadas en la línea de investigación en la UTFSM se debe a un fenómeno definido por Backley & Kowalsky (2019) como pandeo critico o como lo define Rojas R. (2022) deformación unitaria critica. Fenómeno que consiste en la llegada a un punto crítico del refuerzo longitudinal donde se excede la carga del material a las demandas de compresión, provocando finalmente la falla por pandeo. Esta falla suele ocurrir de forma inmediata después del ciclo de compresión crítico, al comienzo del ciclo de tracción. Del estudio se pudo concluir que evitar el pandeo con tal de reducir el efecto de deformación critica unitaria posterga de forma efectiva la fractura de las barras, tal como sugiere Rojas H. (2022).

### 3.3.4 R. Lobera (2016) y desplazamientos máximos alcanzados.

En esta memoria se simuló con el programa OpenSees, el comportamiento de una estructura de hormigón armado con estribos inclinados y otra estructura con estribos ortogonales, sometida a sismos con potencial destructivo importante. Esto tuvo el propósito de establecer información sobre los desplazamientos máximos alcanzados y verificar los desplazamientos del plan de carga utilizado en la línea de investigación. El estudio se basó en los modelos que se muestran en la Figura 16 y Figura 17, los cuales fueron sometidos a los sismos de Concepción del 2010, Viña del Mar 1985, México 1985 y Kobe 1995.

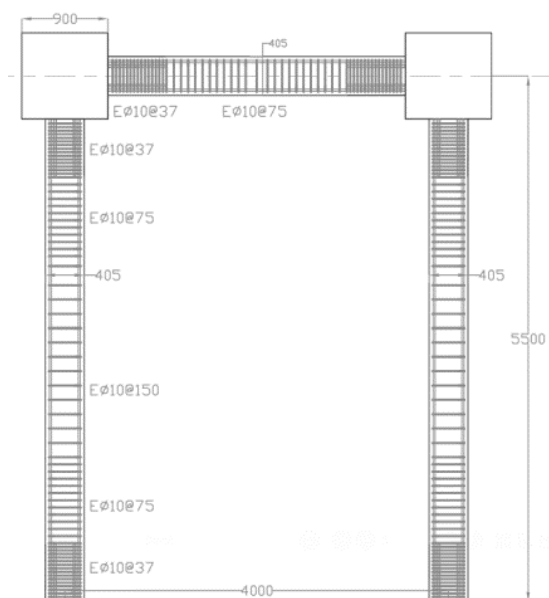


**Figura 16: Sistema de marco con estribos convencionales, V21 (Lobera, 2016)**

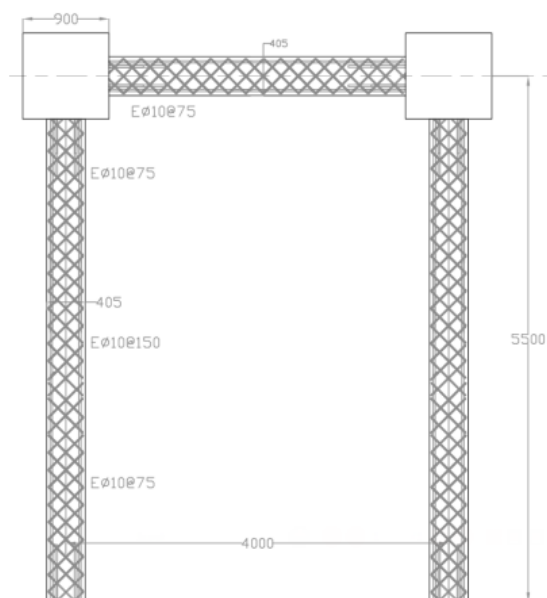


**Figura 17: Sistema de marco con estribos inclinados, VC6 (Lobera, 2016)**

De este análisis se obtuvieron los siguientes desplazamientos máximos:

**Tabla 2: Resultados desplazamientos máximos a escala 1:3 (Lobera, 2016)**

| Sismo             | Desplazamiento Y max. en escala 1:3 [cm] |       |
|-------------------|------------------------------------------|-------|
|                   | V21                                      | VC6   |
| Kobe 1995         | 2.605                                    | 1.913 |
| México 1985       | 2.368                                    | 1.741 |
| Concepción 2010   | 1.004                                    | 1.018 |
| Viña del Mar 1985 | 1.082                                    | 1.141 |

De la investigación Lobera concluye que los cortes de barra que se experimentan en los ensayos de probetas en la UTFSM no sucederían en la realidad, esto debido a que ante sismos con un gran potencial destructivo se tienen desplazamientos cercanos a los 20 [mm], los cuales son mucho menores comparados a los desplazamientos que se encuentran en el plan de cargas típico de memorias anteriores, los cuales llegan incluso a 35 [mm].

## 4 Objetivos

### 4.1 Objetivo General

Aprovechar las óptimas características de comportamiento de los elementos de hormigón armado con armadura transversal inclinada para efectos de las solicitaciones sísmicas y minimizar los problemas que esta configuración presenta, en especial la tendencia a la fractura de la armadura longitudinal.

### 4.2 Objetivos Específicos

-Diseñar estribos que de forma eficiente prevengan pandeo en toda dirección de manera de reducir la tendencia a la fractura del refuerzo longitudinal, considerando conclusiones de diseños de otros memoristas.

-Construir y ensayar elementos de hormigón armado con el diseño de estribo propuesto en el laboratorio del Departamento de Obras Civiles de la USM.

-Analizar curvar de histéresis y comparar resultados con otros diseños de memoristas anteriores.

## 5 Fabricación e instrumentación de especímenes

### 5.1 Diseño de propuesta de estribo

Con el fin de impedir el pandeo en las barras longitudinales como sugiere Rojas H. (2022), además incorporar los buenos resultados conseguidos con el diseño de estribos en espiral rectangular realizado por Azimi et. al. (2015) y el desempeño obtenido por el diseño complementario realizado por Maldonado (2023) y Reyes (2023). Se propone un diseño que contempla una inclinación en dos planos respecto al estribo convencional de  $90^\circ$ , lo cual se puede ver en la Figura 18.



**Figura 18: Dimensiones en mm. de estribo inclinado en dos planos**

Respecto a las dimensiones se buscó considerar los  $45^\circ$  del alto de la viga dando un largo de 15.6 [cm], por otro lado también se quería asegurar un espaciamiento de 3 [cm] entre cada estribo lo cual se logra incluyendo 6,2 [cm] en el ancho del estribo, donde además se considera un traslapado soldado de al menos 2,5 [cm]. La funcionalidad de este tipo de diseño, al igual que el de Maldonado (2023) y Reyes (2023), es

impedir el pandeo de los refuerzos longitudinales en los dos planos donde podría suceder, pero esto se logra a la vez reduciendo la cantidad de acero utilizado.

Respecto a la distribución en la viga se realizaron disposiciones preliminares llegando finalmente a la presente en la Figura 19 y la Figura 20. En las cuales se muestra con colores diferentes una muestra sistemática para la instalación de los estribos la cual es una secuencia en sentido de la viga (color verde) del lado superior de la viga y su espejo (color blanco) en el mismo sentido pero desde el lado inferior.

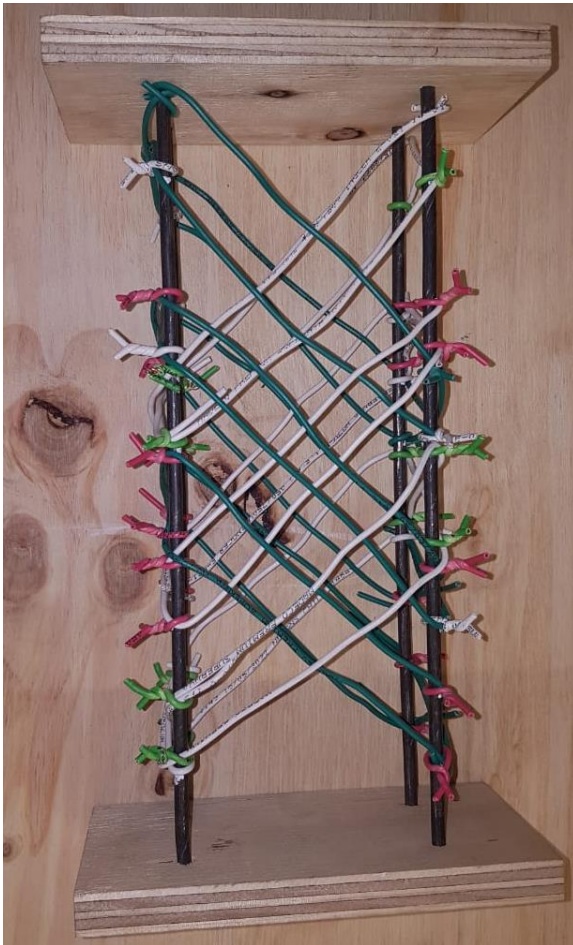


**Figura 19: Disposición preliminar, Vista lateral**

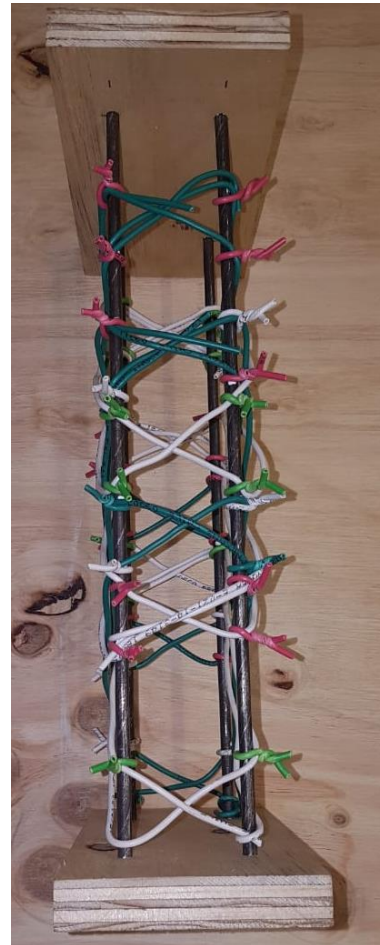


**Figura 20: Disposición preliminar, Vista superior**

## **5.2 Características de Materiales**

### **5.2.1 Hormigón**

Ya que se quiere lograr una condición similar a la de otros memoristas, se busca una resistencia a la compresión cercana a  $400 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$ , para lo cual se preparó la siguiente dosificación, que considera las dos probetas más tres cilíndricos de  $15 \text{ [cm]}$  de diámetro y  $30 \text{ [cm]}$  de altura.

**Tabla 3: Dosificaciones Hormigón**

| Material               | Especificación | Cantidad Total |
|------------------------|----------------|----------------|
| Hormigón Predosificado | H-20           | 173 [kg]       |
| Cemento Especial       | Melón Especial | 5 [kg]         |
| Plastificante          | Plastisol-R    | 130 [kg]       |
| Agua                   | -              | 15.5 [L]       |

Estas dosificaciones se basan en lo realizado en trabajos previos (Figueroa, 2019; Pino, 2017). Mayores detalles aparecen en la memoria de Maldonado (2023).

Previo al ensayo de los especímenes construidos, se realizaron los ensayos de compresión cilíndrica, esto en base a la norma NCh 1037 y con la ayuda del personal del LEMCO, donde se obtuvieron las siguientes resistencias.

**Tabla 4: Resistencias a compresión de probetas cilíndricas**

| Espécimen | $f'_c$ [kgf/cm <sup>2</sup> ] |
|-----------|-------------------------------|
| AB 1      | 441.7                         |
| AB 2      | 451.0                         |
| AB 3      | 465.0                         |

### 5.2.2 Acero

Para la realización del refuerzo longitudinal de la columna y la viga se utilizaron barras de acero grado A630-420H con un diámetro de 8 [mm]. Para los estribos de la columna se utilizaron barras AT56-50H con diámetro de 4.2 [mm], mientras que para la viga se usó acero inoxidable AISI-304 con diámetro de 3.175 [mm]. Se utilizó alambre galvanizado N° 22 para las amarras. Las soldaduras en el acero inoxidable se realizaron con el proceso MIG con electrodo Dual Shield 7100 Ultra de 1.2 mm de diámetro.

A continuación se presenta los resultados del ensayo a tracción del acero longitudinal de 8 [mm] A630-420H.

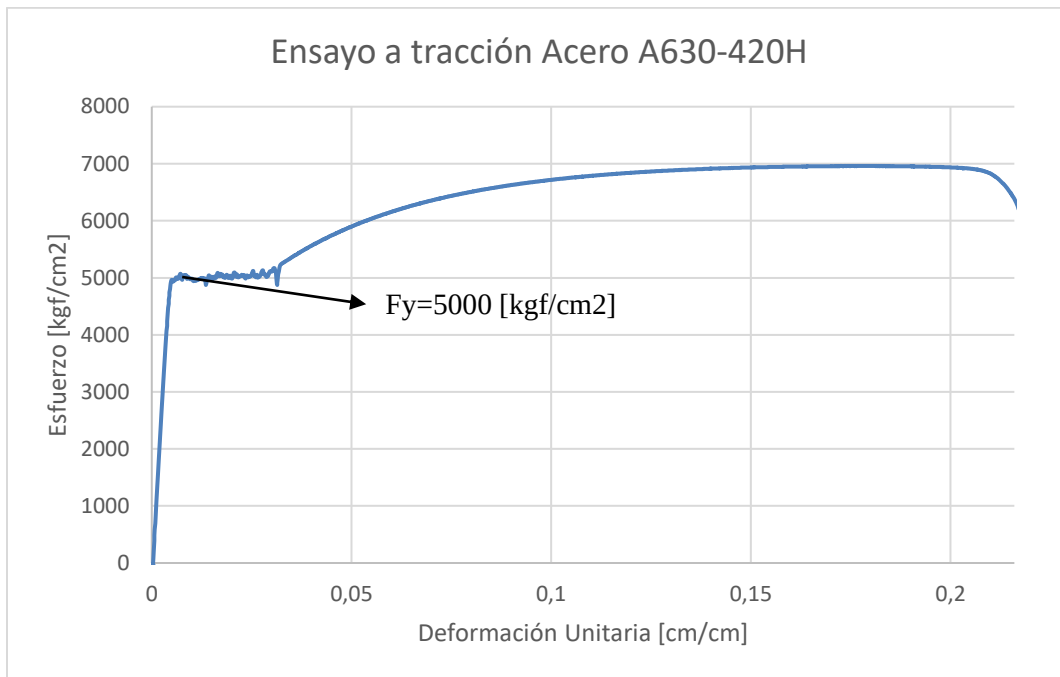


**Figura 21: Curva ensayo a tracción Acero A630-420H**

Por otro lado la resistencia del acero inoxidable también se ensayó a tracción. Pero como se muestra en la figura el valor del esfuerzo de fluencia fue calculado con una deformación remanente de 0.002 según la NCh. 204. En la sección de anexos se pueden ver los demás resultados para los aceros inoxidables.

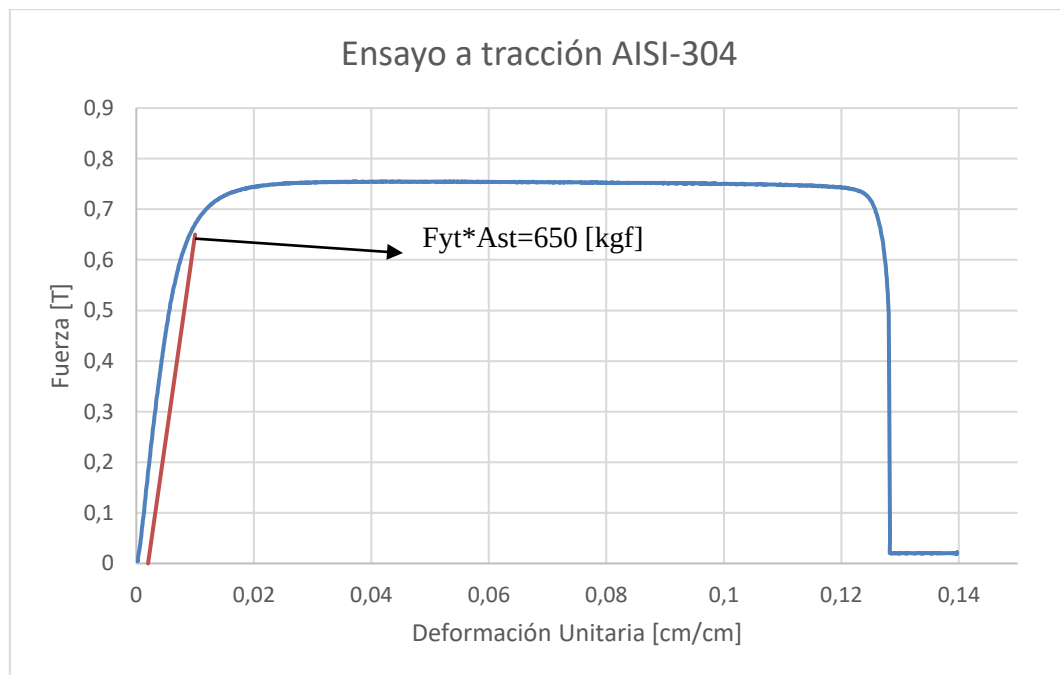


**Figura 22: Curva ensayo a tracción AISI-304**

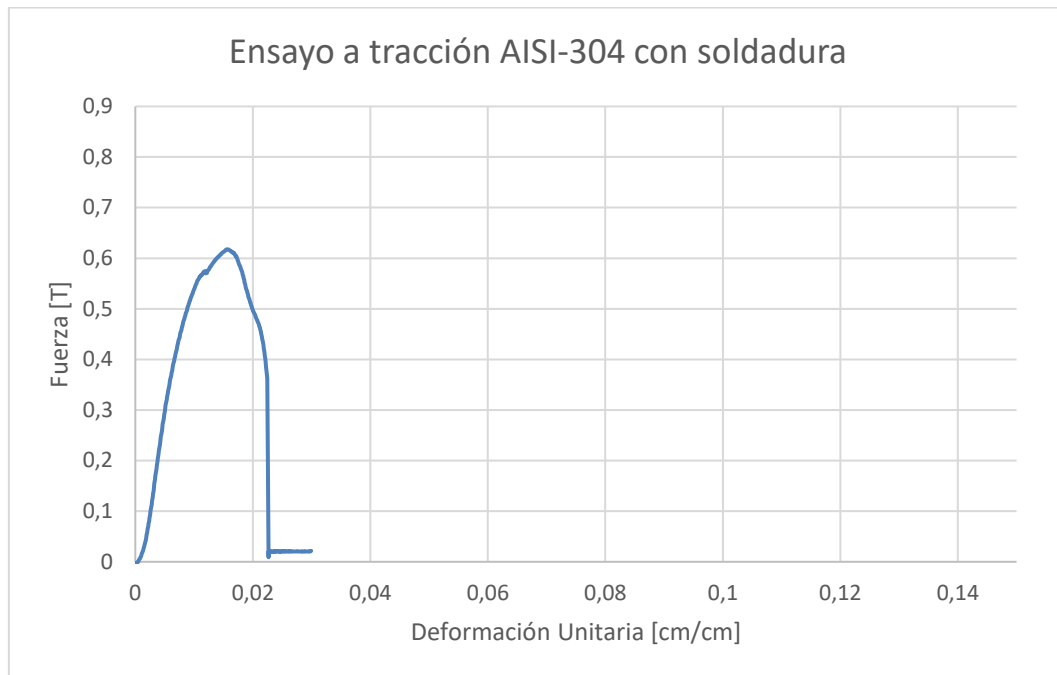


**Figura 23: Curva ensayo a tracción AISI-304 soldado**

### 5.3 Especificaciones Probeta

La construcción de las dos probetas fue realizada en base a las dimensiones sugeridas por la línea de investigación, lo cual se basa en un corte de viga cercano a una sección de columna. Esto se realizó con tal de establecer parámetros similares y luego tener resultados comparables. Las dimensiones de la probeta se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 5: Dimensiones Probeta**

| Elemento | Dimensión [cm] |
|----------|----------------|
| Columna  | 30x50x11.1     |
| Viga     | 50x13.5x7.5    |

#### 5.3.1 Especificaciones Columna

Se utilizaron barras A630-420H de 8 [mm] con un largo de 47 [cm] para el refuerzo longitudinal dejando espacio para el recubrimiento de 1.5 [cm] y estribos AT56-50H de 4.2 [mm] cada 3 [cm] con gancho sísmico de 3.5 [cm] lo cual se detalla en la Figura 24 y Figura 25.

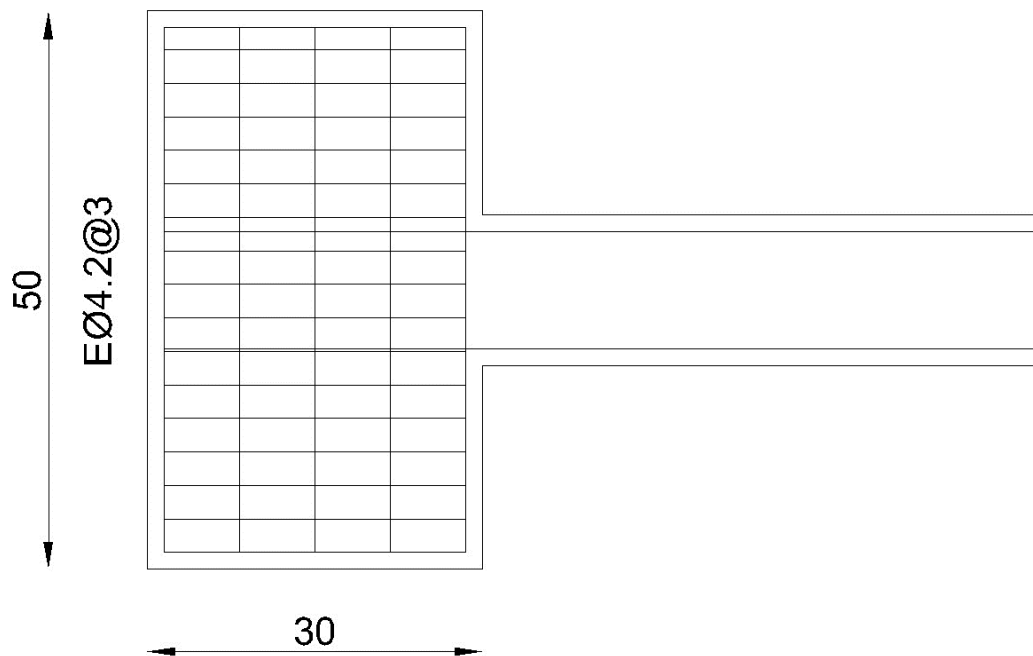


**Figura 24: Detalle armadura columna**

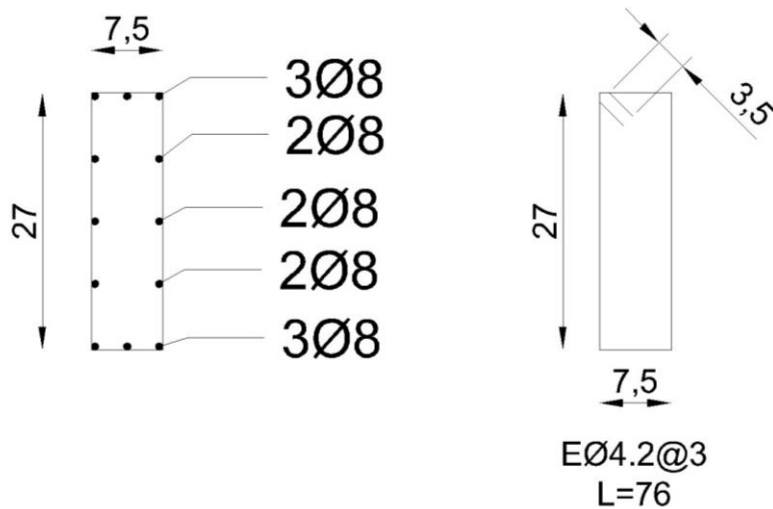


**Figura 25: Detalle estribos en columna**

Cabe notar que se utilizaron estribos abiertos y trabas en la zona central de la columna notada en la Figura 26 , para facilitar la correcta colocación de la viga. Detalles de estos estribos centrales se muestran en la Figura 27.

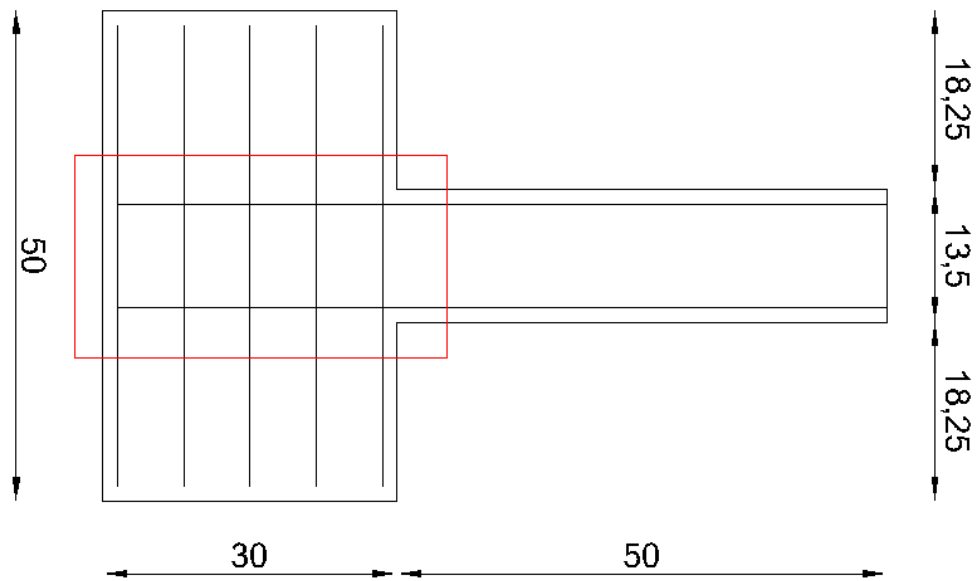


Figura 26: Zona con estribos abiertos

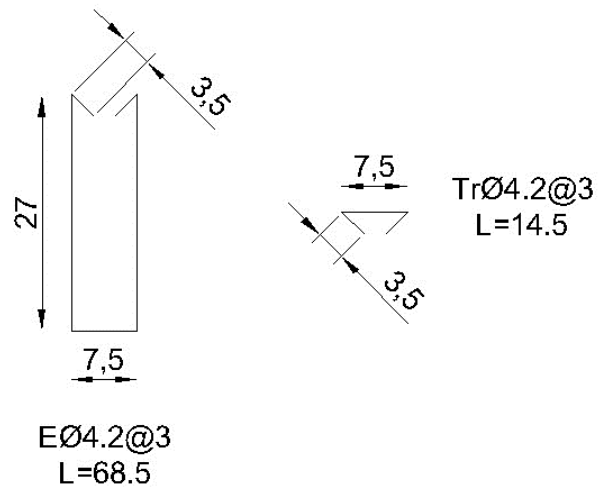


Figura 27: Detalle estribos abiertos y trabas

### 5.3.2 Especificaciones Viga

Se utilizó acero A630-420H para el refuerzo longitudinal con un largo de 80 [cm] que se extienden por los 30 [cm] de columna y 50 [cm] de la viga, estos refuerzos tendrán en la viga una disposición de 2Ø8 superior y 2Ø8 inferior de la viga como se muestra en la Figura 28.

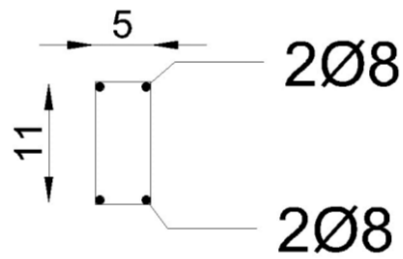


**Figura 28: Detalle perfil de la viga**

Por parte de los estribos se realiza la disposición de estos cada 3 [cm], dejando un recubrimiento de 1,25 [cm] y se le da comienzo en el borde de la columna como se muestra en la Figura 29 y Figura 30.

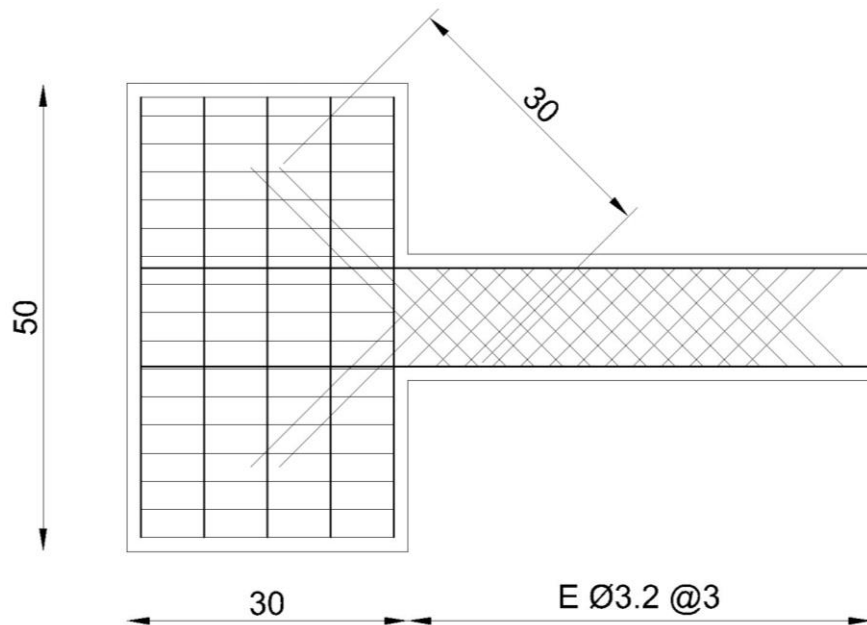


**Figura 29: Vista lateral disposición estribos**

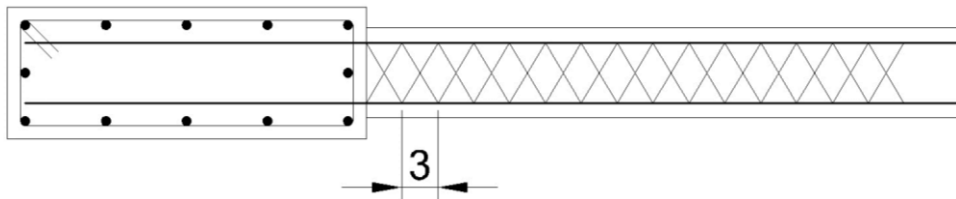


**Figura 30: Vista superior disposición estribos**

## 5.4 Verificación diseño

Si bien el diseño se basa en probetas que cumplieran con la ACI 318-14, se hace necesaria una revisión específica para los estribos empleados, ya que estos difieren del estándar utilizado en memorias anteriores en la UTFSM. Por ello, se lleva a cabo una verificación enfocada en su mayor parte en los estribos y su capacidad al corte, utilizando como referencia la ACI 318-19.

Para simplificaciones se tomarán los siguientes valores.

**Tabla 6: Propiedades mecánicas probeta**

| Propiedad | Valor                   | Unidad              |
|-----------|-------------------------|---------------------|
| $f'_c$    | $\overline{f'_c} = 450$ | kgf/cm <sup>2</sup> |
| $f_y$     | 5000                    | kgf/cm <sup>2</sup> |
| $f_{yt}$  | 8200                    | kgf/cm <sup>2</sup> |

**Tabla 7: Geometría viga**

| Dimensión  | Valor | Unidad |
|------------|-------|--------|
| Ancho      | 7,5   | cm     |
| Alto       | 13,5  | cm     |
| Largo viga | 50    | cm     |

### 5.4.1 Refuerzo longitudinal

En búsqueda de prevenir una falla frágil por una baja cuantía del refuerzo longitudinal, se debe realizar el cálculo de las disposiciones mínimas de refuerzo de 9.6.1.2.

En donde se elige el mayor entre a) y b):

$$a) \frac{0,8 \cdot \sqrt{f'_c}}{f_y} \cdot b \cdot d \leq A_{s,min}$$

$$b) \frac{14}{f_y} \cdot b \cdot d \leq A_{s,min}$$

De aquí se obtiene que a) tiene un valor de 0,311 [cm<sup>2</sup>] mientras que b) tiene un valor de 0,257 [cm<sup>2</sup>]. Por lo que el diseño se realiza con un  $A_s$  mínimo de 0,311 [cm<sup>2</sup>].

Comparando con el refuerzo longitudinal asignado de: 2ø8, se tiene lo siguiente:

$$A_s = 2 \cdot \frac{\pi}{4} (0,8)^2 = 2,01 \text{ cm}^2 > A_{s,min}$$

#### 5.4.2 Espaciamiento Mínimo y Máximo

Para el cálculo del refuerzo transversal mínimo, primero es necesario confirmar que los tres centímetros de espaciado entre estribos está dentro de los parámetros de la ACI, por esto se verifica con las disposiciones de 25.2 para el mínimo y 9.7.6.2.2 para el máximo.

Para el máximo según el reglamento se debe calcular en base al  $V_s$  requerido que para este caso sería el siguiente valor:

$$V_{s\ req.} = 1,1\sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d = 2,14 [Tf]$$

Considerando que históricamente los esfuerzos de corte han estado bajo las 2 [Tf] se asume este caso. Para este valor se obtiene que:

$$S_{max} = d/2 = 6,124 [cm]$$

Para el  $S_{min}$  se debe seguir las disposiciones, donde se elige el mayor de 3 valores limites:

- $d_b = 0,8 [cm]$
- $25 [mm]$
- $\left(\frac{4}{3}\right) * d_{agg} = 1,06 [cm]$

De aquí se tiene que el  $S_{min}$  es de 25[mm] por lo que el espaciado de 3[cm] cumple con el rango permitido por la ACI.

#### 5.4.3 Refuerzo transversal

Para realizar esta sección se hace referencia a las disposiciones de la ACI en 9.6.3.4.

En donde se elige el valor máximo entre a) y b):

$$\begin{aligned} a) \frac{A_{v,min}}{s} &\geq 0,2\sqrt{f'_c} \cdot \frac{b}{f_{yt}} \\ b) \frac{A_{v,min}}{s} &\geq 3,5 \frac{b}{f_{yt}} \end{aligned}$$

De aquí se obtiene que a) tiene un valor de 0,015 [cm<sup>2</sup>] mientras que b) tiene un valor de 0,012 [cm<sup>2</sup>]. Por lo que el diseño se realiza con un  $\frac{A_{v,min}}{s}$  de 0,015 [cm<sup>2</sup>].

Comparando con los refuerzos transversales dispuestos se tienen los siguientes valores:

$$A_{st.unit.} = \frac{\pi}{4} (0,3175)^2 = 0,079 [cm^2]$$

$$S = 3 [cm]$$

$$N^{\circ} \text{ barras dentro de espaciado} = 16$$

$$\frac{A_v}{s} = 16 * \frac{0,079}{3} = 0,42 > 0,015 = \frac{A_{v,min}}{s} [cm^2]$$

#### 5.4.4 Resistencia corte

Considerando la capacidad de corte del hormigón en base a la disposición de 22.5.5.1 se tiene:

$$V_c = 0,53 \sqrt{f'_c} * b * d = 1,032 [Tf]$$

Donde se consideró  $N_u=0$  y un valor de  $\lambda=1$

Continuando con la verificación de diseño, se realiza la capacidad de resistencia al corte del refuerzo ( $V_s$ ), esto siguiendo las disposiciones de 22.5.8.5.4, considerando que los estribos poseen características diferentes a los estribos ortogonales. Dentro de los valores a utilizar se tiene:

**Tabla 8: Resumen valores utilizados para 22.5.8.5.4**

| Propiedad           | Valor | Unidad          |
|---------------------|-------|-----------------|
| N° de barras        | 2     | -               |
| Angulo ( $\alpha$ ) | 45    | °               |
| $A_{st.unit.}$      | 0,079 | cm <sup>2</sup> |
| $A_v$               | 0,158 | cm <sup>2</sup> |

Donde además se tiene:

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} (\sen \alpha + \cos \alpha) d}{s}$$
$$V_s = 7,507 [Tf]$$

Considerando ambas componentes se tiene:

$$V_n = V_c + V_s = 8,53 [Tf]$$

Cabe notar que la verificación por el  $V_{smax} = 2.2 \sqrt{f'_c} b d$  no se aplica debido a la presencia de estribos que soportan compresión, no así para estribos en 90° donde si es aplicable.

#### 5.4.5 Resistencia a flexión

El cálculo se realiza en base a la siguiente formula:

$$M_n = 0,85 f'_c a b \left( d - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y (d - d')$$

Donde:

$$a = \frac{A_s f_s - A'_s f'_s}{0,85 f'_c b}$$

$A_s$ =Area de acero en tracción

$A'_s$ =Area de acero en compresión

$d=h-d'$

$d'$ = Recubrimiento

$b$ =Ancho viga

$h$ =Alto viga

Reemplazando los valores da como resistencia a flexión  $M_n=0,57 [T-m]$ .

#### 5.4.6 Cálculo para vigas en pórticos especiales

Primero se debe calcular la fuerza cortante de diseño  $V_e$ , para esto se siguen los cálculos realizados por Rojas (2009) y la formulación que no tiene cambios respecto a la versión de la ACI actual, la que se presenta a continuación.

$$V_e = V_u = \frac{M_{pr}}{L}$$

Con la única variación siendo que se toma el valor real del  $f_y$  y un  $L$  de 40 [cm] para el cálculo del  $M_{pr}$ , se tiene un valor de 0,85 [T-m]. A si mismo se tiene el valor de  $V_e$  igual a 2,12 [Tf].

Con este valor y además un  $P_u=0$  se cumplen los requisitos del apartado 18.6.5.2 de la ACI para realizar un cálculo de la capacidad de resistencia del refuerzo transversal con  $V_c=0$ . De esta forma el valor de resistencia al corte en los puntos críticos de la viga resulta ser de 7,5 [Tf].

#### 5.4.7 Anclaje

Para el cálculo de la longitud de anclaje se verifica con el apartado 25.4.2.3 de la ACI, donde se considera el caso con barras menores al N° 19 y con espaciamiento libre entre barras de al menos  $1d_b$ . Se tiene por lo tanto la siguiente formula:

$$l_d = \left( \frac{f_y \psi_t \psi_e \psi_g}{6.6 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b$$

Siguiendo el apartado 25.4.2.5 de la ACI se tienen los siguientes valores:

**Tabla 9: Factores para 25.4.2.3**

| Factores                           | Valor |
|------------------------------------|-------|
| $\psi_t$ (Ubicación: Otra)         | 1     |
| $\psi_e$ (Epóxico: No)             | 1     |
| $\psi_g$ (Grado del refuerzo: 420) | 1     |
| $\lambda$ (Concreto peso normal)   | 1     |

Considerando el  $d_b=8$  [mm] se tiene que  $l_d=28,56$  [cm]. Dado que en la probeta se le da un  $l_d=30$  [cm] cumple los requisitos.

#### 5.5 Moldaje

Para realizar el moldaje se siguieron las instrucciones descritas por Maldonado (2023) en cuanto a los materiales utilizados y la forma de usarlos. Parte del moldaje se ve en la Figura 31 y la Figura 32. Esto se hizo con el objetivo de tener probetas similares y poder realizar comparaciones en los resultados obtenidos. Además se tomó en cuenta el consejo de utilizar desmoldante en vez de cinta de embalaje transparente, lo cual dio buenos resultados e hizo fácil y rápido el trabajo de quitar los moldajes luego del hormigonado.



**Figura 31: Moldaje Espécimen Finalizado**



**Figura 32: Moldaje con refuerzo y desmoldante aplicado**

## 5.6 Hormigonado de probetas.

Este proceso de hormigonado se realizó con la ayuda del personal del LEMCO y diversos equipos, tales como una betonera y mesa vibradora. Parte del proceso se ve en las siguientes imágenes.



**Figura 33: Probeta hormigonada**



**Figura 34: Probeta sin moldajes**

A los 14 días después del hormigonado se retiró el moldaje. No se observaron nidos ni otros problemas de este tipo, a excepción de la imperfección superficial que se ve en la Figura 34; lo cual se puede mejorar añadiendo más desmoldante en esa zona particular o reduciendo el tamaño de la tabla blanca central de la Figura 33 en futuros ensayos.

## 5.7 Montaje e Instrumentación

### 5.7.1 Plan de carga

Este se basará en el plan de carga estándar realizado por la ACI-374, que tiene valores que van desde los 5 [mm] hasta los 35 [mm] de desplazamiento tal como se ve en la Figura 35. Previo a esta memoria también se probó con algunas variaciones en el plan de carga, sin mostrar cambios en el comportamiento en la respuesta de las probetas, algo que se detalla en la memoria de Maldonado (2023) y Reyes (2023).

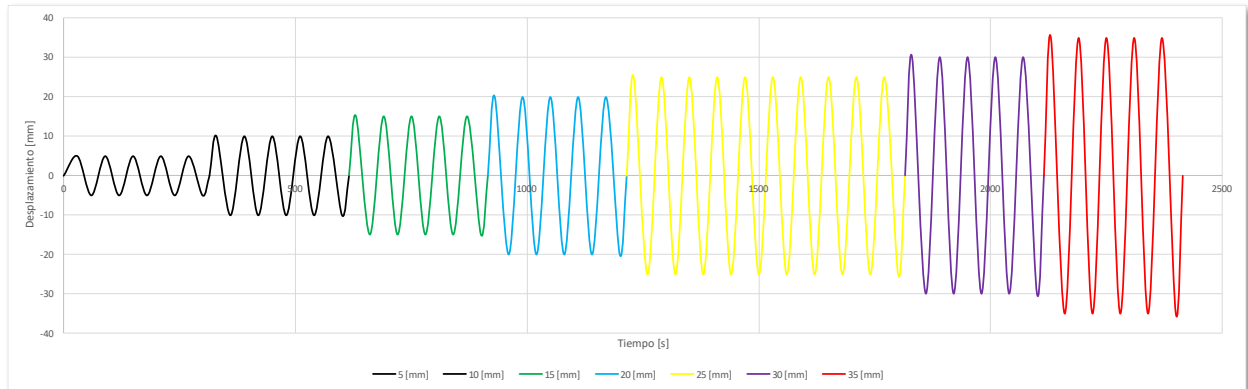


**Figura 35: Desplazamientos del ensayo cíclico.**

### 5.7.2 Montaje

Para el ensayo se utilizó el actuador MTS-244 de la mesa sísmica del laboratorio del LEMCO del Departamento de Obras Civiles. En la Figura 36 se muestra un esquema del montaje del ensayo.

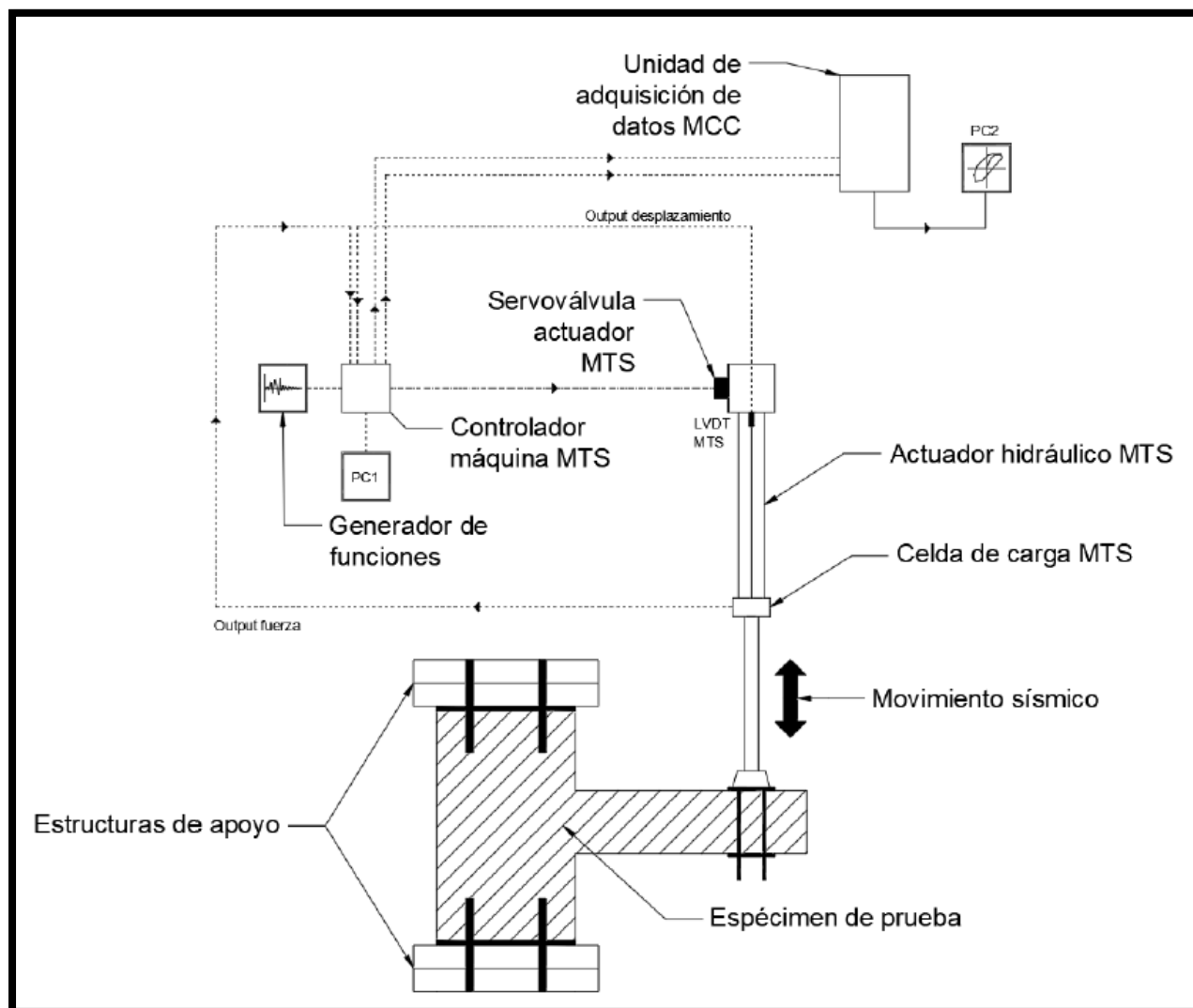


**Figura 36: Diagrama del sistema de ensayo** (Maldonado, 2023)

Por otro lado, la probeta estará lista para ensayar después de llevar a cabo los procedimientos detallados por Maldonado (2023), como el desplazar el actuador de la mesa, apernar la probeta y otras tareas necesarias para su instalación. Con la diferencia de que en esta memoria se utilizó un sistema de riel con perfil C apernado a la superficie como se ve en la Figura 37 y también se conectó a la viga un carro que va por este riel con el objetivo de evitar torsiones de la viga.



**Figura 37: Sistema de riel en probeta ALEJ-1**

En la sección de anexos se muestra un registro fotográfico con algunas de las piezas utilizadas. Además se muestra en la Figura 38 la disposición de los sistemas de cámaras utilizados y la probeta ya instalada junto al actuador sujetado a la punta de la viga.

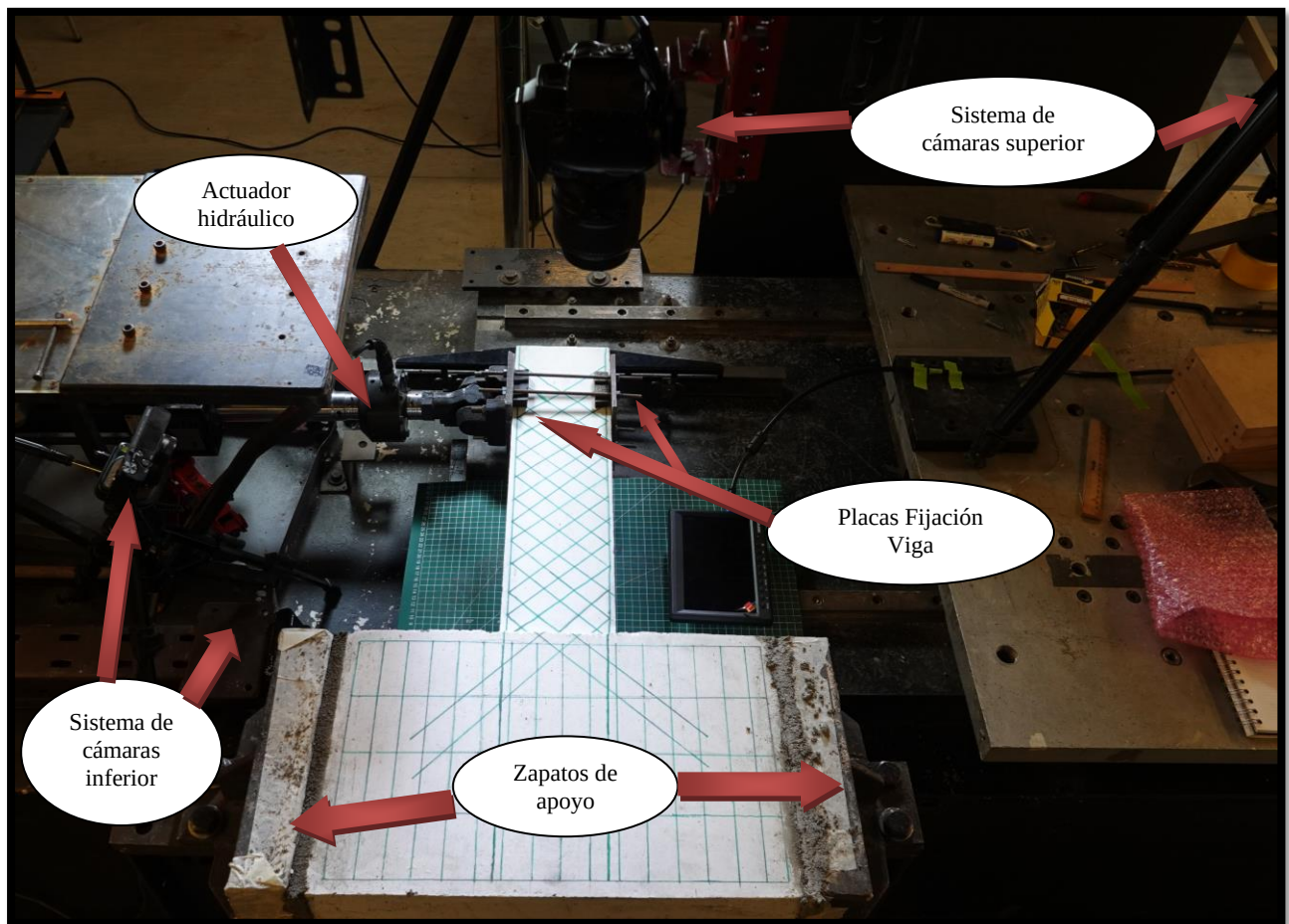


**Figura 38: Montaje de probeta en Sistema de ensayo**

## 6 Resultados

### 6.1 Aspectos generales

Primero se presentan los resultados de las dos probetas en forma de curvas de histéresis, registro fotográfico de momentos importantes del ensayo y los comentarios respectivos. Le sigue una comparación con diseños previos en la línea de investigación, tanto en cantidad de material como en resultados obtenidos.

### 6.2 Probeta ALEJ-1

#### 6.2.1 Curva Histéresis

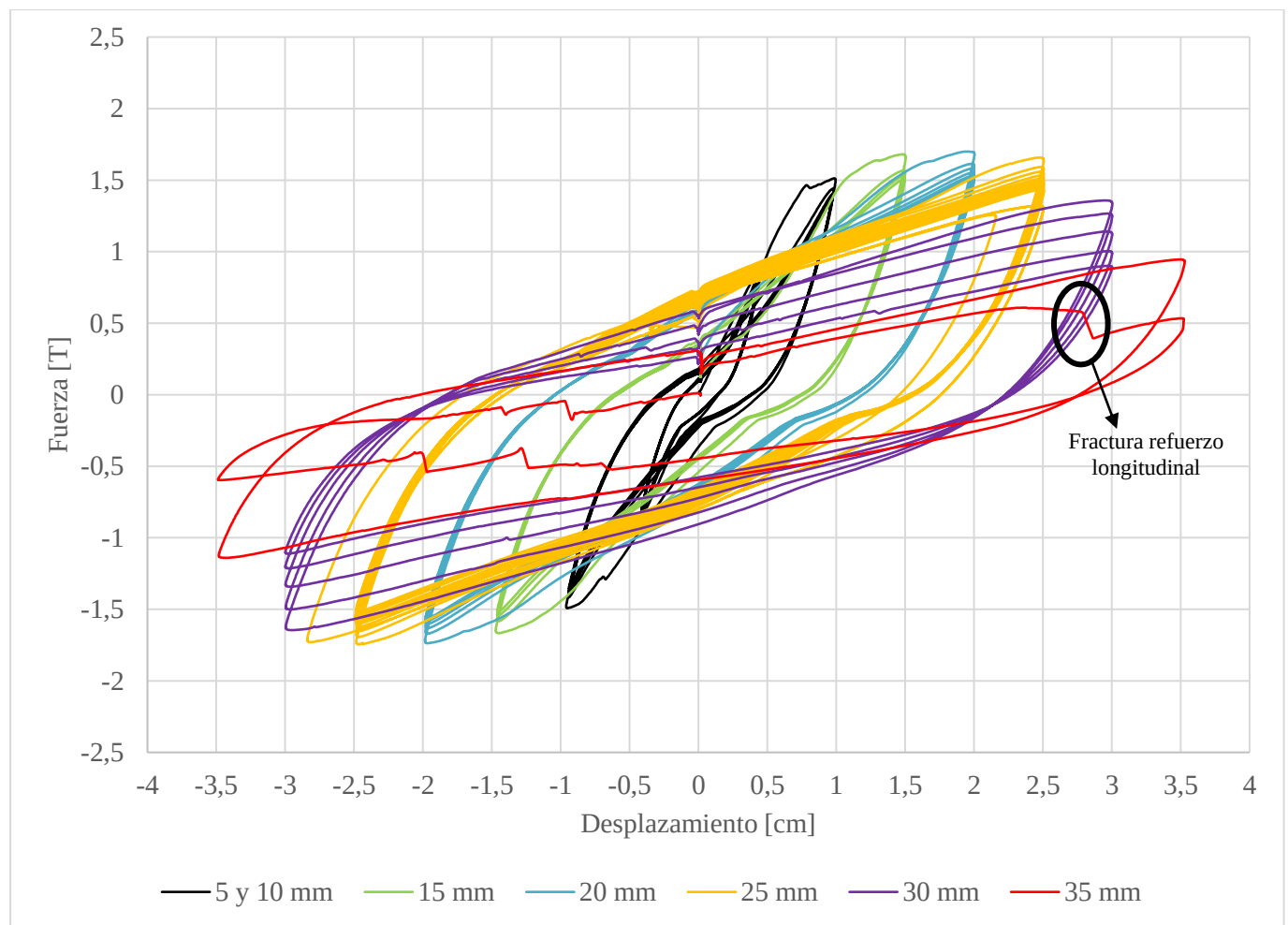


**Figura 39: Curva de histéresis probeta ALEJ-1**

### 6.2.2 Registro Fotográfico ALEJ-1 (Desplazamiento máximo)

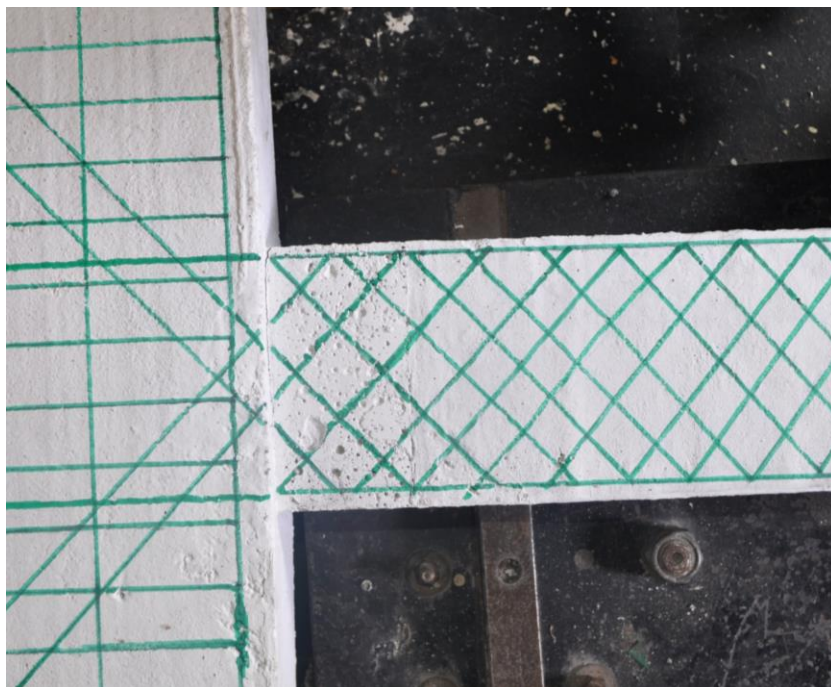


**Figura 40: Quinto ciclo de 10 [mm] - ALEJ 1**

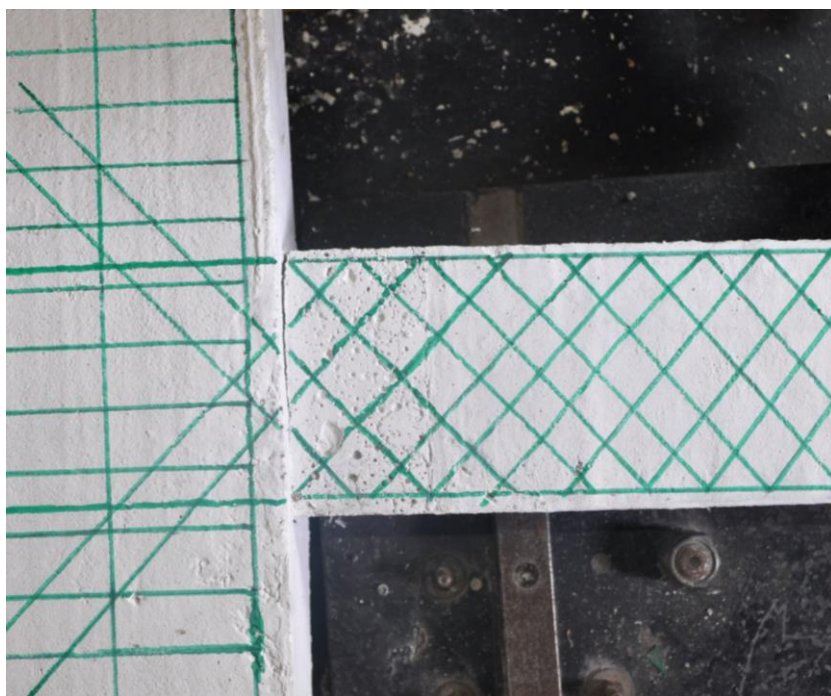


**Figura 41: Quinto ciclo de 15 [mm] -ALEJ 1**

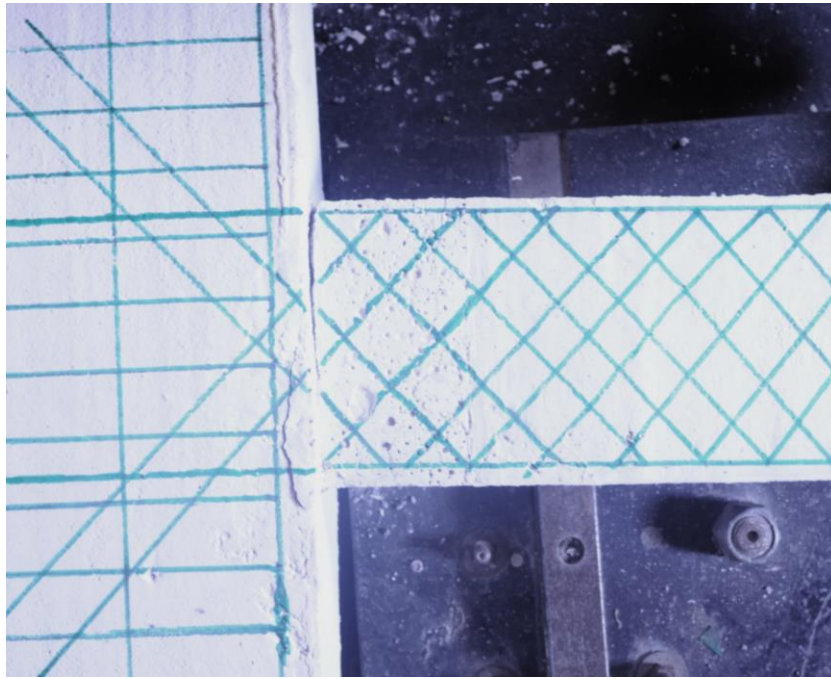


**Figura 42: Quinto ciclo de 20 [mm] - ALEJ 1**

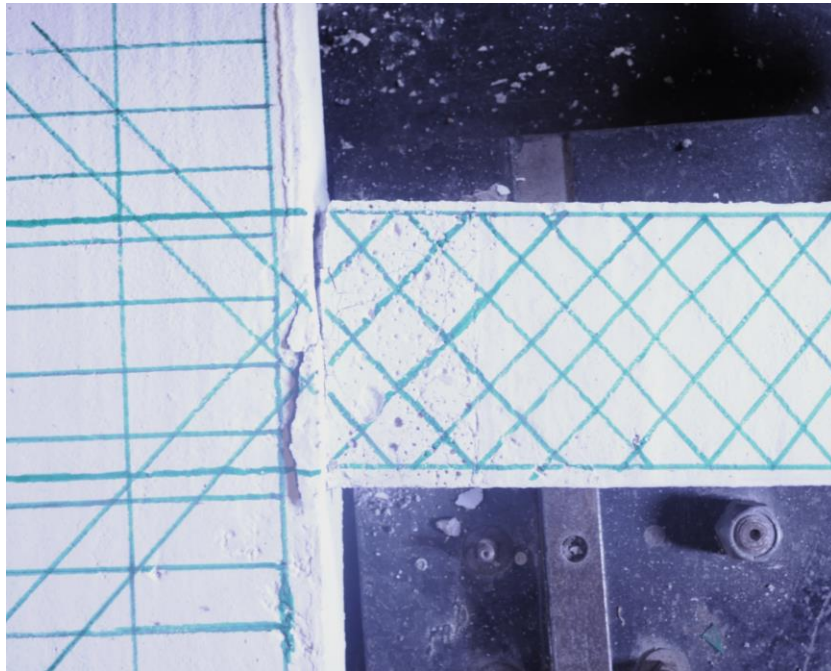


**Figura 43: Décimo ciclo de 25 [mm] - ALEJ 1**

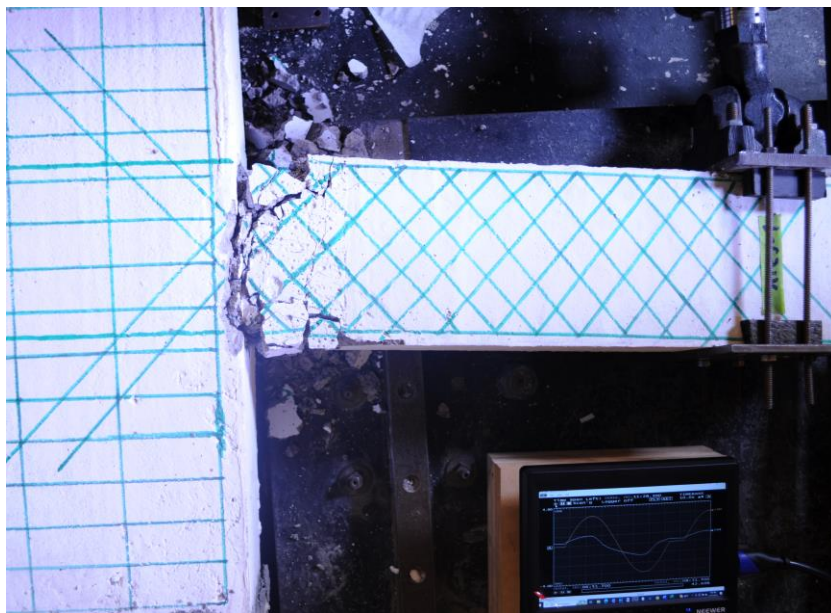


**Figura 44: Quinto ciclo de 30 [mm] - ALEJ 1**

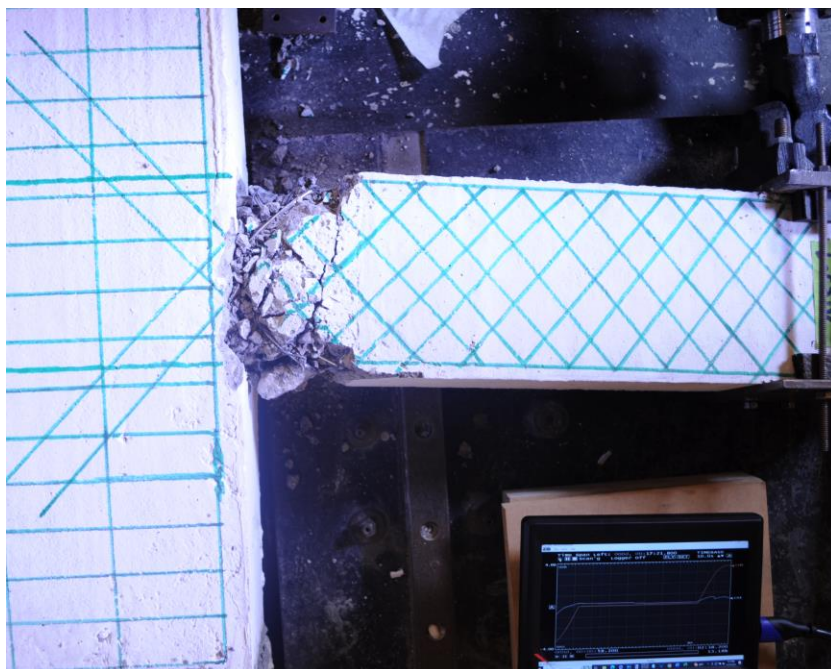


**Figura 45: Segundo ciclo de 35 [mm] - ALEJ 1**

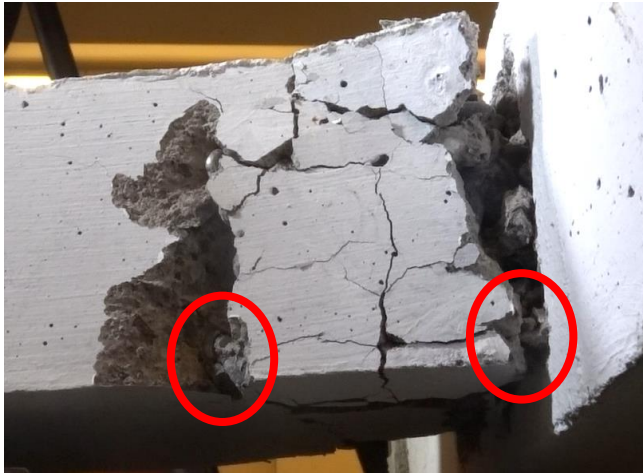


**Figura 46: Caída de recubrimiento deja expuesto a refuerzo longitudinal. 3° ciclo de 30 [mm]**

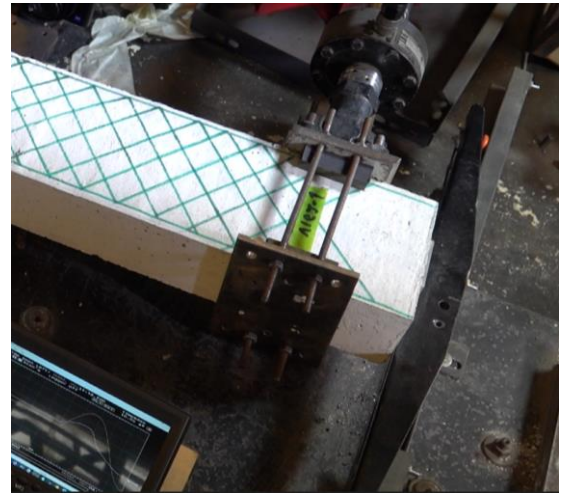


**Figura 47: Lado negativo presenta salida del carro con torsión desde ciclos de 30 [mm]**

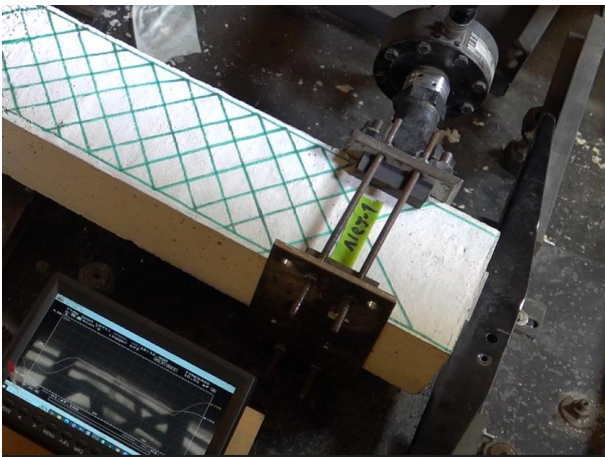


**Figura 48: Lado positivo no presenta salida del carro ni torsión en ciclos de 30 [mm]**

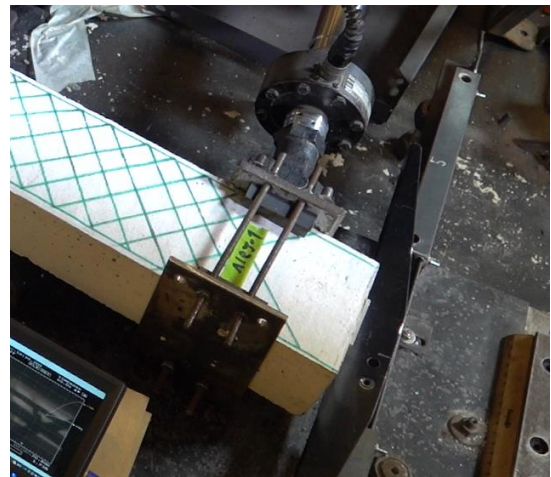


**Figura 49: Lado positivo no presenta salida del carro ni torsión en ciclos de 35 [mm]**



**Figura 50: Máximo pandeo refuerzo longitudinal, primer ciclo de 35 [mm]**



**Figura 51: Fractura del refuerzo longitudinal, comienzo de segundo ciclo de 35 [mm]**

### 6.2.3 Comentarios

**Tabla 10: Bitácora ensayo probeta ALEJ-1**

| Desplazamiento [mm] | Eventos                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5                   | Se realizaron pruebas de ajuste del actuador antes de comenzar con los ensayos. Pequeña fisura en la base de la viga (unión viga-columna).                                                                                                                                                                     |
| 10                  | Aparición de pequeñas grietas equiespaciadas de flexión en la cara superior de la viga. Véase Figura 40                                                                                                                                                                                                        |
| 15                  | Fisura en unión viga-columna se acentúa. Véase Figura 41<br>Desprendimiento de material de zona unión viga-columna.                                                                                                                                                                                            |
| 20                  | Grietas de flexión más gruesas y presentes en todas las caras de la viga. Véase Figura 42                                                                                                                                                                                                                      |
| 25                  | Junto a la aparición de grietas entre las de flexión se cae aún más recubrimiento y se comienzan a observar los estribos. Véase Figura 43<br>Hubo caída de material del mortero, se detiene ensayo y se continuo al otro día con el relleno de este. Se comenzó el ajuste con 2 ciclos adicionales de 25 [mm]. |
| 30                  | Debido a los ciclos extras y caída de material se comienza el ensayo con un menor recubrimiento, se pueden observar los refuerzos longitudinales en la cara inferior de la viga al 3° ciclo. Véase Figura 46<br>Rueda del carro comienza a salirse del perfil C del riel al primer ciclo hacia el              |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>sector del actuador provocando torsión de la viga. Rueda hacia el lado de la ventana aún permanece dentro del riel. Véase Figura 47 y Figura 48</p> <p>Comienza a desprenderse mucho material de la viga. Véase Figura 46</p> <p>Se posiciona el carro en la posición original en cada ciclo, pero aun así se comienza a desplazar fuera del riel dentro del mismo ciclo en el que se arregla.</p> |
| 35 | <p>Se fracturó el refuerzo longitudinal al segundo ciclo y se detuvo el ensayo. La fractura sucedió en el sector superior hacia el actuador. Véase Figura 51</p>                                                                                                                                                                                                                                      |

### 6.3 Probeta ALEJ-2

#### 6.3.1 Curva Histéresis

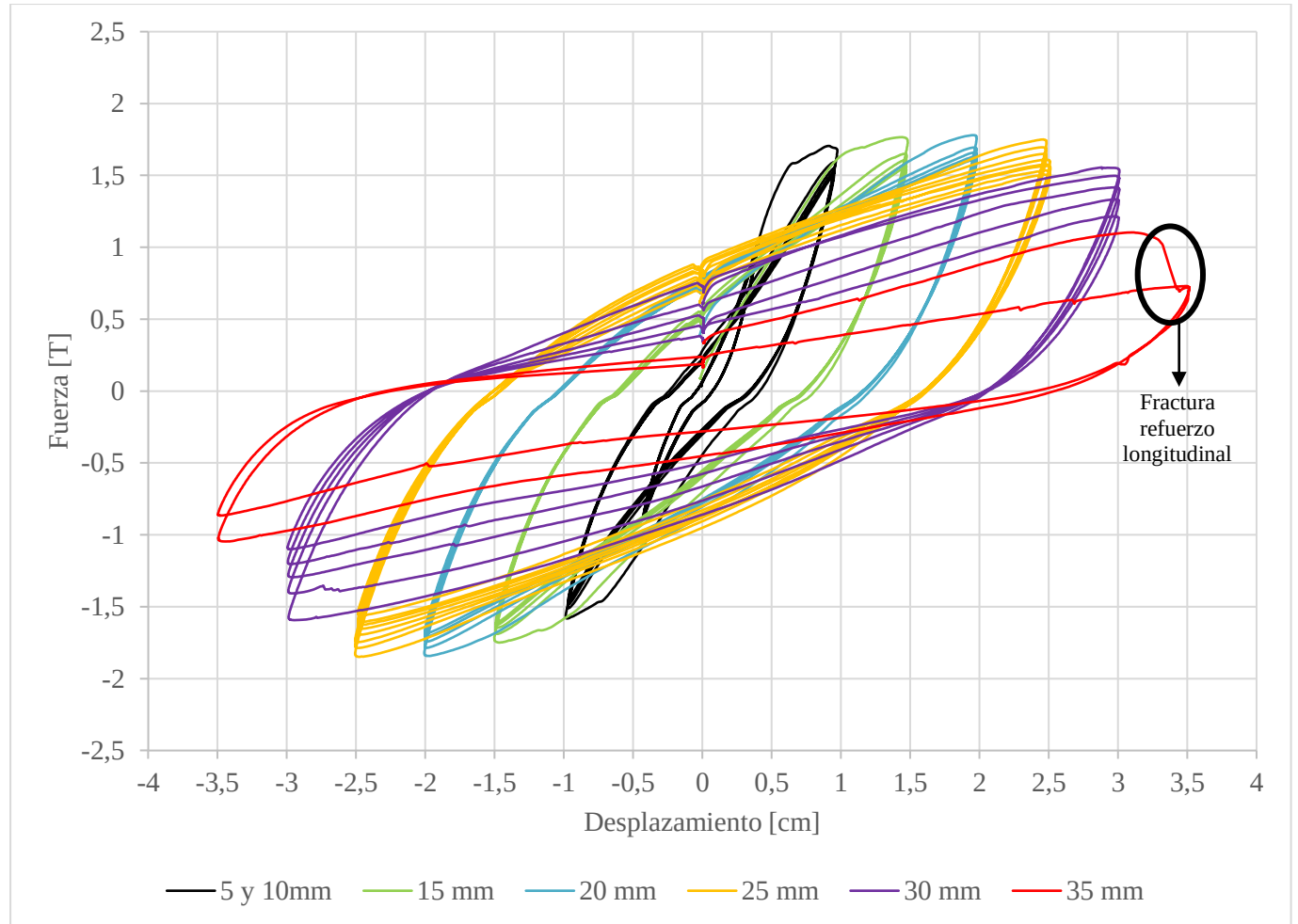


**Figura 52: Curva de histéresis probeta ALEJ-2**

### 6.3.2 Registro Fotográfico ALEJ-2 (Máximos desplazamientos)

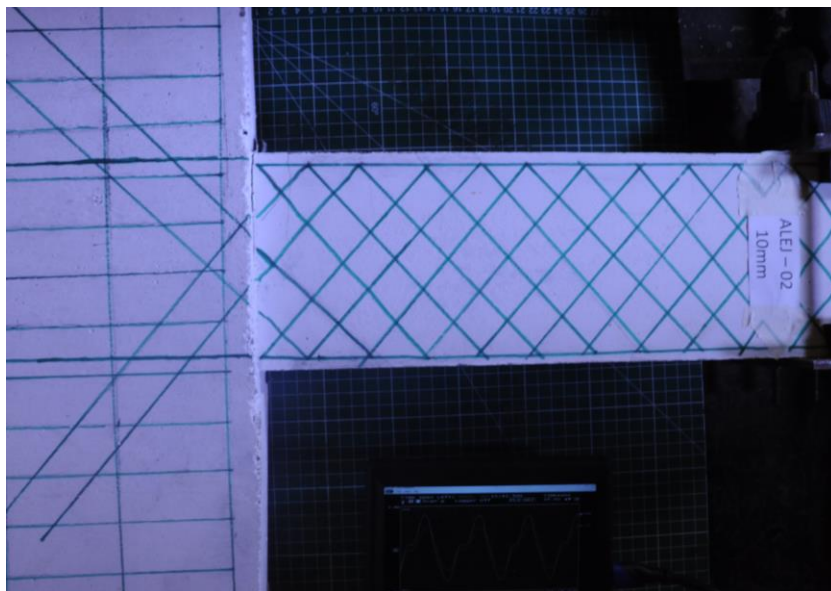


**Figura 53: Quinto ciclo de 10 [mm] - ALEJ 2**

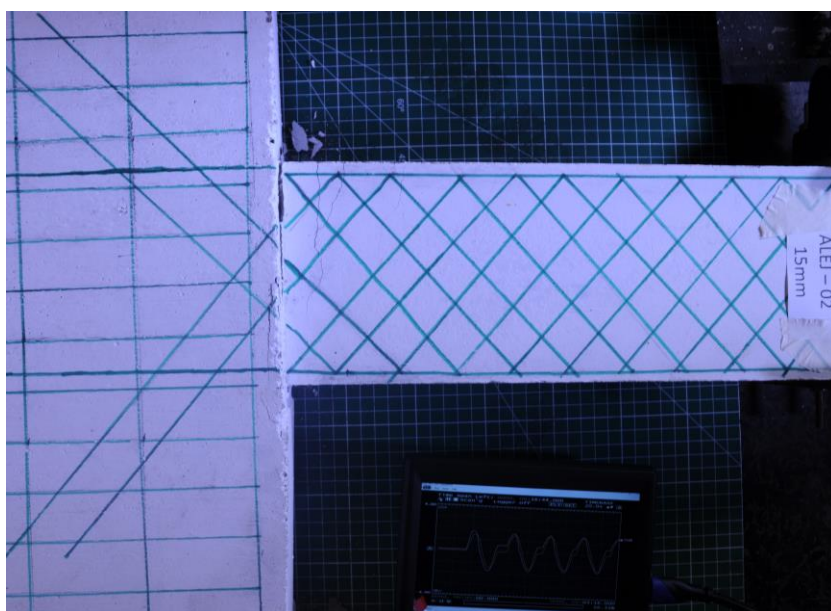


**Figura 54: Quinto ciclo de 15 [mm] - ALEJ 2**

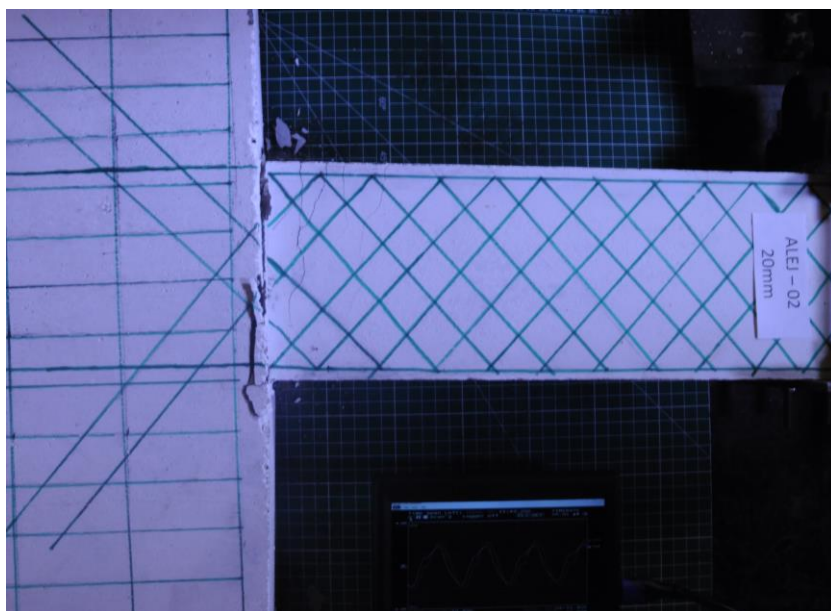


**Figura 55: Quinto ciclo de 20 [mm] - ALEJ 2**

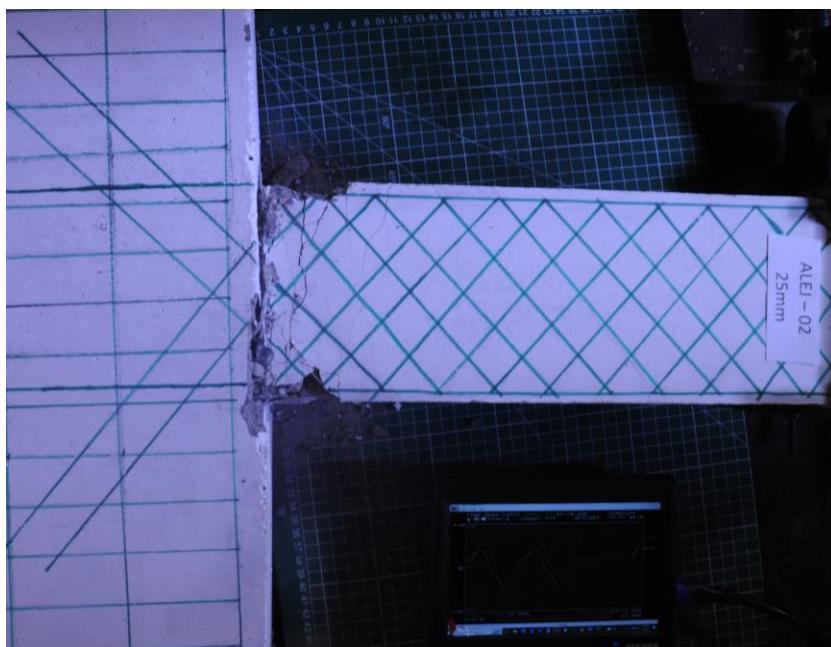


**Figura 56: Décimo ciclo de 25 [mm] - ALEJ 2**



**Figura 57: Quinto ciclo de 30 [mm] - ALEJ 2**

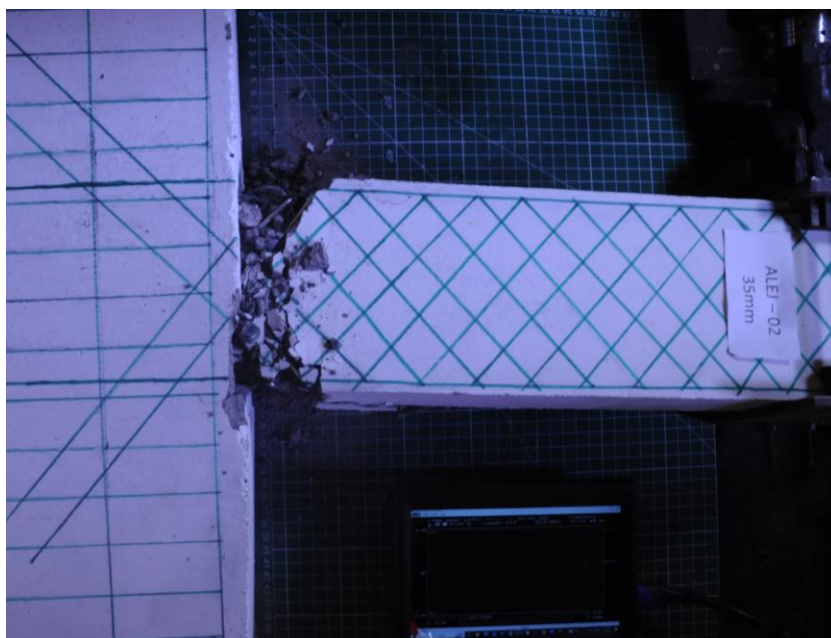


**Figura 58: Segundo ciclo de 35 [mm] - ALEJ 2**

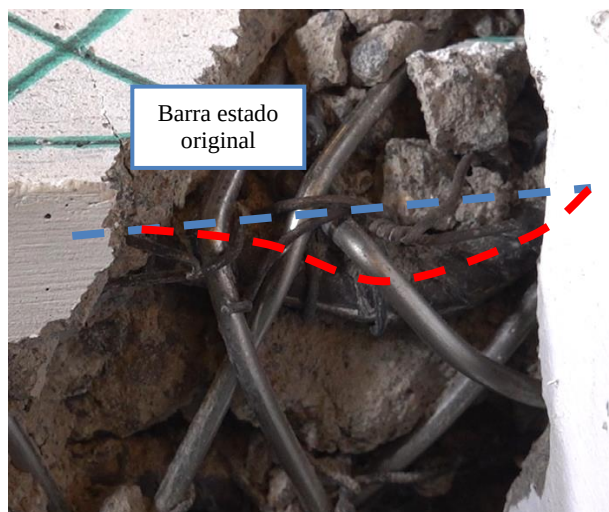


**Figura 59: Máximo pandeo refuerzo longitudinal, quinto ciclo de 30 [mm]**



**Figura 60: Fractura del refuerzo longitudinal, primer ciclo de 35 [mm]**

### 6.3.3 Comentarios

**Tabla 11: Bitácora ensayo probeta ALEJ-2**

| Desplazamiento [mm] | Eventos                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5                   | Se realizaron ajustes a las ruedas del carro para observar algún cambio en la torsión de la viga.                                                                                                                                                                                                                   |
| 10                  | Comienzan pequeñas grietas de flexión. Véase Figura 53                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 15                  | Agrietamiento en conexión viga columna.<br>Mayor amplitud de grietas de flexión. Véase Figura 54                                                                                                                                                                                                                    |
| 20                  | Mayor amplitud de grietas en conexión viga columna. Véase Figura 55                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 25                  | Desprendimiento de material en conexión viga columna. También comienza la aparición de grietas entre las de flexión en la viga. Por el conjunto de daños se alcanzan a ver los estribos por pérdida del recubrimiento. Figura 56<br>Se realizaron pruebas de ajuste preventivos, arreglos en el sistema carro-riel. |
| 30                  | Se repite la salida del carril del riel en el primer ciclo de la misma forma que en ALEJ 1.<br>Desprendimiento de material en la viga permite observar el inicio del pandeo de las barras longitudinales en el ciclo 3. Este ocurre al igual que con ALEJ-1 hacia el sector del actuador. Figura 59                 |
| 35                  | Se fractura el refuerzo longitudinal en el primer ciclo. La fractura sucede en la                                                                                                                                                                                                                                   |

|  |                                                                                                                                                                                  |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | barra superior hacia el sector del actuador, de la misma forma que en ALEJ 1. Véase Figura 60<br>Se realizó un segundo ciclo pero la torsión fue excesiva y se detuvo el ensayo. |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### 6.4 Comentarios adicionales de los ensayos

Considerando la información recabada tanto por las curvas de histéresis como por el material fotográfico se puede afirmar lo siguiente:

- Durante el ensayo, se logró reducir de manera significativa el efecto de torsión en la viga, particularmente en el lado positivo. No se observaron levantamientos ni giros anómalos hasta el final del ensayo, aunque en el lado negativo se registraron giros a partir de los ciclos de 30 [mm].
- El daño observado solo fue de grietas pequeñas de flexión hasta los 25 [mm], otras grietas más grandes se comenzaron a observar desde los 30 [mm] junto a las grietas entre las de flexión. Estos resultados indican una mejora efectiva del comportamiento de la probeta ante las sollicitaciones sísmicas.
- El diseño permitió retardar la aparición del pandeo en el refuerzo longitudinal hasta los desplazamientos de 30 y 35 [mm]. Durante estos ciclos, se observó una mayor caída del recubrimiento de hormigón y una pérdida de resistencia en la curva de histéresis. Sin embargo, en los demás ciclos, se mantuvo una constante resistencia de 1.5 [T] para ambas probetas.
- El registro fotográfico permite mostrar que las amarras no resistieron de la mejor manera los grandes desplazamientos de 30 y 35 [mm]. Este factor junto a la pérdida de recubrimiento provoca que comience a desarrollarse el efecto de pandeo en los refuerzos longitudinales y su eventual fractura.
- Cabe notar que la fractura ocurre luego de llegar al máximo pandeo en el primer ciclo de 35 [mm] en ALEJ-1 y al último ciclo de 30 [mm] en ALEJ-2. Este tipo de falla fue lo investigado por Rojas H (2022) y Rojas S (2022) como desplazamiento unitario crítico, donde luego de llegar al máximo pandeo antes mencionado, al siguiente medio ciclo se produjo la fractura del refuerzo longitudinal.
- La fractura del refuerzo longitudinal ocurre en las probetas ALEJ-1 Y ALEJ-2 a los 35 [mm], en el segundo y primer ciclo respectivamente. Cabe añadir que ambas roturas ocurren en el mismo refuerzo (ver Figura 51 y Figura 60), que además coincide con el sector donde el carro sale del riel de apoyo lo cual se observa en la Figura 61 y Figura 62. Esta salida del carro provoca que el efecto de torsión se desarrolle sin ningún impedimento, lo cual podría estar dañando de forma adicional el refuerzo longitudinal en esa zona.

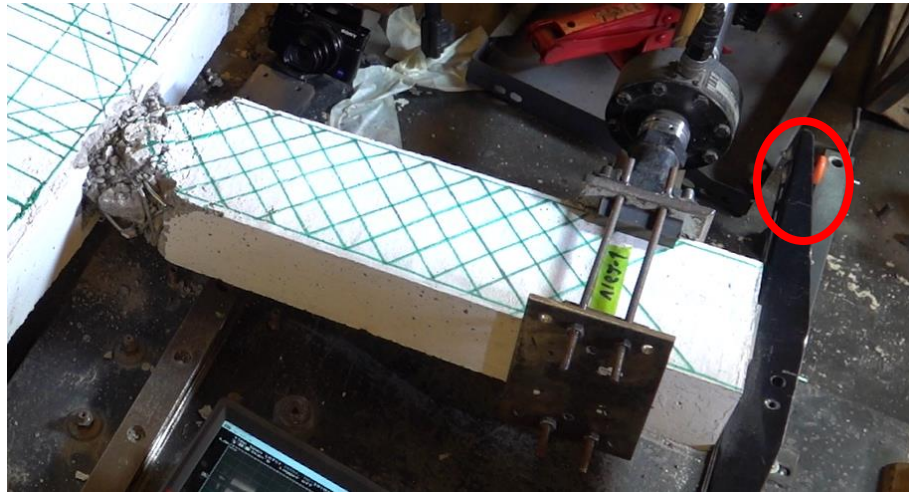


**Figura 61: Salida de riel hacia sector del actuador, ALEJ-1 primer ciclo 35 [mm]**



**Figura 62: Salida de riel hacia sector del actuador, ALEJ-2 primer ciclo 35 [mm]**

- La causa de la salida del carro puede ser una mala adherencia que tuvo el riel a la mesa sísmica, dado que se realizaron cambios a las ruedas del carro entre ALEJ-1 y ALEJ-2 pero no se observaron mejoras. Los pequeños movimientos que se pueden ver en la Figura 63 y Figura 64 son ejemplo de la mala adherencia que dificultaría el correcto funcionamiento del sistema carro-riel.



**Figura 63: Correcta posición del riel al comienzo de los ensayos de ALEJ-2**



**Figura 64: Ligero movimiento al terminar medio ciclo de 35 [mm] en ALEJ-2**

- Respecto a los efectos que tiene la torsión en las probetas, según explica Maldonado (2023), se observaron menores resistencias y una mayor degradación para los ciclos de 30 y 35 [mm] en comparación a las probetas sin torsión. Se infiere por lo tanto que las resistencias obtenidas en esta memoria serían el peor caso, por lo que en un ensayo ideal sin torsión, el diseño podría tener mejores curvas de histéresis e incluso presentar una menor degradación del material y se observarían menores daños.
- Algo que pudo haber afectado ambas probetas con el efecto de torsión es la utilización de una gran cantidad de mortero en la zapata de apoyo, la cual tuvo movimientos pequeños debido a la ligera pero constante caída del mortero durante los ciclos de 25 a 35 [mm].
- Realizando una investigación forense en ambas probetas, se puede notar que no hay grietas por corte, tan solo el movimiento y pandeo de algunos de los estribos en la zona donde cae el recubrimiento. Véase Figura 65, Figura 66, Figura 67 y Figura 68. Solo se observa el vaciamiento del recubrimiento causado por el aplastamiento en los bordes y grietas por flexión.



**Figura 65: Vista frontal ALEJ-1**



**Figura 66: Vista trasera ALEJ-1**



**Figura 67: Vista frontal ALEJ-2**



**Figura 68: Vista trasera ALEJ-2**

## 6.5 Comparación con memoristas previos

También se busca realizar una comparación con previos diseños realizados en la línea de investigación. De aquí se busca comparar la cantidad de material utilizado, el daño observado en los registros fotográficos y observaciones durante el ensayo. A esto se le suma indicar el ciclo donde se obtuvo la falla, considerando a su vez la pérdida de fuerza registrada. Para la comparación se realiza con algunas probetas de Pino (2017), Figueroa(2019), Silva (2022), Maldonado (2023) y Reyes (2023).

### 6.5.1 Cantidad de acero utilizado

Comparando la cantidad de acero transversal empleado en los primeros 13 [cm] por distintos memoristas se encuentra los indicado en la Tabla 12.

**Tabla 12: Cantidad de acero en primeros 13 [cm] de viga**

| <b>Autor</b>                   | <b>Pino (2017)<br/>CP1</b> | <b>Silva (2022)<br/>BS4, BS5 y BS6</b> | <b>Maldonado y Reyes<br/>(2023)</b> | <b>Diseño<br/>Propuesto</b> |
|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Diámetro Estribo [mm]          | 4,2                        | 3,2                                    | 3,2                                 | 3,2                         |
| Armadura Complementaria        | No                         | No                                     | Si                                  | No                          |
| Separación entre estribos [cm] | 2                          | 2,7                                    | 2,7                                 | 3                           |
| Acero estribos Usado [kg]      | 0,518                      | 0,652                                  | 0,675                               | 0,551                       |

La tabla anterior muestra una notoria disminución en la cantidad de acero utilizado en la viga. Se tiene una reducción del 16% para los diseños con estribos inclinados propuestos por Silva (2022), mientras que en comparación al diseño de Reyes (2023) y Maldonado (2023), se logra un ahorro del 18% en el material. Por otro lado un símil en cuanto a la cantidad de acero utilizado es lo realizado por Pino (2017) con estribos convencionales cada 2 [cm] donde hay una diferencia a favor del diseño de Pino de solo un 6%.

Cabe notar que si bien existen similitudes entre el diseño de Silva y Maldonado, los resultados del refuerzo complementario fueron positivos (Reyes, 2023). Esto debido a que se logró impedir el pandeo de forma completa en dos direcciones, algo que se busca realizar con el diseño propuesto pero de forma aún más eficiente. Esto ya se logra utilizando menos material, solo resta analizar el desempeño que se logró en cada probeta.

### 6.5.2 Calidad de Hormigón y espaciamiento de estribos

Las probetas por comparar serán las probetas CP1 y CP2 de Pino (2017), debido a la cuantía de los estribos y la similitud de hormigón. De la misma forma, las probetas P2 y P3 de Figueroa (2019). Los detalles de ambas probetas se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 13: Resumen probetas a comparar**

| Probetas                           | CP1                    | CP2                     | P2                                   | P3                                   | ALEJ-1                  | ALEJ-2                  |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Distribución estribos [cm]         | E90°@2                 | E45°@5                  | E45°@5                               | E45°@5                               | E45°@3                  | E45°@3                  |
| Tipo estribo                       | AT56-50H<br>ø4,2       | AT56-50H<br>ø4,2        | AT56-50H<br>ø4,2<br>(Soldado a viga) | AT56-50H<br>ø4,2<br>(Soldado a viga) | AISI-304<br>ø3.2        | AISI-304<br>ø3.2        |
| $f'_c$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]      | 418,5                  | 437,3                   | 437,3                                | 477,3                                | 450                     | 450                     |
| Max. Desplazamiento [mm]           | 5° ciclo de 33         | 5° ciclo de 33          | 7° ciclo de 30                       | 2° ciclo de 30                       | 2° ciclo de 35          | 1° ciclo de 35          |
| Max. Fuerza [T]                    | 1,7 en ciclo de 8 [mm] | 2,2 en ciclo de 18 [mm] | 2 en ciclo de 25 [mm]                | 2 en ciclo de 25 [mm]                | 1,6 en ciclo de 25 [mm] | 1,6 en ciclo de 25 [mm] |
| Reducción del 70% de Fuerza Máxima | 3° ciclo de 33 [mm]    | 3° ciclo de 33 [mm]     | 3° ciclo de 30 [mm]                  | 2° ciclo de 30 [mm]                  | -                       | -                       |

Por parte de las curvas de histéresis se tienen las siguientes figuras.

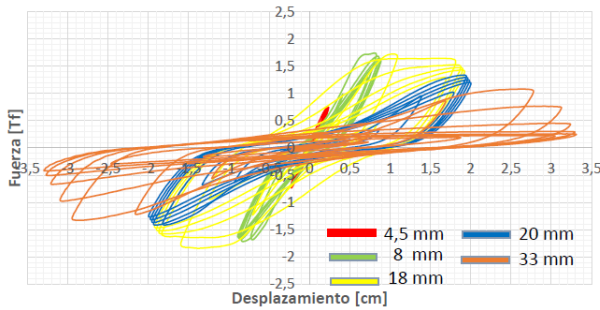


**Figura 69: Curva de histéresis probeta CP1. Fuente: Pino (2017)**

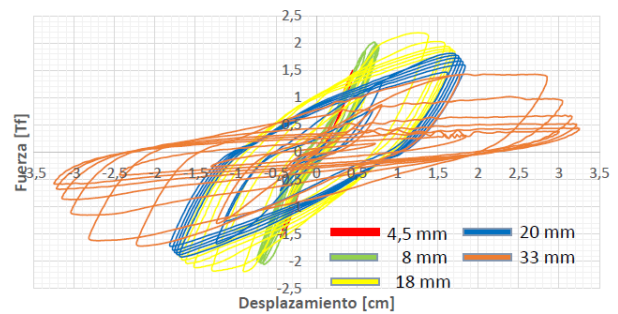


**Figura 70: Curva de histéresis probeta CP2. Fuente: Pino (2017)**

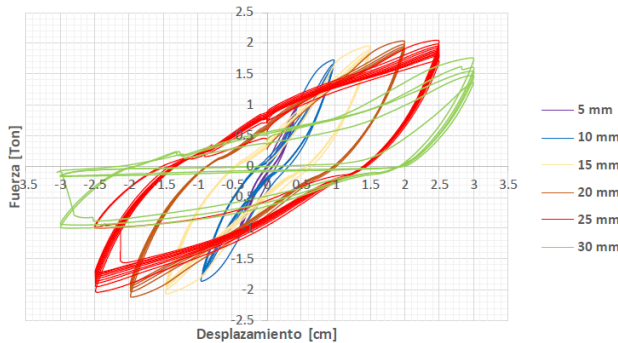


**Figura 71: Curva de histéresis probeta P2. Fuente: Figueroa (2019)**

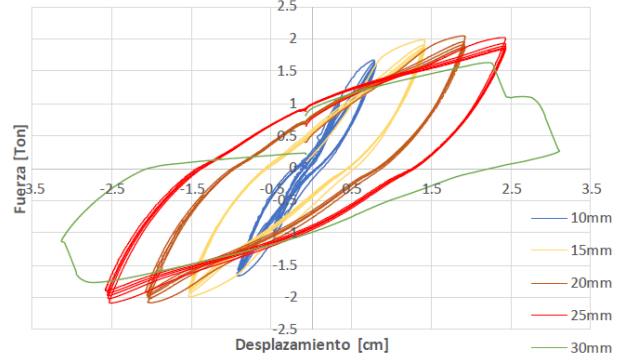


**Figura 72: Curva de histéresis probeta P3. Fuente: Figueroa (2019)**

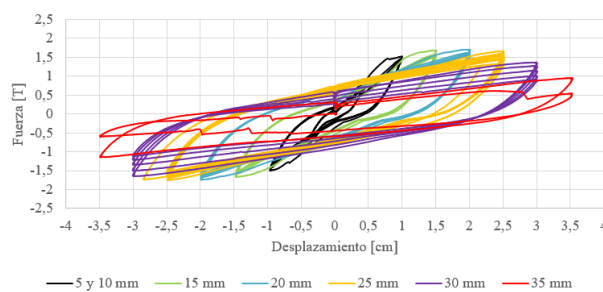


**Figura 73: Curva de histéresis ALEJ-1**

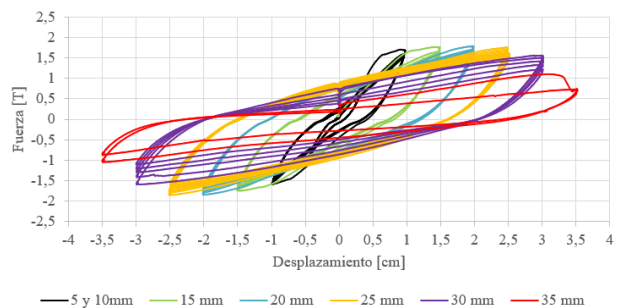


**Figura 74: Curva de histéresis ALEJ-2**

Desde las curvas de histéresis se pueden observar mayores áreas bajo la curva para las probetas de la presente memoria en comparación a CP1. Por otro lado CP2 mantuvo mayor cantidad de ciclos en grandes desplazamientos antes de la falla, pero esta probeta tuvo una pérdida del 70% de su resistencia al 3° ciclo de 33 [mm], algo que no ocurre con ALEJ-1 ni ALEJ-2. También se aprecia que la menor resistencia a los 30 [mm] en las probetas P2 y P3 se debe principalmente al diseño de los estribos y su espaciamiento, ya que se encuentran dentro de las mismas resistencias a compresión del hormigón que las de la presente memoria.

Por otro lado también ha de ser importante comparar el nivel de daños, sin embargo no existe un gran registro de la probeta CP1 por lo que solo se realiza con CP2, lo que se verá en las siguientes figuras.

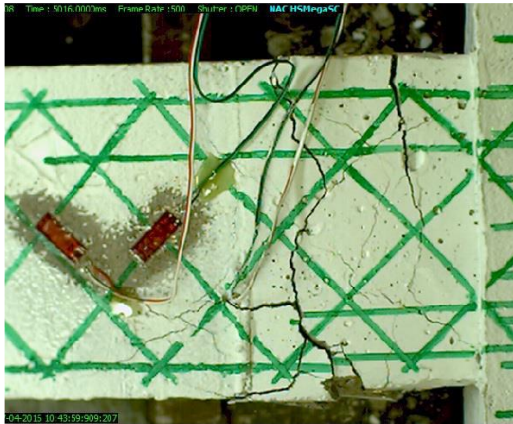


**Figura 75: CP2, 3° ciclo de 20 [mm]. Pino (2017)**

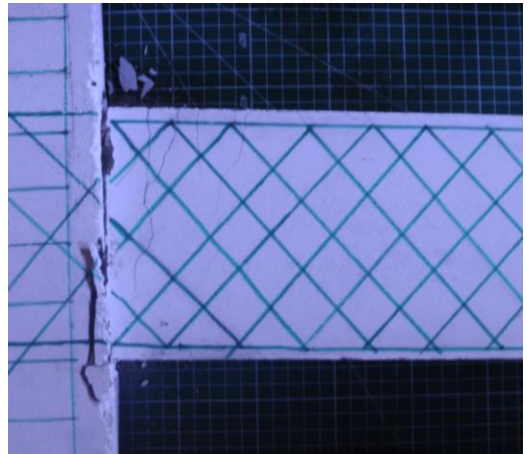


**Figura 76: ALEJ-2, 5° ciclo de 20 [mm]**

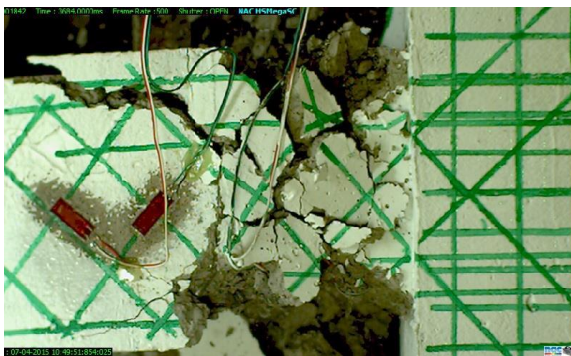


**Figura 77: CP2, 5° ciclo 33[mm]. Pino (2017)**

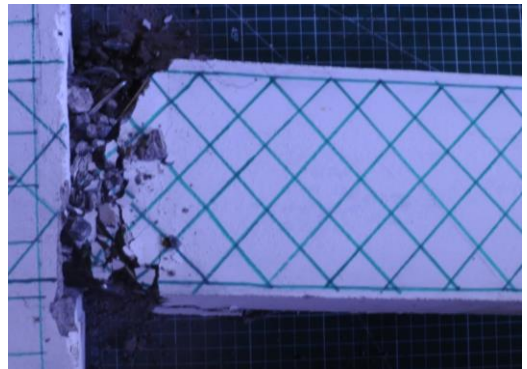


**Figura 78: ALEJ-2, 2° ciclo de 35 [mm]**

Se observa disminución en el nivel del daño presente alrededor del sector de fractura del refuerzo longitudinal en todas las etapas de desplazamientos. Destaca que en los ciclos de 20 [mm], las probetas ALEJ-1 y ALEJ-2 no presentan grietas por flexión en la viga (véase Figura 76), sino que se concentran en su unión con la columna, por otro lado CP2 tiene grandes aberturas de grietas por flexión además de comenzar a presentar daños por corte en el mismo rango de desplazamientos (véase Figura 75). En los últimos ciclos de 33 [mm], CP2 experimenta daños en grandes porciones de la viga como se ve en la Figura 77, mientras que ALEJ-1 y ALEJ-2 tienen un daño concentrado en la zona de pandeo del refuerzo longitudinal, sin grietas de corte ni más grietas por flexión en el resto de la viga como se observa en la Figura 78. Considerando que ambas probetas tienen resistencias a compresión similares del hormigón, se puede demostrar que la disminución del daño observado y la mayor capacidad de la probeta proviene de la diferencia en el diseño de estribos.

Por otro lado, las probetas de Figueroa (2019) solo muestran el registro a los 25 [mm], por lo que se dificulta analizar el proceso de análisis pero considerando los comentarios realizados en su trabajo de investigación, se aprecia que ambas probetas tuvieron problemas de torsión a los 30 [mm], junto al corte de barras a los 25 [mm] en P2.

### 6.5.3 Espaciamiento similar

Las probetas por comparar serán la BS1 con estribos convencionales y la BS5 con estribos inclinados. Se eligen estas debido a que poseen el 100% de la longitud de desarrollo del refuerzo longitudinal, al igual que las probetas realizadas en esta memoria, además de tener similares espaciamientos tanto en estribos de 90 como de 45 grados, más detalles de las probetas de Silva se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 14: Resumen probetas BS y ALEJ**

| Probetas                           | BS1                     | BS5                   | ALEJ-1                  | ALEJ-2                  |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Distribución estribos [cm]         | E90°@3                  | E45°@2,7              | E45°@3                  | E45°@3                  |
| $f_c$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]       | 344,9                   | 374,8                 | 450                     | 450                     |
| Max Desplazamiento [mm]            | 5° ciclo de 30          | 5° ciclo de 33        | 2° ciclo de 35          | 1° ciclo de 35          |
| Max Fuerza [T]                     | 1,6 en ciclo de 25 [mm] | 2 en ciclo de 25 [mm] | 1,6 en ciclo de 25 [mm] | 1,6 en ciclo de 25 [mm] |
| Reducción del 70% de Fuerza Máxima | -                       | 4° ciclo de 30 mm     | -                       | -                       |

Por parte de las curvas de histéresis se tienen las siguientes figuras.

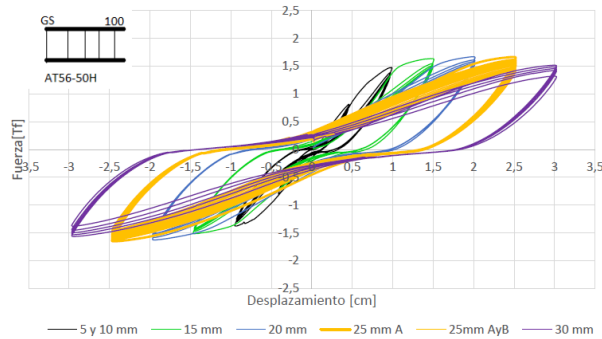


**Figura 79: Curva de histéresis BS1 R-100. Silva (2022)**

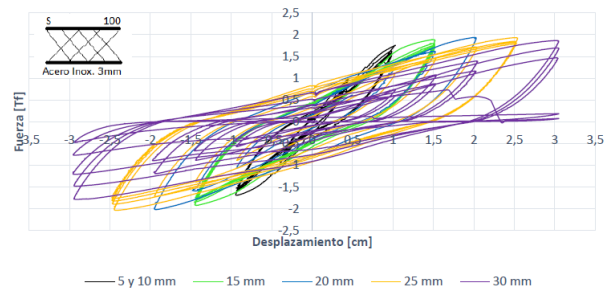


**Figura 80: Curva de histéresis BS5 I-100. Silva (2022)**

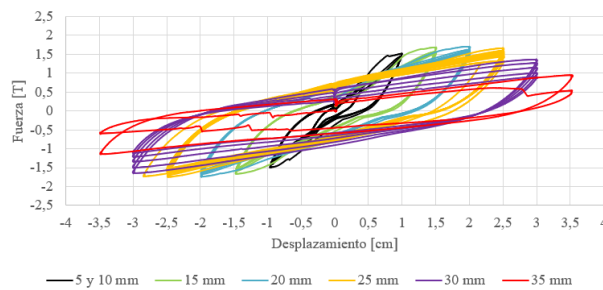


**Figura 81: Curva de histéresis ALEJ-1**

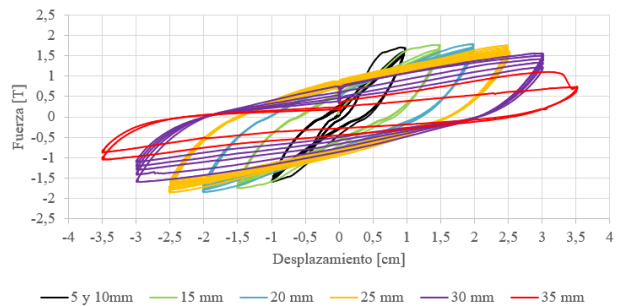


**Figura 82: Curva de histéresis ALEJ-2**

Aunque ambas curvas de Silva presentan buenos resultados, cabe notar el efecto de “pinching” que se tiene en la BS1 con estribos convencionales. Por el lado de estribos inclinados, la pérdida de resistencia en los 30 [mm] de la probeta BS5 es particularmente crítica, disminuyendo de 1,7 [T] a menos de 0,5 [T], con la rotura de las barras longitudinales en el cuarto ciclo. Comparando con las probetas ALEJ-1 Y ALEJ-2, estas superaron y llegaron a los 35 [mm], aun cuando la probeta BS5 mantuvo un comportamiento similar en la curva de histéresis. Aquí es importante considerar que el diseño de estribos propuesto en la presente memoria tuvo un efecto positivo en la amortiguación del daño y en la reducción en la cantidad de grietas comparando con el diseño de Silva (2019), sin embargo también se debe considerar la mayor resistencia del hormigón usada en la probeta. En otro aspecto es necesario observar el registro fotográfico y comparar el daño tanto BS1 Y BS5 con la probeta con un registro fotográfico más completo, ALEJ-2.



**Figura 83: BS1, 5° ciclo de 20 [mm]. Silva (2022)**

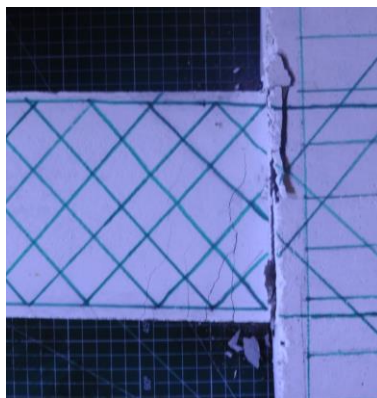


**Figura 84: ALEJ-2, 5° ciclo de 20 [mm]**



**Figura 85: BS5, 5° ciclo de 20 [mm]. Silva (2022)**



**Figura 86: BS1, 10° ciclo de 25 [mm]. Silva (2022)**

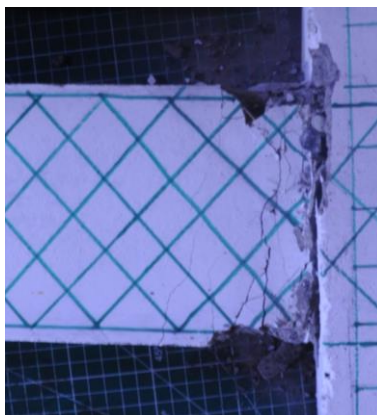


**Figura 87: ALEJ-2, 10° ciclo de 25 [mm]**



**Figura 88: BS5, 10° ciclo de 25 [mm]. Silva (2022)**

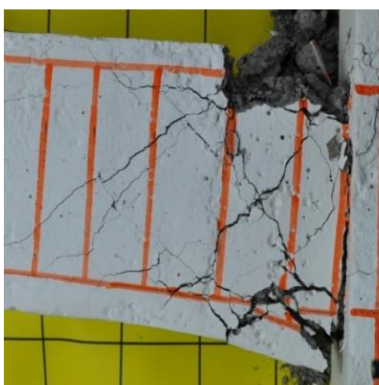


**Figura 89: BS1, 5° ciclo de 30 [mm]. Silva (2022)**

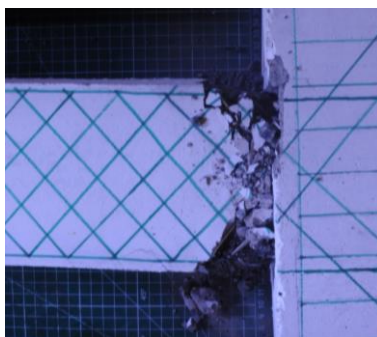


**Figura 90: ALEJ-2, 5° ciclo de 30 [mm]**

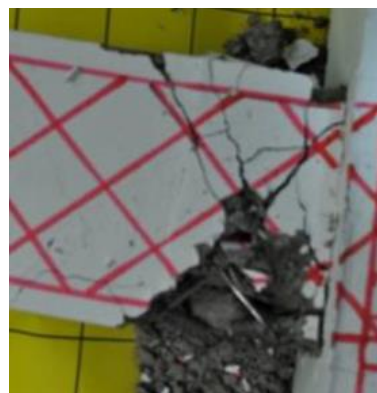


**Figura 91: BS6, 5° ciclo de 30 [mm]. Silva (2022)**

Notar que el daño en la probeta BS1 no se observa de forma explícita en las imágenes (véase Figura 86 y Figura 89). Sin embargo, en el registro del ensayo se menciona un vaciamiento severo bajo la viga (Silva, 2022), lo que obligó a detener el experimento. Este problema no ocurrió durante las pruebas con ALEJ-1 o ALEJ-2, gracias a la capacidad de retención de hormigón de los estribos inclinados. Sin embargo, cabe notar lo mencionado previamente, la resistencia obtenida en la mezcla de hormigón, que en el caso de las probetas de Silva (2019) tienen aproximadamente un 30% menos de resistencia que las probetas ensayadas en esta memoria. Además de esto poseen un refuerzo longitudinal con una pequeña mejora en resistencia llegando a una máxima de 7500 [kgf/cm<sup>2</sup>].

Además de esto las grietas de corte son claras en la viga de BS1 y BS5 desde los 20 [mm] (véase Figura 83 y Figura 85) algo que no se presenta en las probetas de esta memoria. Otro aspecto que diferenciar es el corte de 2 barras del refuerzo longitudinal durante los ciclos de 30 [mm] en la probeta BS5, lo que causa la severa pérdida de resistencia registrada en la curva de histéresis, corte que como ya se mencionó previamente ocurre en ALEJ-2 en los ciclos de 35 [mm] presentando una mejora entre los diseños de estribos inclinados.

Se puede concluir que la resistencia a compresión del hormigón y la capacidad de retención de este, debido al diseño de estribos, podrían ser los factores más relevantes a la hora de obtener mayores desplazamientos y por lo tanto mejores resultados, incluso previniendo de forma efectiva la fractura de los refuerzos longitudinales.

#### 6.5.4 Maldonado y Reyes (2023)

Considerando que todas las probetas de Maldonado y Reyes tienen el mismo diseño, estribos inclinados de acero inoxidable con refuerzo complementario, es interesante evaluar en este caso las probetas que se le aplicaron el mismo plan de cargas que las de esta memoria, GJ1 y GJ2. Cabe notar además la similitud de resistencia del hormigón, siendo la diferencia más grande entre ambos diseños el uso del refuerzo longitudinal CAP en las probetas GJ, en vez del AZA usadas en las ALEJ.

**Tabla 15: Resumen probetas GJ y ALEJ**

| Probetas                           | GJ1                     | GJ2                     | ALEJ-1                  | ALEJ-2                  |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Distribución estribos [cm]         | E45°@2,7                | E45°@2,7                | E45°@3                  | E45°@3                  |
| $f_r$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]       | 8000                    | 8000                    | 7000                    | 7000                    |
| $f'_c$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]      | 429                     | 404                     | 450                     | 450                     |
| Max Desplazamiento [mm]            | 5° ciclo de 35          | 10° ciclo de 35         | 2° ciclo de 35          | 1° ciclo de 35          |
| Max Fuerza [T]                     | 1,9 en ciclo de 15 [mm] | 1,7 en ciclo de 20 [mm] | 1,6 en ciclo de 25 [mm] | 1,6 en ciclo de 25 [mm] |
| Reducción del 70% de Fuerza Máxima | 3° ciclo de 35 [mm]     | 8° ciclo de 35 [mm]     | -                       | -                       |

Por parte de las curvas de histéresis se tienen las siguientes figuras.

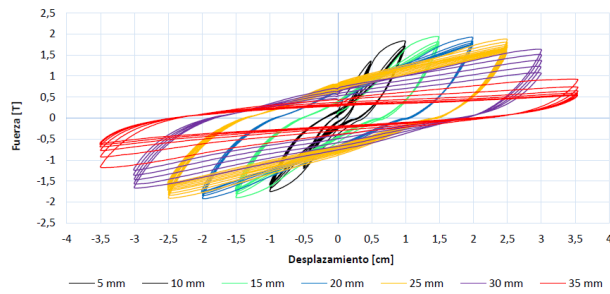


**Figura 92: Curva de histéresis GJ1. Maldonado (2023)**

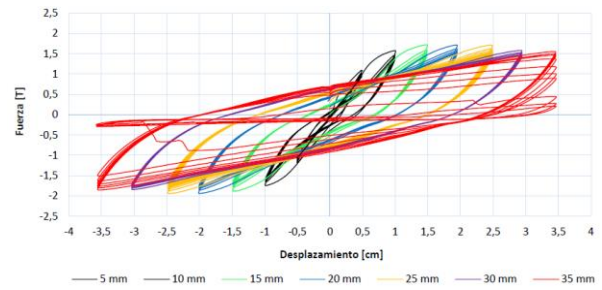


**Figura 93: Curva de histéresis GJ2. Maldonado (2023)**

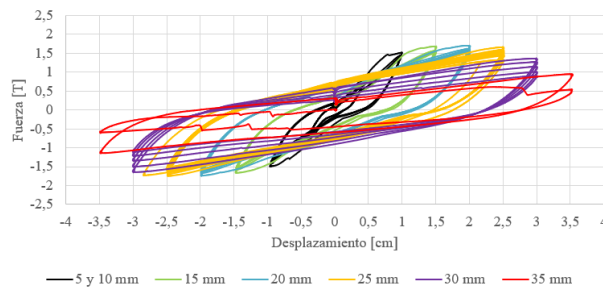


**Figura 94: Curva de histéresis ALEJ-1**

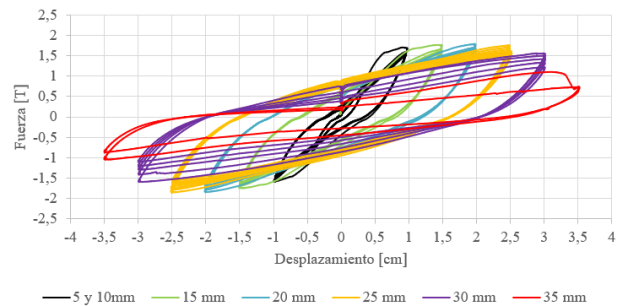


**Figura 95: Curva de histéresis ALEJ-2**

De ambas curvas, se puede observar claramente un mejor comportamiento de la probeta GJ2 que mantuvo muchos más ciclos de 35 [mm] a una fuerza de 1,5 [T] aproximadamente. También se puede observar una cierta similitud de las probetas ALEJ-1 y ALEJ-2 con GJ1, en especial la pérdida de resistencia a los 30 [mm] y el primer ciclo de 35 [mm]. Esto debido a que las probetas mencionadas presentaron el efecto de torsión desde este punto, a diferencia de GJ2, donde el ensayo se desarrolló sin ningún problema. Como señala Maldonado (2023) la causa principal de la pérdida de resistencia en estos desplazamientos fue la ocurrencia de la torsión, que a su vez influyó en el pandeo del refuerzo longitudinal. Sin embargo, para tener más puntos de comparación se debe realizar un análisis de los registros fotográficos para esto se seleccionan las probetas GJ1, GJ2 y ALEJ-2.

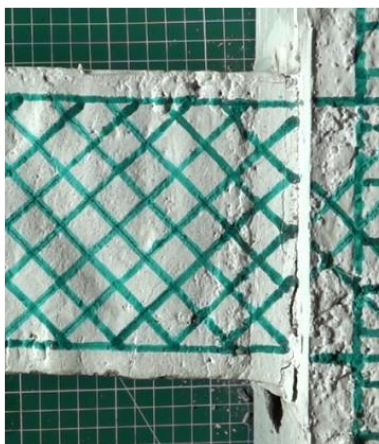


**Figura 96: GJ1, 5° ciclo de 20 [mm]. Maldonado (2023)**

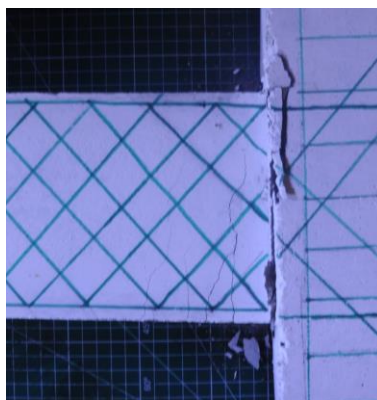


**Figura 97: ALEJ-2, 5° ciclo de 20 [mm]**



**Figura 98: GJ2, 5° ciclo de 20 [mm]. Maldonado (2023)**



**Figura 99: GJ1, 10° ciclo de 25 [mm]. Maldonado (2023)**



**Figura 100: ALEJ-2, 10° ciclo de 25 [mm]**



**Figura 101: GJ2, 10° ciclo de 25 [mm]. Maldonado (2023)**



**Figura 102: GJ1, 5° ciclo de 30 [mm]. Maldonado (2023)**



**Figura 103: ALEJ-2, 5° ciclo de 30 [mm]**



**Figura 104: GJ2, 5° ciclo de 30 [mm]. Maldonado (2023)**



**Figura 105: GJ1, 5° ciclo de 35 [mm]. Maldonado (2023)**

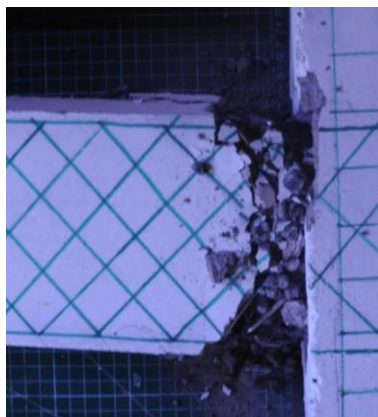


**Figura 106: ALEJ-2, 2° ciclo de 35 [mm]**



**Figura 107: GJ2, 5° ciclo de 35 [mm]. Maldonado (2023)**

Se puede apreciar la gran resistencia y el bajo nivel de daño de la probeta GJ2 comparada incluso con la probeta hermana GJ1. Sin embargo, es importante destacar que GJ2 no experimentó ningún problema de torsión ni movimientos en la zapata de apoyo, lo que la convierte en la situación ideal para cualquier ensayo. En estas condiciones, según Reyes (2023), GJ2 se encuentra entre una de las probetas con mejores resultados que se han obtenido hasta la fecha.

En cuanto a la comparación de daños, se observan similares hasta los ciclos de 25 [mm] (véase Figura 99, Figura 100 y Figura 101), desde aquí la cantidad de daño es mínima en el espécimen GJ2, con solo un par de grietas más amplias a los 30 [mm] (véase Figura 104). Sin embargo, el daño acumulado en ALEJ-2 junto a GJ1, presentan una mayor caída del recubrimiento (véase Figura 102 y Figura 103), debido principalmente a la torsión que se presenta por lo general en esta porción de los ensayos.

Se puede notar además que el daño está focalizado en el sector más cercano de la columna con la viga en los desplazamientos de 30 y 35 [mm]. Sin embargo, la diferencia clave radica en la fractura del refuerzo longitudinal, el cual no se presenta en la probeta GJ1; en su lugar, se dio fin al ensayo al 5° ciclo debido a exceso de torsión.

Considerando, además, que las probetas mantienen una resistencia a la compresión del hormigón similares y los estribos tienen resistencias similares de  $f_{yt}A_{st}=650[\text{kgf}]$ , se puede ver en ambos casos que un buen diseño de estribos inclinados previene de forma efectiva el daño observado en las probetas.

Sin embargo, es relevante mencionar que la  $f_r$  de los refuerzos longitudinales en las probetas GJ, fueron de  $8000 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$  con un  $f_y$  de  $5400 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$ . Mientras que en esta memoria se tiene una  $f_r$  de  $7000 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$  con  $f_y$  de  $5000 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$ , algo que debe considerarse en la comparación de resultados, en especial la mayor resistencia y números de ciclos alcanzados con las probetas.

En otro ámbito, se puede notar de forma más gráfica y simplificada la diferencia entre la cuantía de estribos presentes, señalados en las figuras anteriores con un marcador verde. Es importante resaltar que las probetas diseñadas por Maldonado (2023) poseen una mayor cantidad de acero, tanto visible en las figuras con el color verde como por el refuerzo complementario implementado en el diseño. Esto tiene un impacto significativo en el comportamiento estructural. No obstante, este enfoque resulta más costoso y menos eficiente que el diseño propuesto en esta memoria.

### 6.5.5 Verificación por ACI

Considerando las verificaciones realizadas en el apartado 5.4, se realiza un resumen de verificación para las probetas ya mencionadas.

**Tabla 16: Resumen del cálculo de corte de probetas según ACI 318-19**

| Angulo de estribo  | 90°      |      | 45°         |          |         |                |
|--------------------|----------|------|-------------|----------|---------|----------------|
| Material estribo   | AT56-50H |      | AT56-50H    | AISI-304 |         |                |
| Espaciamiento [cm] | 2        | 3    | 5           | 2,7      | 3       |                |
| Probetas           | CP1      | BS1  | CP2, P2, P3 | BS5      | GJ1,GJ2 | ALEJ-1, ALEJ-2 |
| $V_s$ [Tf]         | 10,17    | 6,78 | 5,7         | 8,47     |         | 7,507          |
| $V_c$ [Tf]         | 0,9      | 0,9  | 1,01        | 0,9      | 1,01    | 1,032          |
| $V_n$ [Tf]         | 11,1     | 7,6  | 6,7         | 9,37     | 9,48    | 8,53           |

Considerando los valores de corte, se puede apreciar que si bien el aporte del hormigón no presenta grandes variaciones en la teoría, se pudo evidenciar que sí toma un rol más importante en la práctica. Ejemplo de esto se vio con las probetas BS5, GJ y ALEJ, ya que sí bien tienen valores similares de  $V_c$ , el daño observado fue menor en las probetas con valores más altos de  $f'_c$ . Cabe notar de todas formas que para que se cumpla esta relación, el diseño de estribos debe contemplar la retención de dicho hormigón lo cual se cumple con los estribos de 45°.

Ahora bien, lo que tiene más relevancia a la hora de prevenir las grietas de corte, es el diseño de estribos, lo que se pudo evidenciar de forma práctica y teórica. Dentro de los factores más relevantes a considerar son el espaciamiento y el tipo de acero utilizado como estribo. Considerando esto, se hallaron diferencias aproximadas de un 20%, entre los estribos inclinados de la AT56-50H y los implementados en la serie ALEJ. Por otro lado se ve un aumento aproximado del 10% por un cambio de 0,3 [mm] en los espaciamientos de estribos entre GJ y ALEJ.

Cabe notar los altos valores de  $V_s$  en las probetas con estribos en 90°. Realizando una verificación con el apartado 5.4 de la presente memoria, se tiene que no cumplen con el valor  $V_{smax}$ . Por otro lado, las probetas con estribos de 45° no se enfrentan con este requerimiento, más bien se encuentran en una aparente sobre estimación de resistencia. Sin embargo, esto podría no estar ocurriendo del todo, dado que el cálculo de  $V_s$  se basa en que el estribo se encuentre en fluencia, lo que no se observó en ninguna de las probetas de esta memoria ni en los comentarios de las probetas comparadas.

En resumen se permite evaluar de forma previa el comportamiento que tendrá una probeta con estribos inclinados basándonos plenamente en las formulaciones de la ACI. Cabe notar de todas maneras que existen variables que podrían cambiar en la práctica el resultado final de los valores teóricos calculados, ejemplo de esto fue evidente en las probetas que presentaron torsión por problemas de montaje o las variaciones de resistencias obtenidas en los materiales.

## **7 Conclusiones**

### **7.1 Conclusiones**

Se construyeron dos probetas que incorporaban un diseño de armadura destinado a reducir el efecto de pandeo en el refuerzo longitudinal bajo solicitaciones sísmicas. Este diseño incluía estribos con inclinación en sus dos planos, con el propósito de disminuir la longitud de pandeo de las barras longitudinales en forma similar a lo realizado por Maldonado (2023) y Reyes (2023) pero sin utilizar el refuerzo complementario diseñado en esa memoria. Para reducir la cantidad de acero empleada, además se aumentó la separación entre estribos de 3 [cm], en vez de los típicos 2,7 [cm] utilizados en las investigaciones anteriores de la UTFSM.

Respecto a los resultados obtenidos por el diseño, se encontró que a pesar de tener una menor cuantía se obtuvo un similar o mejor comportamiento que las probetas de otros memoristas con estribos inclinados, esto en el ámbito de fuerzas alcanzadas y desplazamientos obtenidos. Además, la zona dañada fue más reducida y con un menor deterioro general de la viga. Es importante destacar que estos resultados positivos se obtuvieron a pesar de los efectos de torsión a consecuencia de la inestabilidad ocasionada por problemas de montaje del ensayo.

Comparando los resultados de otros trabajos en la misma línea de investigación, se pudo observar la influencia del espaciamiento en la cantidad de grietas que aparecen y la ocurrencia de la fractura en el pandeo del refuerzo longitudinal. Además se determinó de forma teórica con la guía de la ACI 318-19, las resistencias al corte de algunas probetas de la línea de investigación, junto a estudiar la validez de estos cálculos para futuros estudios.

Además de esto se debe notar que el programa de carga excede los niveles de solicitaciones que podrían alcanzarse en eventos sísmicos muy intensos como el terremoto de Constitución del 2010 o en Ciudad de México en 1985. Este aspecto ya fue mencionado en la memoria de Reyes (2023) y se suma a la investigación de Lobera (2016).

### **7.2 Recomendaciones a investigaciones futuras.**

Un aspecto por investigar es la relación existente entre la resistencia al hormigón y la fractura del refuerzo longitudinal a causa del pandeo. Esto se encontró al comparar con investigaciones anteriores que hasta ahora no ha sido considerado y podría ser relevante.

Otro aspecto que debe ser investigado es la medición de las deformaciones en el refuerzo longitudinal durante el ensayo para identificar si las barras al pandear llegan a la deformación unitaria crítica. La causa de este problema fue que el recubrimiento no permitió la medición de curvaturas por medio del sistema de cámaras, por lo que se requiere de un sistema que cumpla este fin.

## 8 Referencias

- American Concrete Institute Committee 318. (2014). *Building Code Requirements or Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*.
- American Concrete Institute Committee 318. (2019). *Building Code Requirements or Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*.
- American Concrete Institute Committee 374. (2013). *Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads*. 374.2R-13.
- Azimi, M., Adnan, A. Bin, Md Tahir, M., Bin Mohd Sam, A. R., & Bin Sk Abd Razak, S. M. (2015). Seismic performance of ductility classes medium RC beam-column connections with continuous rectangular spiral transverse reinforcements. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12(4), 787–807. <https://doi.org/10.1590/1679-78251387>
- Barclay, L., & Kowalsky, M. (2019). Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test. *ACI Materials Journal*, 116(3), 53–61. <https://doi.org/10.14359/51715583>
- Figuerola, G. (2019). *Aceros soldables en elementos de hormigón armado sometidos a solicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). *Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*. (NCh 1037 of. 2009).
- Instituto Nacional de Normalización. (2006). *Acero – Barras laminadas en caliente para hormigón armado*. (NCh 204 of. 2006).
- Krawinkler, H. (2009). *Loading histories for cyclic tests in support of performance assessment of structural components*. In The 3rd international conference on advances in experimental structural engineering, San Francisco.
- Lobera, R. (2016). *Respuesta sísmica de marcos de hormigón armado con detalles innovadores para las vigas en las zonas próximas a los nudos*. [Tesis de postgrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Maldonado, J. (2023). *Estudio experimental de armadura suplementaria para prevenir la fractura del refuerzo longitudinal en elementos de hormigón armado sometidos a solicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Matson, C. (2018). *Fallas características de vigas de hormigón armado con armadura transversal inclinada sometidas a solicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Moehle, J. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. Structural Engineering.
- Pino, C. (2017). *Vigas de hormigón armado con refuerzo transversal y anclajes*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Reyes, G. (2023). *Análisis de los resultados de ensayos en elementos de hormigón armado sometidos a solicitación sísmica con armadura adicional para prevenir fracturas del refuerzo longitudinal*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Rojas, J. (2019). *Elementos de hormigón armado con barras de refuerzo ancladas con ganchos sometidos a solicitaciones cíclicas*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.

- Rojas, S. (2022a). *Ensayos de barras de acero para hormigón armado sometidas a fatiga de bajo ciclaje con pandeo impedido*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Rojas, S. (2022b). *Fractura de barras de acero para hormigón armado debidas a la deformación crítica por pandeo y a la fatiga de bajo ciclaje*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Silva, B. (2022). *Longitud de anclaje reducida para mitigar tendencia a la fractura de las barras de refuerzo en elementos de hormigón armado sometidos a intensa solicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.

## 9 Anexos

### Problemas de torsión encontrados en el ensayo

- La torsión sin duda influyó en los desplazamientos de 30 y 35 [mm], algo que Maldonado (2023) también observo en sus probetas como un factor relevante en los daños y resistencias alcanzadas. Por lo tanto, realizando una mayor investigación con este diseño de estribos pero eliminando las deficiencias en el montaje del ensayo, probablemente los resultados tendrán mejores indicadores.
- También debe corregirse el sistema de sujeción del espécimen de manera de evitar los movimientos observados. Un efecto directo de este problema es que ambas probetas fallaran en ciclos cercanos con resistencias similares y además con la fractura hacia la misma posición.

**Tabla 17: Resumen Esfuerzo y Deformación Acero utilizado**

| Material     | Esfuerzo Fluencia [kgf/cm <sup>2</sup> ] | Esfuerzo Máximo [kgf/cm <sup>2</sup> ] | Deformación Rotura [cm/cm] |
|--------------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|
| A630-420H Ø8 | 5012                                     | 6960                                   | 0,211                      |

**Tabla 18: Variación resistencia y deformación unitaria AISI-304**

| AISI-304   | Resistencia [kgf/cm <sup>2</sup> ] | Deformación Unitaria [cm/cm] |
|------------|------------------------------------|------------------------------|
| Sin soldar | 0,755                              | 0,123                        |
| Soldado    | 0,617                              | 0,022                        |
| Variación  | -18%                               | -82%                         |

**Tabla 19: Refuerzo para verificación columna fuerte**

| Factores  | Valor | Unidad |
|-----------|-------|--------|
| Ø         | 8     | mm     |
| Nº Barras | 12    | -      |

Utilizando las dimensiones de la columna en Tabla 5 y las fórmulas de la sección 5.4.5. Se tiene que la columna tiene una resistencia de 1,76 [T-m]. Considerando que  $M_n$  de Viga es 0,57 [T-m], se cumple  $M_{nv} \leq 1,2M_{nc}$ .



**Figura 108: Placa de fijación al actuador**

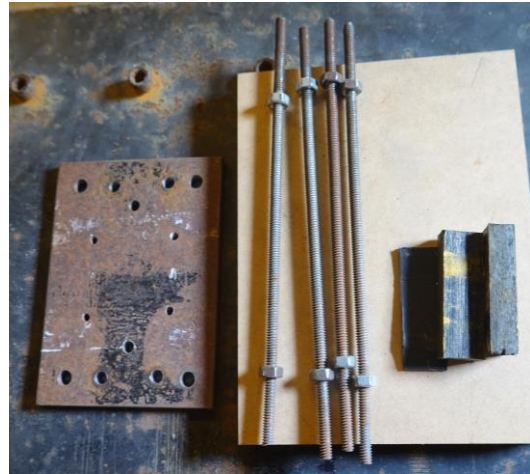


**Figura 109: Placa de fijación al espécimen junto a pernos de fijación.**



**Figura 110: Pernos de fijación del zapato de apoyo junto a bolillas**



**Figura 111: Placa metálica de fijación para zapato de apoyo junto a sistema de bolillas utilizado**



**Figura 112: Riel para fijación sistema de carro**



**Figura 113: Carro con configuración ALEJ-2 de ruedas**



**Figura 114: Configuración ruedas para ALEJ-1**

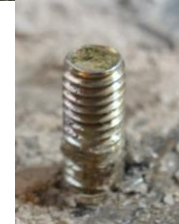


**Figura 115: Hilos de fijación a mesa para riel**