



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA FRACTURA DE BARRAS DE REFUERZO EN
ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON ESTRIBOS INCLINADOS, SOMETIDOS
A SOLICITACIÓN SÍSMICA**

Memoria de Título presentada por

Ricardo Agustín Ayaviri García

Como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Construcción Civil

Profesor Guía

René Enrique Tobar Ramos

Agosto de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA FRACTURA DE BARRAS DE REFUERZO EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON ESTRIBOS INCLINADOS, SOMETIDOS A SOLICITACIÓN SÍSMICA

Nombre del candidato(a): Ricardo Agustín Ayaviri García

Carrera / Grado: Construcción civil

Campus: Casa Central Valparaíso ; Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, René Enrique Tobar Ramos, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 08-08-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08-08-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

Durante la última década, el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) ha desarrollado investigaciones experimentales centradas en el comportamiento sísmico de vigas de hormigón armado con armadura transversal inclinada, donde han demostrado un excelente desempeño frente a cargas cíclicas equivalentes a sollicitaciones sísmicas. Sin embargo, se ha identificado una falla recurrente e indeseable: la fractura de la armadura longitudinal, la cual generalmente ocurre después de la rotura del recubrimiento y pandeo de las barras comprimidas. Es por esto que, en este estudio, junto al memorista asociado Palacios(2025), se fabricaron y ensayaron seis vigas de hormigón armado, representando la zona de conexión viga-columna, utilizando versiones mejoradas de diseños previos propuestos por otros memoristas que incorporan armadura transversal adicional que trata de impedir el pandeo de las barras. Se construyeron y ensayaron cuatro probetas con estribos inclinados en dos planos y dos con estribos ortogonales tradicionales, para efectos de comparación. Teniendo en cuenta la tendencia actual, los hormigones fueron de mayor resistencia que los utilizados por memoristas anteriores.

Los resultados confirmaron que los estribos inclinados mejoran significativamente la estabilidad frente a cargas cíclicas, en comparación con armaduras ortogonales tradicionales. El análisis de curvas de histéresis y registros visuales, incluidos los obtenidos con cámaras endoscópicas, evidenció una menor pérdida de integridad del hormigón en especímenes con estribos inclinados. Por otro lado, se vio que, excepto para sollicitación muy intensa, un hormigón de menor resistencia con armadura inclinada tiene un comportamiento similar a un hormigón de alta resistencia con armadura tradicional, Entonces la conclusión final fue que, evitar o retrasar la fractura de las barras de refuerzo incorporando armadura adicional para restringir el pandeo es posible, pero se ve más práctico cuidar que la relación entre la capacidad mecánica del hormigón comprimido y la del acero traccionado se mantenga lo suficientemente baja.

Palabras clave: Armadura transversal inclinada, Hormigón armado, Fractura refuerzo longitudinal.

Abstract

During the last decade, LEMCO laboratory at the Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) has developed experimental investigations focused on the seismic behavior of reinforced concrete beams with inclined transverse reinforcement, where they have demonstrated excellent performance against cyclic loads equivalent to seismic solicitation. However, a recurrent and undesirable failure has been identified: the fracture of the longitudinal reinforcement, which generally occurs after the rupture of the cover and buckling of the compressed bars. For this reason, in this study, together with the associated memorist Palacios(2025), six reinforced concrete beams were fabricated and tested, representing the beam-column connection zone, using improved versions of previous designs proposed by other memorists that incorporate additional transverse reinforcement that tries to prevent the buckling of the bars. Four specimens with inclined stirrups in two planes and two with traditional orthogonal stirrups were constructed and tested for comparison purposes. Considering the current trend, the concretes were of higher strength than those used by previous memoirs.

The results confirmed that inclined stirrups significantly improve stability under cyclic loading compared to traditional orthogonal reinforcement. Analysis of hysteresis curves and visual records, including those obtained with endoscopic cameras, showed less loss of concrete integrity in specimens with inclined stirrups. On the other hand, it was seen that, except for very intense solicitation, a lower strength concrete with inclined reinforcement has a behavior similar to a high strength concrete with traditional reinforcement. The final conclusion was that, avoiding or delaying the fracture of the reinforcing bars by incorporating additional reinforcement to restrict buckling is possible, but is better that the ratio between the mechanical capacity of the compressed concrete and that of the tensioned steel remains sufficiently low.

Keywords: Inclined transverse reinforcement, Reinforced concrete, Longitudinal reinforcement fracture.

Índice de Contenido

1. Capítulo 1 Introducción	13
1.1. Definición del problema	13
2. Capítulo 2 Estado del arte	15
2.1. General	15
2.2. Desempeño sísmico en conexiones viga-columna de hormigón armado con refuerzos transversales en espiral rectangular continua.	15
2.3. Estudios previos en la línea de investigación en la UTFSM	17
2.3.1. G. Reyes (2023), J. Maldonado (2023) “Armadura Suplementaria para prevenir la fractura longitudinal del refuerzo longitudinal”	17
2.3.2. A. Bermúdez (2024), “Estribos inclinados en dos planos para optimizar el comportamiento de elementos de hormigón armado sometidos a sollicitación sísmica.”	19
3. Capítulo 3 Fabricación de especímenes	20
3.1. Detalle de los especímenes.	21
3.1.1. Refuerzo Columnas	21
3.1.2. Refuerzo Vigas	21
3.2. Diseño de Estribos	23
3.3. Hormigón	26
3.3.1. Resistencia Probetas cilíndricas	26
3.4. Características de las probetas fabricadas	26
3.4.1. Características Columna	27
3.4.2. Características Viga	28
3.4.2.1. Características Armadura con estribos ortogonales	29
3.4.2.2. Características Armadura con estribos inclinados	30
3.4.2.3. Proceso de armado armadura inclinada	31
3.5. Diseño de las probetas	32
3.6. Moldaje	36
3.7. Hormigonado de probetas	37
3.8. Montaje e instrumentación	37
3.8.1. Plan de carga	38
3.8.2. Montaje	38
4. Capítulo 4 Resultados Experimentales	40
4.1. General	40
4.2. Probeta RM1	41
4.2.1. Aspectos Generales	41

4.2.2.	Curva Histéresis RM1	41
4.2.3.	Registro Fotográficos Probeta RM1	43
4.2.3.1.	Máximo desplazamiento positivo (vista lateral)	43
4.2.3.2.	Máximo desplazamiento negativo (vista lateral)	44
4.2.3.3.	Estado espécimen último Ciclo (vista superior).....	45
4.2.4.	Bitácora de ensayo Probeta RM1	46
4.3.	Probeta RM2	47
4.3.1.	Aspectos Generales	47
4.3.2.	Curva Histéresis RM2	47
4.3.3.	Registro Fotográficos Probeta RM2.....	49
4.3.3.1.	Máximo desplazamiento positivo (vista lateral)	49
4.3.3.2.	Máximo desplazamiento Negativo (vista lateral).....	50
4.3.3.3.	Estado espécimen último Ciclo (vista superior).....	51
4.3.4.	Bitácora de ensayo Probeta RM2	51
4.4.	Probeta RM3	52
4.4.1.	Aspectos Generales	52
4.4.2.	Curva Histéresis RM3	52
4.4.3.	Registro Fotográficos Probeta RM3.....	54
4.4.3.1.	Máximo desplazamiento positivo (vista lateral)	54
4.4.3.2.	Máximo desplazamiento Negativo (vista lateral).....	55
4.4.3.3.	Estado espécimen último Ciclo (vista superior).....	56
4.4.4.	Bitácora de ensayo Probeta RM3	57
4.5.	Probeta RM4	58
4.5.1.	Aspectos generales	58
4.5.2.	Curva Histéresis RM4	58
4.5.3.	Registro Fotográficos Probeta RM4.....	60
4.5.3.1.	Máximo desplazamiento Positivo (vista lateral)	60
4.5.3.2.	Máximo desplazamiento Negativo (vista lateral).....	61
4.5.3.3.	Estado espécimen último Ciclo (vista superior).....	62
4.5.4.	Bitácora de ensayo Probeta RM4	63
4.6.	Probeta RM5	64
4.6.1.	Aspectos Generales	64
4.6.2.	Curva Histéresis RM5	64
4.6.3.	Registro Fotográficos Probeta RM5.....	66
4.6.3.1.	Máximo Desplazamiento Positivo (Vista Lateral)	66

4.6.3.2.	Máximo Desplazamiento Negativo (Vista Lateral).....	67
4.6.3.3.	Estado Espécimen Último Ciclo (Vista Superior).....	68
4.6.4.	Bitácora de ensayo Probeta RM5.....	69
4.7.	Probeta RM6.....	70
4.7.1.	Aspectos Generales.....	70
4.7.2.	Curva Histéresis RM6.....	70
4.7.3.	Registro Fotográficos Probeta RM6.....	72
4.7.3.1.	Máximo Desplazamiento Positivo (Vista Lateral).....	72
4.7.3.2.	Máximo Desplazamiento Negativo (Vista Lateral).....	73
4.7.3.3.	Estado Espécimen Último Ciclo (Vista Superior).....	74
4.7.4.	Bitácora de ensayo Probeta RM6.....	75
4.8.	Comentarios generales sobre los ensayos.....	76
4.9.	Comentarios Adicionales.....	80
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones		82
Referencias.....		82
Anexos		84

Índice de Tablas

Tabla 1: Características acero en Columnas.....	21
Tabla 2: Detalle de Vigas Confeccionadas.....	21
Tabla 3: Dosificación para Hormigón de probetas.....	26
Tabla 4: Resistencia a compresión de Hormigón.....	26
Tabla 5: Dimensiones partes de Moldaje.....	36
Tabla 6: Bitácora Ensayo Probeta RM1.....	46
Tabla 7 :Bitácora Ensayo Probeta RM2.....	51
Tabla 8: Bitácora Ensayo Probeta RM3.....	57
Tabla 9: Bitácora Ensayo Probeta RM4.....	63
Tabla 10: Bitácora Ensayo Probeta RM5.....	69
Tabla 11: Bitácora Ensayo Probeta RM6.....	75
Tabla 12: Carga máxima obtenida por nivel de carga.....	76
Tabla 13: Resumen etapas durante el ensayo.....	76
Tabla 14: Comparación con memoristas anteriores.....	80

Índice de Figuras

Figura 1: Representación de zona de interés sometido a sollicitación sísmica (Silva B. 2022).....	13
Figura 2: Espiral rectangular convencional (DCM- CONVEN) (Azimi et al. 2015).....	15
Figura 3: Espiral rectangular simple (DCM-SINGLE). (Azimi et al. 2015).....	16
Figura 4: Espiral rectangular doble (DCM-DOUBLE). (Azimi et al. 2015).....	16
Figura 5: Aplicación espiral rectangular simple. (Azimi et al. 2015).	16
Figura 6: Aplicación espiral rectangular doble. (Azimi et al. 2015).	16
Figura 7: Curvas de histéresis de comparación de los especímenes ensayados. Azimi et al (2015). 16	
Figura 8: Capacidad porcentual de disipación de energía. (Azimi et al. 2015).....	17
Figura 9: Refuerzo complementario (G. Reyes (2023), J. Maldonado (2023))......	18
Figura 10: Curva de Histéresis GJ1 (Maldonado, 2023).....	18
Figura 11: Curva de Histéresis GJ2 (Maldonado, 2023).....	18
Figura 12: Curva de Histéresis GJ3 (Maldonado, 2023).....	19
Figura 13: Curva de Histéresis GJ4 (Maldonado, 2023).....	19
Figura 14: Propuesta estribo inclinado en dos planos, abatido. (A. Bermúdez, 2024).....	20
Figura 15: Curva de histéresis probeta ALEJ-1 (A. Bermúdez, 2024).....	20
Figura 16: Curva de histéresis probeta ALEJ-2 (A. Bermúdez, 2024).....	20
Figura 17: Registro de proceso de ensayo.....	22
Figura 18: Gráfico De Esfuerzo V/s Deformación unitaria, Acero AZA 630-420H.	22
Figura 19: Gráfico de Esfuerzo v/s Deformación unitaria, Acero AT56-50H.	23
Figura 20: Gráfico de Esfuerzo v/s Elongación. AISI-304.	23
Figura 21: Diseño estribo interno.....	24
Figura 22: Diseño estribo externo.	24
Figura 23: Aplicación Estribo inclinado en dos planos.	24
Figura 24: Colocación de Estribos Inclinados.....	25
Figura 25: Estribo abierto Externo.	25
Figura 26: Estribo abierto Interno.	25
Figura 27: Dimensiones de probetas (Vista Frontal).....	26
Figura 28: Dimensiones de probetas (Vista Lateral).	27
Figura 29: Vista Inclinada de Probeta.	27
Figura 30: Sección Transversal de Columna y Armadura.	28
Figura 31: Plano de elevación de Columna y Armadura.	28
Figura 32: Sección Transversal de Viga y Armadura Ortogonal.	29

Figura 33: Plano de elevación de Viga y Armadura Ortogonal.....	29
Figura 34: Plano de elevación de Viga y Armadura Inclinada.	30
Figura 35: Vista de elevación armado Viga inclinada.	30
Figura 36: Sección Transversal de Viga y Armadura Inclinada.	32
Figura 37: Diseño 3D de Armadura de Columna.	33
Figura 38:Diseño 3D armadura Viga ortogonal	33
Figura 39:Diseño 3D unión Armadura-Viga con estribos ortogonales.	33
Figura 40 Diseño 3D Colocación estribos inclinados internos.	34
Figura 41: Diseño 3D Colocación estribos inclinados externos.....	34
Figura 42: Diseño 3D unión estribos internos y externos.	35
Figura 43: Diseño 3D Unión Columna-Viga con estribos inclinados.	35
Figura 44:Partes de Moldaje.	36
Figura 45:Dimensiones generales de moldaje.....	36
Figura 46: Sección transversal unión Viga-Columna.....	36
Figura 47: Diagrama unilineal del sistema de ensayo (Maldonado,2023).	37
Figura 48: Historia de desplazamiento, Probetas RM1,RM4,RM6.....	38
Figura 49: Montaje de probeta en Mesa Sísmica LEMCO.	39
Figura 50: Armadura probetas RM1,RM2,RM3,RM4.	40
Figura 51: Armadura probetas RM5 y RM6.	40
Figura 52: Curvas de Histéresis parciales RM1.	41
Figura 53: Curva de Histéresis Probeta RM1.....	42
Figura 54: Quinto Ciclo 5mm RM1 (Positivo)	43
Figura 55: Quinto Ciclo 10mm RM1 (Positivo)	43
Figura 56: Quinto Ciclo 15mm RM1 (Positivo)	43
Figura 57: Quinto Ciclo 20mm RM1 (Positivo)	43
Figura 58: Quinto Ciclo 25mm RM1 (Positivo)	43
Figura 59: Décimo Ciclo 25mm RM1 (Positivo).....	43
Figura 60 Quinto Ciclo 5mm RM1 (Negativo).....	44
Figura 61 Quinto Ciclo 10mm RM1 (Negativo).....	44
Figura 62 Quinto Ciclo 15mm RM1 (Negativo).....	44
Figura 63 Quinto Ciclo 20mm RM1 (Negativo).....	44
Figura 64 Quinto Ciclo 25mm RM1 (Negativo).....	44
Figura 65 Décimo Ciclo 25mm RM1 (Negativo)	44
Figura 66: Quinto Ciclo 5mm RM1 (Estado).....	45

Figura 67: Quinto Ciclo 10mm RM1 (Estado).....	45
Figura 68: Quinto Ciclo 15mm RM1 (Estado).....	45
Figura 69: Quinto Ciclo 20mm RM1 (Estado).....	45
Figura 70: Quinto Ciclo 25mm RM1 (Estado).....	45
Figura 71: Quinto Ciclo 30mm RM1 (Estado).....	45
Figura 72: Curvas de Histéresis Parciales RM2.....	47
Figura 73: Curva de Histéresis Probeta RM2.....	48
Figura 74: Quinto Ciclo 5mm RM2 (Positivo).	49
Figura 75: Quinto Ciclo 10mm RM2 (Positivo).	49
Figura 76: Quinto Ciclo 15mm RM2 (Positivo).	49
Figura 77: Quinto Ciclo 20mm RM2 (Positivo).	49
Figura 78: Décimo Ciclo 25mm RM2 (Positivo).....	49
Figura 79: Quinto Ciclo 5mm RM2 (Negativo).....	50
Figura 80: Quinto Ciclo 10mm RM2 (Negativo).....	50
Figura 81: Quinto Ciclo 15mm RM2 (Negativo).....	50
Figura 82: Quinto Ciclo 20mm RM2 (Negativo).....	50
Figura 83: Décimo Ciclo 25mm RM2 (Negativo).	50
Figura 84: Quinto Ciclo 5mm RM2 (Estado).....	51
Figura 85: Quinto Ciclo 10mm RM2 (Estado).....	51
Figura 86: Quinto Ciclo 15mm RM2 (Estado).....	51
Figura 87: Quinto Ciclo 20mm RM2 (Estado).....	51
Figura 88: Decimo Ciclo 25mm RM2 (Estado).	51
Figura 89: Curvas de Histéresis parciales RM3.	52
Figura 90: Curva de Histéresis Probeta RM3.....	53
Figura 91: Quinto Ciclo 5mm RM3 (Positivo).	54
Figura 92: Quinto Ciclo 10mm RM3 (Positivo).	54
Figura 93: Quinto Ciclo 15mm RM3 (Positivo).	54
Figura 94: Quinto Ciclo 20mm RM3 (Positivo).	54
Figura 95: Quinto Ciclo 25mm RM3 (Positivo).	54
Figura 96 :Décimo Ciclo 25mm RM3 (Positivo).....	54
Figura 97: Análisis de Ensayo RM3.....	55
Figura 98: Quinto Ciclo 5mm RM3 (Negativo).....	55
Figura 99: Quinto Ciclo 10mm RM3 (Negativo).....	55
Figura 100: Quinto Ciclo 15mm RM3 (Negativo).....	55

Figura 101: Quinto Ciclo 20mm RM3 (Negativo).....	55
Figura 102: Quinto Ciclo 25mm RM3 (Negativo).....	56
Figura 103: Décimo Ciclo 25mm RM3 (Negativo).	56
Figura 104: Quinto Ciclo 5mm RM3 (Estado).....	56
Figura 105: Quinto Ciclo 10mm RM3 (Estado).....	56
Figura 106: Quinto Ciclo 15mm RM3 (Estado).....	56
Figura 107: Quinto Ciclo 20mm RM3 (Estado).....	56
Figura 108: Décimo Ciclo 25mm RM3 (Estado).	56
Figura 109: Curvas de Histéresis parciales RM4.	58
Figura 110: Curva de Histéresis Probeta RM4.....	59
Figura 111: Quinto Ciclo 5mm RM4 (Positivo).....	60
Figura 112: Quinto Ciclo 10mm RM4 (Positivo).....	60
Figura 113: Quinto Ciclo 15mm RM4 (Positivo).....	60
Figura 114: Quinto Ciclo 20mm RM4 (Positivo).....	60
Figura 115: Quinto Ciclo 25mm RM4 (Positivo).....	60
Figura 116: Décimo Ciclo 25mm RM4 (Positivo).	60
Figura 117: Quinto Ciclo 5mm RM4 (Negativo).	61
Figura 118: Quinto Ciclo 10mm RM4 (Negativo).	61
Figura 119: Quinto Ciclo 15mm RM4 (Negativo).	61
Figura 120: Quinto Ciclo 20mm RM4 (Negativo).....	61
Figura 121: Quinto Ciclo 25mm RM4 (Negativo).....	61
Figura 122: Décimo Ciclo 25mm RM4 (Negativo).	61
Figura 123: Quinto Ciclo 5mm RM4 (Estado).....	62
Figura 124: Quinto Ciclo 10mm RM4 (Estado).....	62
Figura 125: Quinto Ciclo 15mm RM4 (Estado).....	62
Figura 126: Quinto Ciclo 20mm RM4 (Estado).....	62
Figura 127: Décimo Ciclo 25mm RM4 (Estado).	62
Figura 128: Análisis de ensayo RM4.	63
Figura 129: Curvas de Histéresis parciales RM5.	64
Figura 130: Curva de Histéresis Probeta RM5.....	65
Figura 131: Quinto Ciclo 5mm RM5 (Positivo).	66
Figura 132: Quinto Ciclo 10mm RM5 (Positivo).	66
Figura 133: Quinto Ciclo 15mm RM5 (Positivo).	66
Figura 134: Quinto Ciclo 20mm RM5 (Positivo).	66

Figura 135: Décimo Ciclo 25mm RM5 (Positivo).....	66
Figura 136: Quinto Ciclo 5mm RM5 (Negativo).....	67
Figura 137: Quinto Ciclo 10mm RM5 (Negativo).....	67
Figura 138: Quinto Ciclo 15mm RM5 (Negativo).....	67
Figura 139: Quinto Ciclo 20mm RM5 (Negativo).....	67
Figura 140: Décimo Ciclo 25mm RM5 (Negativo).	67
Figura 141: Quinto Ciclo 5mm RM5 (Estado).....	68
Figura 142: Quinto Ciclo 10mm RM5 (Estado).....	68
Figura 143: Quinto Ciclo 15mm RM5 (Estado).....	68
Figura 144: Quinto Ciclo 20mm RM5 (Estado).....	68
Figura 145: Décimo Ciclo 25mm RM5 (Estado).	68
Figura 146: Análisis de ensayo RM5; 30 [mm].	69
Figura 147: Curvas de Histéresis parciales RM6.	70
Figura 148: Curva de Histéresis Probeta RM6.....	71
Figura 149: Quinto Ciclo 5mm RM6 (Positivo).	72
Figura 150: Quinto Ciclo 10mm RM6 (Positivo).	72
Figura 151: Quinto Ciclo 15mm RM6 (Positivo).	72
Figura 152: Quinto Ciclo 20mm RM6 (Positivo).	72
Figura 153: Décimo Ciclo 25mm RM6 (Positivo).....	72
Figura 154: Quinto Ciclo 5mm RM6 (Negativo).....	73
Figura 155: Quinto Ciclo 10mm RM6 (Negativo).....	73
Figura 156: Quinto Ciclo 15mm RM6 (Negativo).....	73
Figura 157: Quinto Ciclo 20mm RM6 (Negativo).....	73
Figura 158: Décimo Ciclo 25mm RM6 (Negativo).	73
Figura 159: Quinto Ciclo 5mm RM6 (Estado).....	74
Figura 160: Quinto Ciclo 10mm RM6 (Estado).....	74
Figura 161: Quinto Ciclo 15mm RM6 (Estado).....	74
Figura 162: Quinto Ciclo 20mm RM6 (Estado).....	74
Figura 163: Décimo Ciclo 25mm RM6 (Estado).	74
Figura 164: Curva de Fuerza v/s Desplazamiento para la amplitud 25 [mm]; A)RM6; B)RM1.	77
Figura 165: Curva de Fuerza v/s Desplazamiento para la amplitud 5,10,15,20 [mm]; A)RM6; B)RM1.....	78
Figura 166:Agrietamientos por Corte; A) Armadura Tradicional; B) Armadura inclinada.....	78
Figura 167: Comparación estado después de Carga 25 [mm]; A)RM5 B)RM1	79

Figura 168: Gráfico De Esfuerzo V/s Deformación unitaria, Acero AZA 630-420H; A) Propio; B) Bermúdez (2024).....	81
Figura 169: Maquina para doblado de estribos ortogonales.....	84
Figura 170: Maquina para doblado de estribos inclinados.....	84
Figura 171: Electrodo para acero inoxidable(E308-L) 3/32"......	84
Figura 172: Alambre galvanizado N°22.....	84
Figura 173: Armadura y Moldaje Especímenes Ensayados. A) Armadura Inclinada ; B) Armadura Ortogonal Tradicional; C)Moldaje.	84
Figura 174: Colocación Armadura en moldaje.....	85
Figura 175: Sección sobresaliente de perno de anclaje.....	85
Figura 176: Mesa vibradora.	85
Figura 177: Hormigonado de espécimen.....	85
Figura 178: Hormigonado de cilindros.	85
Figura 179: Curado de Hormigón en sala Húmeda LEMCO.....	85
Figura 180: Placa de Fijación al actuador.	86
Figura 181: Placa de Fijación al espécimen.	86
Figura 182: Riel deslizante fijo al extremo de la viga.....	86
Figura 183: Zapato de apoyo probeta-mesa sísmica.	86
Figura 184: Placa de apoyo, entre unión (zapato de apoyo- fundación apernada).....	86
Figura 185: Proceso de izaje de espécimen a ensayar.	87
Figura 186: Proceso de apriete de tuercas.	87
Figura 187: Colocación de Mortero nivelante.....	87
Figura 188: Colocación de sistema de fijación y limpieza.....	87
Figura 189: Unión de Riel con espécimen.	87
Figura 190:Colocación de Luces y Cámaras para Registro fotográfico.....	87
Figura 191: Proceso de montaje de Especímenes.	87

Capítulo 1

Introducción

1.1. Definición del problema

Durante la última década, en el laboratorio LEMCO del Departamento de Obras Civiles de la UTFSM se han estado realizando diversos trabajos experimentales asociados con memorias de título, donde se comprueba el excelente comportamiento de los elementos de hormigón armado con armadura transversal inclinada sometidos a cargas cíclicas alternadas, equivalentes a la solicitación sísmica.

Sin embargo, también en estos casos se ha visto una tendencia a la fractura de la armadura longitudinal, lo cual es un tipo de falla indeseable. La fractura sería causada por las altas deformaciones que conlleva la curvatura asociada al pandeo de las barras longitudinales que ocurre frecuentemente hacia el final de los ensayos.

En la presente memoria se procedió a diseñar y probar un conjunto de nuevos detalles de construcción para las armaduras transversales inclinadas que trata de minimizar la tendencia al pandeo y por consiguiente la fractura de las barras longitudinales. Estos nuevos detalles implican dobleces más o menos complicados de estribos inclinados en dos planos desarrollados en memorias anteriores: Bermúdez, A. (2024), Matson, C. (2018), Pino, C. (2017) y otros.

Así, junto al memorista asociado Palacios, M. (2025), se construyeron seis vigas en voladizo de hormigón armado, que en realidad representan la zona próxima a la columna de una viga perteneciente a un marco dúctil, y que consideran una versión perfeccionada de estos detalles, las cuales fueron ensayadas en el laboratorio LEMCO, obteniendo las correspondientes curvas de histéresis y registros fotográficos incluyendo de cámaras endoscópicas, para observar el comportamiento de las barras dentro del hormigón.

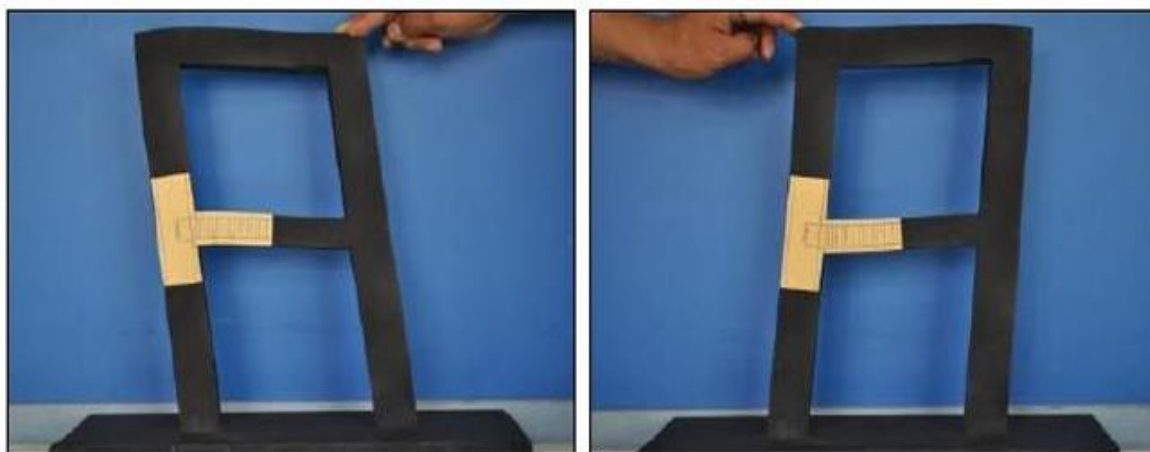


Figura 1: Representación de zona de interés sometido a solicitación sísmica (Silva B. 2022).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general es diseñar y probar nuevos detalles para la zona próxima a la columna de una viga de hormigón armado con armadura transversal inclinada, tales que aprovechen las excelentes características de resistencia y ductilidad que proporciona este tipo de armadura transversal, pero minimizando el riesgo de fractura de la armadura longitudinal observada cuando estos elementos son sometidos a sollicitación sísmica.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Lograr un diseño perfeccionado de la armadura transversal de estribos inclinados teniendo en cuenta los resultados de los memoristas anteriores en la misma línea de investigación, que trata de impedir en cualquier dirección el pandeo y fractura de las barras de acero longitudinales.
- Probar el nuevo diseño mediante la construcción y ensayo de seis probetas, donde cuatro tienen estribos inclinados en dos planos y los otros dos estribos ortogonales tradicionales, para efectos de poder tener una comparación. Este trabajo se desarrolló con el memorista asociado Palacios (2025).
- Analizar y comparar los resultados de los ensayos con los obtenidos por memoristas anteriores en la misma línea de investigación, y con teorías recientes sobre las condiciones en que ocurre la fractura de las barras, publicadas en la literatura sobre el tema (Barclay, L., Kowalsky, M., 2019).

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. General

Las referencias inmediatas que abordan el estudio de cómo influye y se comporta una viga con refuerzo de estribos inclinados son las memorias anteriores dentro de la misma línea de investigación. También se analizó el trabajo realizado por Azimi et al.(2015), el cual es de los pocos disponible en la literatura dedicados a este tema.

2.2. Desempeño sísmico en conexiones viga-columna de hormigón armado con refuerzos transversales en espiral rectangular continua.

La principal referencia a un trabajo externo a la institución es la publicación de Azimi et. AL (2015), quien presentó un estudio experimental sobre la capacidad de resistir cargas sísmicas en uniones viga-columna con armadura transversal inclinada, que aquí tenía la forma de una espiral continua, probándose dos diferentes diseños. Se comparó el desempeño de estribos convencionales (DCM-CONVEN), refuerzo espiral rectangular (DCM-SINGLE) y refuerzo espiral rectangular doble (DCM-DOBLE). Como se muestra en las **Figuras 2, 3 y 4**.

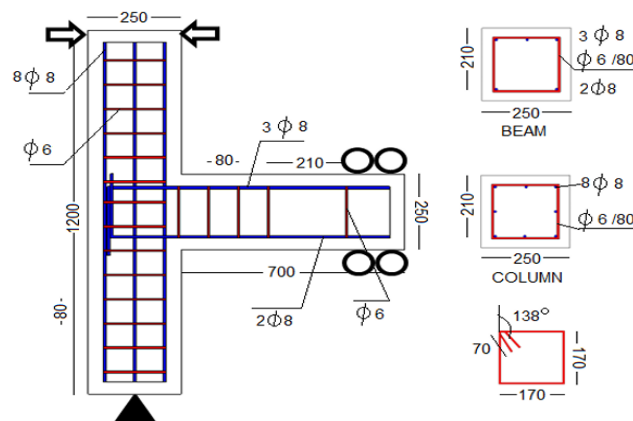


Figura 2: Espiral rectangular convencional (DCM- CONVEN) (Azimi et al. 2015).

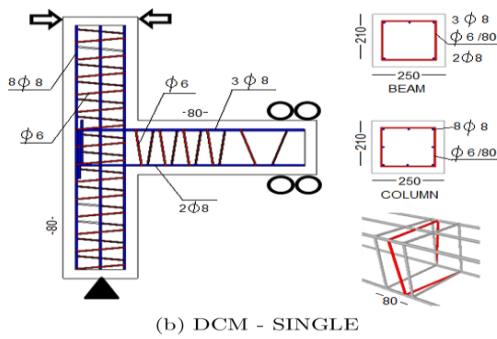


Figura 3: Espiral rectangular simple (DCM-SINGLE). (Azimi et al. 2015).

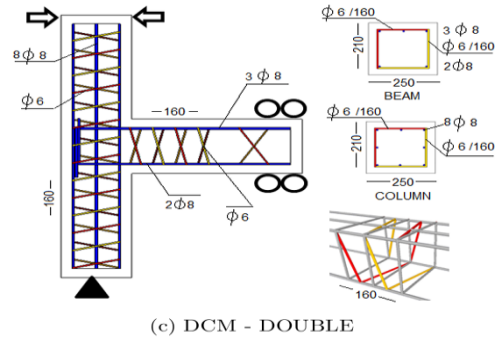


Figura 4: Espiral rectangular doble (DCM-DOUBLE). (Azimi et al. 2015).

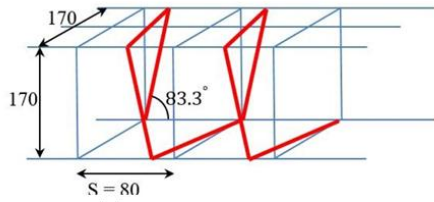


Figura 5: Aplicación espiral rectangular simple. (Azimi et al. 2015).

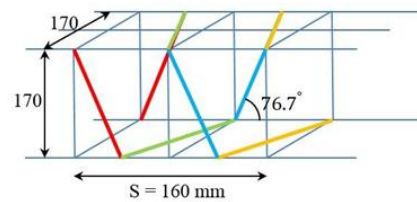


Figura 6: Aplicación espiral rectangular doble. (Azimi et al. 2015).

Los resultados de la publicación de Azimi et al. (2015), indicaron que los diseños de refuerzo espiral simple y doble, presentaron una mayor capacidad de resistir cargas sísmicas y de confinar el hormigón fracturado, comparados con el refuerzo con armadura convencional. Esto se vio reflejado en las curvas de histéresis y en el gráfico de energía de disipación, como se muestra en la **Figura 7 y Figura 8**.

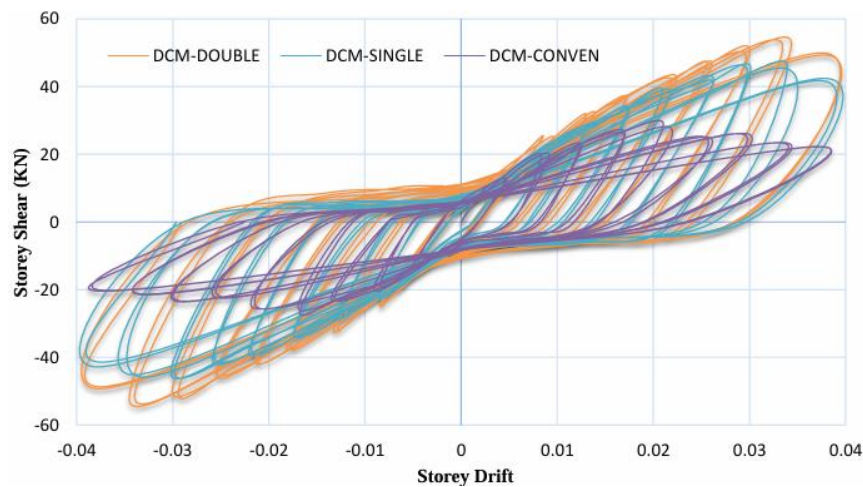


Figura 7: Curvas de histéresis de comparación de los especímenes ensayados. Azimi et al (2015)

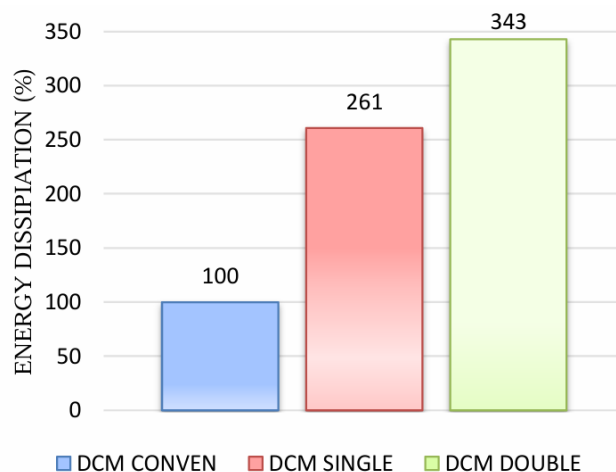


Figura 8: Capacidad porcentual de disipación de energía. (Azimi et al. 2015).

A pesar de obtener buenos resultados, en los ensayos realizados en la UTFSM se llegó a experimentar que, a mayores desplazamientos que los considerados en los ensayos de Azimi, se comenzó a presentar una fractura en el refuerzo longitudinal.

2.3. Estudios previos en la línea de investigación en la UTFSM

Dentro de los estudios donde se buscó impedir que las barras longitudinales se cortaran se encuentran memorias como A. Bermúdez (2024), G.Reyes (2023) y J.Maldonado (2023). La fractura generalmente tiene lugar en la zona de la viga próxima a la columna y en la que también tiende a producirse el pandeo las barras longitudinales, tanto en las vigas con armadura transversal inclinada y en las vigas con armadura transversal convencional.

En la comprensión del fenómeno de fractura, un avance importante es la investigación realizada por Barcley & Kowalsky (2019) quienes mencionan que, durante la aplicación de cargas cíclicas, al alcanzar una deformación crítica en compresión, al acto seguido de aplicarse la deformación en tracción a las barras, estas tienden a fracturarse, aún cuando la carga de tracción todavía sea poca.

2.3.1. G. Reyes (2023), J. Maldonado (2023) “Armadura Suplementaria para prevenir la fractura longitudinal del refuerzo longitudinal”.

Para evitar el pandeo de las barras longitudinales en compresión generalmente se recomienda disminuir la distancia entre estribos. Sin embargo, en los estudios desarrollados en la UTFSM, esto ha resultado en que simplemente el pandeo cambia a la dirección perpendicular, a veces abarcando varios tramos de estribos.

Los memoristas asociados **G. Reyes (2023)** y **J. Maldonado (2023)** agregaron entonces una armadura suplementaria formada por barras diagonales en las caras superior e inferior para restringir el pandeo en la dirección perpendicular. Este es uno de los últimos trabajos previos a esta memoria.

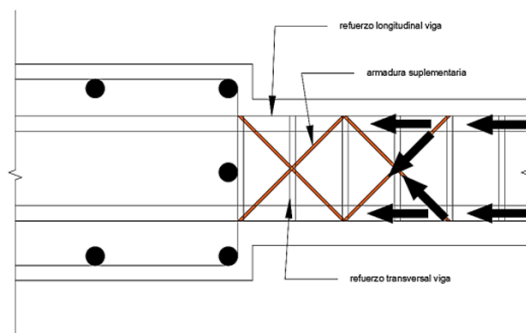


Figura 9: Refuerzo complementario (G. Reyes (2023), J. Maldonado (2023)).

Reyes y Maldonado además estudiaron los efectos que podrían producir variaciones en los ciclos de carga, siendo de forma escalonada (GJ1 y GJ2) como lo indica el ACI-374 y con ciclos intermedios de menor amplitud (GJ3 y GJ4) como se indica en la publicación de Krawinkler (2009), para elementos de madera y albañilería. Como se muestra en la **Figura 10**, **Figura 11**, **Figura 12** y **Figura 13**.

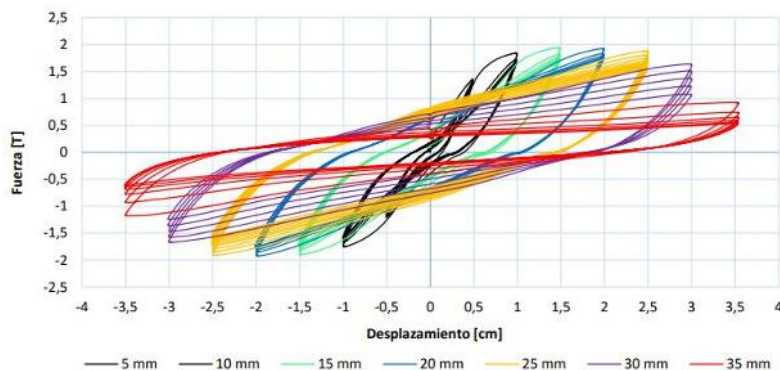


Figura 10: Curva de Histéresis GJ1 (Maldonado, 2023).

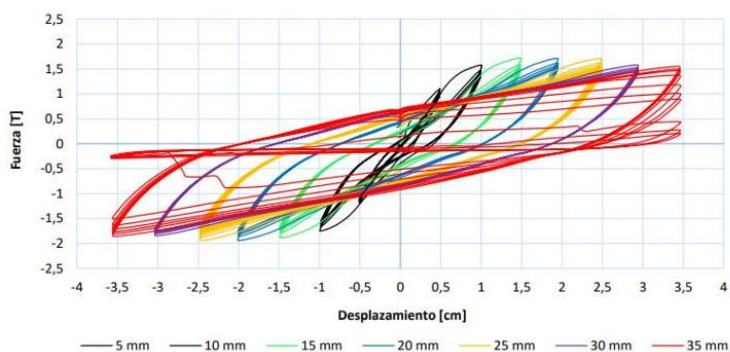


Figura 11: Curva de Histéresis GJ2 (Maldonado, 2023).

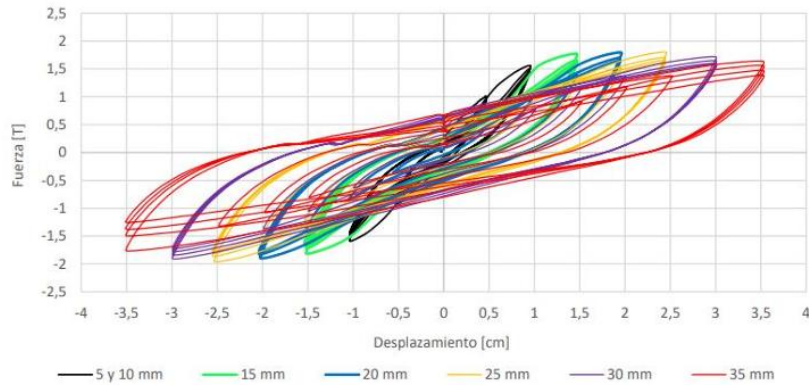


Figura 12: Curva de Histéresis GJ3 (Maldonado, 2023).

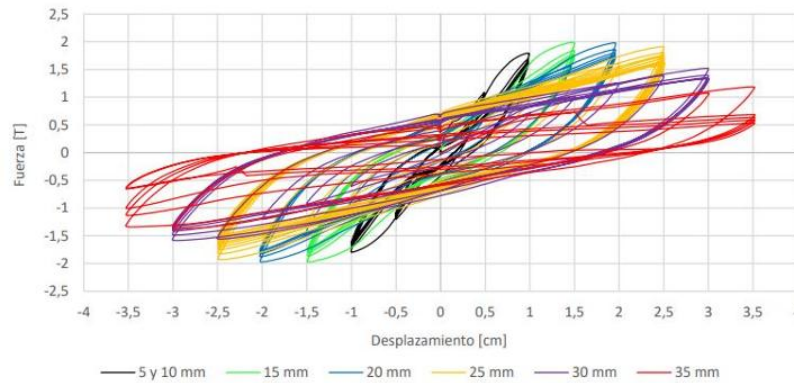


Figura 13: Curva de Histéresis GJ4 (Maldonado, 2023)

Los resultados de los ensayos mostraron que agregar la armadura adicional implementada mejora el comportamiento sísmico, llegando hasta amplitudes de desplazamiento de 35 [mm], aunque de igual forma se presentó al final el pandeo y corte de las barras longitudinales. Los ensayos también indicaron que variaciones en la secuencia de las cargas cíclicas como las mencionadas no tuvieron relevancia con los resultados obtenidos.

2.3.2. A. Bermúdez (2024), “Estribos inclinados en dos planos para optimizar el comportamiento de elementos de hormigón armado sometidos a sollicitación sísmica.”

Con el objetivo de reducir el efecto pandeo en todas las direcciones y consiguientemente la tendencia a la fractura, y además reduciendo la cuantía de acero transversal, A. Bermúdez (2024) estudió un complicado diseño de estribos inclinado en dos planos, como se muestra en la **Figura 15** y en la **Figura 16**.



Figura 14: Propuesta estribo inclinado en dos planos, abatido. (A. Bermúdez, 2024)

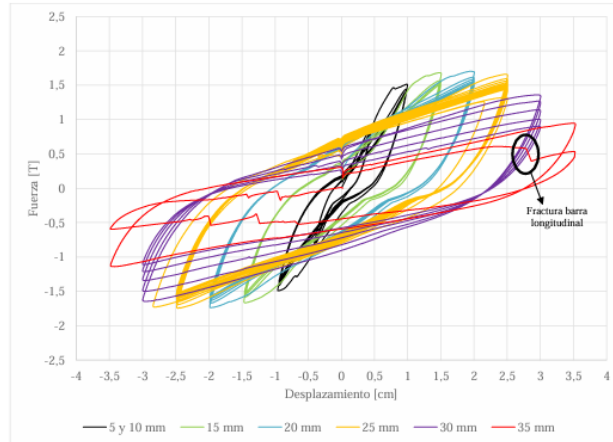


Figura 15: Curva de histéresis probeta ALEJ-1 (A. Bermúdez, 2024)

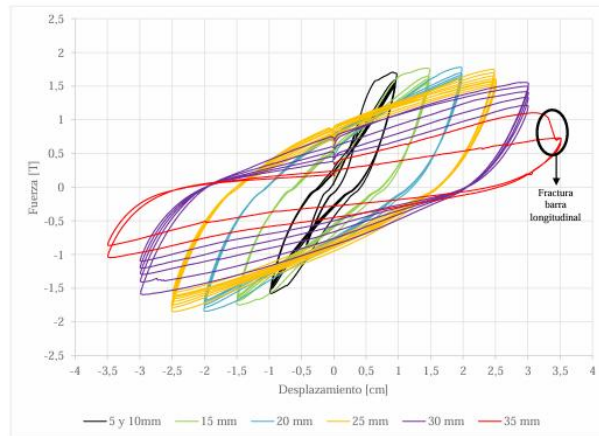


Figura 16: Curva de histéresis probeta ALEJ-2 (A. Bermúdez, 2024)

Como resultado de los ensayos se obtuvo que estos estribos inclinados en dos planos producen que la viga tenga un similar comportamiento a las de memorias anteriores, como la de **Maldonado (2023)**, disminuyendo la cuantía de acero. Además, se produjo una reducción de daño y deterioro en la zona cercana a la unión viga-columna.

Cabe mencionar que en las amplitudes mayores a 20 [mm], por problemas de montaje de los ensayos. los especímenes de **A. Bermúdez, (2024)** tendieron a la torsión, lo cual, como menciona **J. Maldonado (2023)**, podría influir en los resultados.

Capítulo 3

Fabricación de especímenes

Junto con el memorista asociado (Palacios 2025) se confeccionaron un total de seis especímenes de dimensiones similares a los estudiados en memorias anteriores, las cuales están a una escala 1/3 del tamaño real, y representan un segmento de viga anclado a una columna exterior de un marco dúctil.

3.1. Detalle de los especímenes.

A continuación, se detallarán las propiedades de los materiales utilizados para la confección de columnas y vigas en las seis probetas.

3.1.1. Refuerzo Columnas

Para la confección de las seis columnas se utilizó el tipo de acero de refuerzo que se detalla en la **Tabla 1**, Esta información es poco relevante ya que no se espera daños en las columnas.

Tabla 1: Características acero en Columnas.

Refuerzo	Calidad	Diámetro [mm]
Longitudinal	A630-420H	8
Transversal	AT56-50H	4,2

3.1.2. Refuerzo Vigas

Para la confección de las vigas se utilizaron los tipos de acero indicada en la **Tabla 2** :

Tabla 2: Detalle de Vigas Confeccionadas.

Ítem	Probeta	Acero Longitudinal	Acero de Armadura Transversal	Estribo
1	RM-1	A630-420H (8mm)	AISI-304 [3,2mm]	Soldado
2	RM-2	A630-420H (8mm)	AISI-304 [3,2mm]	Soldado
3	RM-3	A630-420H (8mm)	AISI-304 [3,2mm]	Soldado
4	RM-4	A630-420H (8mm)	AISI-304 [3,2mm]	Soldado
5	RM-5	A630-420H (8mm)	AT56-50H [4,2mm]	Gancho sísmico
6	RM-6	A630-420H (8mm)	AT56-50H [4,2mm]	Gancho sísmico

A las barras empleadas en la confección de columnas y vigas, se le determinó la curva esfuerzo-deformación lo cual fue realizado en la máquina MTS810 del LEMCO (**Figura 18 a 20**). El esfuerzo de fluencia (F_y) se obtuvo con el criterio de una deformación remanente de 0,002 según la NCh 204. Los estribos de acero inoxidable de 3.2 [mm] y de acero soldable AT56-50H pueden usarse

para reemplazar los originales A630-420H, siempre que durante la carga no incursionen mucho más allá de la fluencia, según resultados de Silva, B (2022). Esto se hace por facilidad de construcción.

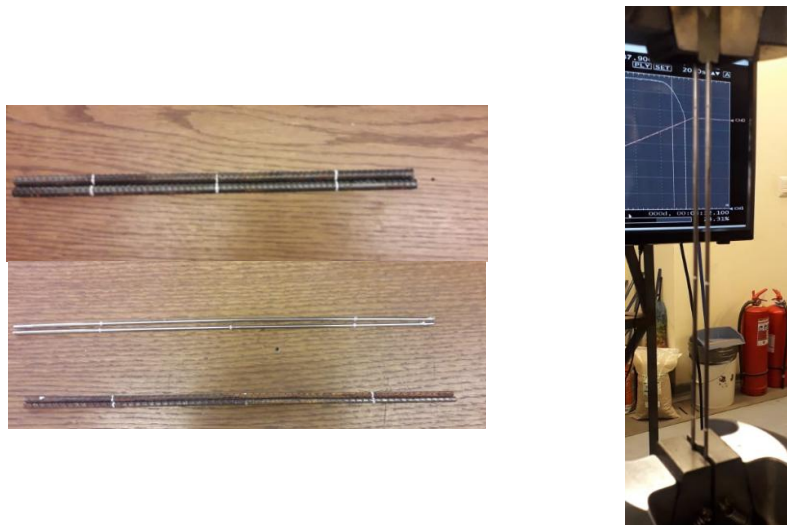


Figura 17: Registro de proceso de ensayo

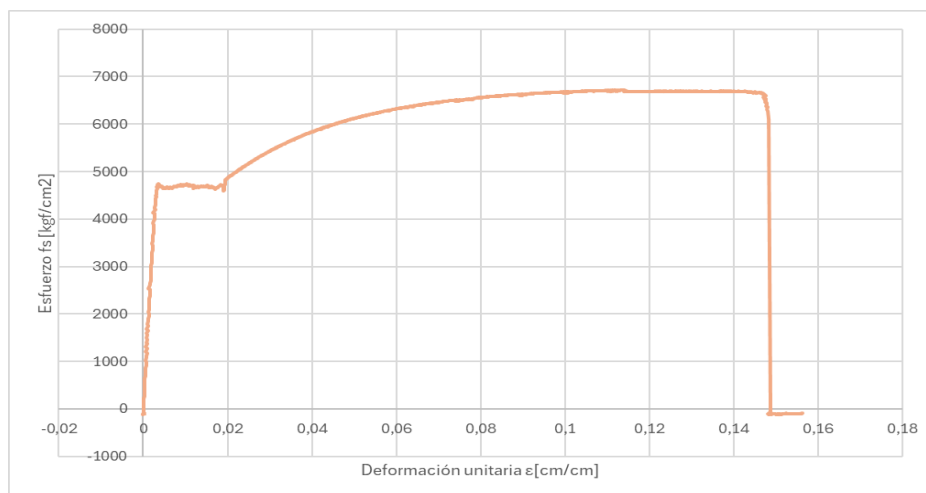


Figura 18: Gráfico De Esfuerzo V/s Deformación unitaria, Acero AZA 630-420H.

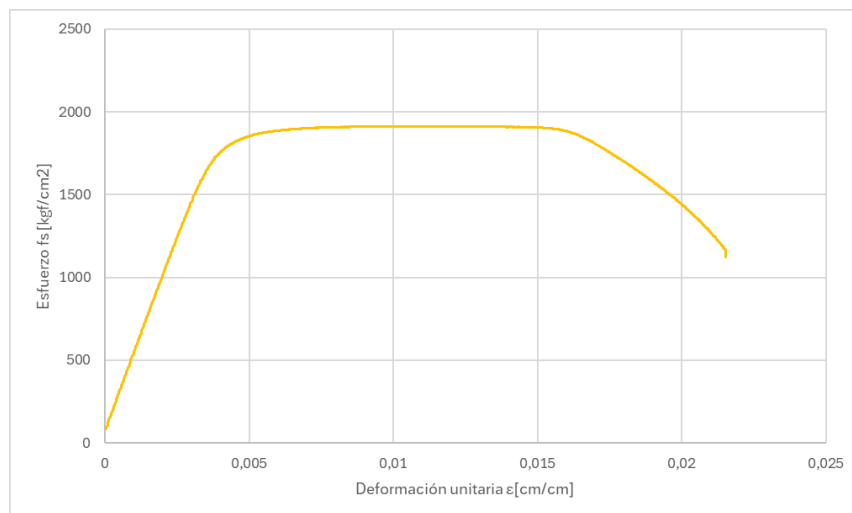


Figura 19: Gráfico de Esfuerzo v/s Deformación unitaria, Acero AT56-50H.

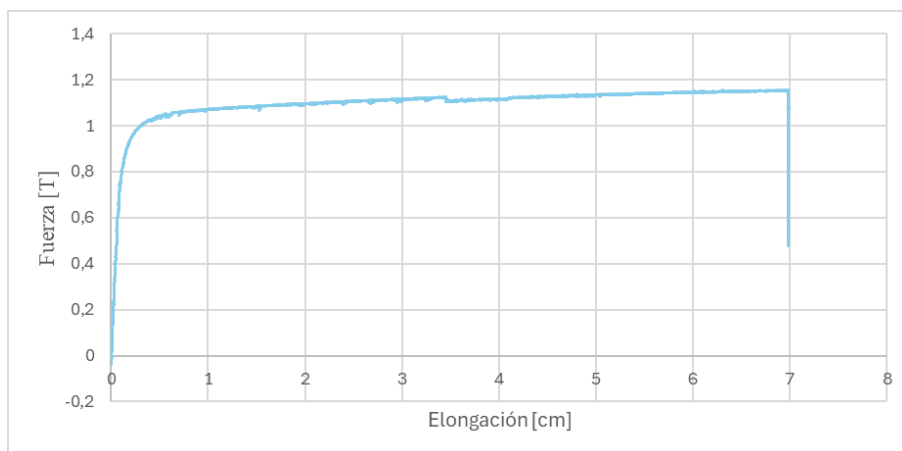


Figura 20: Gráfico de Esfuerzo v/s Elongación. AISI-304.

3.2. Diseño de Estribos

Con la finalidad de poder tener una buena comparación de resultados aplicando distintos ciclos de carga y poder evitar el pandeo en las barras longitudinales en la viga, se diseñó en base a las sugerencias de Rojas H. (2022), Maldonado (2023) y Bermúdez (2024) los estribos inclinados en dos planos. Como se muestra en las **Figura 21 a 23**.



Figura 21: Diseño estribo interno.

Además, se consideró el diseño de estribos externos que irían sobre los internos:

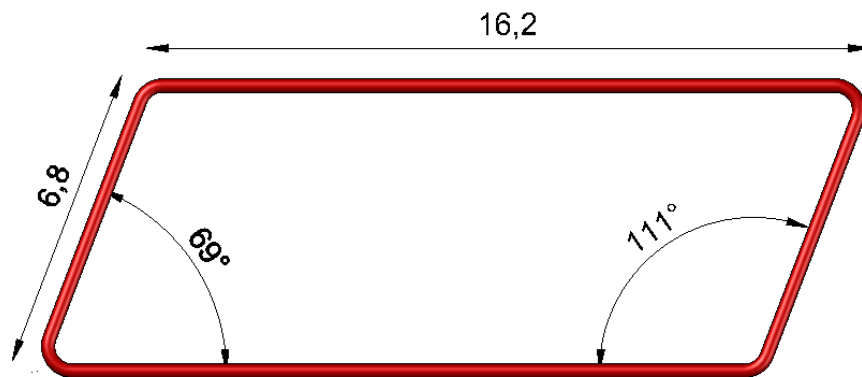


Figura 22: Diseño estribo externo.

Estos estribos son de acero inoxidable de 3,2 [mm] de diámetro y, como se observa en la **Figura 21 y Figura 22**, cuentan con inclinación interna de 69° y 111° respectivamente.

La inclinación en dos planos en las caras laterales y frontales, fue para arriostrar las barras longitudinales en todas las direcciones, variando los puntos y posición en las que actúa el refuerzo de estribos inclinados en la zona próxima a la columna.

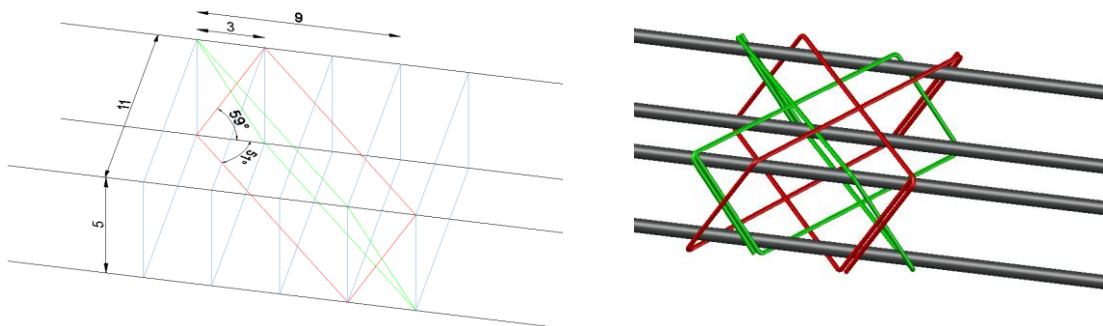


Figura 23: Aplicación Estribo inclinado en dos planos.

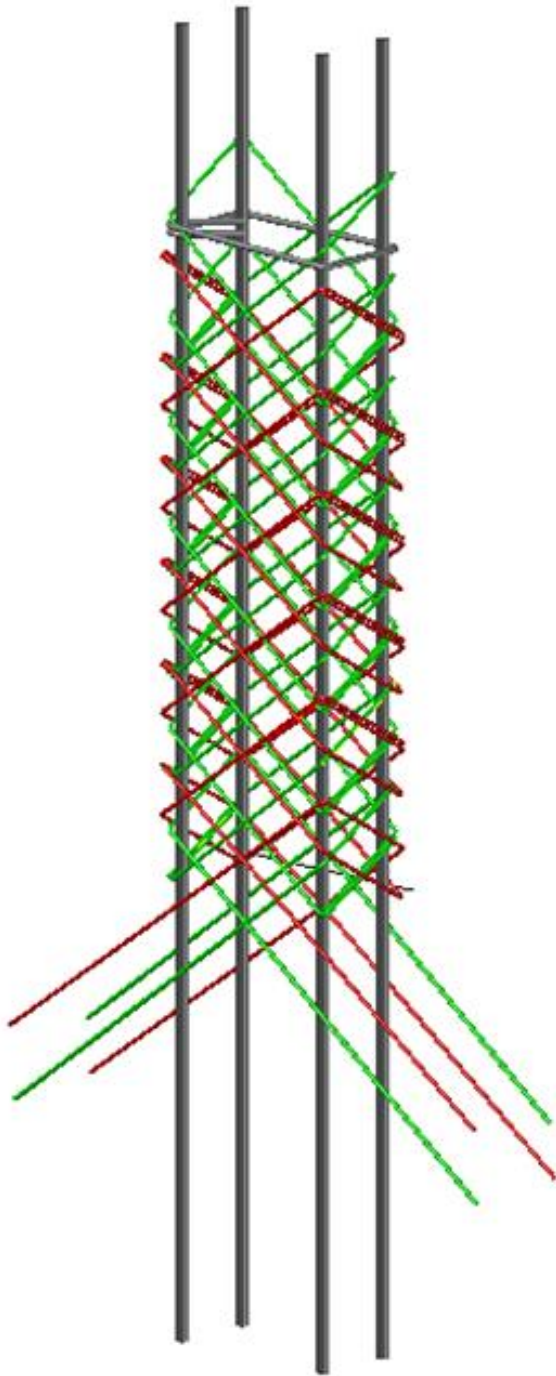


Figura 24: Colocación de Estribos Inclinados.

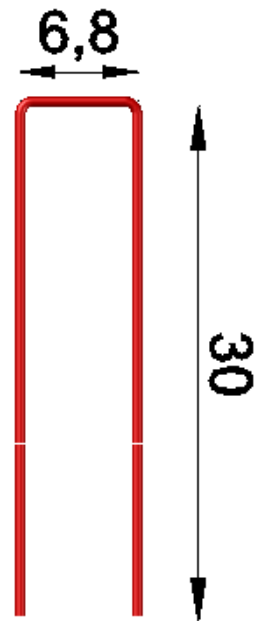


Figura 25: Estribo abierto Externo.

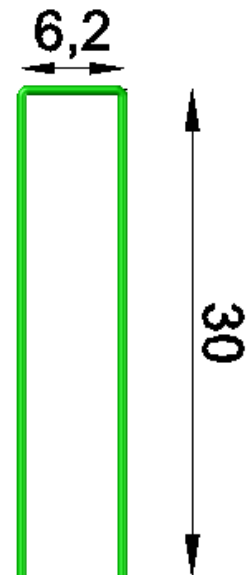


Figura 26: Estribo abierto Interno.

3.3. Hormigón

La dosificación se basa en lo realizado en trabajos previos dentro de la misma línea de investigación como los de Maldonado (2023), Bermúdez (2024) y Pino (2017). Pero de acuerdo con la tendencia actual, se decidió trabajar con resistencias un poco mayores, a las de anteriores memoristas, para la cual se adiciono la cantidad extra de cemento que se indica en la **Tabla 3**.

Para la confección de dos especímenes propuestos y tres probetas cilíndricas de 30[cm] de alto y 15 [cm] de diámetro , se consideró la siguiente dosificación:

Tabla 3: Dosificación para Hormigón de probetas

Material	Especificación	Cantidad Total
Hormigón Predosificado	H-20	87,5 [kg]
Cemento Especial	Melón Especial	2,5 [kg]
Plastificante	Cromplast-500	438 [ml]
Agua	-	7,62 [L]

3.3.1. Resistencia Probetas cilíndricas

De acuerdo con la norma NCh1037-2009, se muestran las siguientes resistencias a la compresión obtenidas a 7, 28 días, y a la edad del ensayo de las vigas, valores por gentileza de LEMCO.

Tabla 4: Resistencia a compresión de Hormigón.

Nombre Espécimen	Días de Curado	Resistencia Cilíndrica (Mpa)
RM (Inclinado)	7	30.50
RM (Inclinado)	28	35.09
RM (Inclinado)	60	53.64
RM (Inclinado)	28	48.49
RM (Ortogonal)	148	77.61
RM (Ortogonal)	148	83.04
RM (Ortogonal)	180	71.71

3.4. Características de las probetas fabricadas

A continuación, se detallarán las dimensiones para la confección de la armadura de la columna y viga.

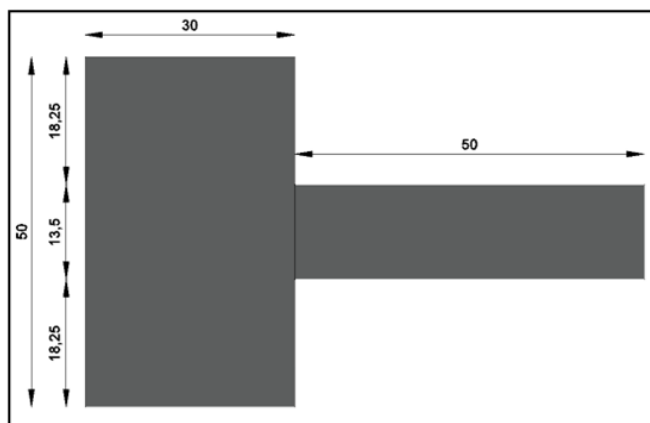


Figura 27: Dimensiones de probetas (Vista Frontal)

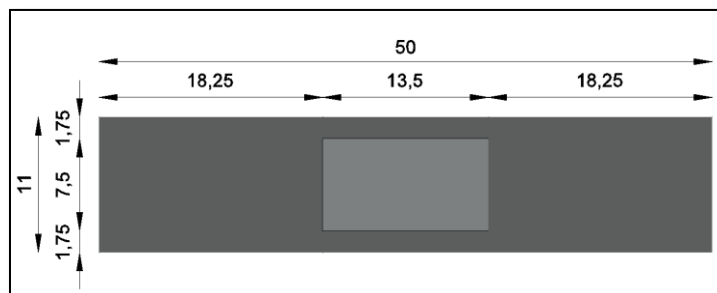


Figura 28: Dimensiones de probetas (Vista Lateral).

3.4.1. Características Columna

Para la confección de las seis columnas se consideraron los siguientes detalles:

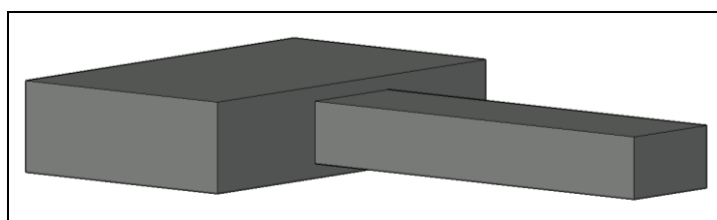


Figura 29: Vista Inclinada de Probeta.

- Las dimensiones de la columna son de 50x11x30 cm, aparecen en la **Figura 27 y Figura 28**.
- El tipo de acero utilizado para el refuerzo longitudinal y transversal se detalla en la **Tabla 2**.
- Para el refuerzo longitudinal la cuantía es de $10\phi 8$ de 47 [cm] de largo y para el refuerzo transversal $E\phi 4.2@2.3$ con ganchos sísmicos de largo 3,5 [cm], como se detalla en la **Figura 30**. Además, para la colocación de estribos, se fue cambiando la posición donde quedan los ganchos sísmicos para efectos de tener una distribución uniforme.

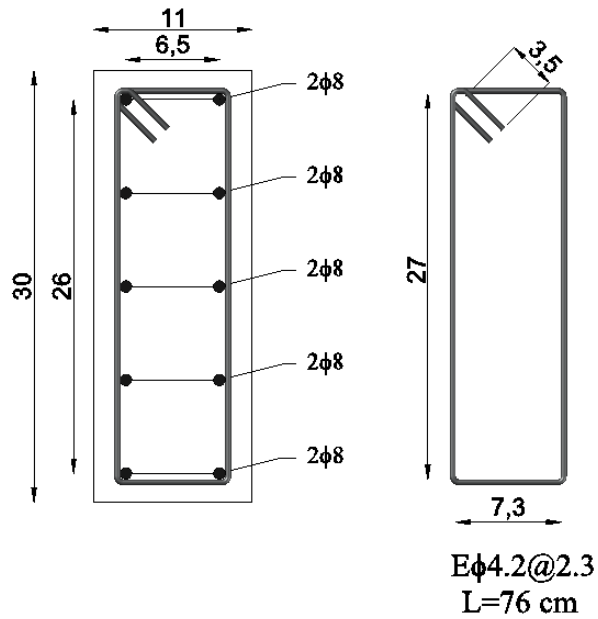


Figura 30: Sección Transversal de Columna y Armadura.

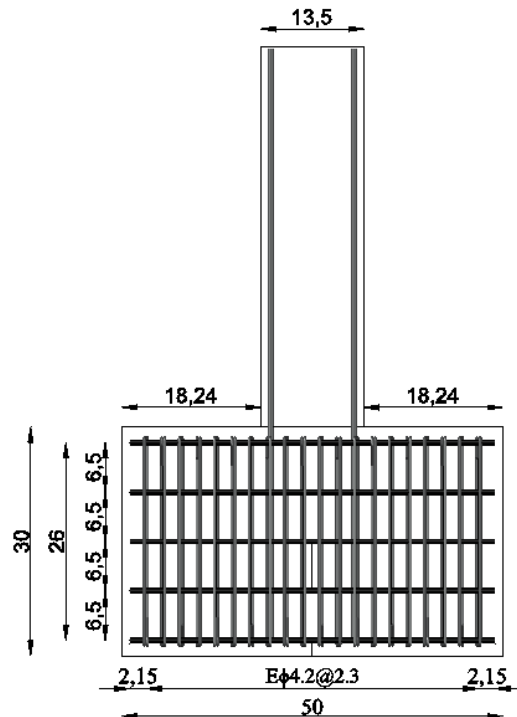


Figura 31: Plano de elevación de Columna y Armadura.

3.4.2. Características Viga

Para la armadura de la viga, a continuación, se indicarán los detalles para su confección, tanto para las vigas con estribos ortogonales, como también las vigas con estribos inclinados

Las dimensiones de la viga son 13,5x7,5x50 cm, especificado en la **Figura 27** y **Figura 28**.

3.4.2.1. Características Armadura con estribos ortogonales

Para la confección de las vigas con estribos ortogonales, el tipo de acero utilizado tanto para el refuerzo longitudinal y transversal se detalla en el ítem 5 y 6 de la **Tabla 2**.

Para el refuerzo transversal, la cuantía considerada en la zona cercana a la columna confinada es de $E\phi 4.2@3$ y en la zona no confinada $E\phi 4.2@6$, detallado en las **Figuras 32 y 33**.

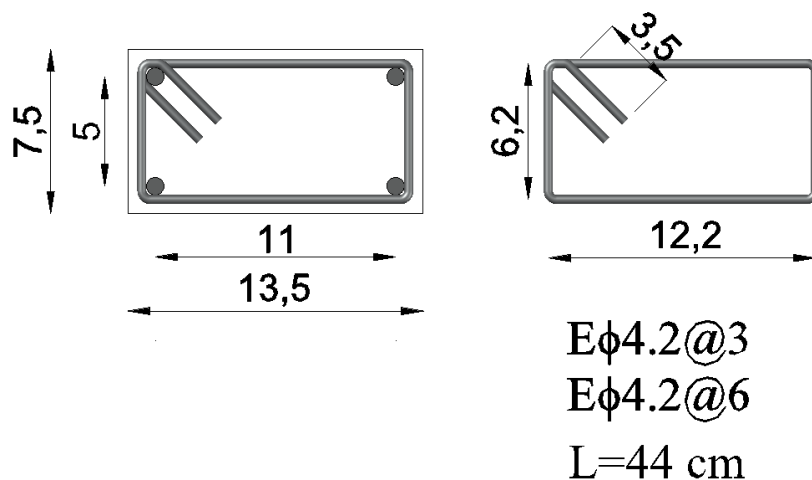


Figura 32: Sección Transversal de Viga y Armadura Ortogonal.

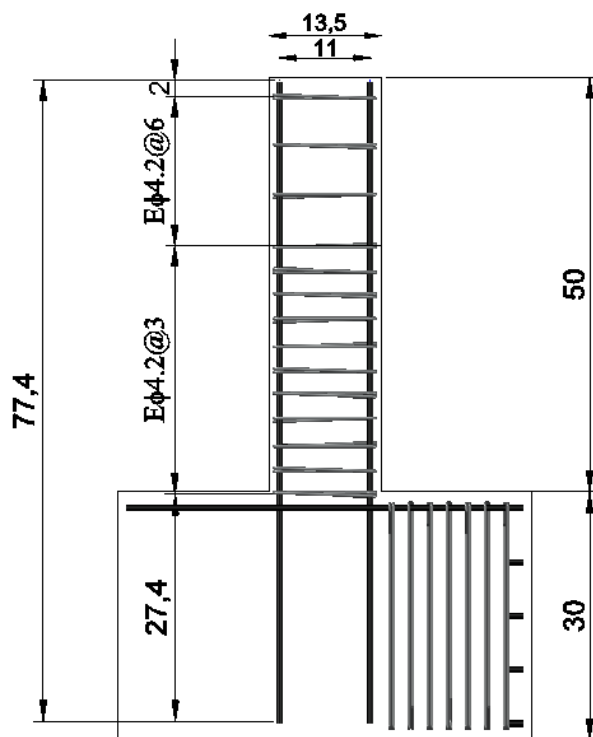


Figura 33: Plano de elevación de Viga y Armadura Ortogonal.

3.4.2.2. Características Armadura con estribos inclinados

Ahora para la confección de las vigas con estribos inclinados, el tipo de acero utilizado tanto para el refuerzo longitudinal y transversal se detalla en los ítems 1 al 4 de la **Tabla 2**.

Para el refuerzo transversal, se consideró una cuantía de $E\phi 3,2@3$ donde la colocación de estribos fue por parte, donde primero se comenzó con los internos, seguido de la colocación de estribos externos con amarre de acero de la forma como se indica en las **Figuras 34 y 35**:

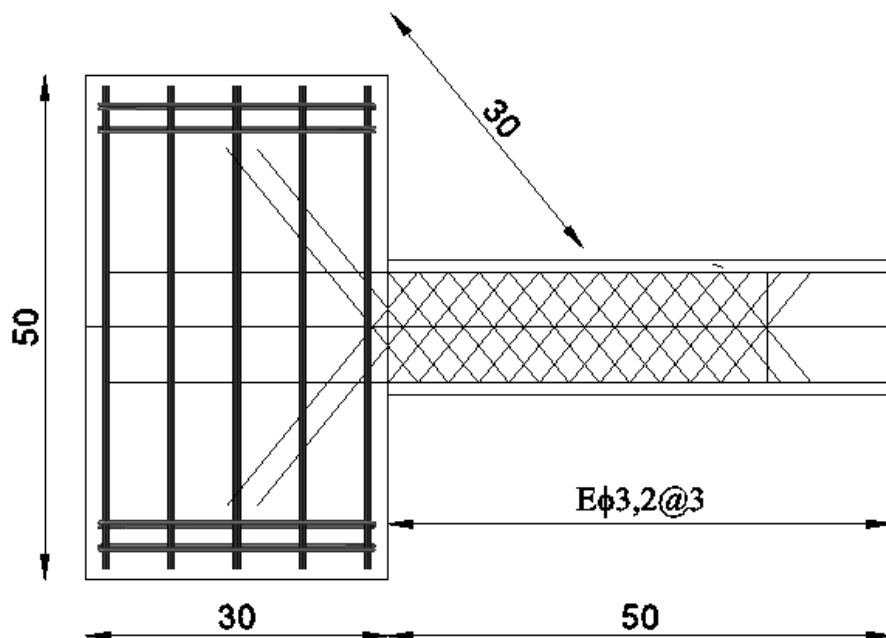


Figura 34: Plano de elevación de Viga y Armadura Inclinada.

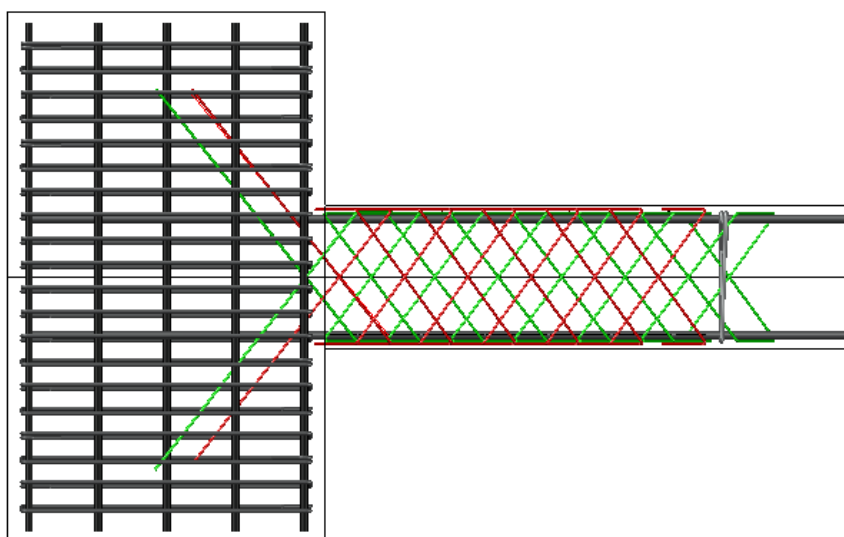
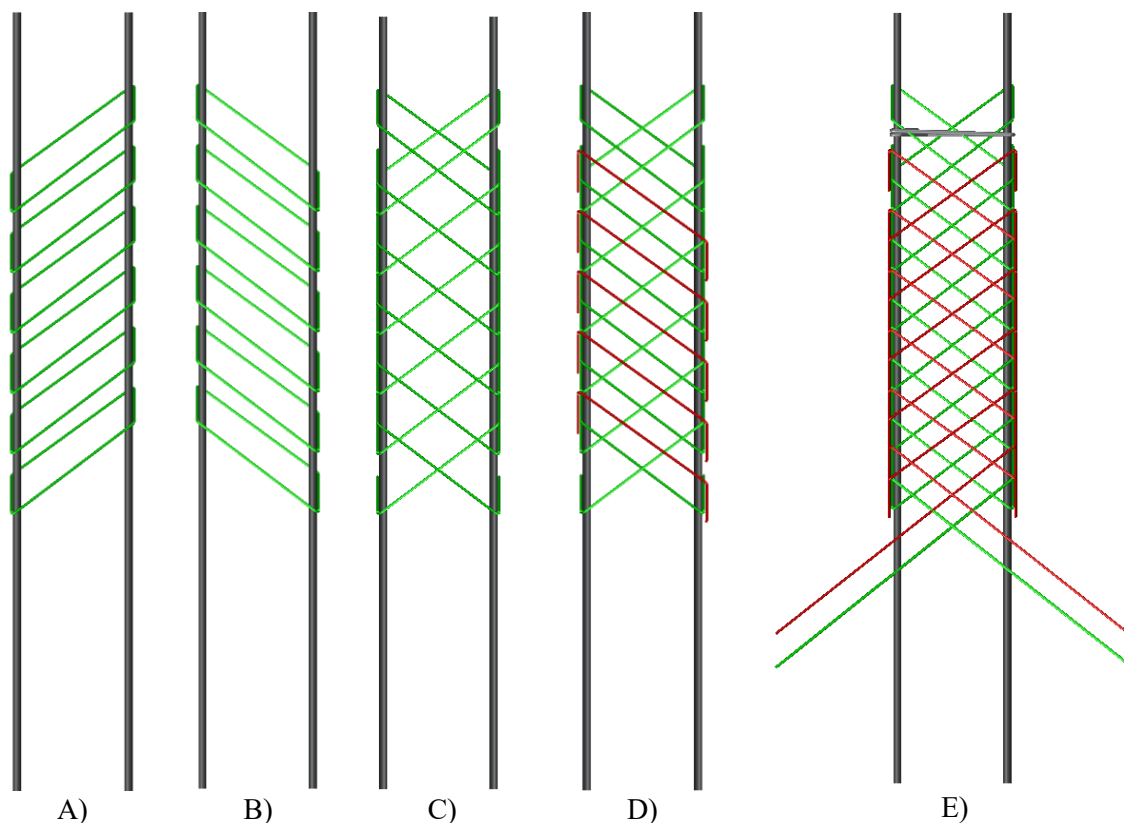


Figura 35: Vista de elevación armado Viga inclinada.

3.4.2.3. Proceso de armado armadura inclinada.

La colocación de estribos internos se realizó según el siguiente procedimiento:

Antes de comenzar, los estribos fueron doblados con la máquina de la **Figura 170** (Ver Anexo), después fueron soldadas en la unión de los extremos usando electrodo para acero inoxidable(E308-L) 3/32", la cual fue realizada por personal de LEMCO.



Dejando un espacio de 28[cm], se comenzó a instalar cada 6 [cm] los seis estribos internos como se observa en A), los cuales fueron amarrados con alambre galvanizado N°22. Después con la misma separación cada 6 [cm] se colocaron siguientes seis estribos de forma simétrica, como se observa en B), de este modo queda terminado la colocación de los doce estribos internos como se observa en C).

Ya instalados los estribos internos, se continúa colocando los estribos externos de la misma manera que A) y B) pero en este caso con orientación invertida con la finalidad de obtener la inclinación en forma de X de separación de 3[cm] como se observa en la **Figura 36**.

Ya finalizando se colocan los estribos abiertos y un estribo ortogonal de refuerzo en el extremo de la viga, la cual es zona con menor enfierradura, como se observa en E).

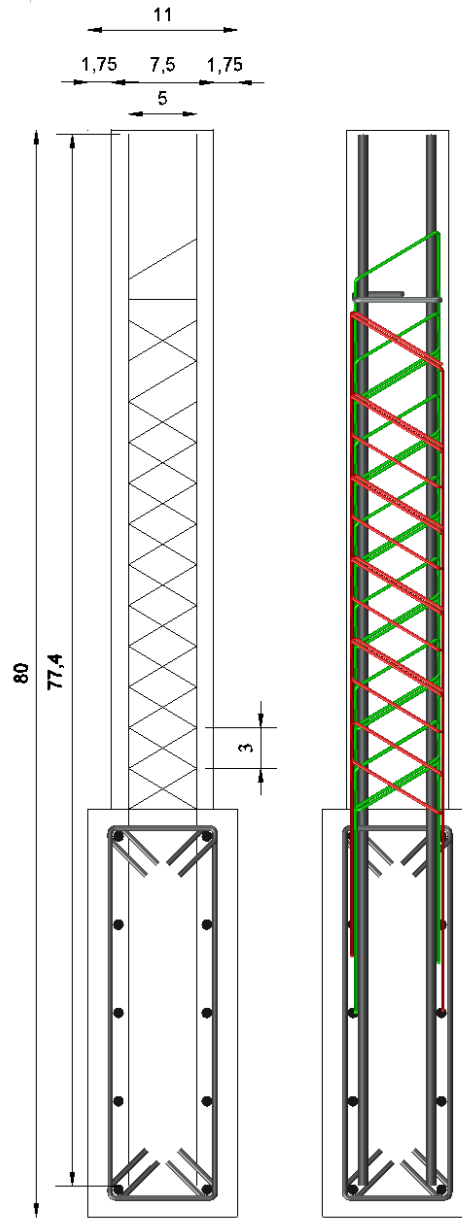


Figura 36: Sección Transversal de Viga y Armadura Inclinada.

3.5. Diseño de las probetas

Primero se hizo, para tener una mejor comprensión, un modelado 3D de la columna según lo indicado en la **Figura 37**. Además se utilizó el mismo diseño de columna para todas las probetas ensayadas.

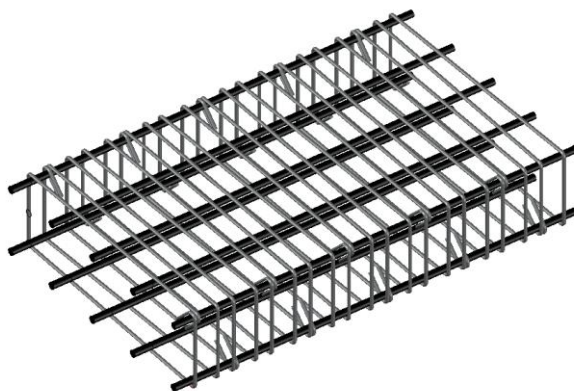


Figura 37: Diseño 3D de Armadura de Columna.

Después se diseñaron dos vigas con estribos ortogonales como se muestra en las **Figuras 38 y 39**.



**Figura 38: Diseño 3D armadura
Viga ortogonal**

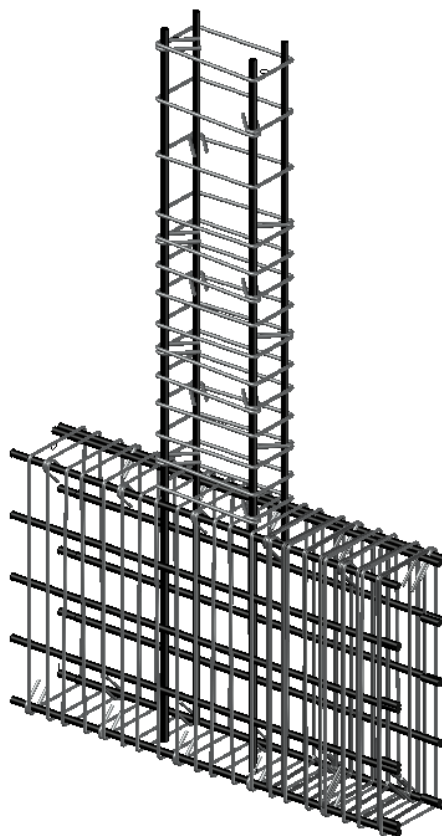


**Figura 39: Diseño 3D unión Armadura-Viga con estribos
ortogonales.**

Del mismo modo se terminó el diseño de la columna unida a la viga de estribos inclinados. Como se muestra en las **Figuras 40 a 43**.

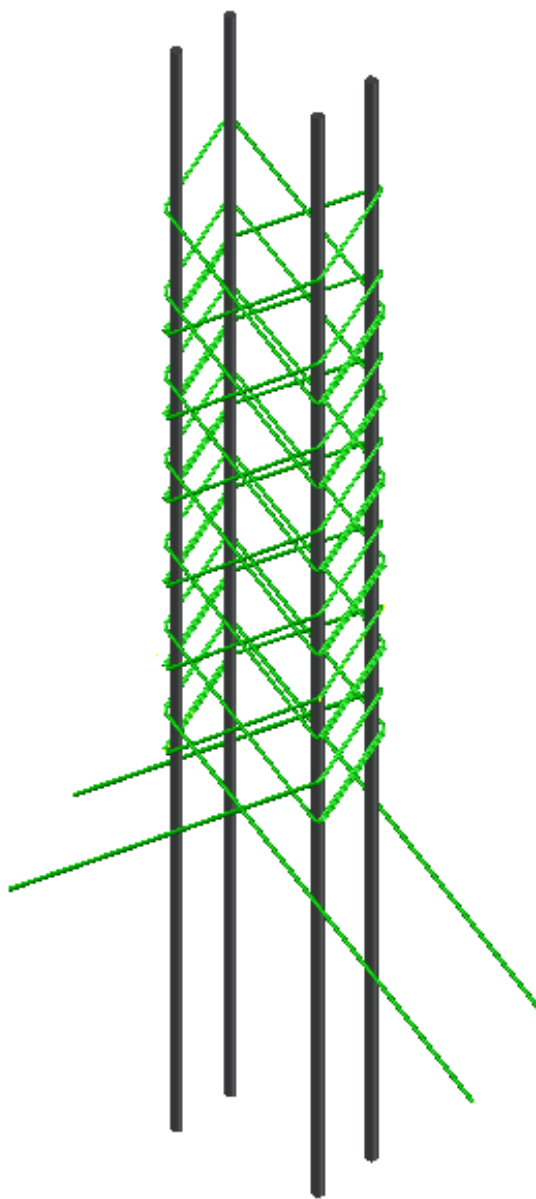


Figura 40 Diseño 3D Colocación estribos inclinados internos.

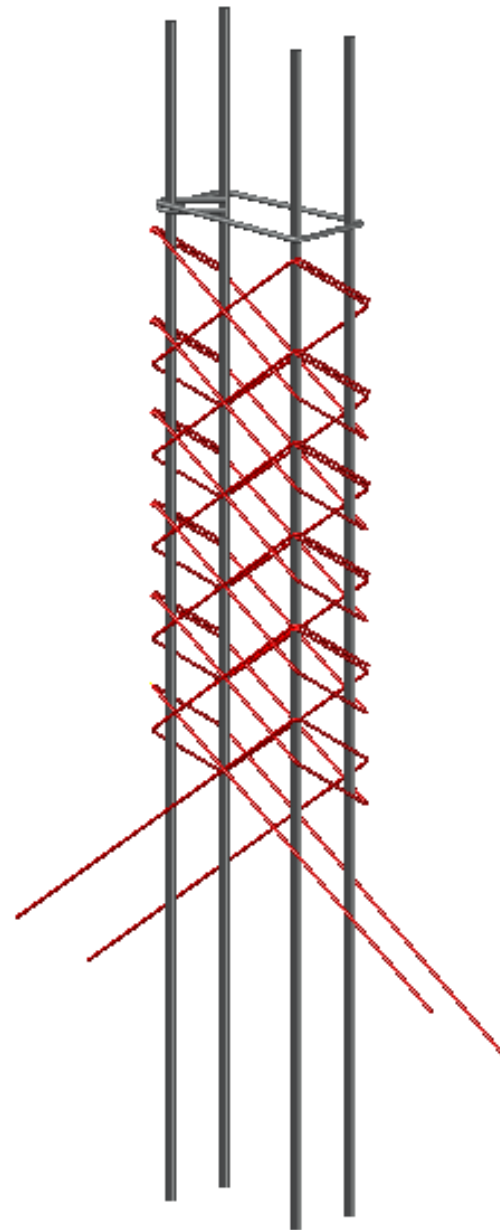


Figura 41: Diseño 3D Colocación estribos inclinados externos.

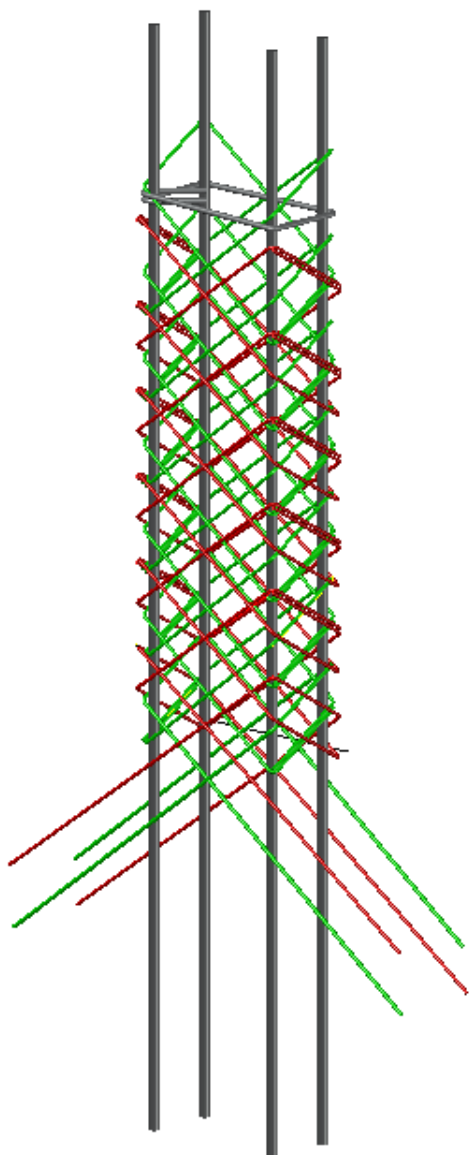


Figura 42: Diseño 3D unión estribos internos y externos.

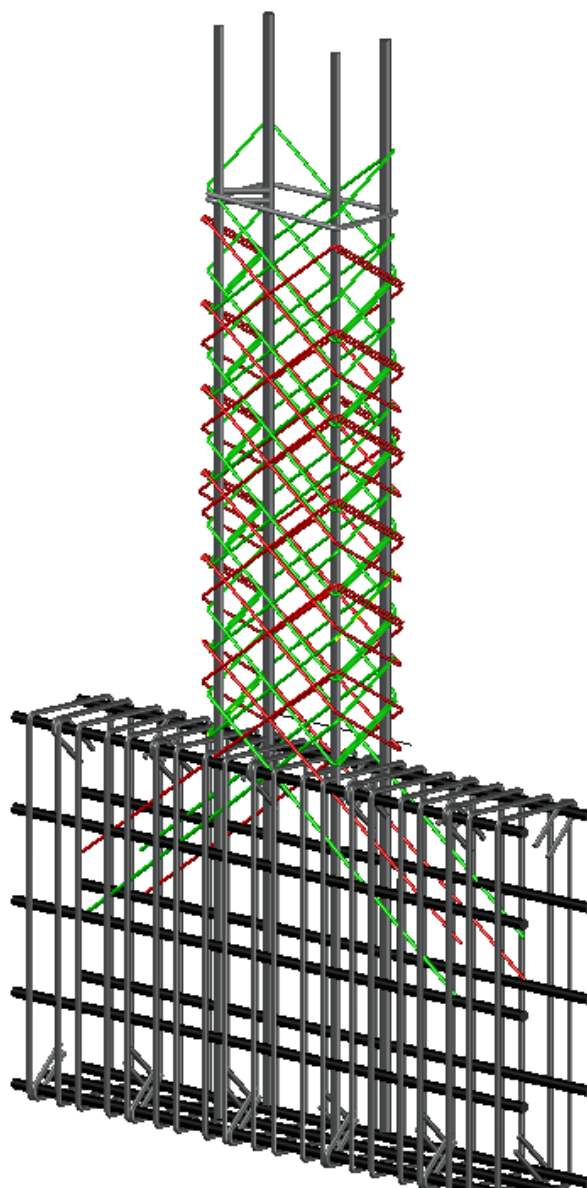


Figura 43: Diseño 3D Unión Columna-Viga con estribos inclinados.

3.6. Moldaje

Para la construcción de los moldajes, se utilizó Melamina Blanca de 15 [mm] y cholguán de 2,5 [mm], donde las secciones se detallan en las **Figuras 45 a 46** y las dimensiones en la **Tabla 5**:

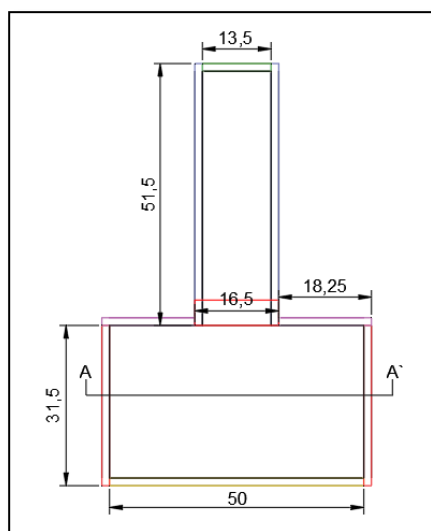


Figura 45: Dimensiones generales de moldaje.

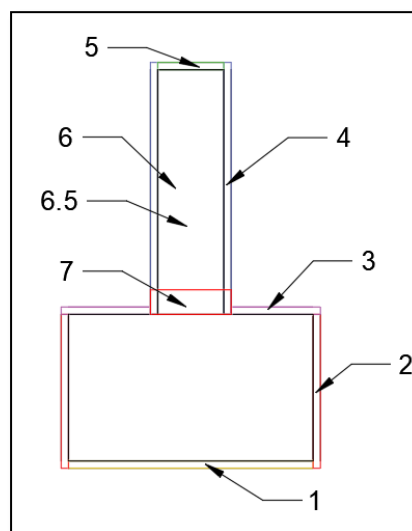


Figura 44: Partes de Moldaje.

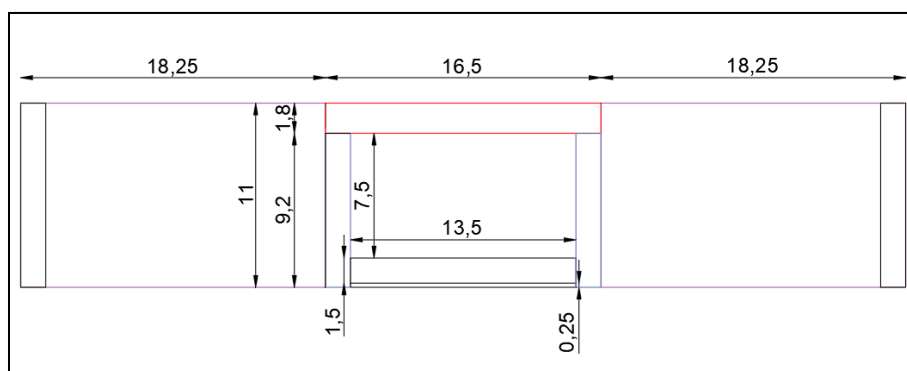


Figura 46: Sección transversal unión Viga-Columna.

Tabla 5: Dimensiones partes de Moldaje.

Sección	Largo [cm]	Alto [cm]	Espesor [cm]
1 [Melamina]	50	11	1.5
2 [Melamina]	31.5	11	1.5
3 [Melamina]	18.25	11	1.5
4 [Melamina]	51.5	9.2	1.5
5 [Melamina]	13,5	11	1.5
6 [Melamina]	50	13.5	1.5
6.5 [Cholguán]	50	13.5	0.25
7 [Melamina]	5	16.5	1.8

Además, para la sección N°2 se crearon cuatro orificios centrados para la colocación de las barras de anclaje de diámetro de 5/8" y 24 [cm] de largo, las cuales estarán ajustadas con tuercas tanto internas como externas, Como se observa en los anexos (**Figura 175**).

Además, antes de hormigonar, se utilizó desmoldante para madera para evitar que el hormigón se adhiriera en la madera.

3.7. Hormigonado de probetas

Siguiendo la dosificación (**Tabla 3**) se realizaron un total de seis probetas y de siete cilindros para efectos de poder obtener la resistencia a la compresión (**Tabla 4**).

No se pudo hormigonar las seis probetas en el mismo día por lo que el trabajo se separó en dos días. Primero se hormigonaron las probetas RM5 y RM6, después las probetas RM1, RM2, RM3 y RM4. Esto se llevó a cabo con la ayuda y supervisión del personal del laboratorio LEMCO, que además facilitó las herramientas y equipos necesarios, como mesa de vibrado, betonera, y otros (**Anexo 1**).

Después de hormigonar se dejó curar las probetas por dos días en ambiente natural para luego llevarlas a la cámara húmeda del laboratorio LEMCO por un periodo mínimo de 28 días. Luego se siguió con el proceso de pintado y montaje en el lugar de ensayo, además de la limpieza de los orificios de donde se colocarán las cámaras endoscópicas (más detalles en memoria de Palacios (2025)).

3.8. Montaje e instrumentación

Las probetas confeccionadas fueron sometidas a cargas cíclicas en el lugar de ensayo, que fue la base de la mesa sísmica del laboratorio (LEMCO) del Departamento de Obras Civiles, donde previamente se retiró la plataforma de la mesa para trabajar con el actuador.

El actuador MTS-244, está operado por el controlador MTS 407, donde además se registra la fuerza aplicada mediante una celda de carga MTS que se encuentra en la cabeza del actuador, y el desplazamiento con el LVDT incluido en el interior del actuador.

Por último, toda esta información se recopiló utilizando un adquisidor de datos MCC para después obtener los gráficos utilizando el programa TracerDAQ.

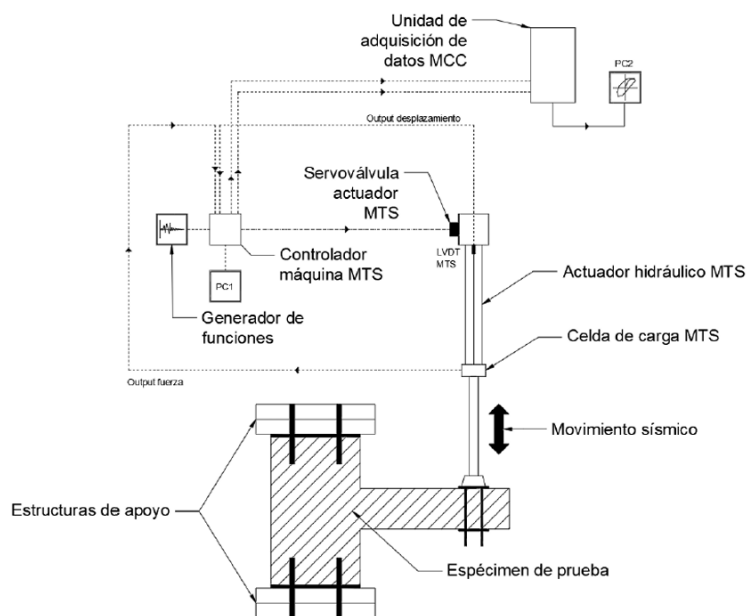


Figura 47: Diagrama unilineal del sistema de ensayo (Maldonado,2023).

3.8.1. Plan de carga

La carga se aplica en régimen de desplazamiento controlado. El programa de desplazamiento que se utilizó para esta investigación está basado en la normativa ACI-374, siendo de cinco ciclos para cada nivel de desplazamiento aplicado, a excepción del nivel de 25 [mm] que consta de diez ciclos como se detalla en la **Figura 48**:

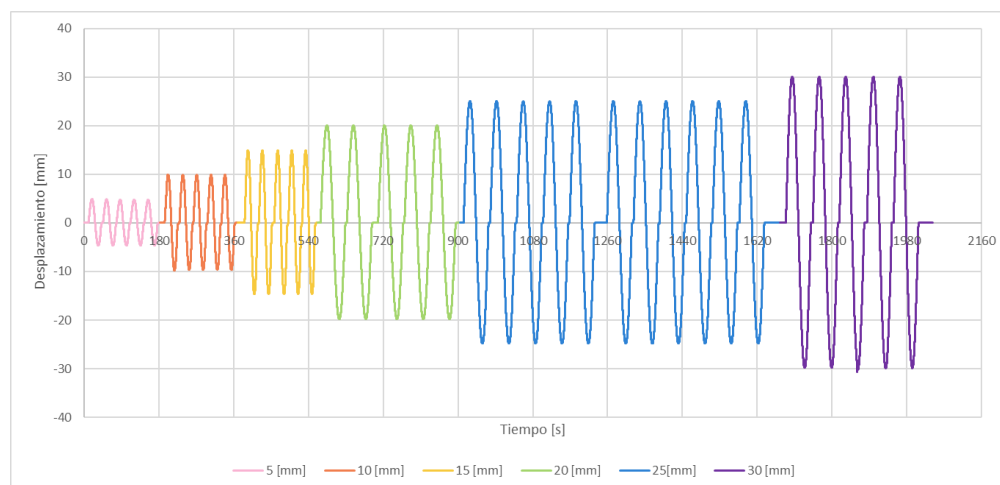


Figura 48: Historia de desplazamiento, Probetas RM1, RM4, RM6.

3.8.2. Montaje

Para colocar las probetas en la mesa sísmica los pasos realizados son los siguientes:

- Desconectar y desplazar la plataforma de la mesa sísmica liberando dos de los cuatro rieles, dejando un espacio suficiente para poder ensayar la probeta.
- Una vez despejada la zona, izar la probeta y anclar la columna de la probeta a los soportes que tiene la mesa sísmica para los ensayos, procurando mantener el mismo nivel de eje horizontal con el actuador.
- Una vez anclada la columna por la sección inferior se procede a apretar los pernos de la cara lateral derecha de la columna.
- Después antes de apretar los pernos de la cara lateral izquierda, se procedió a colocar mortero de nivelación para asegurar que la probeta estuviera totalmente adherida a los puntos de apoyo de la mesa sísmica.
- Con la columna ya anclada, se instaló en la punta de la viga el riel o carro deslizante con el fin de evitar posible torsión de la viga al momento de ensayar.
- Finalmente se conectó el brazo hidráulico del actuador en sector extremo de la viga utilizando dos placas perforadas, para asegurar que los ejes centrales de la probeta y actuador estén completamente perpendiculares, lo cual se corroboró con láser de nivelación.

Además del montaje de la columna, se colocaron cámaras endoscópicas en los orificios que permiten visualizar las barras longitudinales de la viga. Esto se detalla en la memoria de Palacios (2025).

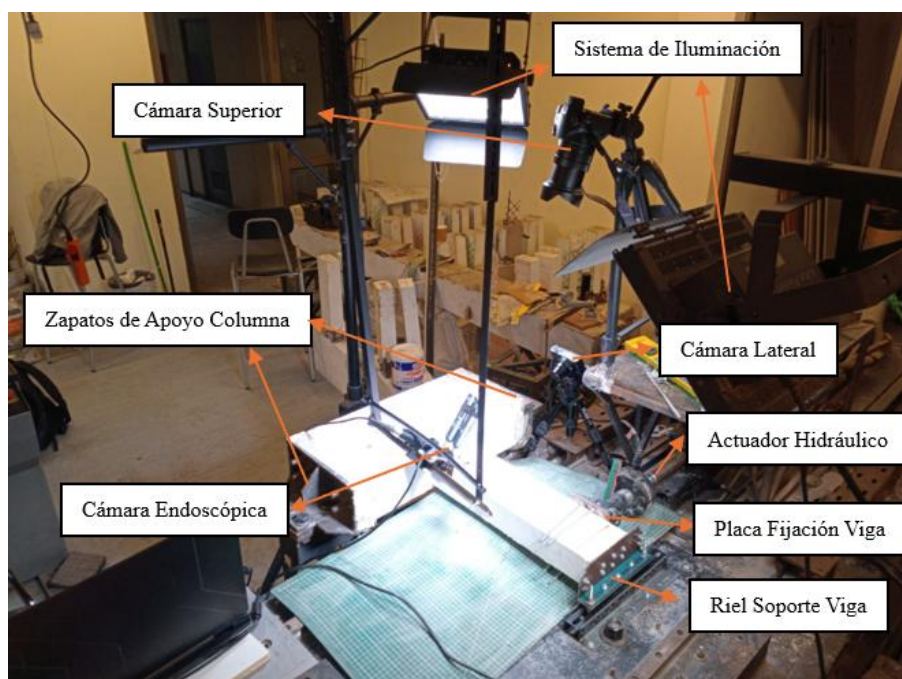


Figura 49: Montaje de probeta en Mesa Sísmica LEMCO.

En la Ítem de Anexo (**Figura 191**) se detallan con fotografías del proceso de montaje.

Capítulo 4

Resultados Experimentales

4.1. General

Con los ensayos realizados a las seis probetas se obtuvieron las curvas de histéresis con el programa TracerDAQ para poder identificar el comportamiento del espécimen, donde se puede analizar cuando falla la probeta, cuando va perdiendo resistencia y cualquier comportamiento que se puede comparar tanto en el grafico como el registro fotográfico. Para ello se analizó el gráfico de la fuerza v/s desplazamiento desde el inicio al fin del ensayo, así como también las fotos registradas.

Además, se obtuvo mediante cámaras endoscópicas el comportamiento de las barras longitudinales al interior de las vigas, en donde los resultados obtenidos son informados en la memoria de Palacios(2025).

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada probeta ensayada, donde se obtuvo las curvas y fotografías para cada serie de desplazamiento y ciclos importantes identificados. Finalizando con sus respectivas bitácoras de ensayo y comentarios generales.

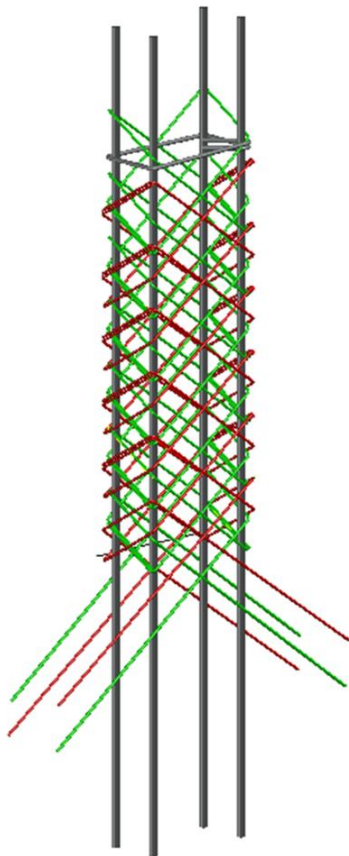


Figura 50: Armadura probetas RM1,RM2,RM3,RM4.



Figura 51: Armadura probetas RM5 y RM6.

4.2. Probeta RM1

4.2.1. Aspectos Generales

Hormigón armado de resistencia 54 [Mpa] con armadura de refuerzo inclinada como se observa en la **Figura 50**, con dos ductos para la instalación de cámaras endoscópicas.

4.2.2. Curva Histéresis RM1

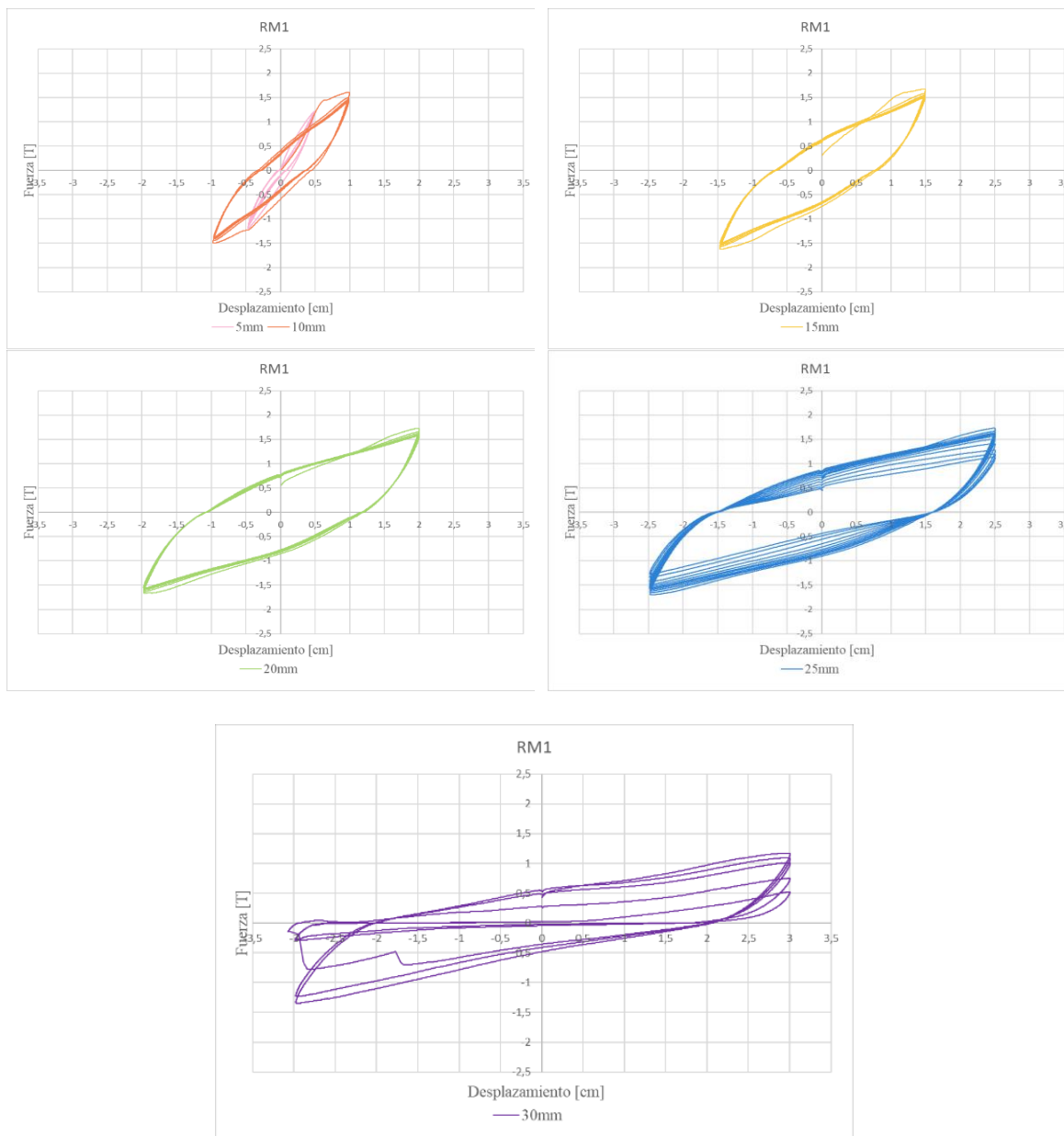


Figura 52: Curvas de Histéresis parciales RM1.

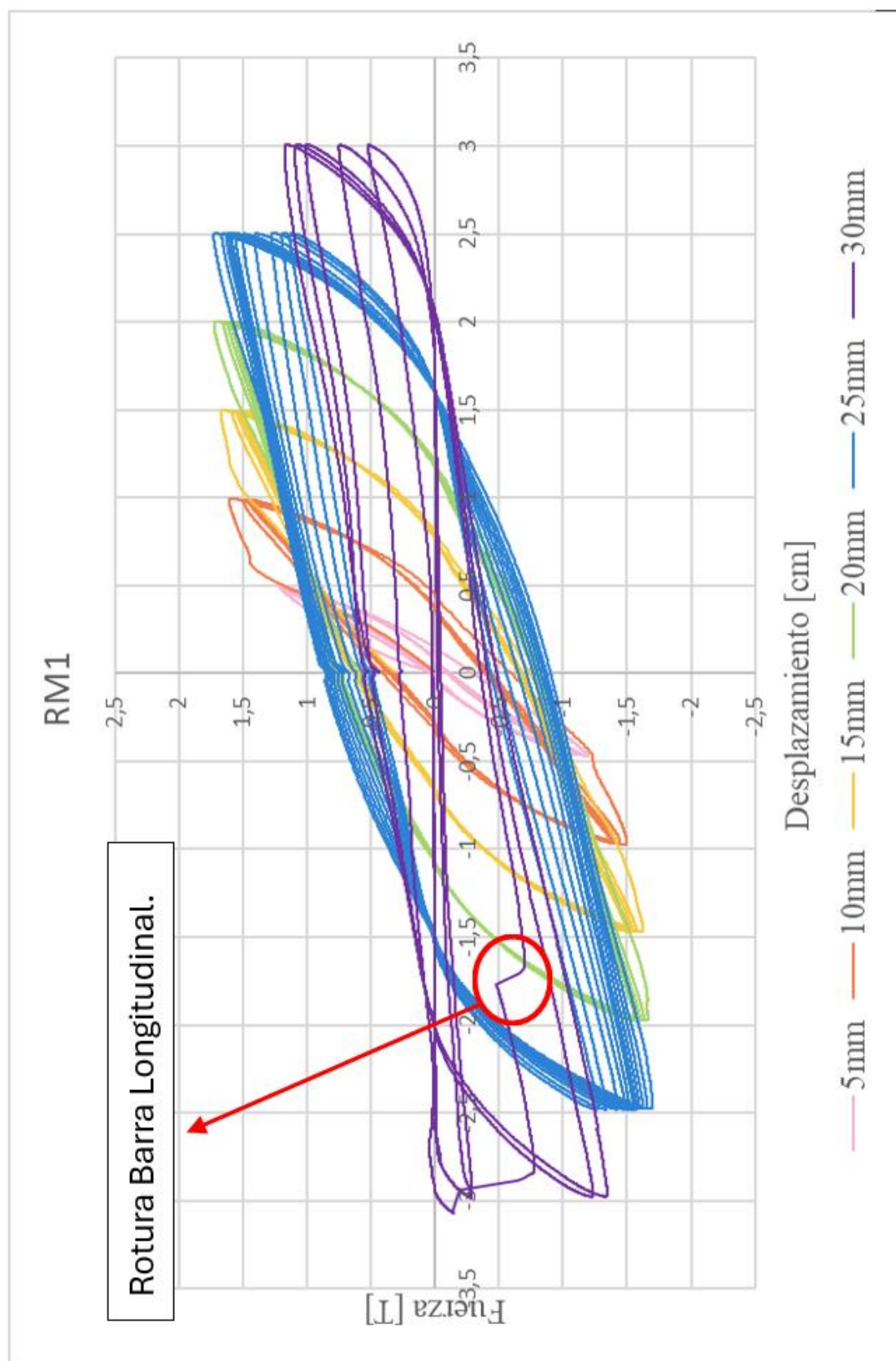


Figura 53: Curva de Histéresis Probeta RM1.

4.2.3. Registro Fotográficos Probeta RM1

4.2.3.1. Máximo desplazamiento positivo (vista lateral)



Figura 54: Quinto Ciclo 5mm RM1 (Positivo)

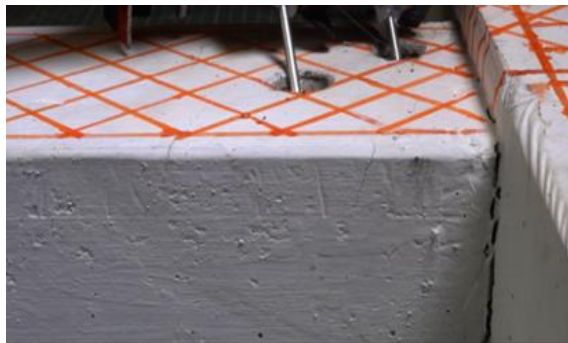


Figura 55: Quinto Ciclo 10mm RM1 (Positivo)



Figura 56: Quinto Ciclo 15mm RM1 (Positivo)

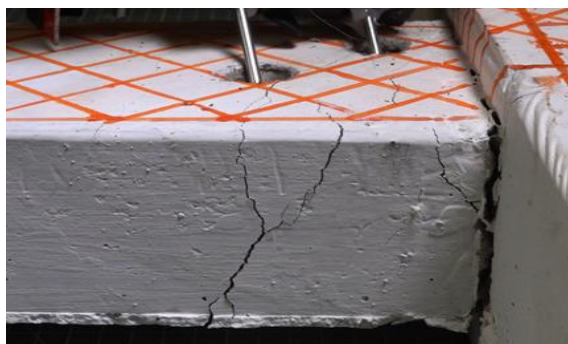


Figura 57: Quinto Ciclo 20mm RM1 (Positivo)

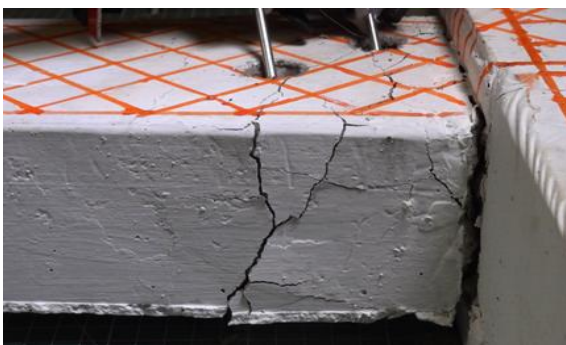


Figura 58: Quinto Ciclo 25mm RM1 (Positivo)



Figura 59: Décimo Ciclo 25mm RM1 (Positivo)

4.2.3.2. Máximo desplazamiento negativo (vista lateral)

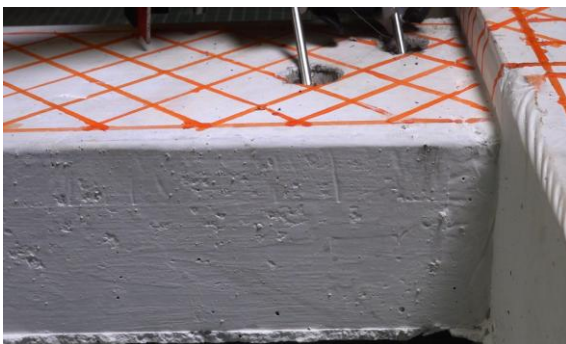


Figura 60 Quinto Ciclo 5mm RM1 (Negativo)



Figura 61 Quinto Ciclo 10mm RM1 (Negativo)

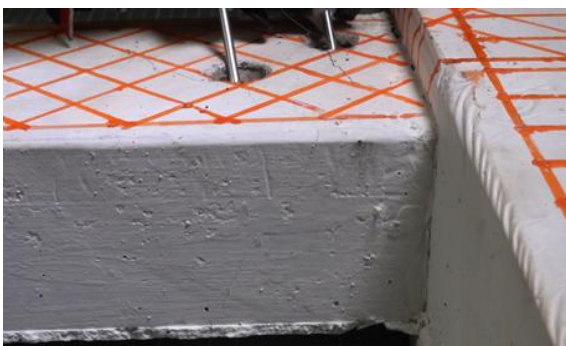


Figura 62 Quinto Ciclo 15mm RM1 (Negativo)

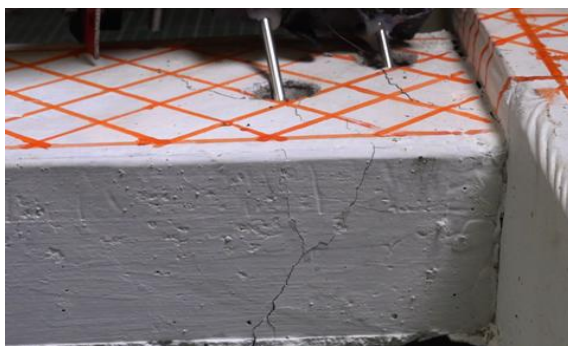


Figura 63 Quinto Ciclo 20mm RM1 (Negativo)



Figura 64 Quinto Ciclo 25mm RM1 (Negativo)



Figura 65 Décimo Ciclo 25mm RM1 (Negativo)

4.2.3.3. Estado espécimen último Ciclo (vista superior)

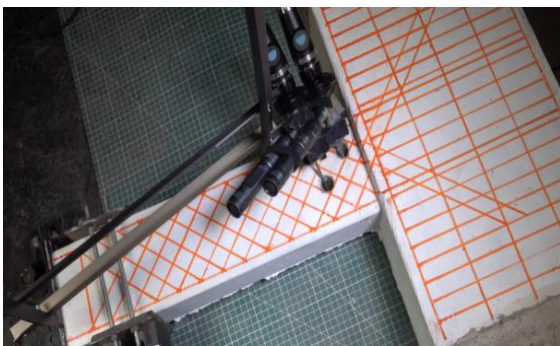


Figura 66: Quinto Ciclo 5mm RM1 (Estado).



Figura 67: Quinto Ciclo 10mm RM1 (Estado).



Figura 68: Quinto Ciclo 15mm RM1 (Estado).

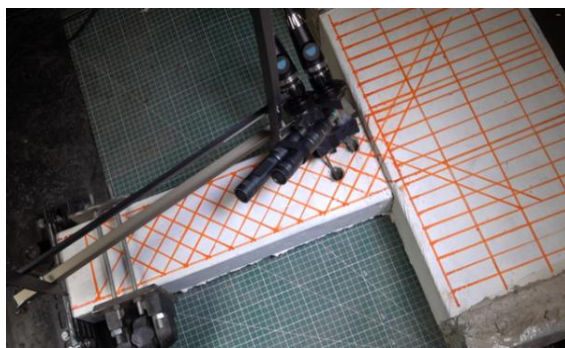


Figura 69: Quinto Ciclo 20mm RM1 (Estado).

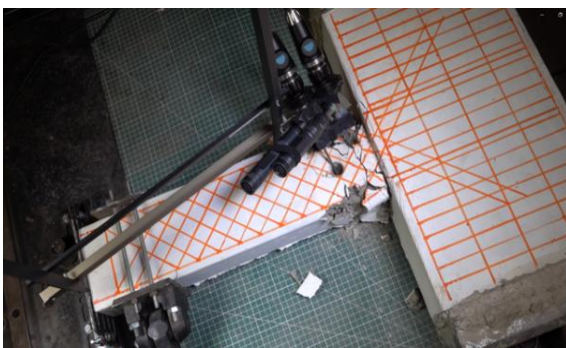


Figura 70: Quinto Ciclo 25mm RM1 (Estado).

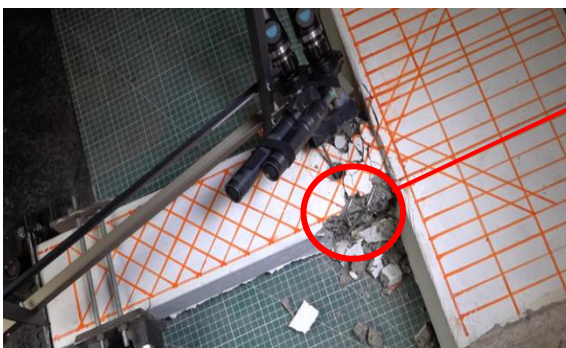


Figura 71: Quinto Ciclo 30mm RM1 (Estado).



Fractura de Barra longitudinal en lado negativo de la viga, 4° ciclo de [30 mm].

4.2.4. Bitácora de ensayo Probeta RM1

Tabla 6: Bitácora Ensayo Probeta RM1.

Desplazamiento	Bitácora
5mm	• Inicio de ensayo sin Ninguna grieta producida.
10mm	• Comienzan a notarse pequeñas grietas casi imperceptibles.
15mm	• Las fisuras son más notorias, pero no quedan de forma permanente.
20mm	• Comienzan a quedar fisuras permanentes, pero aún no se produce un deterioro, deformación o pérdida de hormigón importante.
25mm	• Durante los primeros cinco ciclos se genera una pequeña deformación en el hormigón, producto del movimiento de las barras de acero. • Ya finalizando el décimo ciclo, se produce una pérdida de hormigón de recubrimiento, lo cual produce una leve disminución en la resistencia.
30mm	• Se produce un Corte en la barra longitudinal en el cuarto Ciclo al momento de aplicar carga al lado negativo, lo cual produce una disminución de resistencia considerable (1[Ton]). • Ya finalizando los ciclos se pierde una cantidad importante de hormigón de recubrimiento.

4.3. Probeta RM2

4.3.1. Aspectos Generales

Hormigón armado de resistencia 54 [Mpa] con armadura de refuerzo inclinada como se observa en la **Figura 50**, con colocación de Strain Gauge.

4.3.2. Curva Histéresis RM2

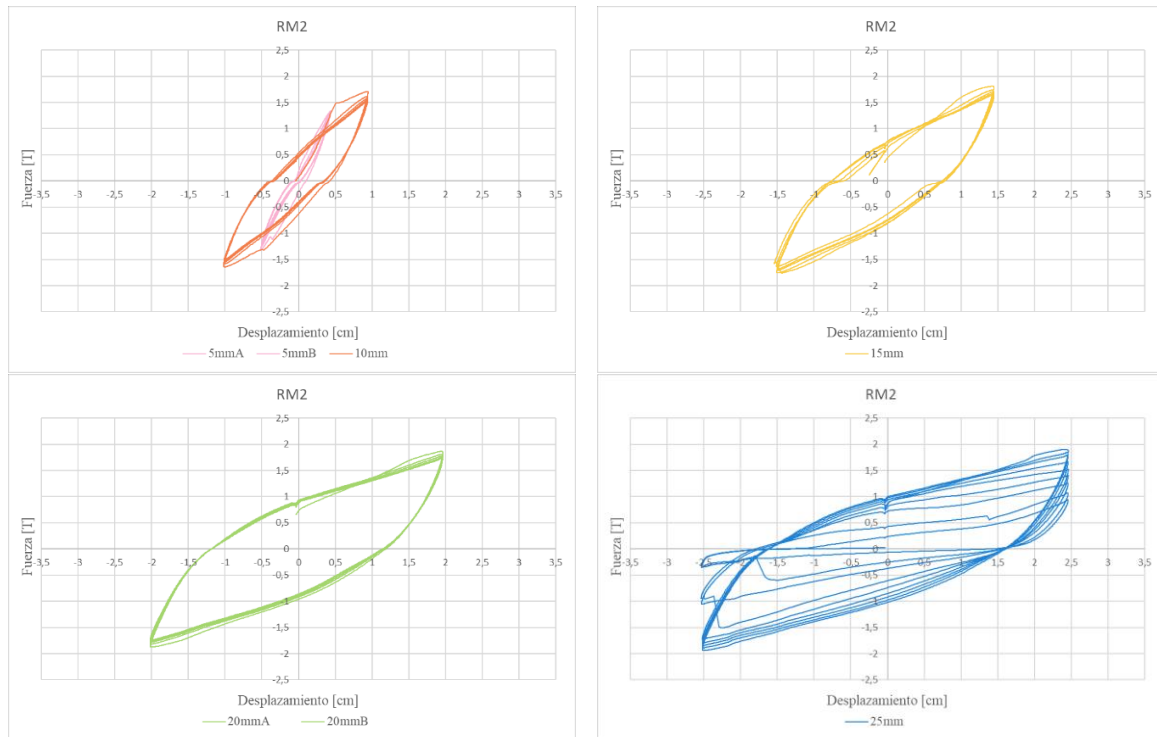


Figura 72: Curvas de Histéresis Parciales RM2.

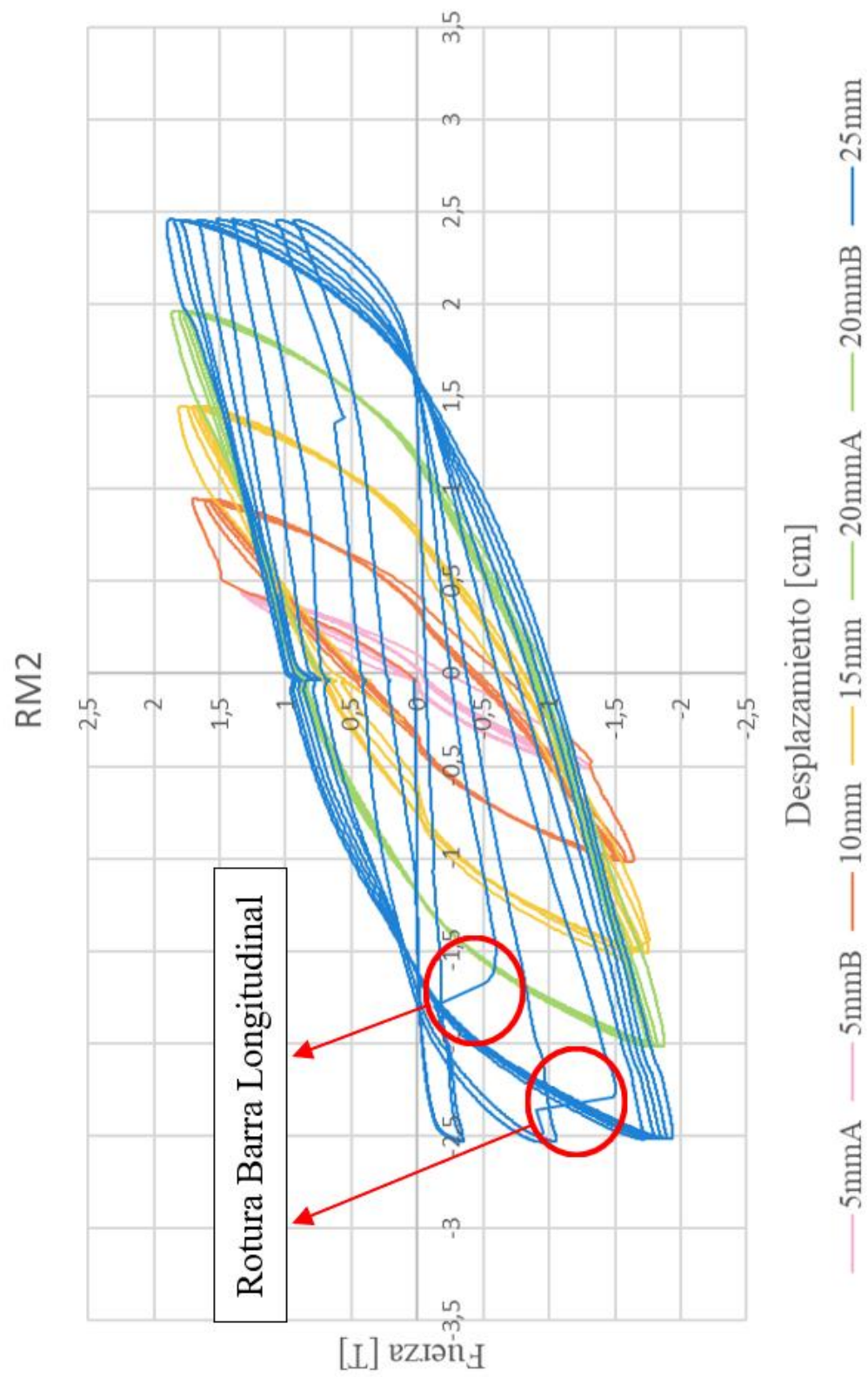


Figura 73: Curva de Histéresis Probeta RM2.

4.3.3. Registro Fotográficos Probeta RM2

4.3.3.1. Máximo desplazamiento positivo (vista lateral)



Figura 74: Quinto Ciclo 5mm RM2 (Positivo).

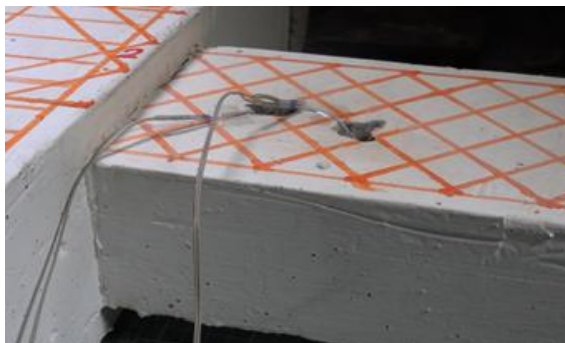


Figura 75: Quinto Ciclo 10mm RM2 (Positivo).

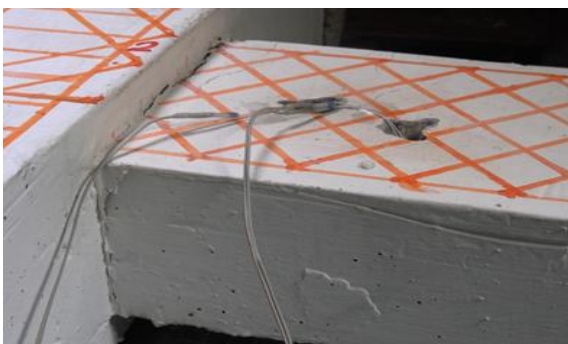


Figura 76: Quinto Ciclo 15mm RM2 (Positivo).

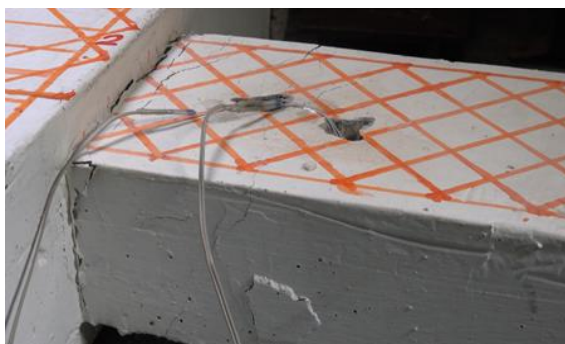


Figura 77: Quinto Ciclo 20mm RM2 (Positivo).



Pandeo de barra
antes del corte.

Figura 78: Décimo Ciclo 25mm RM2 (Positivo).

4.3.3.2. Máximo desplazamiento Negativo (vista lateral)

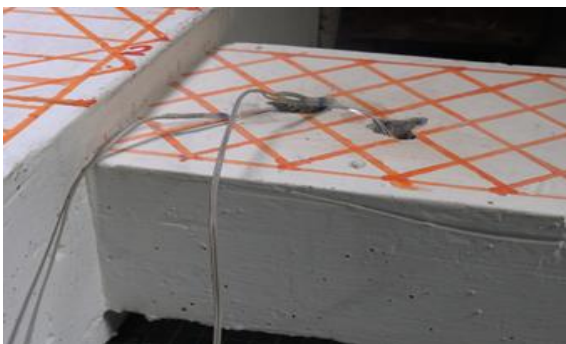


Figura 79: Quinto Ciclo 5mm RM2 (Negativo).

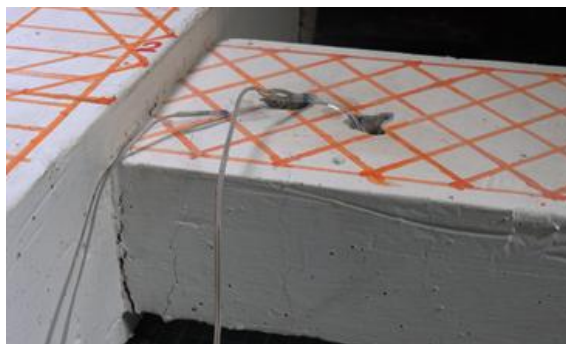


Figura 80: Quinto Ciclo 10mm RM2 (Negativo).

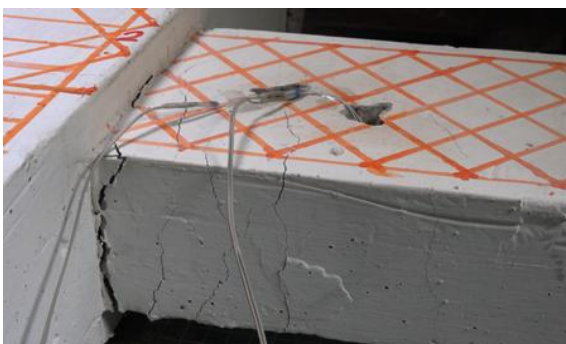


Figura 81: Quinto Ciclo 15mm RM2 (Negativo).



Figura 82: Quinto Ciclo 20mm RM2 (Negativo).



Corte de barra
longitudinal Ciclo
N°6 (25 mm)

Figura 83: Décimo Ciclo 25mm RM2 (Negativo).

4.3.3.3. Estado espécimen último Ciclo (vista superior)

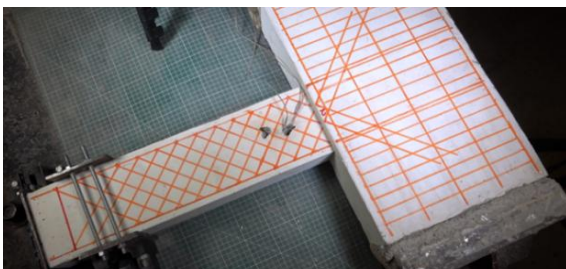


Figura 84: Quinto Ciclo 5mm RM2 (Estado).

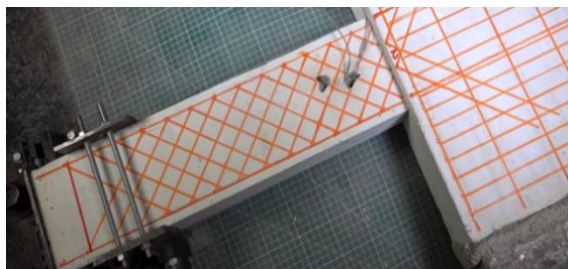


Figura 85: Quinto Ciclo 10mm RM2 (Estado).

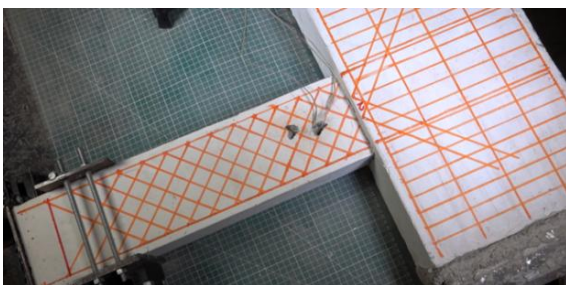


Figura 86: Quinto Ciclo 15mm RM2 (Estado).

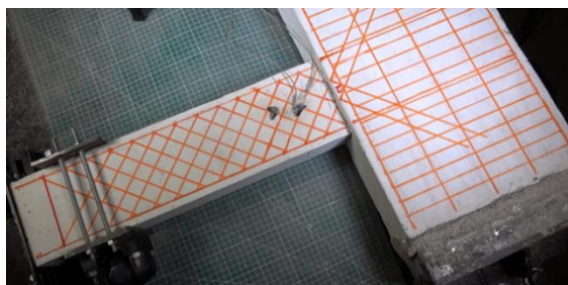


Figura 87: Quinto Ciclo 20mm RM2 (Estado).

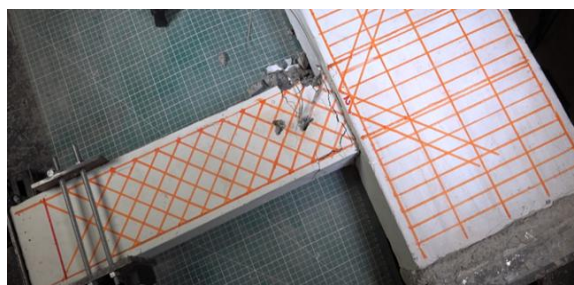


Figura 88: Decimo Ciclo 25mm RM2 (Estado).

4.3.4. Bitácora de ensayo Probeta RM2

Tabla 7 :Bitácora Ensayo Probeta RM2.

Desplazamiento	Bitácora
5mm	Inicio de ensayo, Ninguna grieta producida.
10mm	Aparición de pequeñas grietas en caras laterales.
15mm	Grietas más notorias en lado positivo y negativo.
20mm	- Grietas por toda la viga cercana a la unión viga-columna. - Aun no hay desprendimiento de hormigón.
25mm	- Comienza a desprenderse el recubrimiento de la viga. - En ciclo N°4 las barras comienzan a pandear. - Corte de barra inferior al momento de la carga negativa, ciclo N°6. - Corte de barra superior al momento de carga negativa, ciclo N°8.
30mm	No se alcanzó a realizar por falla producida en 25[mm].

4.4. Probeta RM3

4.4.1. Aspectos Generales

Hormigón armado de resistencia 54 [Mpa] con armadura de refuerzo inclinada como se observa en la **Figura 50**, con dos ductos para la instalación de cámaras endoscópicas.

4.4.2. Curva Histéresis RM3

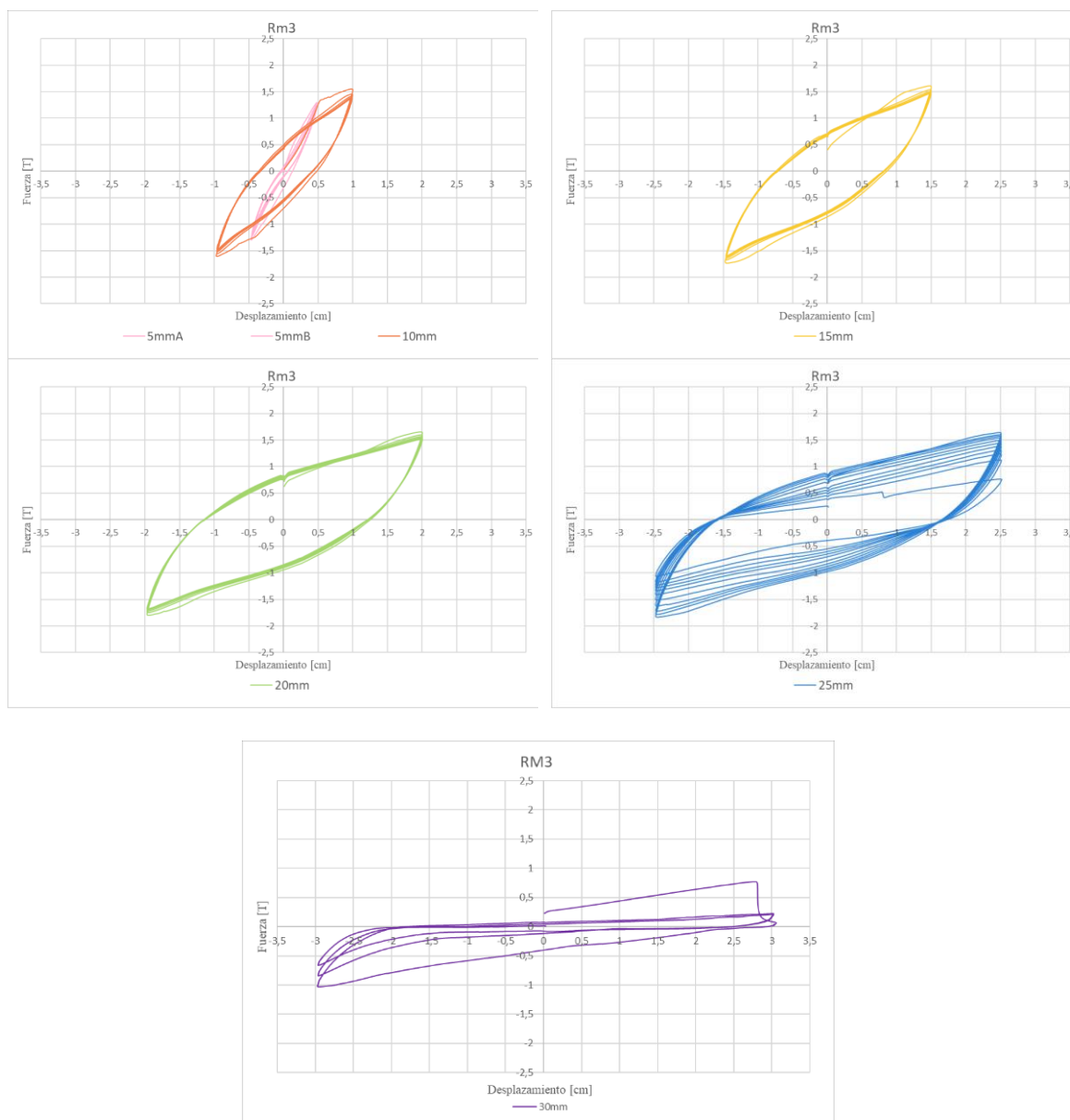


Figura 89: Curvas de Histéresis parciales RM3.

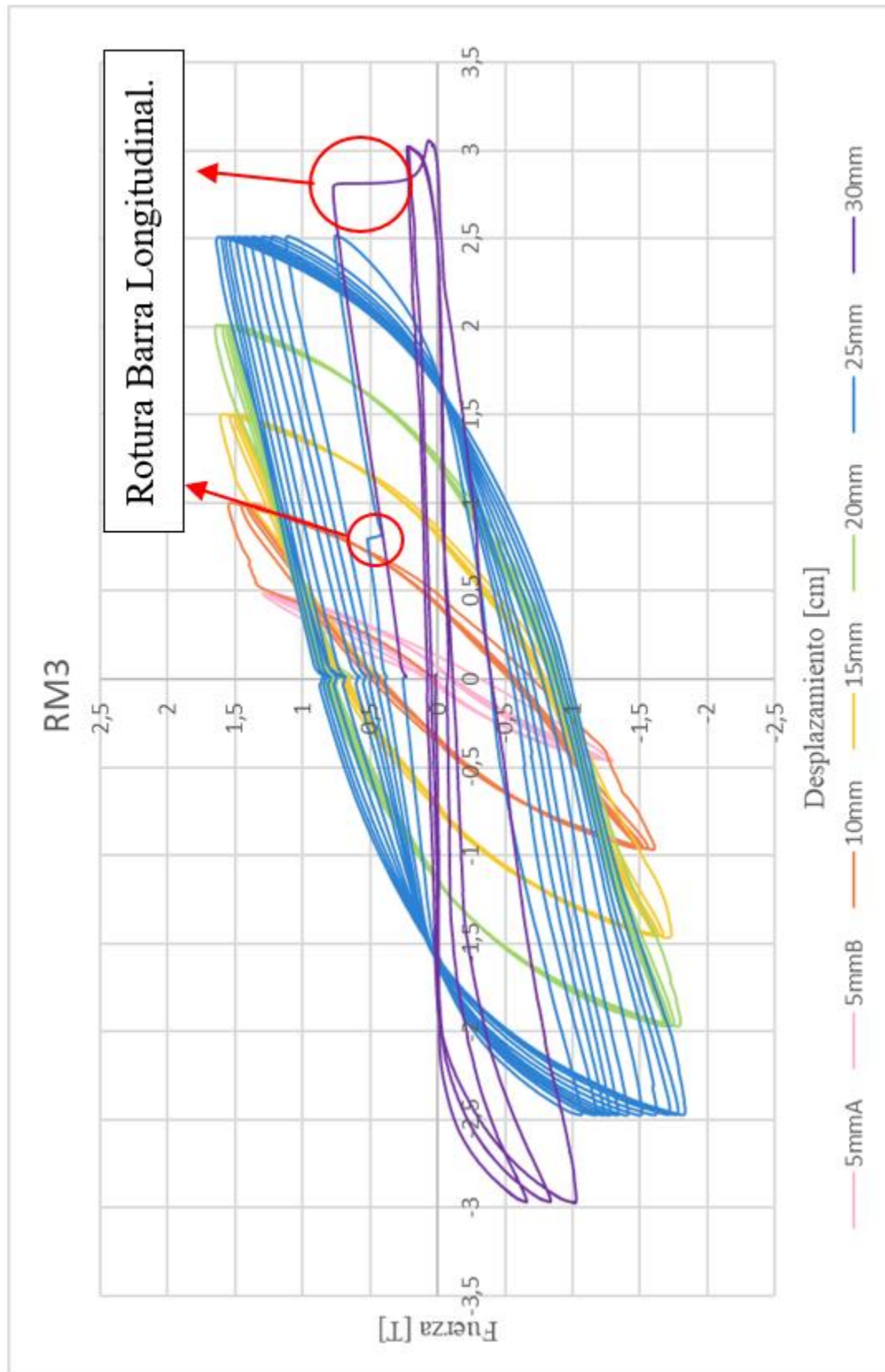


Figura 90: Curva de Histéresis Probeta RM3.

4.4.3. Registro Fotográficos Probeta RM3

4.4.3.1. Máximo desplazamiento positivo (vista lateral)



Figura 91: Quinto Ciclo 5mm RM3 (Positivo).



Figura 92: Quinto Ciclo 10mm RM3 (Positivo).



Figura 93: Quinto Ciclo 15mm RM3 (Positivo).

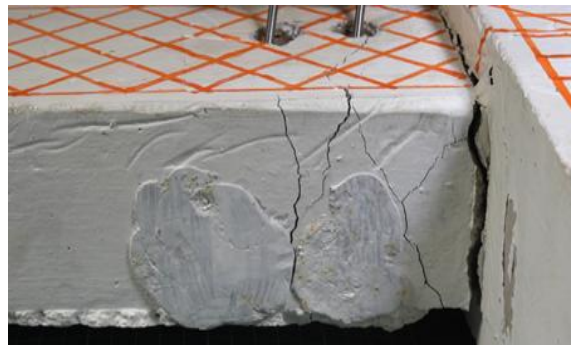


Figura 94: Quinto Ciclo 20mm RM3 (Positivo).



Figura 95: Quinto Ciclo 25mm RM3 (Positivo).



Figura 96 :Décimo Ciclo 25mm RM3 (Positivo).



Figura 97: Análisis de Ensayo RM3.

4.4.3.2. Máximo desplazamiento Negativo (vista lateral)



Figura 98: Quinto Ciclo 5mm RM3 (Negativo).



Figura 99: Quinto Ciclo 10mm RM3 (Negativo).



Figura 100: Quinto Ciclo 15mm RM3 (Negativo).



Figura 101: Quinto Ciclo 20mm RM3 (Negativo).



Figura 102: Quinto Ciclo 25mm RM3 (Negativo).



Figura 103: Décimo Ciclo 25mm RM3 (Negativo).

4.4.3.3. Estado espécimen último Ciclo (vista superior)

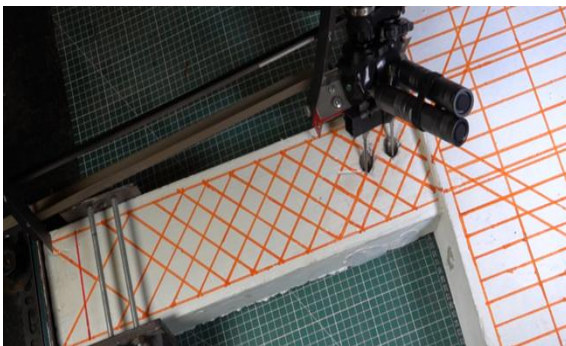


Figura 104: Quinto Ciclo 5mm RM3 (Estado).

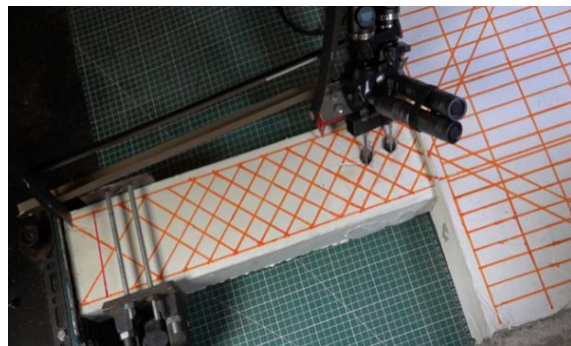


Figura 105: Quinto Ciclo 10mm RM3 (Estado).

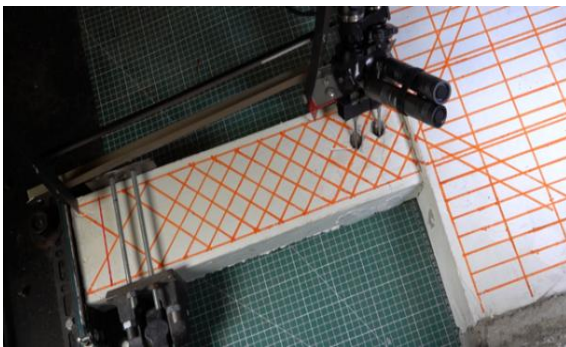


Figura 106: Quinto Ciclo 15mm RM3 (Estado).

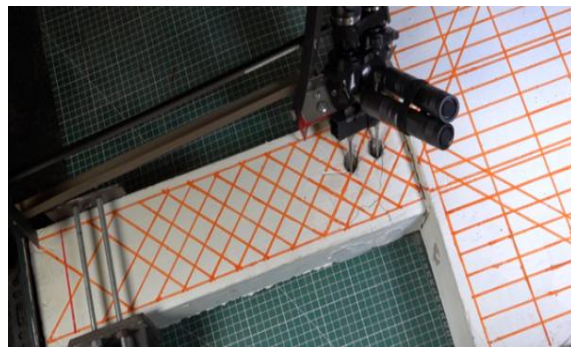


Figura 107: Quinto Ciclo 20mm RM3 (Estado).



Figura 108: Décimo Ciclo 25mm RM3 (Estado).

4.4.4. Bitácora de ensayo Probeta RM3

Tabla 8: Bitácora Ensayo Probeta RM3.

Desplazamiento	Bitácora
5mm	• Inicio de ensayo sin problema, no se observan grietas.
10mm	• Pequeñas grietas en la unión viga-columna.
15mm	• Aparición de grietas en zona cercana a la unión viga-columna.
20mm	• 8ºCiclo: Un lado está más deteriorado pero la resistencia sigue siendo la misma debido a que solo se ha deteriorado el hormigón de recubrimiento.
25mm	• 8ºCiclo: caída en la resistencia de 1.6 KN a 1.3 KN. • 10º ciclo: corte de barra longitudinal inferior al aplicar carga lado positivo.
30mm	• 1ºCiclo: Corte de barra longitudinal superior, al aplicar carga lado positivo.

4.5. Probeta RM4

4.5.1. Aspectos generales

Hormigón armado de resistencia 54 [Mpa] con armadura de refuerzo inclinada como se observa en la **Figura 50**, con dos ductos para la instalación de cámaras endoscópicas.

4.5.2. Curva Histéresis RM4

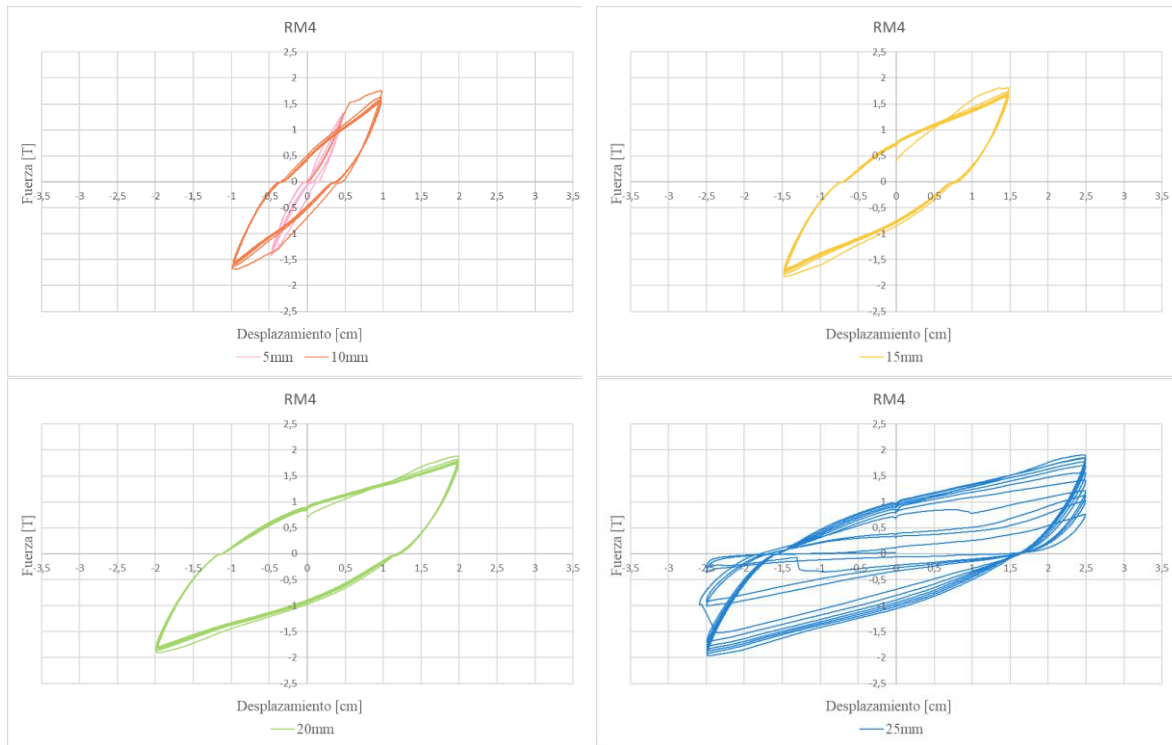


Figura 109: Curvas de Histéresis parciales RM4.

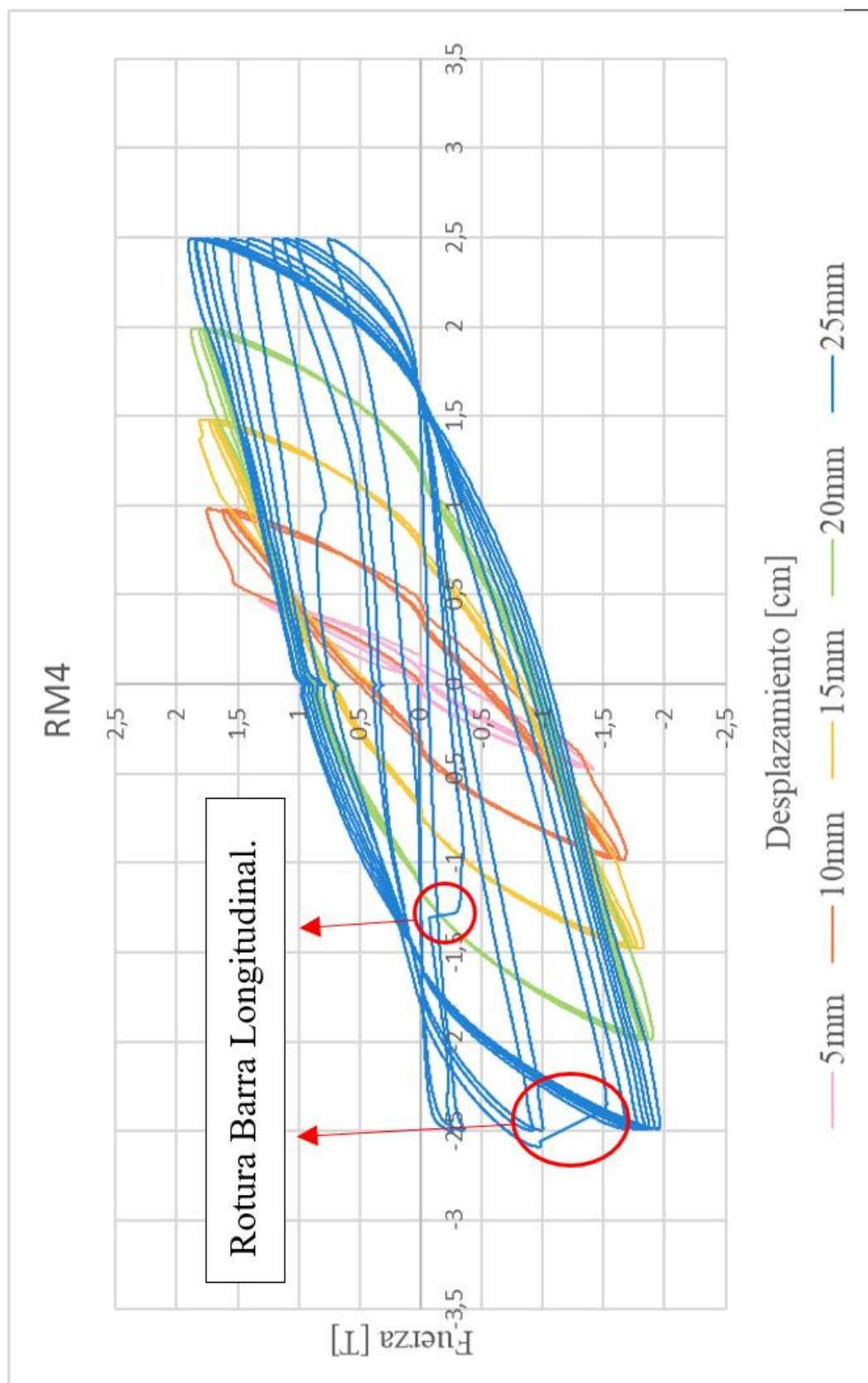


Figura 110: Curva de Histéresis Probeta RM4

4.5.3. Registro Fotográficos Probeta RM4

4.5.3.1. Máximo desplazamiento Positivo (vista lateral)



Figura 111: Quinto Ciclo 5mm RM4 (Positivo).



Figura 112: Quinto Ciclo 10mm RM4 (Positivo).



Figura 113: Quinto Ciclo 15mm RM4 (Positivo).



Figura 114: Quinto Ciclo 20mm RM4 (Positivo).



Figura 115: Quinto Ciclo 25mm RM4 (Positivo).



Figura 116: Décimo Ciclo 25mm RM4 (Positivo).

4.5.3.2. Máximo desplazamiento Negativo (vista lateral)



Figura 117: Quinto Ciclo 5mm RM4 (Negativo).



Figura 118: Quinto Ciclo 10mm RM4 (Negativo).



Figura 119: Quinto Ciclo 15mm RM4 (Negativo).



Figura 120: Quinto Ciclo 20mm RM4 (Negativo).



Figura 121: Quinto Ciclo 25mm RM4 (Negativo).



Figura 122: Décimo Ciclo 25mm RM4 (Negativo).

4.5.3.3. Estado espécimen último Ciclo (vista superior)

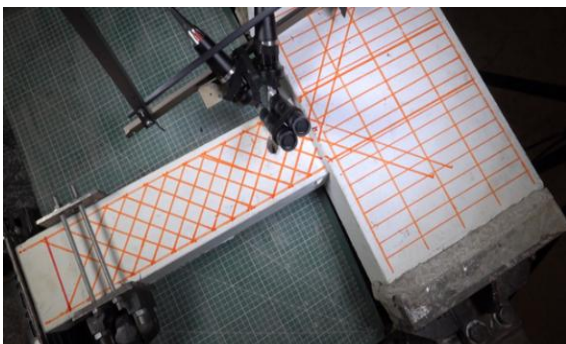


Figura 123: Quinto Ciclo 5mm RM4 (Estado).



Figura 124: Quinto Ciclo 10mm RM4 (Estado).



Figura 125: Quinto Ciclo 15mm RM4 (Estado).



Figura 126: Quinto Ciclo 20mm RM4 (Estado).

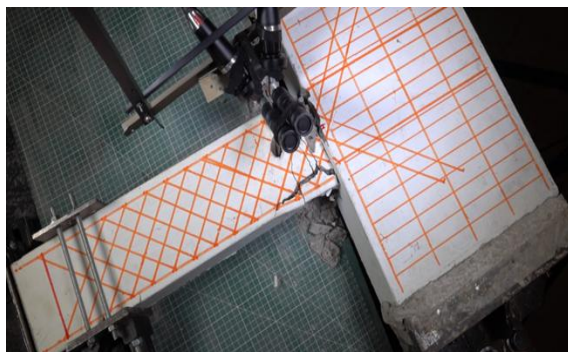


Figura 127: Décimo Ciclo 25mm RM4 (Estado).

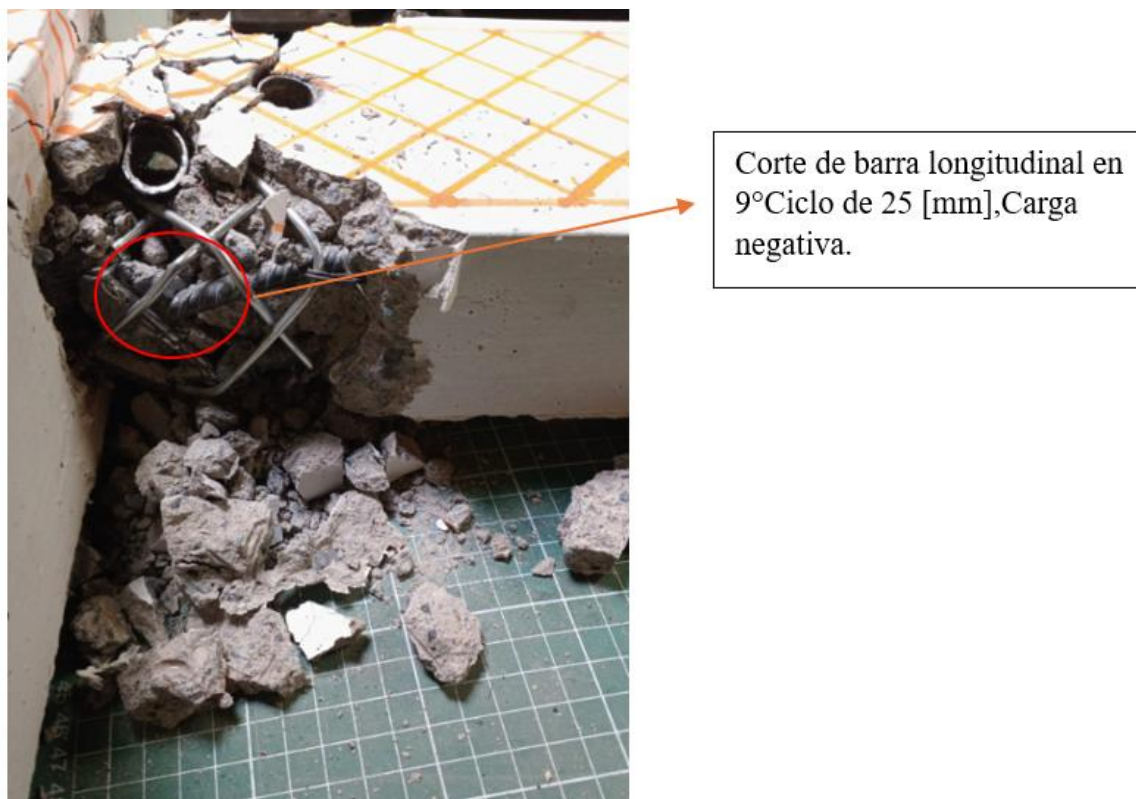


Figura 128: Análisis de ensayo RM4.

4.5.4. Bitácora de ensayo Probeta RM4

Tabla 9: Bitácora Ensayo Probeta RM4.

Desplazamiento	Bitácora
5mm	Inicio de ensayo, sin aparición de grietas.
10mm	Pocas grietas visibles, comienzan a moverse las barras.
15mm	- Movimiento de barras más visible (Mayor detalle en Memoria de Palacios(2025), aparición de grietas equidistantes en caras laterales. - grietas más largas en Cara frontal.
20mm	Casi 2 [Ton] de resistencia, grietas no permanentes por toda la viga.
25mm	- Primeros ciclos: comienzo de pandeo provocado por que aún se mantiene la integridad del hormigón, lo cual hace palanca. 7ºCiclo: Corte de barra longitudinal al aplicar carga lado negativo 9º Ciclo: Segundo corte en barra longitudinal al aplicar carga lado negativo.
30mm	No se alcanzó a realizar por falla producida en desplazamiento de 25 [mm].

4.6. Probeta RM5

4.6.1. Aspectos Generales

Hormigón armado de resistencia 77 [Mpa] con armadura de refuerzo ortogonal como se observa en la **Figura 51**, con dos ductos para la instalación de cámaras endoscópicas.

4.6.2. Curva Histéresis RM5

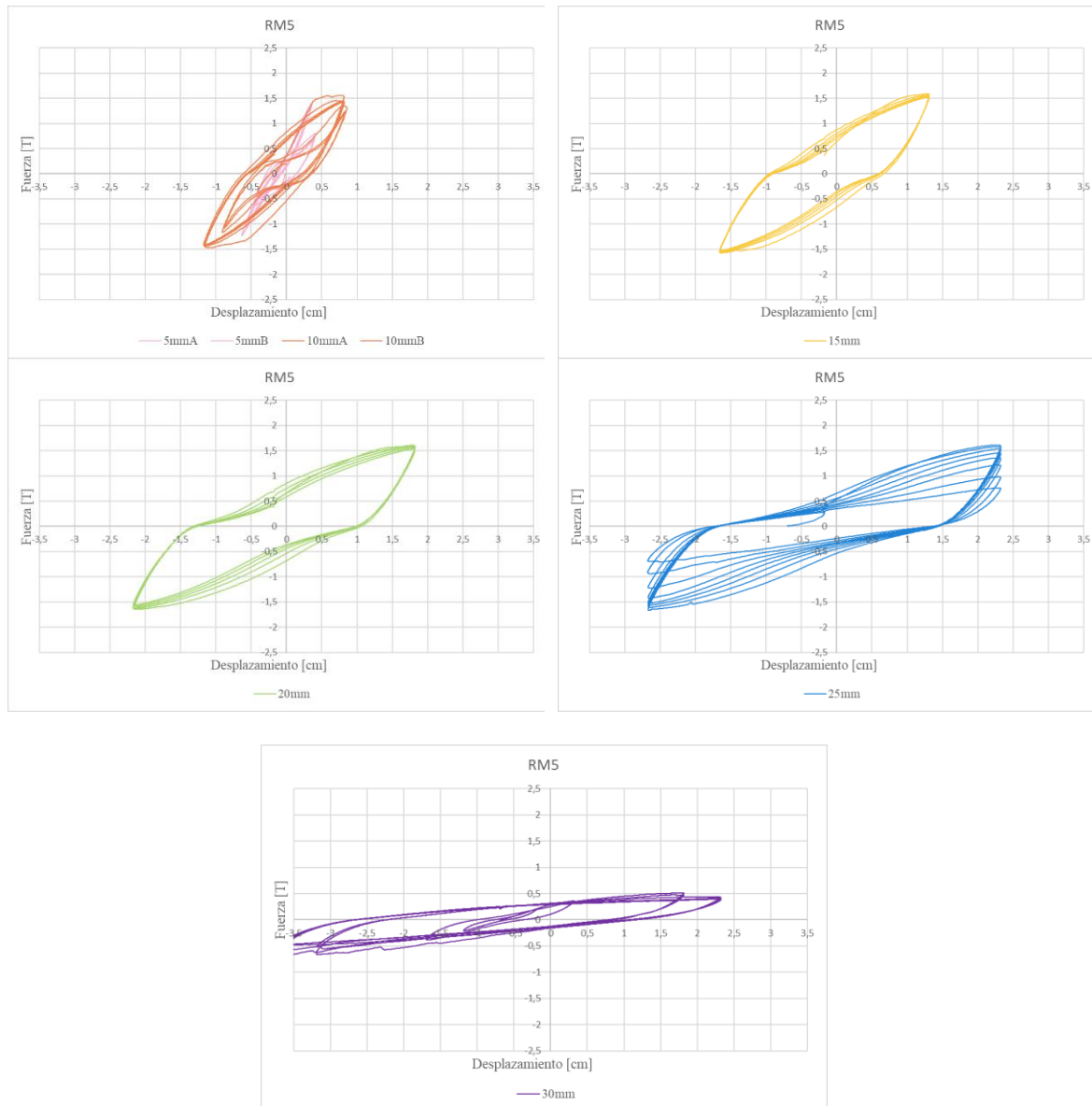


Figura 129: Curvas de Histéresis parciales RM5.

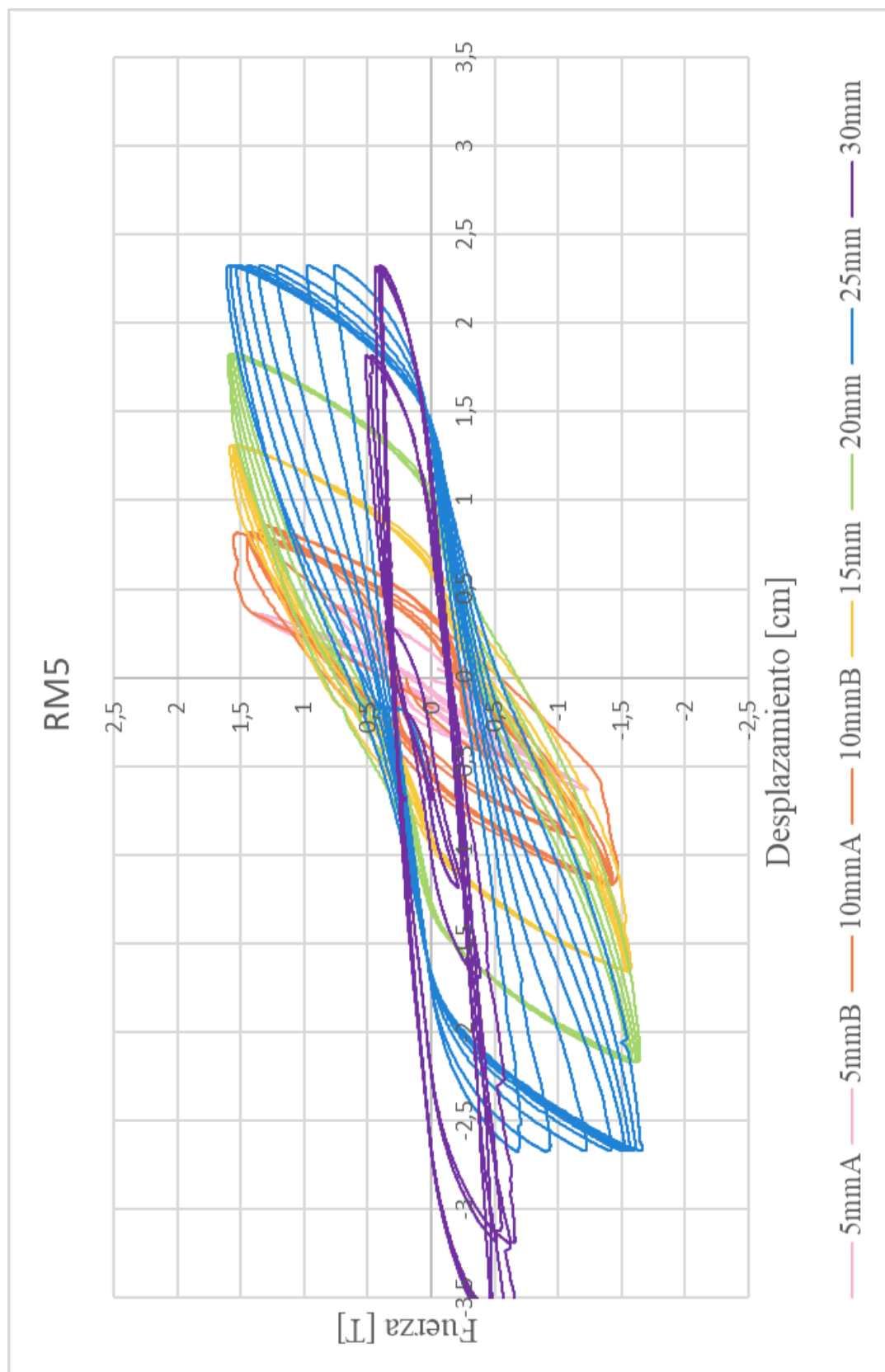


Figura 130: Curva de Histéresis Probeta RM5

4.6.3. Registro Fotográficos Probeta RM5

4.6.3.1. Máximo Desplazamiento Positivo (Vista Lateral)

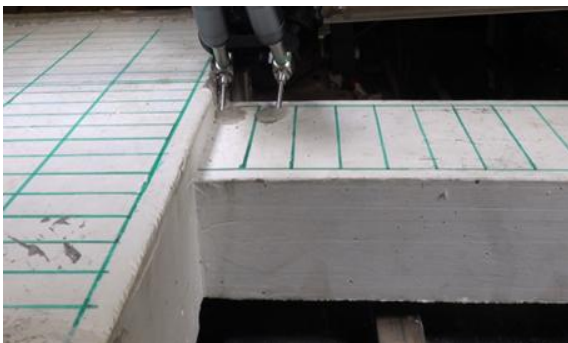


Figura 131: Quinto Ciclo 5mm RM5 (Positivo).



Figura 132: Quinto Ciclo 10mm RM5 (Positivo).

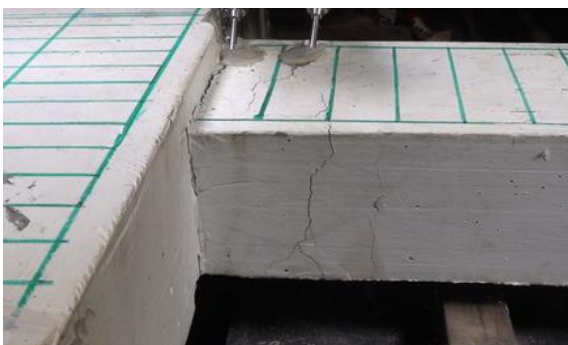


Figura 133: Quinto Ciclo 15mm RM5 (Positivo).



Figura 134: Quinto Ciclo 20mm RM5 (Positivo).



Figura 135: Décimo Ciclo 25mm RM5 (Positivo).

4.6.3.2. Máximo Desplazamiento Negativo (Vista Lateral)

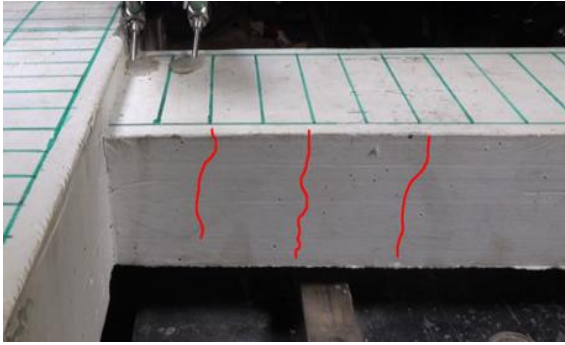


Figura 136: Quinto Ciclo 5mm RM5 (Negativo).

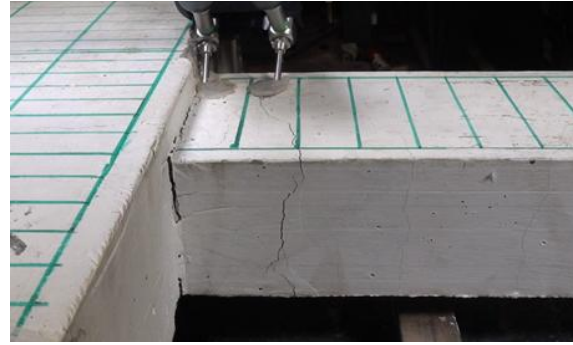


Figura 137: Quinto Ciclo 10mm RM5 (Negativo).

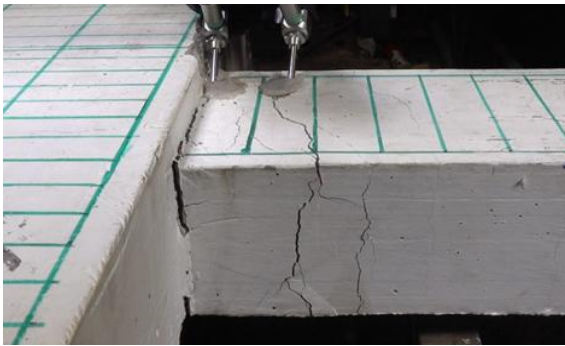


Figura 138: Quinto Ciclo 15mm RM5 (Negativo).



Figura 139: Quinto Ciclo 20mm RM5 (Negativo).



Figura 140: Décimo Ciclo 25mm RM5 (Negativo).

4.6.3.3. Estado Espécimen Último Ciclo (Vista Superior)

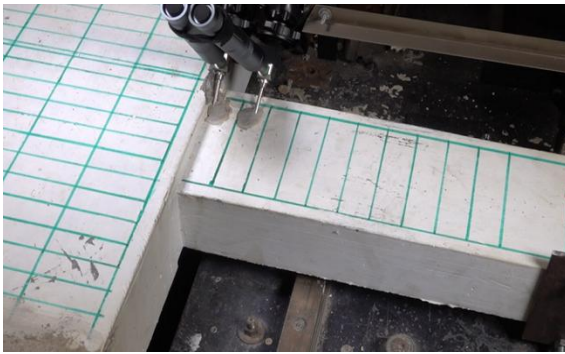


Figura 141: Quinto Ciclo 5mm RM5 (Estado).

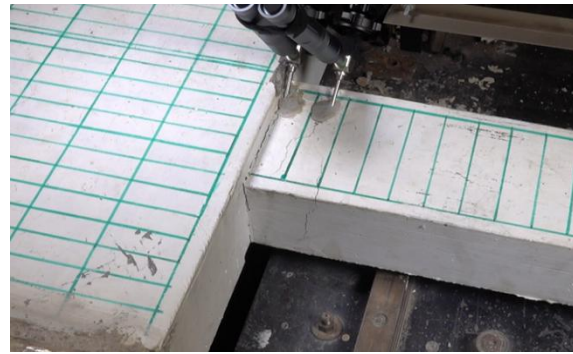


Figura 142: Quinto Ciclo 10mm RM5 (Estado).

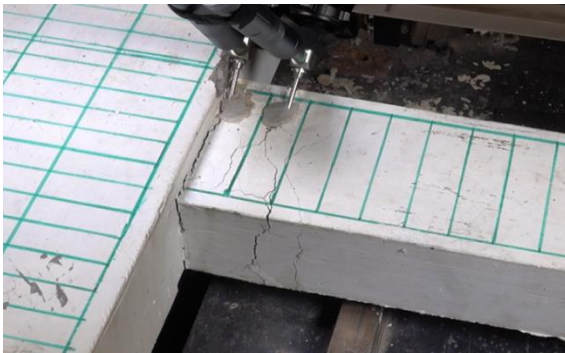


Figura 143: Quinto Ciclo 15mm RM5 (Estado).



Figura 144: Quinto Ciclo 20mm RM5 (Estado).

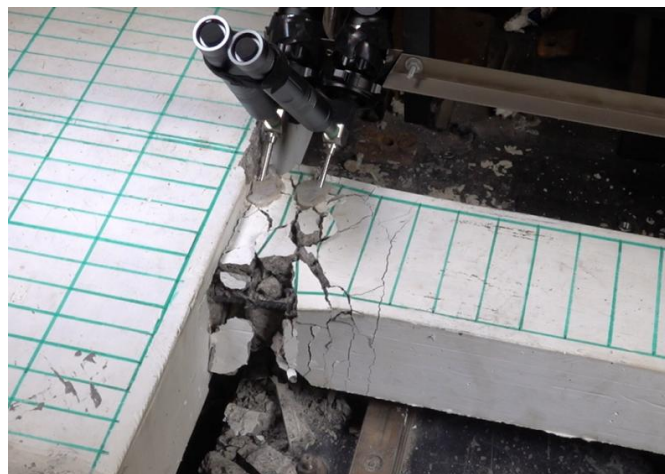


Figura 145: Décimo Ciclo 25mm RM5 (Estado).



Figura 146: Análisis de ensayo RM5; 30 [mm].

4.6.4. Bitácora de ensayo Probeta RM5

Tabla 10: Bitácora Ensayo Probeta RM5.

Desplazamiento	Bitácora
5mm	Inicio de ensayo, aparición de pequeñas fisuras laterales.
10mm	Aparición de fisuras en unión viga-columna y zona próxima.
15mm	Mayor cantidad de fisuras, al aplicar carga en lados positivo y negativo.
20mm	Caída de hormigón de recubrimiento y mayor cantidad de grietas.
25mm	- Deterioros importantes con pérdida de integridad del hormigón. - Máxima resistencia de 1.8T. 9ºCiclo Falla de probeta por deterioro y pandeo de barras longitudinales.
30mm	Se realizo una tanda de ciclos en el cual la resistencia era mínima debido al pandeo de barras y a la perdida de integridad de hormigón.

4.7. Probeta RM6

4.7.1. Aspectos Generales

Hormigón armado de resistencia 77 [Mpa] con armadura de refuerzo ortogonal como se observa en la **Figura 51**, con dos ductos para la instalación de cámaras endoscópicas.

4.7.2. Curva Histéresis RM6

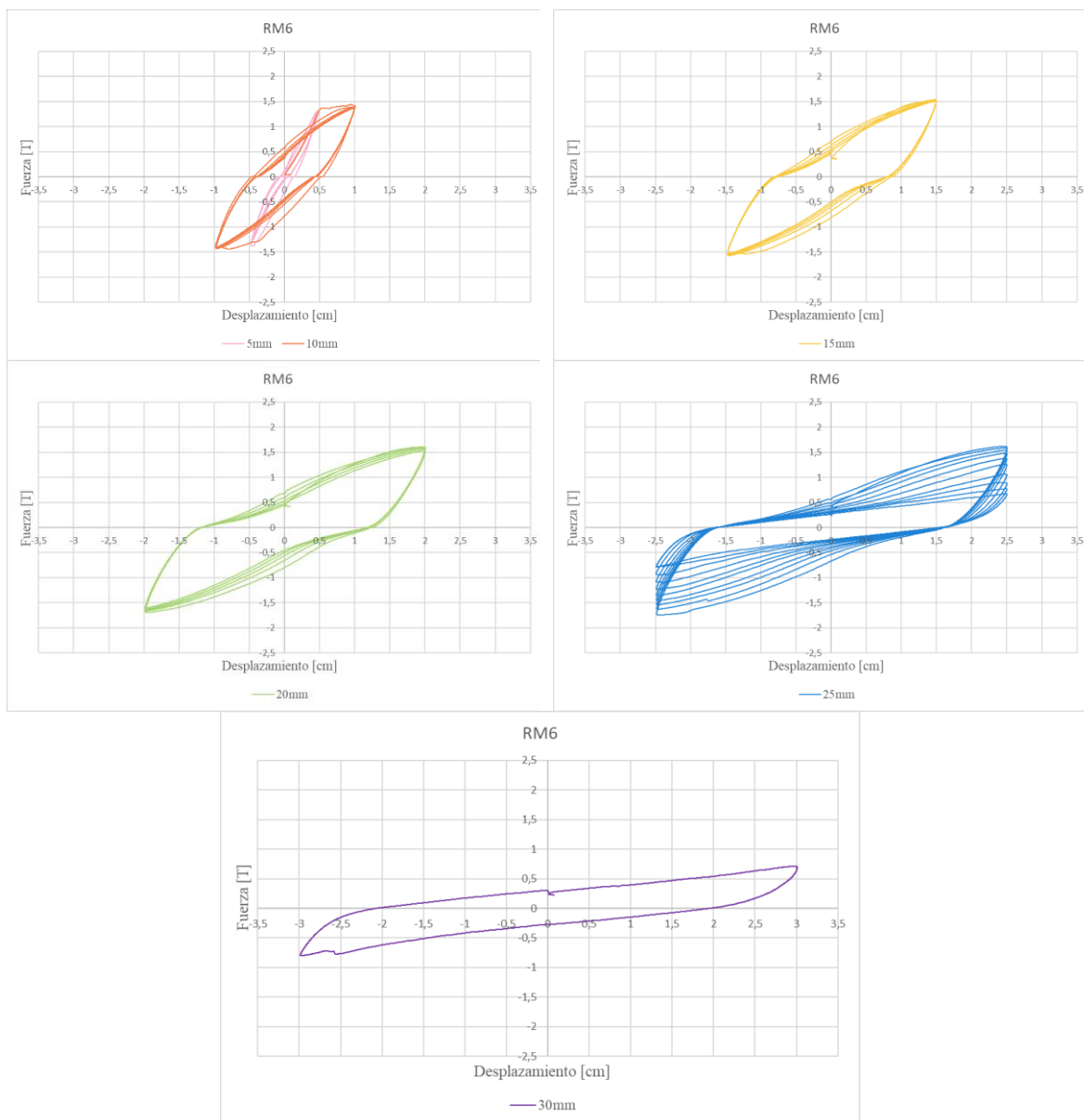


Figura 147: Curvas de Histéresis parciales RM6.

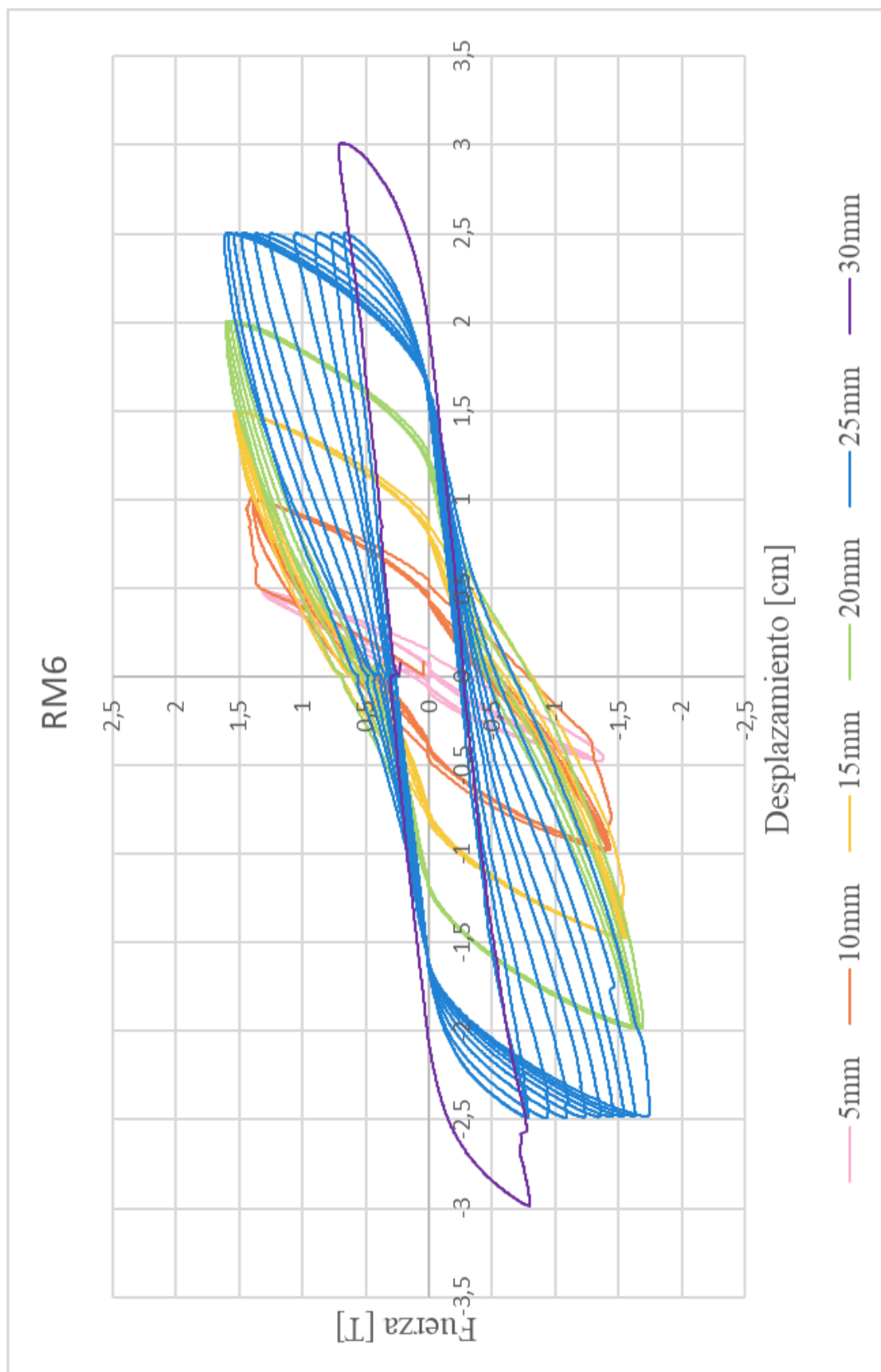


Figura 148: Curva de Histéresis Probeta RM6

4.7.3. Registro Fotográficos Probeta RM6

4.7.3.1. Máximo Desplazamiento Positivo (Vista Lateral)



Figura 149: Quinto Ciclo 5mm RM6 (Positivo).



Figura 150: Quinto Ciclo 10mm RM6 (Positivo).



Figura 151: Quinto Ciclo 15mm RM6 (Positivo).



Figura 152: Quinto Ciclo 20mm RM6 (Positivo).



Figura 153: Décimo Ciclo 25mm RM6 (Positivo).

4.7.3.2. Máximo Desplazamiento Negativo (Vista Lateral)

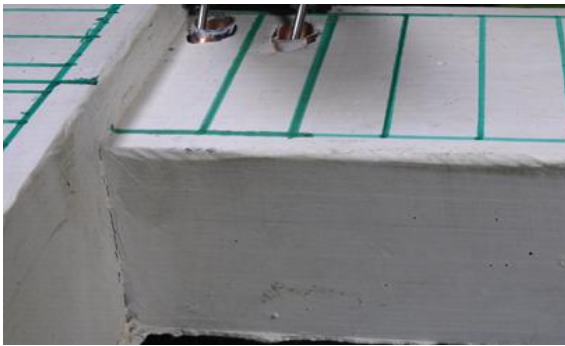


Figura 154: Quinto Ciclo 5mm RM6 (Negativo).



Figura 155: Quinto Ciclo 10mm RM6 (Negativo).

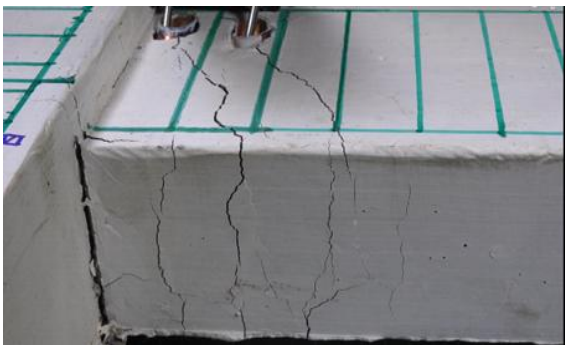


Figura 156: Quinto Ciclo 15mm RM6 (Negativo).

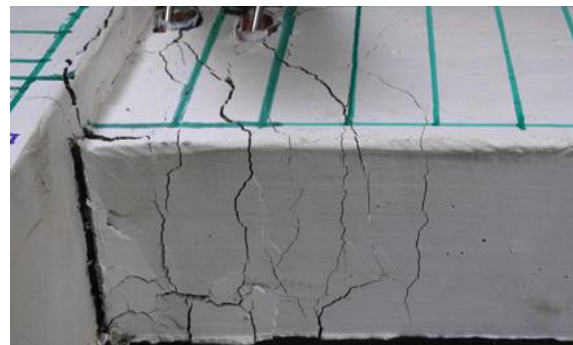


Figura 157: Quinto Ciclo 20mm RM6 (Negativo).



Figura 158: Décimo Ciclo 25mm RM6 (Negativo).

4.7.3.3. Estado Espécimen Último Ciclo (Vista Superior)

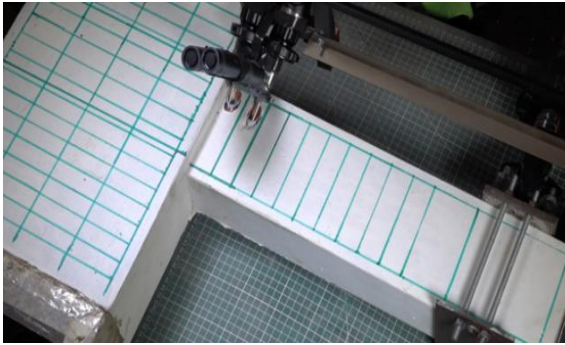


Figura 159: Quinto Ciclo 5mm RM6 (Estado).

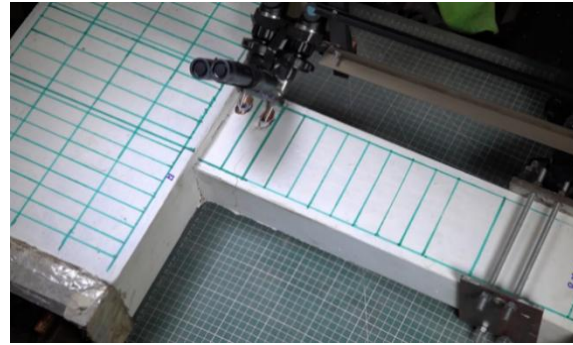


Figura 160: Quinto Ciclo 10mm RM6 (Estado).

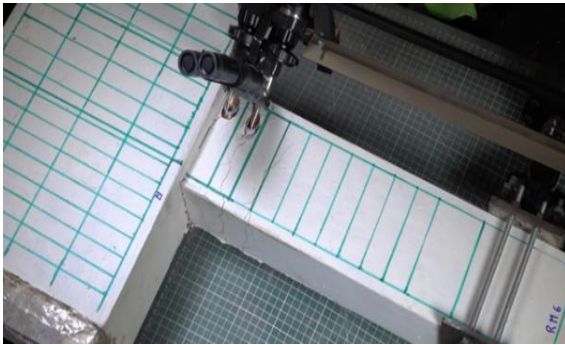


Figura 161: Quinto Ciclo 15mm RM6 (Estado).

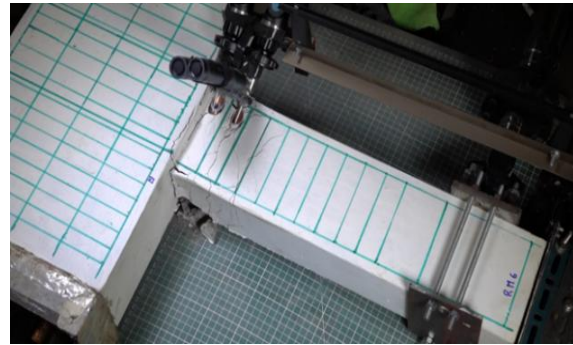


Figura 162: Quinto Ciclo 20mm RM6 (Estado).

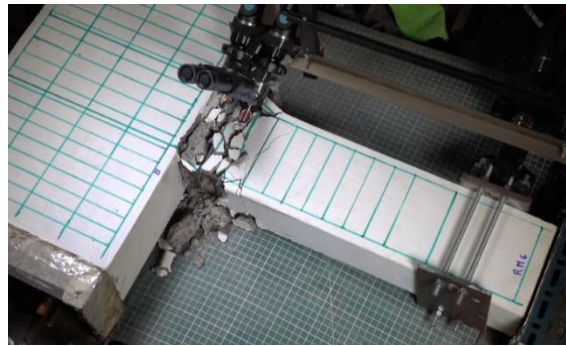


Figura 163: Décimo Ciclo 25mm RM6 (Estado).

4.7.4. Bitácora de ensayo Probeta RM6

Tabla 11: Bitácora Ensayo Probeta RM6.

Desplazamiento	Bitácora
5mm	• Pequeñas grietas laterales visibles.
10mm	• Fisuras más notorias, pero aún no hay desprendimiento de material.
15mm	• Grietas por toda la viga.
20mm	• Comienzan a quedar grietas permanentes. En el 5º ciclo se produce la primera caída de recubrimiento en el lado positivo.
25mm	• En el 3º Ciclo se produce caída de recubrimiento en el lado negativo • En el 6º Ciclo hay mayor desprendimiento de hormigón. • En el 8º Ciclo hay pandeo de barras, y disminución de resistencia.
30mm	• Se produce pequeña torsión de la viga, se procede a mejorar riel para siguientes ensayos.

4.8. Comentarios generales sobre los ensayos.

Según el material filmico obtenido mediante cámaras y resultados de curvas de histéresis, se pudo realizar el resumen presentado en las **Tablas 12 y 13**.

Tabla 12: Carga máxima obtenida por nivel de carga.

Desplazamiento	Armadura inclinada				Armadura Tradicional	
	RM1 Carga Máx. [Ton]	RM2 Carga Máx. [Ton]	RM3 Carga Máx. [Ton]	RM4 Carga Máx. [Ton]	RM5 Carga Máx. [Ton]	RM6 Carga Máx. [Ton]
5 [mm]	1,22	1,34	1,30	1,33	1,40	1,31
10 [mm]	1,61	1,71	1,55	1,75	1,56	1,43
15 [mm]	1,67	1,81	1,61	1,81	1,59	1,54
20 [mm]	1,72	1,86	1,65	1,88	1,61	1,61
25 [mm]	1,73	1,90	1,64	1,90	1,61	1,61
30 [mm]	1,17	0	0,78	0	0,51	0,71

Tabla 13: Resumen etapas durante el ensayo.

Detalles	Armadura inclinada				Armadura Tradicional	
	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
Inicio de pandeo armadura	5°ciclo, 25[mm]	2°ciclo, 25[mm]	3°ciclo, 25[mm]	5°ciclo, 25[mm]	4°ciclo, 25[mm]	4°ciclo, 25[mm]
Caída de recubrimiento.	8°ciclo, 25[mm]	5°ciclo, 25[mm]	5°ciclo, 25[mm]	5°ciclo, 25[mm]	4°ciclo, 25[mm]	5°ciclo, 20[mm]
Fractura barra longitudinal	4°ciclo, 30[mm]	6°ciclo, 25[mm]	10°ciclo, 25[mm]	7°ciclo, 25[mm]	No se produce	No se produce
	4°ciclo, 30[mm]	8°ciclo, 25[mm]	1°ciclo, 30[mm]	9°ciclo, 25[mm]		

Como se esperaba, las barras longitudinales no se llegaron a cortar en los especímenes de armadura ortogonal (RM5 y RM6) , sino que pandearon a finales del desplazamiento aplicado de 25 [mm]. Esto principalmente puede ser, porque se produce una mayor pérdida de hormigón de recubrimiento a finales del desplazamiento de 20 [mm], y de la integridad del hormigón desde los primeros ciclos de 25[mm], dejando mayor espacio para el pandeo de las barras. En cambio, ya que por la forma en que ocurren las grietas estrechas y estando el hormigón poco disgregado, las barras sufren fuertes curvaturas asociadas a importantes deformaciones en las probetas de estribos inclinados en dos planos, la cual produce que estas se corten en los últimos ciclos de 25 [mm].

Ahora, en un desplazamiento de 25 [mm] la resistencia en los especímenes con armadura inclinada no disminuyó más del 30 % del máximo. Mientras que en los especímenes con armadura ortogonal disminuyen más del 55% del máximo, como se muestra en la **Figura 164**.

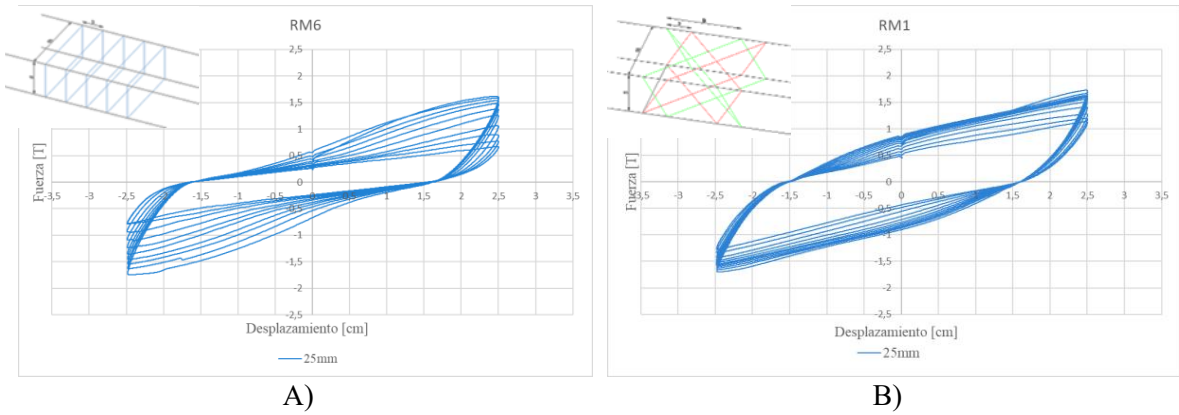
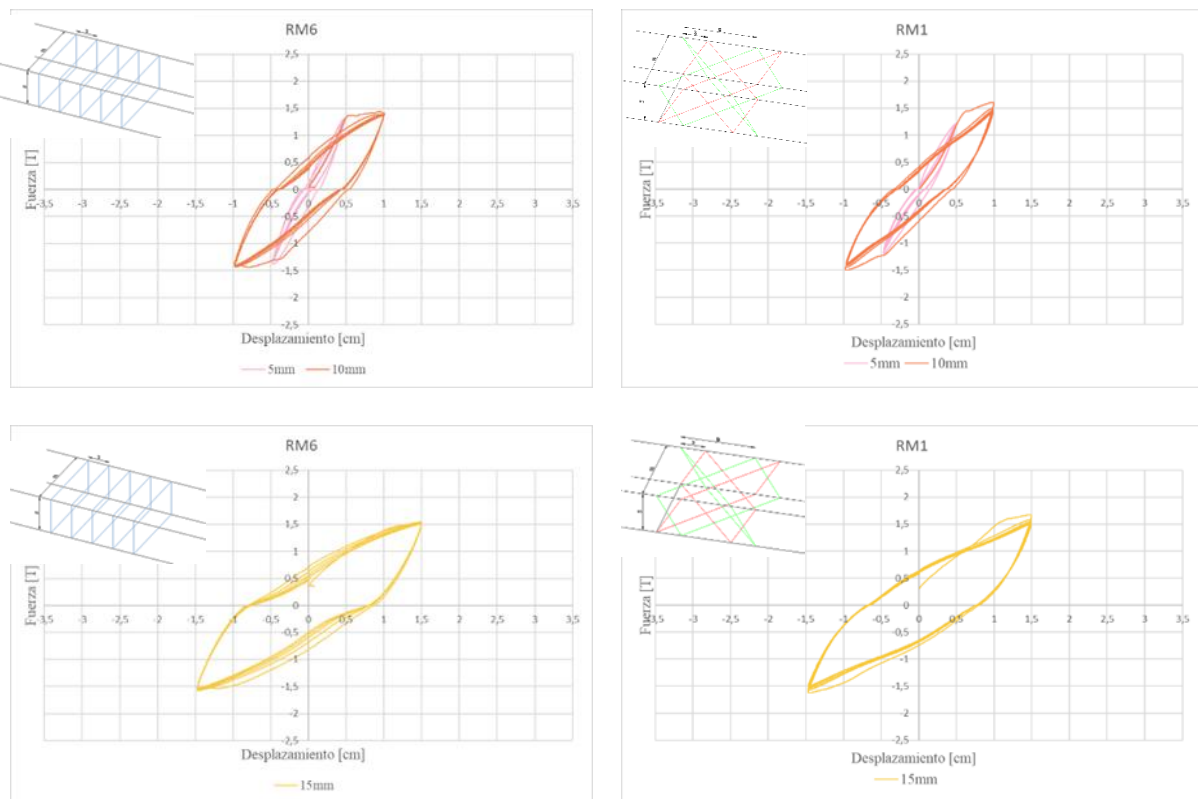


Figura 164: Curva de Fuerza v/s Desplazamiento para la amplitud 25 [mm]; A)RM6; B)RM1.

Otro aspecto interesante es que en desplazamientos de 5 [mm], 10 [mm] y 15 [mm], los especímenes con estribos ortogonales y con hormigón de alta resistencia, tienen unas curvas similares que al usar armadura inclinada y hormigón de resistencia moderada. Como se observa en la **Figura 165**.



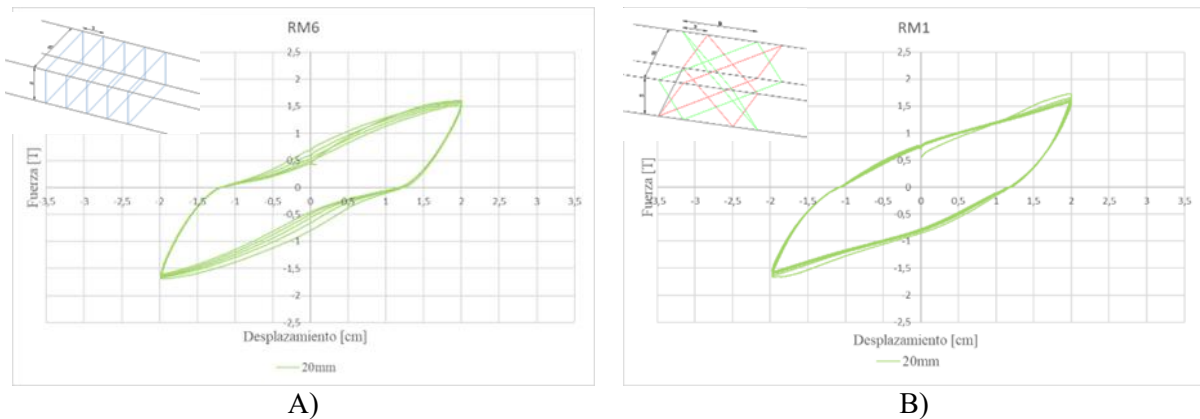


Figura 165: Curva de Fuerza v/s Desplazamiento para la amplitud 5,10,15,20 [mm]; A)RM6; B)RM1

La distribución desfavorable de los estribos tradicionales provoca que los trozos de hormigón sueltos se escapan, como se observa en la sección A) de la **Figura 166**. Mientras que, al usar estribos inclinados en dos planos, dificultan el vaciamiento del hormigón, conservando su integridad, como se observa en la sección B) de la **Figura 166**.

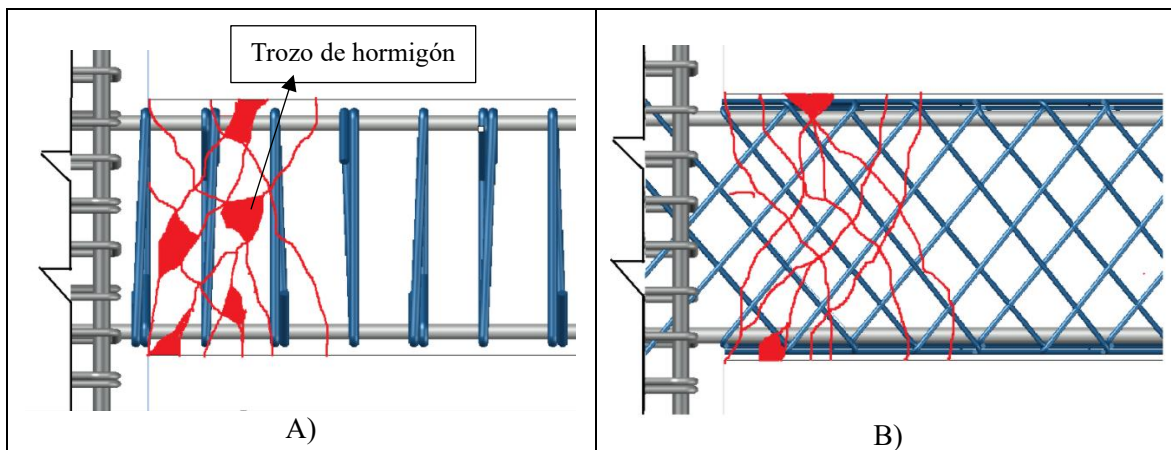


Figura 166: Agrietamientos por Corte; A) Armadura Tradicional; B) Armadura inclinada.

Esto principalmente se vio reflejado en el estado en el cual quedan los especímenes, después de aplicados ciclos de 25[mm], como se observa en la **Figura 167**.

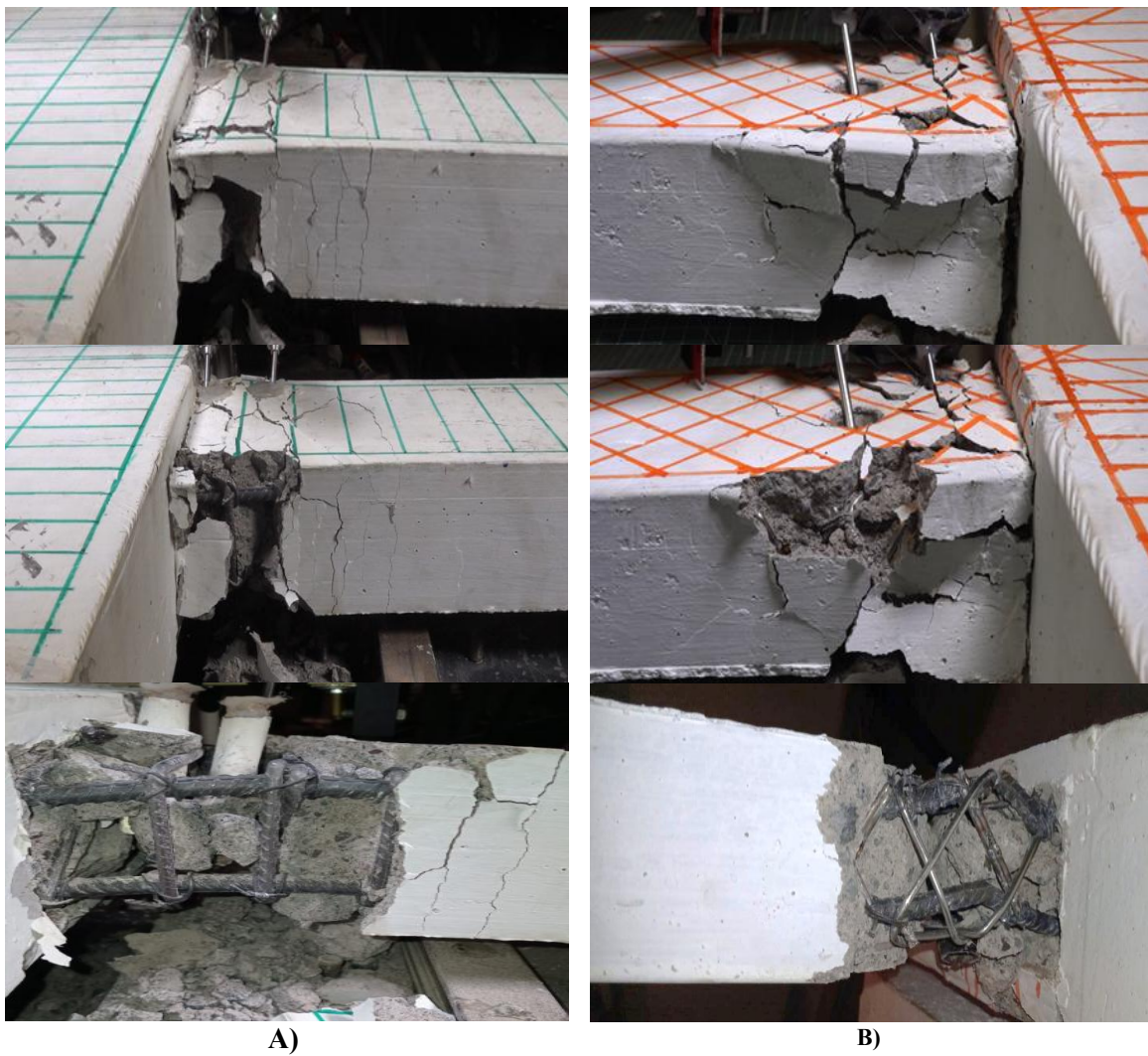


Figura 167: Comparación estado después de Carga 25 [mm]; A)RM5 B)RM1

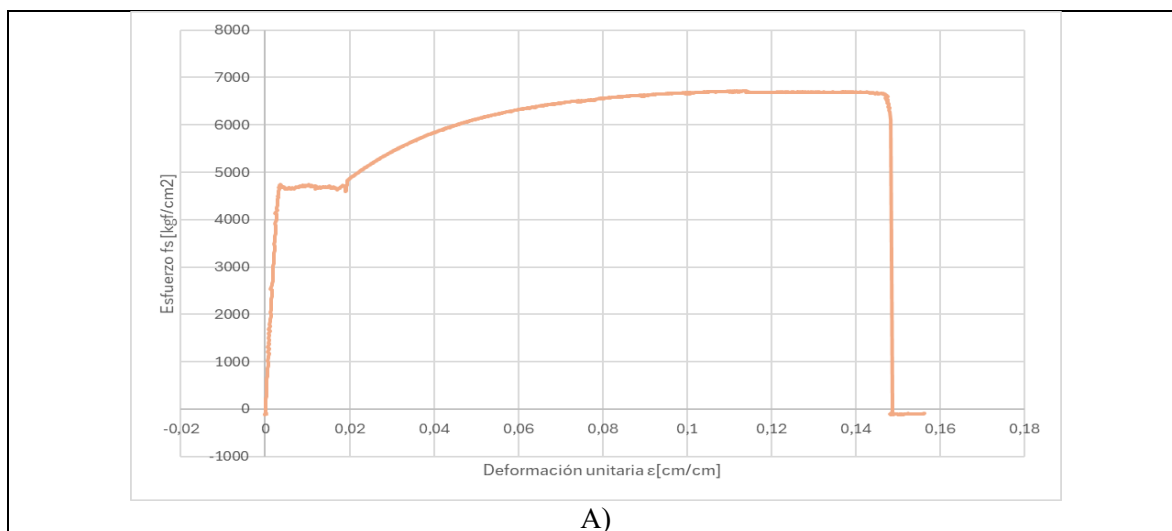
4.9. Comentarios Adicionales

Uno de los problemas para establecer comparaciones en este caso, es que, realizando el ensayo de tracción unidireccional, la curva de esfuerzo/deformación (**Figura 18**) es ligeramente menos dúctil y diferente a las usadas por otros memoristas (como Maldonado (2023), Silva (2022) y Bermúdez (2024)).

Tabla 14: Comparación con memoristas anteriores.

Autor	Acero longitudinal Viga	Resistencia hormigón f'_c [kgf/cm ²]
Propio (Armadura ortogonal)	AZA (A630-420H) 8[mm]	775
Propio (Armadura inclinada)		536
Bermúdez (2024)	AZA (A630-420H) 8[mm]	450
Maldonado (2023)	CAP (A630-420H) 8[mm]	417
Silva (2022)	CAP (A630-420H) 8[mm]	329

Además, al ser AZA como el acero utilizado por Bermúdez (2024), no significa que tendrá la misma curva de esfuerzo/deformación a la obtenida en esta memoria, ya que se evidencia la diferencia en ductilidad y deformación, a pesar de ser del mismo fabricante. Cómo se puede observar en la **Figura 168**.



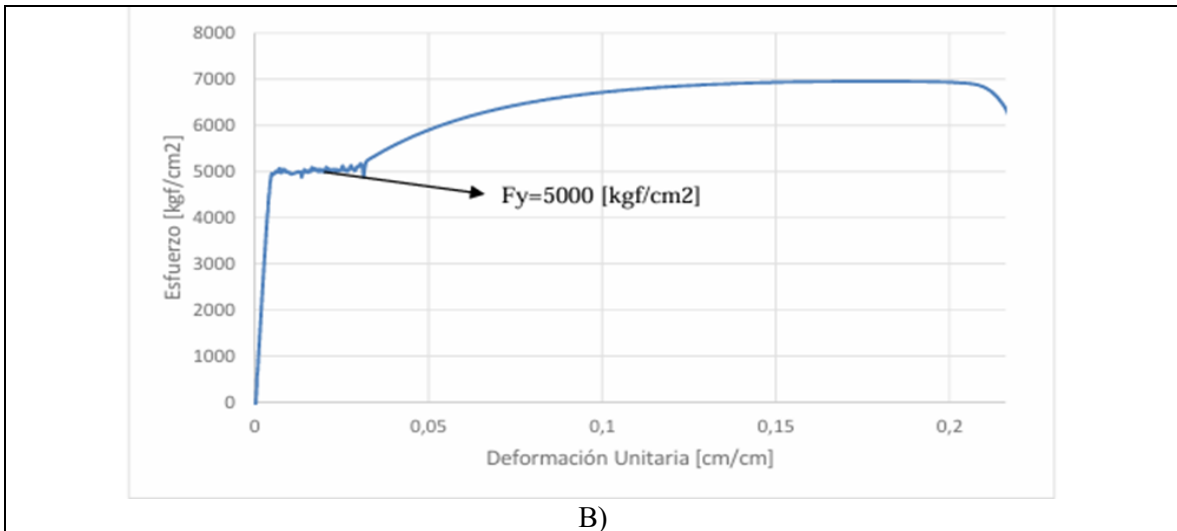


Figura 168: Gráfico De Esfuerzo V/s Deformación unitaria, Acero AZA 630-420H; A) Propio; B) Bermúdez (2024)

Por esto, existe la posibilidad de que la resistencia de hormigón, además del tipo, resistencia y ductilidad del acero influyeran en que las barras se cortaran antes de que el hormigón se aplastara.

Sin embargo, para tener una idea clara de la influencia del acero longitudinal en las vigas, debería emplearse el comportamiento a la fatiga de estos aceros, lo cual ya está fuera del alcance de esta memoria.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Junto al memorista asociado Palacios(2025), se construyeron y ensayaron cuatro probetas con estribos inclinados en dos planos y dos con estribos ortogonales. Los resultados permitieron confirmar que las probetas con estribos inclinados presentan un mejor comportamiento frente a cargas cíclicas equivalentes a la sollicitación sísmica , en comparación con las que tienen estribos ortogonales tradicionales. Sin embargo, se comprobó también que el uso de estribos inclinados genera una tendencia a la fractura de las barras longitudinales de la viga.

Respecto a los resultados obtenidos, se logró obtener un comportamiento similar a las probetas de memoristas anteriores (Maldonado (2023), Pino,C (2017), Matson (2018), Basualdo (2019)), utilizando una menor cantidad de acero de refuerzo, y con una configuración más sencilla de la armadura. Además, fue posible fundamentar mejor los resultados obtenidos por Bermúdez (2024) al disponer de resultados de un mayor número de especímenes y haber solucionado el problema de montaje que ocasionaba la tendencia a la torsión de los especímenes.

Los registros fotográficos, incluyendo las obtenidos por cámaras endoscópicas, evidencian que los especímenes con armadura inclinada presentan una menor pérdida de integridad de hormigón bajo una intensa sollicitación sísmica. Esta diferencia también se refleja en las curvas de histéresis, en donde las armaduras con estribos inclinados muestran ciclos anchos y estables, implicando una mejor capacidad de disipación de energía.

Mediante el análisis de investigaciones previas y de los resultados obtenidos, se encontró que la rotura de las barras no ocurre inmediatamente al aumentarse la amplitud entre una familia de ciclos y la siguiente. Sino que la falla suele producirse en ciclos intermedios, corroborando los resultados de Barclay y Kowalsky (2019), quienes sostienen que, una vez alcanzada una deformación crítica por pandeo, incluso una carga leve en un ciclo posterior puede inducir el corte de la barra.

Por otro lado, las vigas con estribos inclinados con hormigón de menor resistencia tienden a tener un comportamiento similar a las vigas con estribos ortogonales con hormigones de alta resistencia, excepto al final, cuando se aplican desplazamientos muy grandes.

Finalmente, la secuencia de falla deseable en estos elementos de hormigón armado que trabajan en flexión es que el acero longitudinal primero deba fluir y luego que, en una deformación de por lo menos tres por mil, el hormigón en compresión se aplaste, lo cual no se está dando en estos casos ya que el acero longitudinal al utilizar armadura inclinada se está fracturando antes que el hormigón se aplaste completamente.

Por lo tanto, como recomendación para estudios futuros, con el objetivo de solucionar este problema, quedo claro que se tiene que reducir la relación entre la capacidad mecánica del hormigón y la capacidad mecánica del acero, aumentando la cuantía de acero o disminuyendo la resistencia del hormigón a un rango intermedio. Dado que en esta memoria se utilizó un hormigón con una resistencia mayor y considerando además que, aunque el acero provenía del mismo fabricante, presentaba una ductilidad ligeramente inferior a la empleada en otras memorias. Además, se recomienda realizar análisis forense de los casos de interés, para obtener seguridad en las propiedades de los materiales.

Referencias

- 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.
- 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>
- Matson, C. (2018). *Fallas características de vigas de hormigón armado con armadura transversal inclinada sometidas a sollicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- 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 sollicitación sísmica con armadura adicional para prevenir fracturas del refuerzo longitudinal*. [Tesis de pregrado, 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 sollicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Rojas, J. (2009). *Elementos de hormigón armado con barras de refuerzo ancladas con ganchos sometidos a sollicitaciones cíclicas*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Bermúdez, A. (2024). *Estribos Inclinados en dos planos para optimizar el comportamiento de elementos de hormigón armado sometidos a sollicitación sísmica. Análisis Experimental*. [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 sollicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM

Anexos



Figura 169: Máquina para doblado de estribos ortogonales.



Figura 170: Máquina para doblado de estribos inclinados.



Figura 171: Electrodo para acero inoxidable(E308-L) 3/32\".



Figura 172: Alambre galvanizado N°22.



A)



B)



C)

Figura 173: Armadura y Moldaje Especímenes Ensayados. A) Armadura Inclinada ; B) Armadura Ortogonal Tradicional; C)Moldaje.



Figura 174: Colocación Armadura en moldaje.



Figura 175: Sección sobresaliente de perno de anclaje.



Figura 176: Mesa vibradora.



Figura 177: Hormigonado de espécimen.



Figura 178: Hormigonado de cilindros.



Figura 179: Curado de Hormigón en sala Húmeda LEMCO.



Figura 180: Placa de Fijación al actuador.



Figura 181: Placa de Fijación al espécimen.



Figura 182: Riel deslizante fijo al extremo de la viga.



Figura 183: Zapato de apoyo probeta-mesa sísmica.



Figura 184: Placa de apoyo, entre unión (zapato de apoyo- fundación apernada).



Figura 185: Proceso de izaje de espécimen a ensayar.



Figura 186: Proceso de apriete de tuercas.



Figura 187: Colocación de Mortero nivelante.

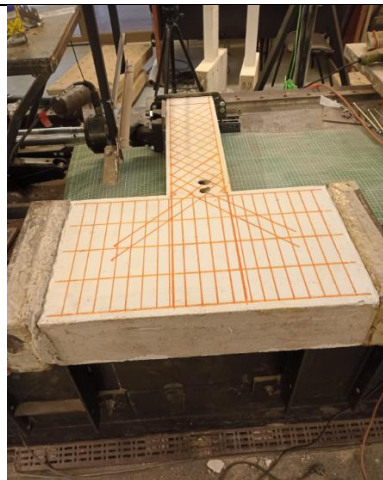


Figura 188: Colocación de sistema de fijación y limpieza.

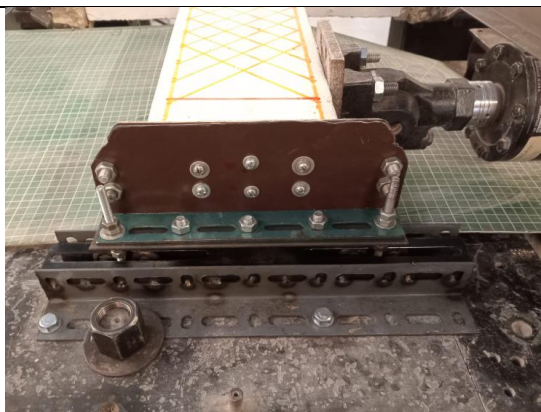


Figura 189: Unión de Riel con espécimen.

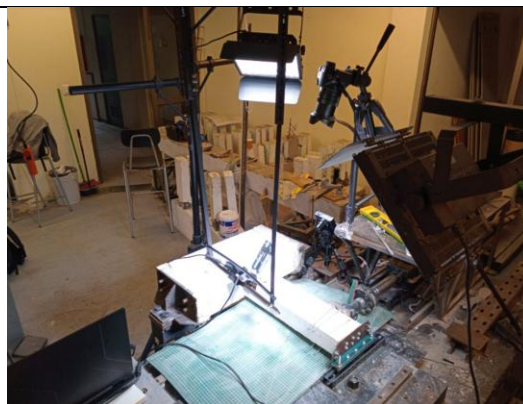


Figura 190: Colocación de Luces y Cámaras para Registro fotográfico.

Figura 191: Proceso de montaje de Especímenes.