UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE

ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON ARMADURA TRANSVERSAL INCLINADA Y ALTA CUANTÍA DE ACERO SOMETIDOS A SOLICITACIÓN SÍSMICA

Memoria de titulación presentada por

Steven Xavier Vásquez Muñoz

Como requisito parcial para optar al título de

Constructor Civil

Profesor Guía

René Tobar Ramos

Octubre 2026

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: ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON ARMADURA TRANSVERSAL INCLINADA Y ALTA CUANTÍA DE ACERO SOMETIDOS A SOLICITACIÓN SÍSMICA

Nombre del candidato(a): Steven Xavier Vásquez Muñoz

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 (marcar una opción)

☒ 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 **(marcar una opción)**:

☐ 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: 26-10-2026 ; **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26-10-2026 ; **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

La presente memoria es parte de una investigación experimental desarrollada en el laboratorio LEMCO del Departamento de Obras Civiles de la UTFSM sobre el comportamiento sísmico de elementos de hormigón armado con armadura transversal inclinada a 45°/135°. Estudios anteriores llevados a cabo en el mismo laboratorio mostraron que esta disposición permite conservar de mejor manera la integridad del hormigón y disminuir la degradación de resistencia respecto de los estribos ortogonales. Sin embargo, también se ha observado una tendencia indeseable a la fractura del refuerzo longitudinal, la que puede conducir al repentino colapso de la estructura. En este contexto, se evaluó una alternativa para evitar o retardar dicha fractura mediante la reducción de la resistencia del hormigón y el aumento de la cuantía del acero longitudinal, buscando favorecer una secuencia de falla como la que se espera normalmente en estos elementos, o sea en la que el hormigón se aplasta, disgrega y vacía gradualmente, y la fractura de las barras no ocurre.

Junto con las memoristas asociadas Alfaro, R. (2026) y Loyola, K. (2026), se construyeron y ensayaron seis especímenes representativos de uniones viga-columna, sometidos a cargas cíclicas equivalentes a solicitaciones sísmicas. Se utilizaron hormigones de resistencias moderadas 17,55 [MPa] y 23,83 [MPa], con especímenes con estribos inclinados en dos planos y otros con estribos ortogonales para comparación.

Ninguno de los seis especímenes presentó fractura del refuerzo longitudinal durante los ensayos. Los especímenes con estribos inclinados conservaron de mejor manera el hormigón que aquellos con estribos ortogonales. No obstante, se observó deslizamiento de las barras dentro de la columna en todos los especímenes, a pesar de que la longitud de anclaje cumplía los mínimos del código ACI-318. El análisis de las mediciones disponibles indicó que el refuerzo longitudinal observado alcanzó la fluencia antes de que el anclaje limitara la respuesta en los ciclos posteriores.

Los resultados muestran que fue posible evitar la fractura del refuerzo longitudinal y conservar una respuesta cíclica favorable en los especímenes con armadura transversal inclinada, pese al deslizamiento de las barras observado, probablemente gracias al alto grado de confinamiento de las barras en su zona de anclaje.

Palabras clave: Hormigón armado, armadura transversal inclinada, cuantía de acero longitudinal, fractura del refuerzo longitudinal, deslizamiento del anclaje.

ABSTRACT

This report is part of an experimental study conducted at the LEMCO laboratory of the Department of Civil Engineering at UTFSM on the seismic behavior of reinforced concrete members with transverse reinforcement inclined at 45°/135°. Previous studies conducted in the same laboratory showed that this arrangement better preserves the integrity of the concrete and reduces the loss of strength compared to orthogonal stirrups. However, an undesirable tendency for the longitudinal reinforcement to fracture has also been observed, which can lead to the sudden collapse of the structure. In this context, an alternative was evaluated to prevent or delay such fracture by reducing the concrete strength and increasing the amount of longitudinal steel, with the aim of promoting a failure sequence typically expected in these members—that is, one in which the concrete is gradually crushed, disintegrated, and washed out, and the bars do not fracture.

Together with co-authors Alfaro, R. (2026) and Loyola, K. (2026), six representative beam-column connection specimens were constructed and tested, subjected to cyclic loads equivalent to seismic stresses. Concrete with moderate strengths of 17.55 [MPa] and 23.83 [MPa] was used, with specimens featuring stirrups inclined in two planes and others with orthogonal stirrups for comparison.

None of the six specimens exhibited fracture of the longitudinal reinforcement during the tests. The specimens with inclined stirrups retained the concrete better than those with orthogonal stirrups. However, slippage of the bars within the column was observed in all specimens, even though the anchorage length met the minimum requirements of the ACI-318 code. Analysis of the available measurements indicated that the longitudinal reinforcement reached yield before the anchorage limited the response in subsequent cycles.

The results show that it was possible to prevent fracture of the longitudinal reinforcement and maintain a favorable cyclic response in the specimens with inclined transverse reinforcement, despite the observed bar slippage, likely due to the high degree of confinement of the bars in their anchorage zone.

Keywords: Reinforced concrete, inclined transverse reinforcement, longitudinal steel ratio, longitudinal reinforcement failure, anchorage slip.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Capítulo I: Introducción 9

1.1. Contextualización y definición del problema 9
1.2. Estudio experimental 10
1.3. Objetivos 10
1.3.1. Objetivo general 10
1.3.2. Objetivos específicos 10

2. Capítulo II: Estudios previos 11

2.1. Trabajos de la literatura especializada 11
2.1.1. Comportamiento sísmico de elementos con armadura transversal inclinada 11
2.1.2. Deformación crítica por pandeo 11
2.2. Trabajos realizados en la UTFSM 12
2.2.1. Deformación crítica y fractura de barras 12
2.2.2. Armadura suplementaria para restringir el pandeo 12
2.2.3. Estribos inclinados en dos planos 12
2.2.4. Medición de deformaciones y relación entre materiales 12

3. Capítulo III: Fabricación de especímenes 13

3.1. Características de los especímenes 13
3.2. Características de los materiales 14
3.2.1. Hormigón 14
3.2.2. Acero 14
3.3. Enfierradura de los especímenes fabricados 16
3.3.1. Columna 16
3.3.2. Vigas 16
3.3.2.1. Diseño de estribos inclinados 16
3.3.2.2. Armaduras de vigas con estribos ortogonales 17
3.3.2.3. Dimensiones de vigas con estribos inclinados 18
3.3.3. Armadura de los especímenes 20
3.4. Tuberías para cámaras endoscópicas 21
3.5. Moldaje 21
3.5.1. Moldaje para vigas referenciales 21
3.5.2. Moldaje para vigas angostadas 22
3.6. Hormigonado de probetas 22

4. Capítulo IV: Montaje para ensayo y medición 23

4.1. Montaje y medición de especímenes 23
4.2. Programa de carga 25

5. Capítulo V: Resultados experimentales 26

5.1. General 26
5.2. Espécimen RKS-1 26

5.2.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-1 26
5.2.2. Registro fotográfico espécimen RKS-1 27
5.2.3. Comentarios espécimen RKS-1 27
5.3. Espécimen RKS-2 28
5.3.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-2 28
5.3.2. Registro fotográfico espécimen RKS-2 30
5.3.3. Comentarios espécimen RKS-2 31
5.4. Espécimen RKS-3 32
5.4.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-3 32
5.4.2. Registro fotográfico espécimen RKS-3 33
5.4.3. Comentarios espécimen RKS-3 33
5.5. Espécimen RKS-4 34
5.5.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-4 34
5.5.2. Registro fotográfico espécimen RKS-4 37
5.5.3. Comentarios espécimen RKS-4 38
5.6. Espécimen RKS-5 39
5.6.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-5 39
5.6.2. Registro fotográfico espécimen RKS-5 42
5.6.3. Comentarios espécimen RKS-5 43
5.7. Espécimen RKS-6 44
5.7.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-6 44
5.7.2. Registro fotográfico espécimen RKS-6 47
5.7.3. Comentarios espécimen RKS-6 48
5.8. Análisis del diseño empleado 49
5.8.1. Evaluación de la longitud de anclaje mínima según el ACI-318-25 49
5.8.2. Determinación de la fluencia de la barra de acero longitudinal de la viga 51
5.8.3. Evaluación de la resistencia por flexión de los especímenes ensayados 52
5.8.4. Evaluación de la resistencia por corte 53
5.9. Análisis de los resultados 55
6. Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones 57
7. Referencias 58
8. Anexos 59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de la zona de interés. 9
Figura 2. Espécimen representativo de unión viga-columna a escala reducida. 9
Figura 3. Aplicación espiral (a) DCM DOUBLE (b) DCM SINGLE. (Azimi et al. 2015). 11
Figura 4. Capacidad porcentual de disipación de energía. (Azimi et al. 2015)..... 11
Figura 5. Dimensiones de especímenes en centímetros. 13
Figura 6. Gráfico de Fuerza v/s Desplazamiento, aceros ensayados..... 15
Figura 7. Registro de barras ensayadas a tracción. 15
Figura 8. Detalle armadura columna (medidas en cm). 16
Figura 9. Armadura de viga con estribos ortogonales. 17
Figura 10. Armadura de viga angostada con estribos ortogonales..... 17
Figura 11. Armadura de viga referencial con estribos inclinados. 18
Figura 12. Dimensiones de estribo inclinado y anclaje a columna de viga referencial. 18
Figura 13. Armadura de viga angostada con estribos inclinados..... 19
Figura 14. Dimensiones de estribo inclinado y anclaje a columna de viga angostada. 19
Figura 15. Armadura de espécimen con estribos inclinados..... 20
Figura 16. Armadura de espécimen con estribos ortogonales..... 20
Figura 17. Dimensiones moldaje de viga. 21
Figura 18. Espécimen ortogonal en moldaje..... 21
Figura 19. Corte A-A de moldaje de viga. 21
Figura 20. Dimensiones moldaje de viga angostada. 22
Figura 21. Espécimen angostado en moldaje. 22
Figura 22. Corte B-B de moldaje de viga angostada..... 22
Figura 23. Diagrama unilineal del sistema de ensayo (Maldonado, J. (2023)). 23
Figura 24. Montaje y disposición de los equipos de medición y registro. 24
Figura 25. Identificación y ubicación de las cámaras endoscópicas en especímenes. 24
Figura 26. Historia de desplazamiento de especímenes. 25
Figura 27. Curvas de histéresis RKS-1. 26
Figura 28. Ciclo inicial RKS-1. 27
Figura 29. Vista lateral ciclo inicial RKS-1. 27
Figura 30. Cuarto ciclo 30mm RKS-1. 27
Figura 31. Vista lateral post-ensayo RKS-1. 27
Figura 32. Curva de histéresis parcial 10mm RKS-2. 28
Figura 33. Curva de histéresis parcial 15mm RKS-2. 28
Figura 34. Curva de histéresis parcial 20mm RKS-2. 29
Figura 35. Curva de histéresis parcial 25mm RKS-2. 29
Figura 36. Curvas de histéresis RKS-2. 30
Figura 37. Quinto ciclo 5mm RKS-2..... 30
Figura 38. Quinto ciclo 10mm RKS-2. 30
Figura 39. Quinto ciclo 15mm RKS-2. 30
Figura 40. Quinto ciclo 20mm RKS-2. 30
Figura 41. Décimo ciclo 25mm RKS-2..... 31
Figura 42. Post-ensayo vista lateral RKS-2. 31
Figura 43. Curvas de histéresis RKS-3. 32

Figura 44. Quinto ciclo 25mm RKS-3. 33
Figura 45. Tercer ciclo 30mm RKS-3. 33
Figura 46. Vista lateral post-ensayo RKS-3. 33
Figura 47. Curvas de histéresis parciales 5 y 10mm RKS-4. 34
Figura 48. Curva de histéresis parcial 15mm RKS-4. 34
Figura 49. Curva de histéresis parcial 20mm RKS-4. 35
Figura 50. Curva de histéresis parcial 25mm RKS-4. 35
Figura 51. Curva de histéresis parcial 30mm RKS-4. 36
Figura 52. Curvas de histéresis RKS-4. 36
Figura 53. Quinto ciclo 5mm RKS-4. 37
Figura 54. Quinto ciclo 10mm RKS-4. 37
Figura 55. Quinto ciclo 15mm RKS-4. 37
Figura 56. Quinto ciclo 20mm RKS-4. 37
Figura 57. Décimo ciclo 25mm RKS-4. 37
Figura 58. Tercer ciclo 30mm RKS-4. 37
Figura 59. Vista lateral post-ensayo RKS-4. 37
Figura 60. Curva de histéresis parcial 10mm RKS-5. 39
Figura 61. Curva de histéresis parcial 15mm RKS-5. 39
Figura 62. Curva de histéresis parcial 20mm RKS-5. 40
Figura 63. Curva de histéresis parcial 25mm RKS-5. 40
Figura 64. Curva de histéresis parcial 30mm RKS-5. 41
Figura 65. Curvas de histéresis RKS-5. 41
Figura 66. Quinto ciclo 5mm RKS-5. 42
Figura 67. Quinto ciclo 10mm RKS-5. 42
Figura 68. Quinto ciclo 15mm RKS-5. 42
Figura 69. Quinto ciclo 20mm RKS-5. 42
Figura 70. Décimo ciclo 25mm RKS-5. 42
Figura 71. Tercer ciclo 30mm RKS-5. 42
Figura 72. Vista lateral post-ensayo RKS-5. 42
Figura 73. Curvas de histéresis parciales 5 y 10mm RKS-6. 44
Figura 74. Curva de histéresis parcial 15mm RKS-6. 44
Figura 75. Curva de histéresis parcial 20mm RKS-6. 45
Figura 76. Curva de histéresis parcial 25mm RKS-6. 45
Figura 77. Curva de histéresis parcial 30mm RKS-6. 46
Figura 78. Curvas de histéresis RKS-6. 46
Figura 79. Quinto ciclo 5mm RKS-6. 47
Figura 80. Quinto ciclo 10mm RKS-6. 47
Figura 81. Quinto ciclo 15mm RKS-6. 47
Figura 82. Quinto ciclo 20mm RKS-6. 47
Figura 83. Décimo ciclo 25mm RKS-6. 47
Figura 84. Quinto ciclo 30mm RKS-6. 47
Figura 85. Vista lateral post-ensayo RKS-6. 47
Figura 86. Determinación de Cb (medidas en cm). 49
Figura 87. Parámetros para cálculo de Ktr. 49

Figura 88. Intervalo de fluencia acero A630-420H. 50
Figura 89. Longitud de anclaje de los especímenes (medidas en cm). 50
Figura 90. Longitud entre cámaras endoscópicas de columna. 51
Figura 91. Parámetros comunes utilizados para la evaluación de la resistencia por flexión. 52
Figura 92. Deformación remanente AISI-304. 54
Figura 93. Sistema utilizado para el doblado de estribos. 59
Figura 94. Primer hormigonado. 59
Figura 95. Segundo hormigonado. 59
Figura 96. Sección sobresaliente de perno de anclaje. 59
Figura 97. Ensayo probeta cilíndrica. 60
Figura 98. Ensayo acero AT56-50H. 60
Figura 99. Trazado de especímenes. 60
Figura 100. Grouting de nivelación. 60
Figura 101. Instalación de riel de soporte de viga. 60
Figura 102. Instalación de cámaras endoscópicas. 60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de los especímenes ensayados. 13
Tabla 2. Dosificación de hormigón utilizada. 14
Tabla 3. Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas. 14
Tabla 4. Características del acero. 14
Tabla 5. Eventos ensayo espécimen RKS-1. 27
Tabla 6. Eventos ensayo espécimen RKS-2. 31
Tabla 7. Eventos ensayo espécimen RKS-3. 33
Tabla 8. Eventos ensayo espécimen RKS-4. 38
Tabla 9. Eventos ensayo espécimen RKS-5. 43
Tabla 10. Eventos ensayo espécimen RKS-6. 48
Tabla 11. Parámetros utilizados en la evaluación del anclaje según ACI-318-25 50
Tabla 12. Valores calculados para la longitud de anclaje mínima. 50
Tabla 13. Alargamiento de fluencia del refuerzo longitudinal. 51
Tabla 14. Parámetros obtenidos para el cálculo de la resistencia por flexión. 52
Tabla 15. Resistencia teórica por flexión y cargas experimentales. 53
Tabla 16. Parámetros utilizados para calcular el aporte del hormigón al corte. 53
Tabla 17. Parámetros utilizados para calcular la resistencia al corte del refuerzo. 53
Tabla 18. Resistencia por corte y cargas experimentales. 54

Capítulo I: Introducción

1.1. Contextualización y definición del problema

Durante la última década, en la UTFSM se han desarrollado diversos estudios experimentales sobre el comportamiento sísmico de elementos de hormigón armado con armadura transversal inclinada. Los resultados obtenidos por Silva, B. (2022), Maldonado, J. (2023), Bermúdez, A. (2024) y otros autores han mostrado que esta disposición mejora significativamente el desempeño estructural respecto de los elementos con estribos ortogonales, principalmente por una menor pérdida de integridad del hormigón y una menor degradación de resistencia. Sin embargo, también se ha evidenciado una tendencia indeseable a la fractura del refuerzo longitudinal, lo cual puede conducir a una falla súbita de la estructura.

La fractura del refuerzo longitudinal es un fenómeno asociado al pandeo de las barras favorecido por la pérdida del recubrimiento del hormigón durante una intensa solicitación sísmica. Ayaviri, R. (2025) y Palacios, M. (2025), observaron este comportamiento y plantearon que la relación entre la capacidad mecánica del hormigón y la del acero longitudinal tendría una influencia importante en la secuencia de falla. Esto tiene que ver con una hipótesis fundamental para el diseño a flexión de los elementos de hormigón armado, respecto a que el acero en tracción fluye primero y el hormigón se aplasta, disgrega y vacía gradualmente después, al superar una deformación unitaria en compresión de 0.003, como lo explica Moehle, J. (2015), en su conocido libro. Sin embargo, en casos con armadura transversal inclinada, y cuando el esfuerzo de corte hace tender las grietas a 45 grados, el hormigón es capaz de soportar deformaciones considerablemente mayores sin vaciarse, ya que la armadura transversal inclinada logra atrapar los pequeños trozos y lo impide (Ayaviri, R. 2025). Por lo tanto, es el acero longitudinal el que finalmente falla y se corta.

Se confeccionarán entonces, seis especímenes representativos de uniones exteriores viga-columna de marcos sismorresistentes (véase **Figuras 1 y 2**), diseñados para que no haya daños en la columna y este se concentre en la zona de rótula plástica de las vigas. Buscando evitar la fractura del acero reduciendo la capacidad mecánica del hormigón, se disminuirá la sección transversal de la viga, con respecto a lo usado por otros memoristas y se empleará un hormigón de menor resistencia a la compresión. Se usarán cámaras endoscópicas para observar detalladamente el comportamiento del refuerzo longitudinal durante los ensayos.

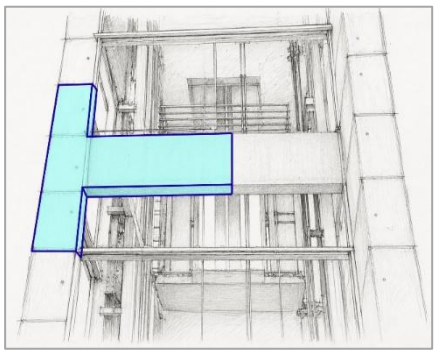


Figura 1. Representación de la zona de interés.

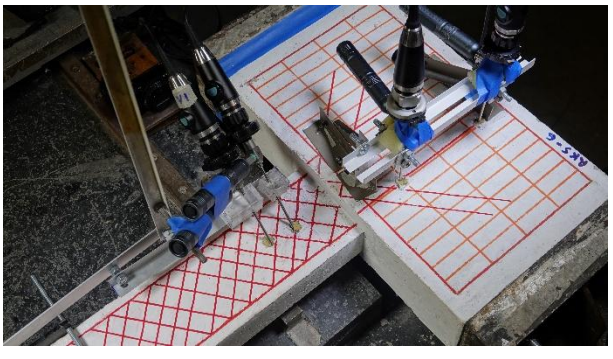


Figura 2. Espécimen representativo de unión viga-columna a escala reducida.

1.2. Estudio experimental

Con el propósito de inducir una secuencia de falla apropiada, en la que el acero longitudinal fluya y luego, en una deformación unitaria de por lo menos tres por mil, el hormigón en compresión se aplaste, se planteó la necesidad de aumentar la cuantía del acero de refuerzo. No obstante, debido a las limitaciones en la capacidad de carga del equipo experimental del laboratorio, no fue factible incrementar el número de barras de acero en la sección transversal de la viga para aumentar la cuantía. Por lo tanto, se optó por disminuir el ancho de la viga de los especímenes para lograr este objetivo.

En conjunto con las memoristas asociadas Alfaro, R. (2026) y Loyola, K. (2026), se confeccionaron especímenes de hormigón armado representativos de uniones viga-columna de marcos sismorresistentes que pueden interpretarse a escala 1/3 o 1/4. Dos de ellos mantienen las dimensiones comúnmente utilizadas en investigaciones previas (Maldonado, J. (2023), Bermúdez, A. (2024), Ayaviri, R. (2025), Palacios, M. (2025) y otros), mientras que los cuatro restantes incorporan la propuesta de sección angostada, reduciendo el ancho de la viga.

Adicionalmente, todos los especímenes fueron confeccionados con un hormigón de menor resistencia a la compresión respecto del empleado en investigaciones anteriores. Ambas modificaciones responden a la hipótesis planteada por Ayaviri, R. (2025).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

En la presente investigación se evaluará experimentalmente una alternativa para impedir o retardar la fractura del refuerzo longitudinal observada en elementos con armadura transversal inclinada 45°/135° sometidos a solicitación sísmica, ya que puede conducir a una falla indeseable de la estructura en forma global. La solución que se estudiará busca disminuir la capacidad mecánica del hormigón de los especímenes con el objetivo de modificar la secuencia de falla, de modo que el hormigón se aplaste, disgregue y vacíe antes de la fractura del acero.

1.3.2. Objetivos específicos

- Proponer una configuración de espécimen que permita disminuir la relación entre la capacidad mecánica del hormigón comprimido y la del acero longitudinal, o sea aumentar la cuantía del acero de la viga, mediante la reducción de su sección transversal respecto de las dimensiones usadas por memoristas anteriores, lo cual tendrá que hacerse de esta manera por restricciones en la capacidad de carga del equipo experimental.
- Determinar claramente la secuencia de falla de los especímenes construidos, estableciendo sus diferencias de acuerdo al programa indicado, en términos de ciclos de histéresis, aparición de grietas, pandeo, deslizamientos y eventual fractura de la armadura longitudinal, para lo cual se dispondrá de un sistema de cámaras endoscópicas dirigidas al interior del hormigón para observar el comportamiento de las barras.
- Evaluar cómo el aumento de la cuantía del acero favorece una secuencia de falla en la que el hormigón comprimido alcance su aplastamiento antes de que ocurra la fractura de las barras longitudinales y establecer recomendaciones de diseño y construcción.

Capítulo II:
Estudios previos

2.1. Trabajos de la literatura especializada

2.1.1. Comportamiento sísmico de elementos con armadura transversal inclinada

Se encontró muy poca literatura sobre el comportamiento de elementos de hormigón armado con armadura transversal inclinada, la publicación de Azimi et al. (2015) es la más pertinente, quienes demostraron que el uso de armadura transversal continua en espiral mejora la capacidad de disipación de energía y la ductilidad de las conexiones viga – columna respecto al uso convencional de los estribos ortogonales. Véase **Figura 3 y 4.**

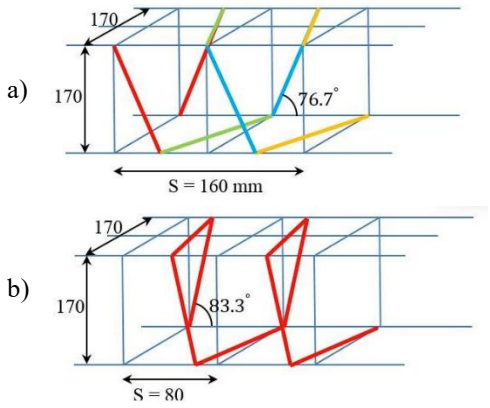


Figura 3. Aplicación espiral (a) DCM DOUBLE (b) DCM SINGLE. (Azimi et al. 2015).

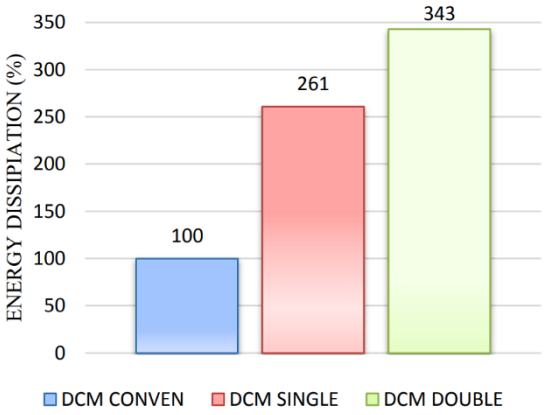


Figura 4. Capacidad porcentual de disipación de energía. (Azimi et al. 2015).

2.1.2. Deformación crítica por pandeo

Barcley y Kowalsky (2019) demostraron que las barras sometidas a cargas cíclicas pueden fracturarse de manera frágil después de experimentar pandeo. Los autores observaron que, durante la fase de compresión, la barra desarrolla deformaciones por flexión asociadas al pandeo y que, al superar una deformación crítica, su capacidad resistente queda severamente comprometida. En consecuencia, la fractura puede producirse en el ciclo de tracción inmediatamente posterior, incluso cuando la demanda de carga no es elevada.

2.2. Trabajos realizados en la UTFSM

2.2.1. Deformación crítica y fractura de barras

Rojas, S. A. (2022) estudió realizó ensayos de fatiga de bajo ciclaje y ensayos de tracción de barras de 8mm previamente pandeadas (BBT), siguiendo el enfoque de Barcley y Kowalsky (2019). Determinó deformaciones unitarias críticas por flexión cercanas a 0,24 para acero CAP y 0,25 para acero AZA, aportando una referencia experimental para interpretar la fractura del refuerzo longitudinal. Asimismo, al comparar sus resultados con ensayos anteriores con pandeo restringido, identificó la restricción lateral como una alternativa para retrasar la fractura.

2.2.2. Armadura suplementaria para restringir el pandeo

Reyes, G. (2023) y Maldonado, J. (2023) desarrollaron un sistema de armadura suplementaria mediante barras diagonales ubicadas en las caras superior e inferior de la viga, con el propósito de restringir el pandeo del refuerzo longitudinal en direcciones paralelas a las caras, donde la disminución del espaciamiento entre estribos había demostrado ser ineficaz. Los ensayos evidenciaron una mejora del comportamiento sísmico, alcanzando desplazamientos del orden de 35 mm antes de la aparición del pandeo y la fractura de las barras, pero esto último no pudo ser evitado.

2.2.3. Estribos inclinados en dos planos

Bermúdez, A. (2024) estudió una configuración de estribos inclinados en dos planos con el objetivo de proporcionar confinamiento multidireccional al refuerzo longitudinal, reduciendo simultáneamente la cuantía de acero transversal respecto a las soluciones anteriores. Los ensayos mostraron un comportamiento sísmico similar al obtenido con armadura suplementaria, acompañado de una menor degradación del hormigón en la zona de rótula plástica. Sin embargo, en los ciclos de mayor amplitud se observaron problemas de torsión de los especímenes, atribuida al sistema de montaje utilizado durante los ensayos, lo que limitó la interpretación de los resultados.

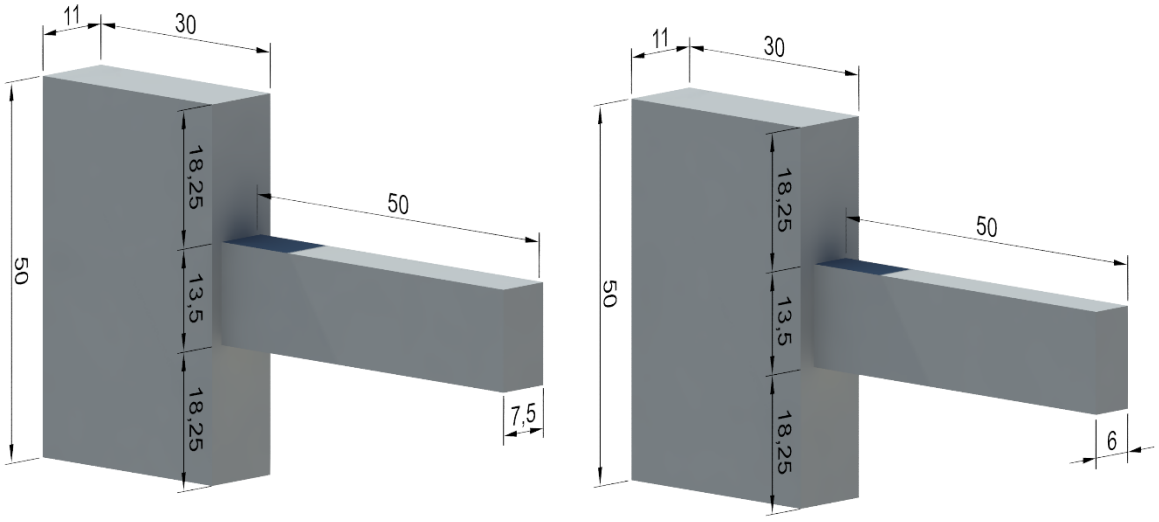
2.2.4. Medición de deformaciones y relación entre materiales

Palacios, M. (2025) desarrolló un procedimiento de medición mediante cámaras endoscópicas que permitió estimar deformaciones longitudinales en el rango inelástico hasta el inicio del pandeo. Complementariamente, Ayaviri, R. (2025) amplió la comparación entre estribos inclinados y ortogonales, destacando la estabilidad de los ciclos y la conservación del hormigón con armadura inclinada, aunque persistió la tendencia a la fractura longitudinal. Propuso reducir la relación entre la capacidad mecánica del hormigón y del acero mediante una menor resistencia del hormigón o una mayor cuantía longitudinal, planteamiento que constituye un antecedente directo de la presente investigación.

Capítulo III:
Fabricación de especímenes

3.1. Características de los especímenes

La **Figura 5** presenta los dos tipos de especímenes considerados en este estudio. La primera corresponde a la configuración utilizada en estudios anteriores, mientras que la segunda considera la reducción en el ancho de la viga.



a) Espécimen de referencia b) Espécimen con ancho de viga angostado

Figura 5. Dimensiones de especímenes en centímetros.

Para ambas configuraciones geométricas se construyeron especímenes con armadura transversal de estribos ortogonales y otros con estribos inclinados. La distribución de los especímenes fabricados se resume en la **Tabla 1.**

Tabla 1. Distribución de los especímenes ensayados.

Espécimen	Geometría de viga	Tipo de estribo
RKS-1	Referencial	Ortogonal
RKS-2	Angostada	Ortogonal
RKS-3	Angostada	Ortogonal
RKS-4	Referencial	Inclinado
RKS-5	Angostada	Inclinado
RKS-6	Angostada	Inclinado

3.2. Características de los materiales

3.2.1. Hormigón

La dosificación detallada en la **Tabla 2** corresponde a la mezcla utilizada para la confección de tres especímenes y cuatro probetas cilíndricas de 15 [cm] de diámetro y 30 [cm] de alto.

Tabla 2. Dosificación de hormigón utilizada.

Material	Detalle	Cantidad total
Hormigón predosificado	Hormigón Presec H-20	175 [kg]
Cemento especial	Cemento Polpaico	2 [kg]
Plastificante	Eucon 610 SR	0,111 [L]
Agua	-	19,6 [L]

La fecha de hormigonado de los especímenes RKS 1,5 y 6 se realizó el día 28/04/26, mientras que para los especímenes RKS 2,3 y 4 se realizó el día 26/05/26.

Con respecto a las probetas cilíndricas, estas fueron ensayadas de acuerdo con la NCh1037 of.2009. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas.

Número probeta	Fecha hormigonado	Fecha ensayo	Días transcurridos	Resistencia [MPa]
1	28/04/26	05/05/26	7	10,20
2		26/05/26	28	15,77
3		23/06/26	56	21,02
4		**13/08/26**	**107**	**23,83**
5	26/05/26	02/06/26	7	7,68
6		23/06/26	28	15,82
7		21/07/26	56	15,24
8		**20/08/26**	**86**	**17,55**

3.2.2. Acero

Para el diseño de las armaduras, se utilizan los aceros que se presentan en la **Tabla 4**. Puesto que no se fabrican barras de acero A630-420H con diámetros tan pequeños, se utilizó acero inoxidable AISI-304 para la confección de los estribos. El uso de este material se justifica en la memoria de Silva, B. (2022), cuyo criterio se adoptó en esta investigación.

Tabla 4. Características del acero.

Refuerzo	Calidad	Diámetro [mm]
Longitudinal (AZA)	A630-420H	8
Transversal (Columna)	AT56-50H	4,2
Trasversal (Viga)	Acero Inoxidable AISI-304	3,2

Se presentan a continuación, los gráficos fuerza v/s elongación obtenidos para dos ejemplares de cada una de las barras utilizadas en la fabricación de los especímenes. Estos datos se usan más adelante.

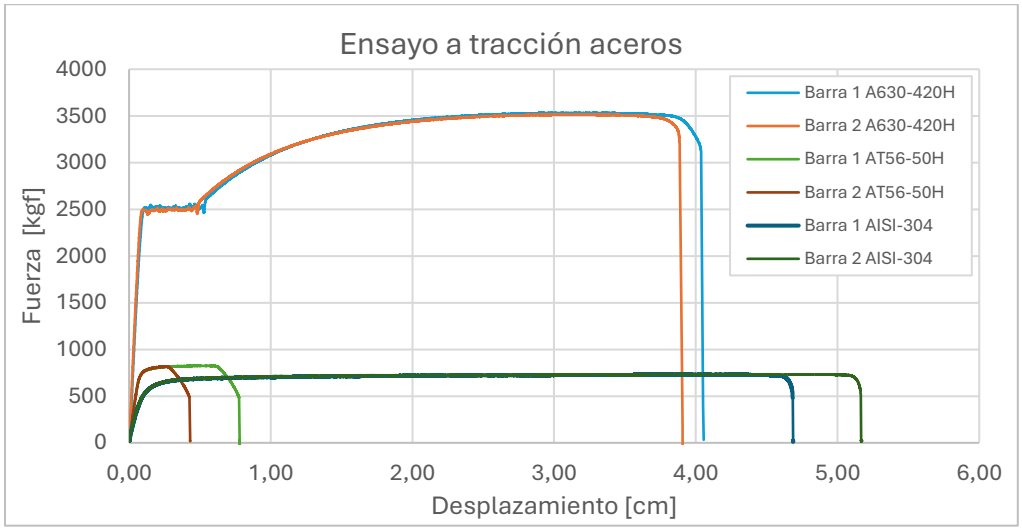


Figura 6. Gráfico de Fuerza v/s Desplazamiento, aceros ensayados.



Figura 7. Registro de barras ensayadas a tracción.

3.3. Enfierradura de los especímenes fabricados

A continuación, se detallan las armaduras de la columna y de la viga.

3.3.1. Columna

Para la confección de la armadura de la columna se utilizaron barras longitudinales de acero A630-420H y estribos de acero AT56-50H con ganchos sísmicos en sus extremos. Las dimensiones y detalles se presentan en la **Figura 8**.

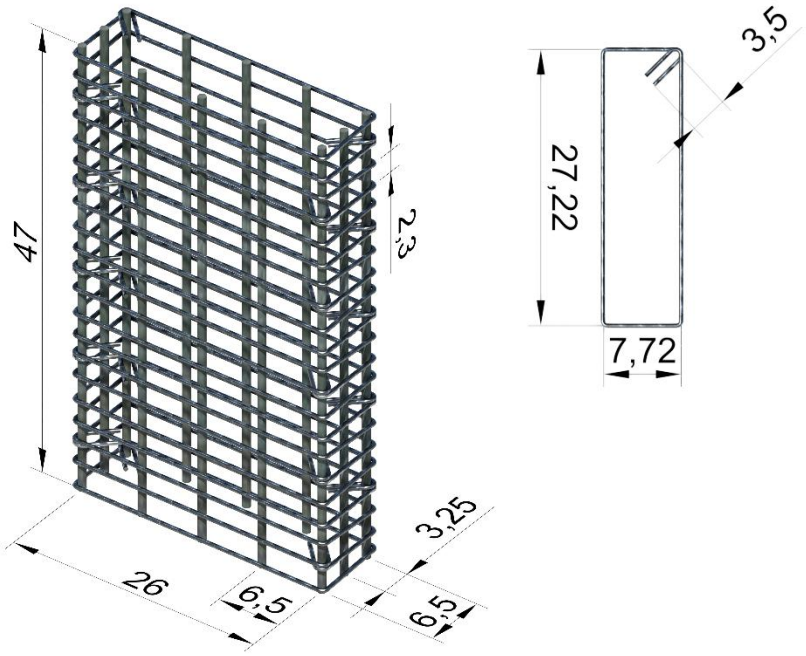


Figura 8. Detalle armadura columna (medidas en cm).

3.3.2. Vigas

El armado de las vigas se realizó con el refuerzo longitudinal y transversal descrito anteriormente en la **Tabla 4**. La disposición de los estribos se ajustó respecto a la configuración ortogonal y a la configuración inclinada correspondiente a cada espécimen. Los detalles se presentan en los subapartados siguientes.

3.3.2.1. Diseño de estribos inclinados

Para los especímenes con estribos inclinados se utilizó el diseño en dos planos empleado por Bermúdez, A. (2024), Ayaviri, R. (2025), Palacios, M. (2025) y otros. Los detalles del proceso de armado y distribución de los estribos internos y externos se encuentran en las memorias de Ayaviri, R. (2025) y Palacios, M. (2025).

3.3.2.2. Armaduras de vigas con estribos ortogonales

Las **Figuras 9 y 10** presentan las dimensiones en centímetros de las armaduras de las vigas con estribos ortogonales de los especímenes ensayados. La **Figura 9** corresponde a la geometría referencial empleada en estudios anteriores, mientras que la **Figura 10** muestra la configuración con sección angostada propuesta en la presente memoria.

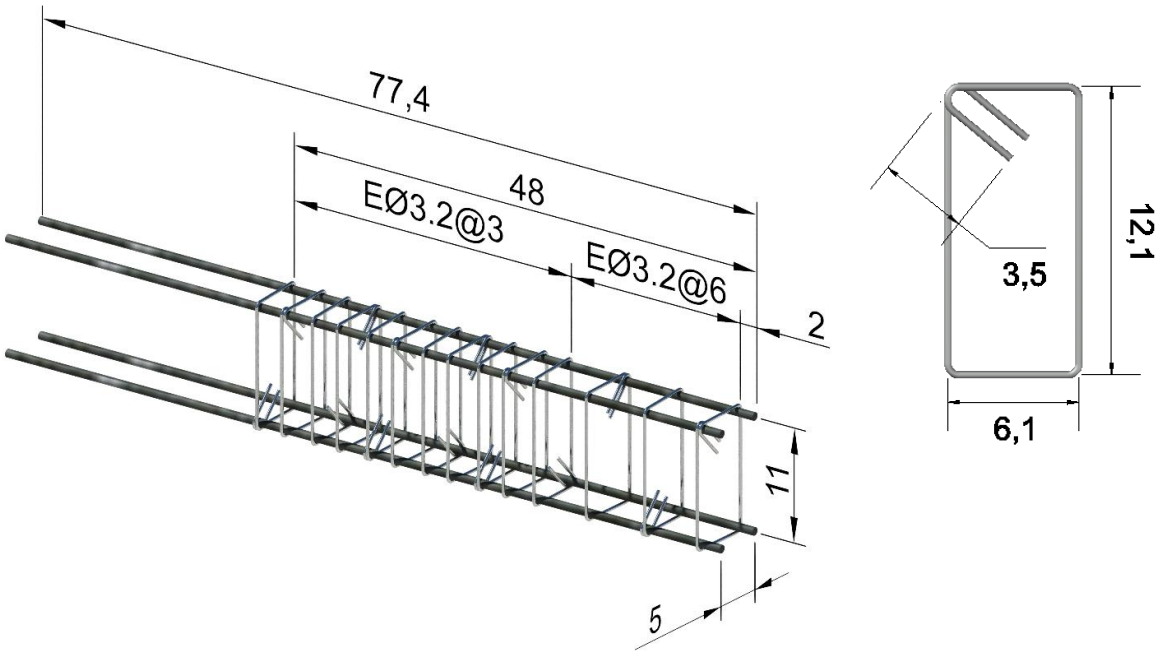


Figura 9. Armadura de viga con estribos ortogonales.

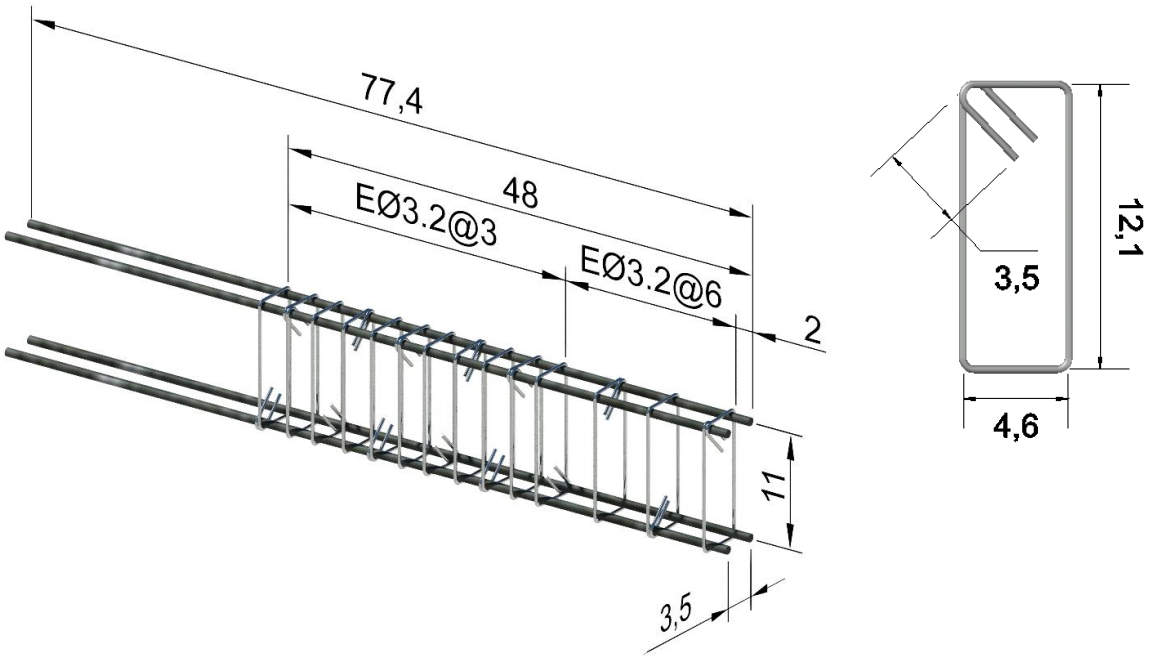


Figura 10. Armadura de viga angostada con estribos ortogonales.

3.3.2.3. Dimensiones de vigas con estribos inclinados

Las **Figuras 11 y 12** muestran las dimensiones en centímetros y disposición de la armadura transversal inclinada correspondiente a la geometría referencial utilizada en esta línea de investigación (Ayaviri, R. (2025), Palacios, M. (2025)). En dichas representaciones, es posible distinguir los estribos y anclajes exteriores (identificados en azul oscuro) junto con los estribos y anclajes interiores (identificados en gris claro).

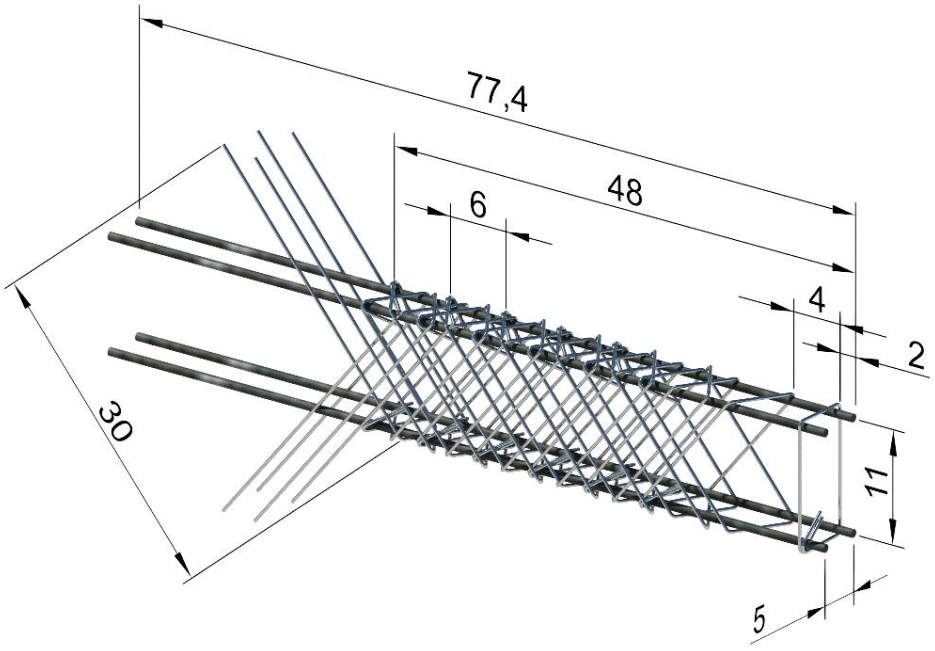


Figura 11. Armadura de viga referencial con estribos inclinados.

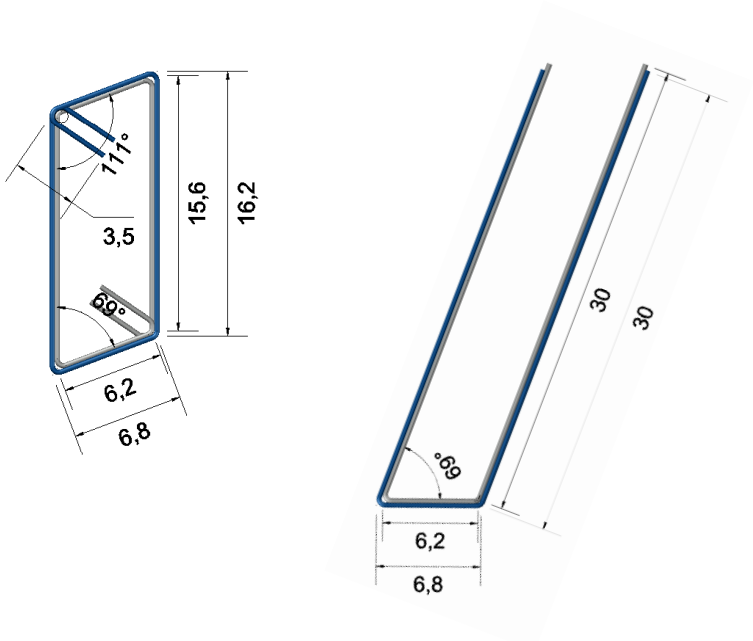


Figura 12. Dimensiones de estribo inclinado y anclaje a columna de viga referencial.

Las **Figuras 13 y 14** muestran las dimensiones en centímetros de la viga angostada propuesta en este estudio. En esta configuración se mantiene la disposición de la armadura transversal inclinada utilizada en la geometría referencial, reduciéndose únicamente el ancho de la sección transversal de la viga.

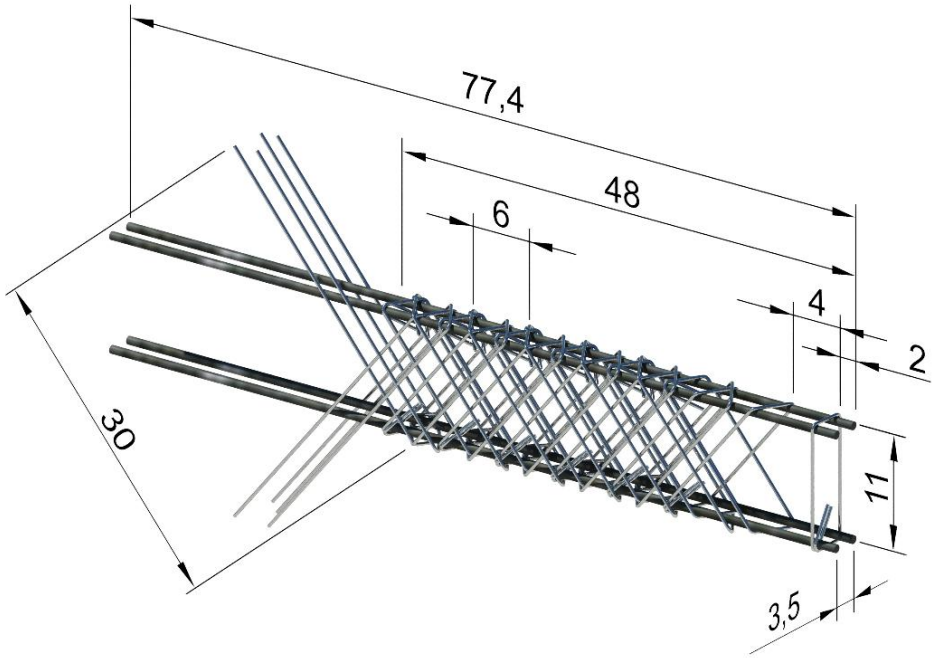


Figura 13. Armadura de viga angostada con estribos inclinados.

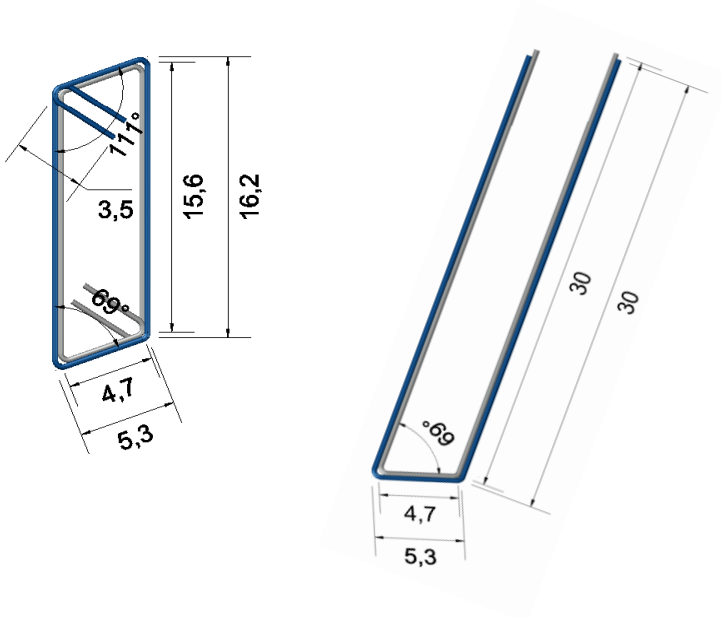


Figura 14. Dimensiones de estribo inclinado y anclaje a columna de viga angostada.

3.3.3. Armadura de los especímenes

Las **Figuras 15 y 16** muestran las armaduras completas de ambos tipos de especímenes ensayados.

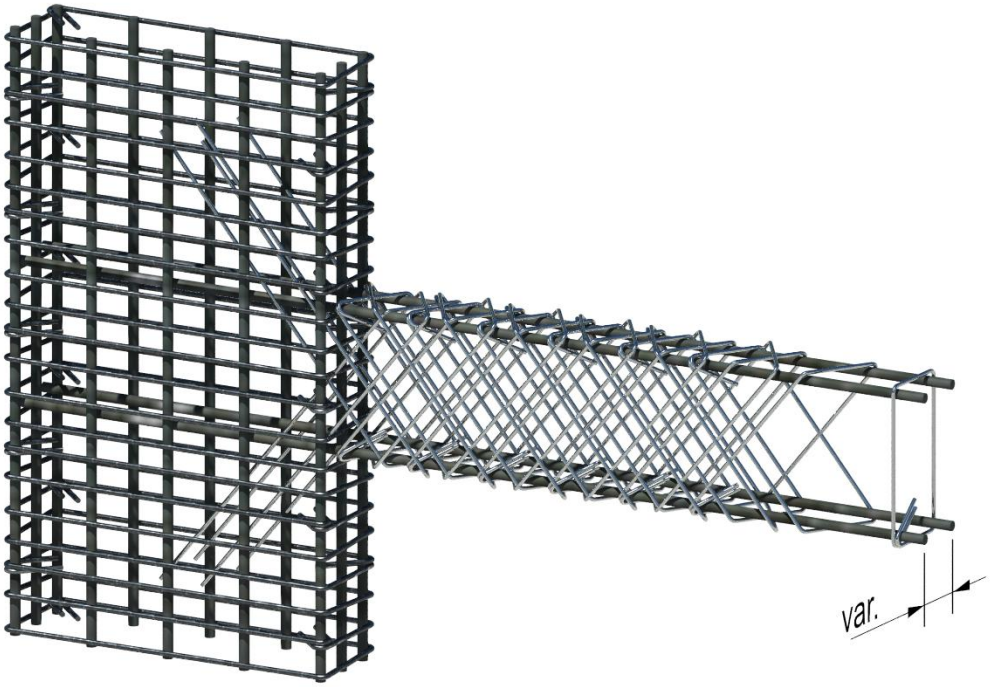


Figura 15. Armadura de espécimen con estribos inclinados.

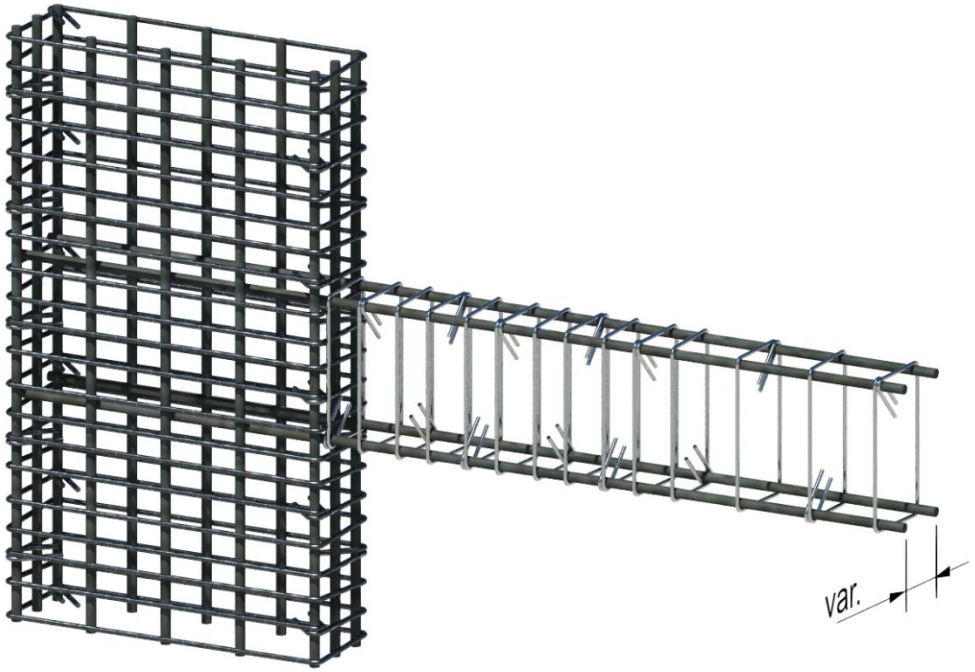


Figura 16. Armadura de espécimen con estribos ortogonales.

3.4. Tuberías para cámaras endoscópicas

Para permitir la posterior instalación de cámaras endoscópicas, se incorporaron tuberías de cobre de ½" de diámetro adheridas a las barras del refuerzo longitudinal. Cada espécimen cuenta con dos tuberías dispuestas en la viga y dos en la columna. Mayores detalles sobre la fabricación e instalación de este sistema se presentan en la memoria de Loyola, K. (2026).

3.5. Moldaje

Los moldajes fueron construidos utilizando melamina blanca de 15 [mm], cholguán de 2,5 [mm] y madera MDF de 10 [mm]. Adicionalmente, se utilizó desmoldante para maderas y se realizaron perforaciones para barras de anclaje de 5/8" de diámetro y de 25 [cm] de longitud incluyendo tuercas y golillas. Véase **Figura 96** en Anexo.

3.5.1. Moldaje para vigas referenciales

Los moldajes se elaboraron a partir de las dimensiones de los especímenes utilizados por Bermúdez, A. (2024), Ayaviri, R. (2025) y Palacios, M. (2025), como se indica en las **Figuras 17, 18 y 19**. Todas las dimensiones indicadas están expresadas en centímetros.

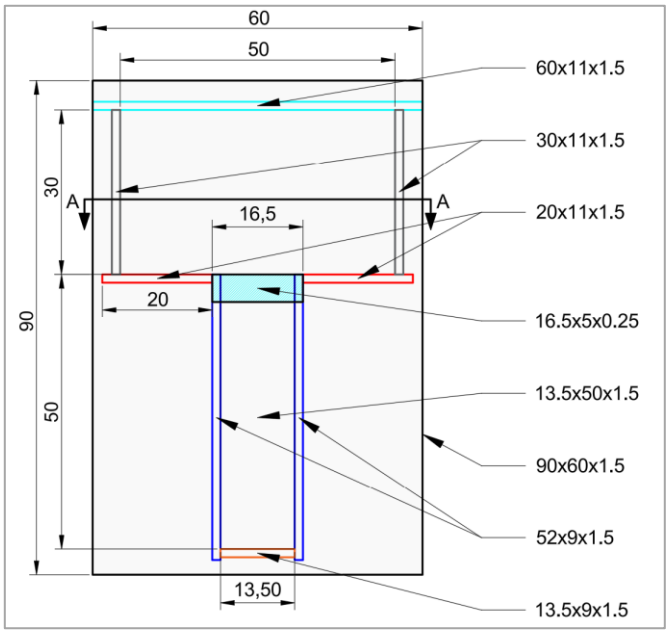


Figura 17. Dimensiones moldaje de viga.

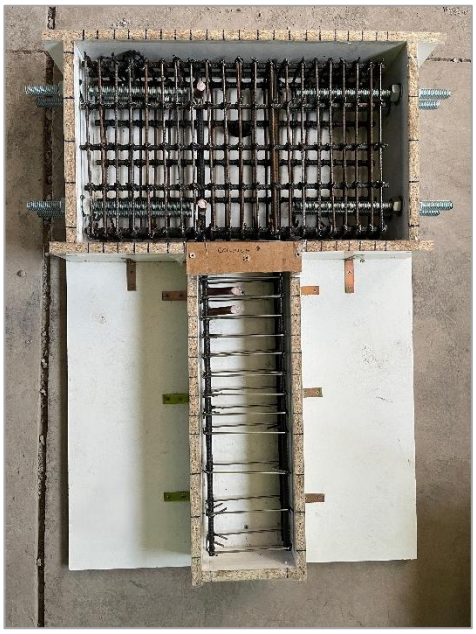


Figura 18. Espécimen ortogonal en moldaje.

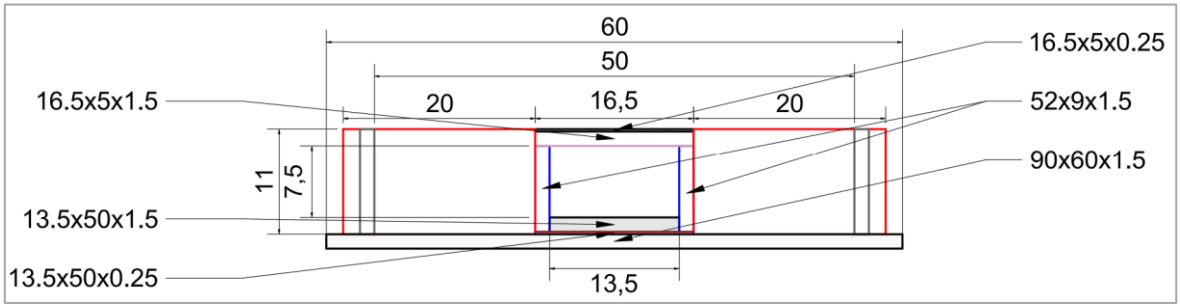


Figura 19. Corte A-A de moldaje de viga.

3.5.2. Moldaje para vigas angostadas

Se diseñó una variante del moldaje tradicional ajustada en base al angostamiento realizado en la viga, la cual se detalla en las **Figuras 20, 21 y 22**. Todas las dimensiones indicadas están expresadas en centímetros.

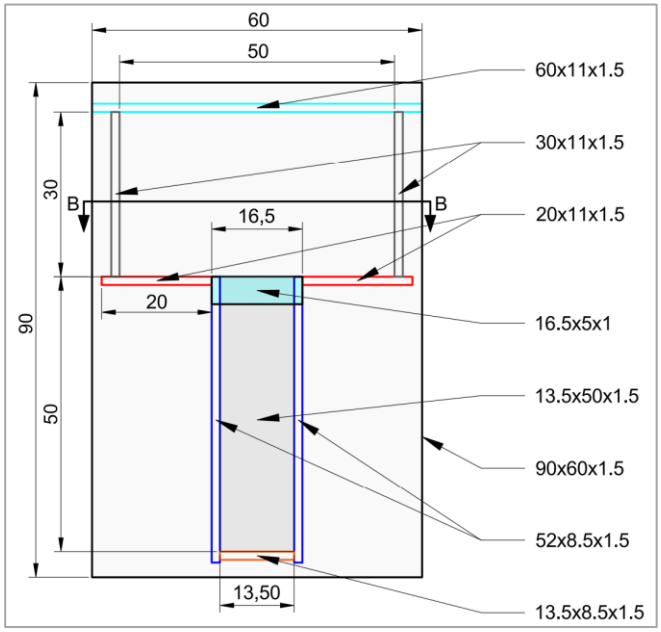


Figura 20. Dimensiones moldaje de viga angostada.

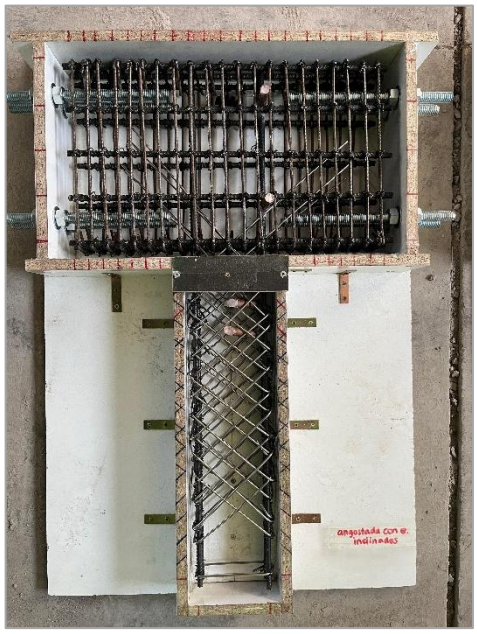


Figura 21. Espécimen angostado en moldaje.

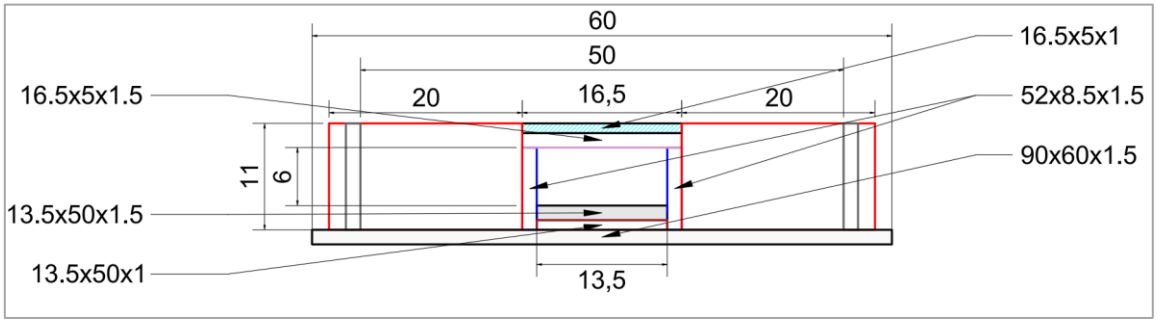


Figura 22. Corte B-B de moldaje de viga angostada

3.6. Hormigonado de probetas

El hormigonado de los especímenes se realizó en dos fechas distintas, empleando en ambas ocasiones la dosificación especificada en la **Tabla 2.** El proceso contó con la colaboración y supervisión del personal del LEMCO, que facilitó las herramientas y equipos necesarios para su ejecución. Las **Figuras 94 y 95 del anexo** muestran ambas jornadas de hormigonado.

Aunque se mantuvo la dosificación y se utilizó hormigón predosificado de la misma marca, se descubrió después que los sacos empleados en cada jornada correspondían a distintos lotes de fabricación. Esta diferencia constituye una posible fuente de variabilidad del material que, junto con las condiciones de preparación y curado, pudo contribuir a las distintas resistencias obtenidas. Asimismo, el hormigonado y el curado se efectuaron durante un periodo de bajas temperaturas ambientales, condición que pudo retrasar el desarrollo de la resistencia.

Capítulo IV:
Montaje para ensayo y medición

4.1. Montaje y medición de especímenes

Los especímenes fueron sometidos a ensayos de carga cíclica sobre el bloque de fundación de la mesa sísmica del Laboratorio de Ingeniería sismorresistente del LEMCO. El procedimiento de montaje y fijación de los especímenes a la fundación se realizó siguiendo los pasos descritos en la memoria de Ayaviri, R. (2025).

Para la aplicación de las cargas se utilizó el actuador hidráulico MTS-244 de la mesa sísmica, comandado por un controlador MTS 407. La fuerza aplicada se registró mediante la celda de carga ubicada en el extremo del actuador, mientras que el desplazamiento fue obtenido a partir del transductor LVDT incorporado en este. Las señales fueron registradas mediante un sistema de adquisición de datos MCC, permitiendo posteriormente obtener las curvas de histéresis de los especímenes.

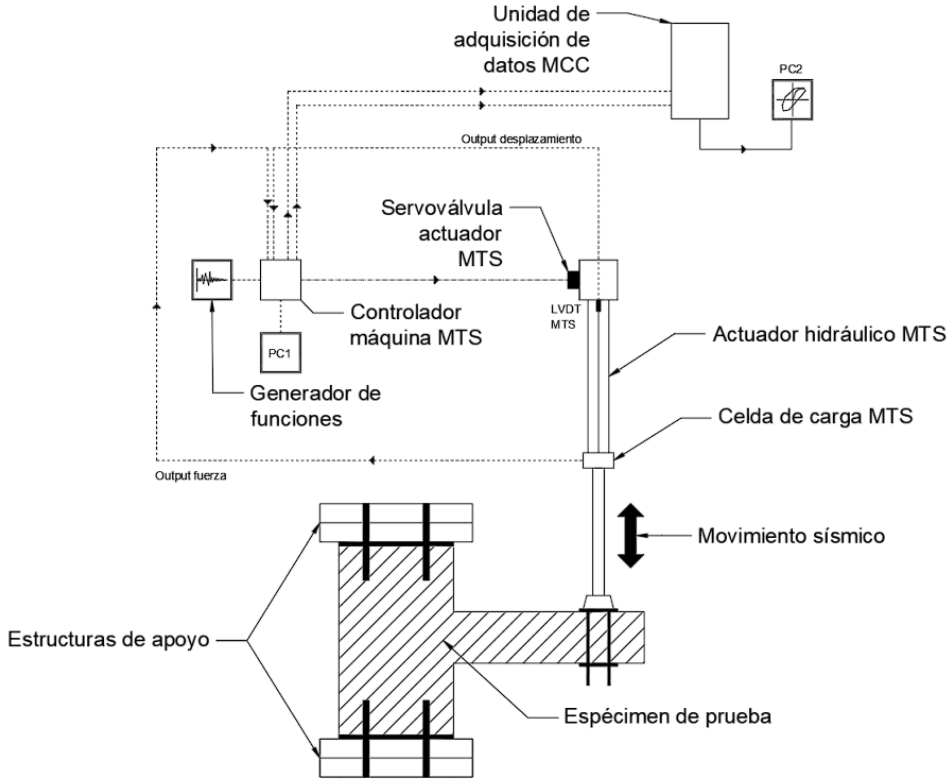


Figura 23. Diagrama unilineal del sistema de ensayo (Maldonado, J. (2023)).

La **Figura 23** esquematiza y la **Figura 24** presenta una vista general del montaje experimental utilizado durante los ensayos.

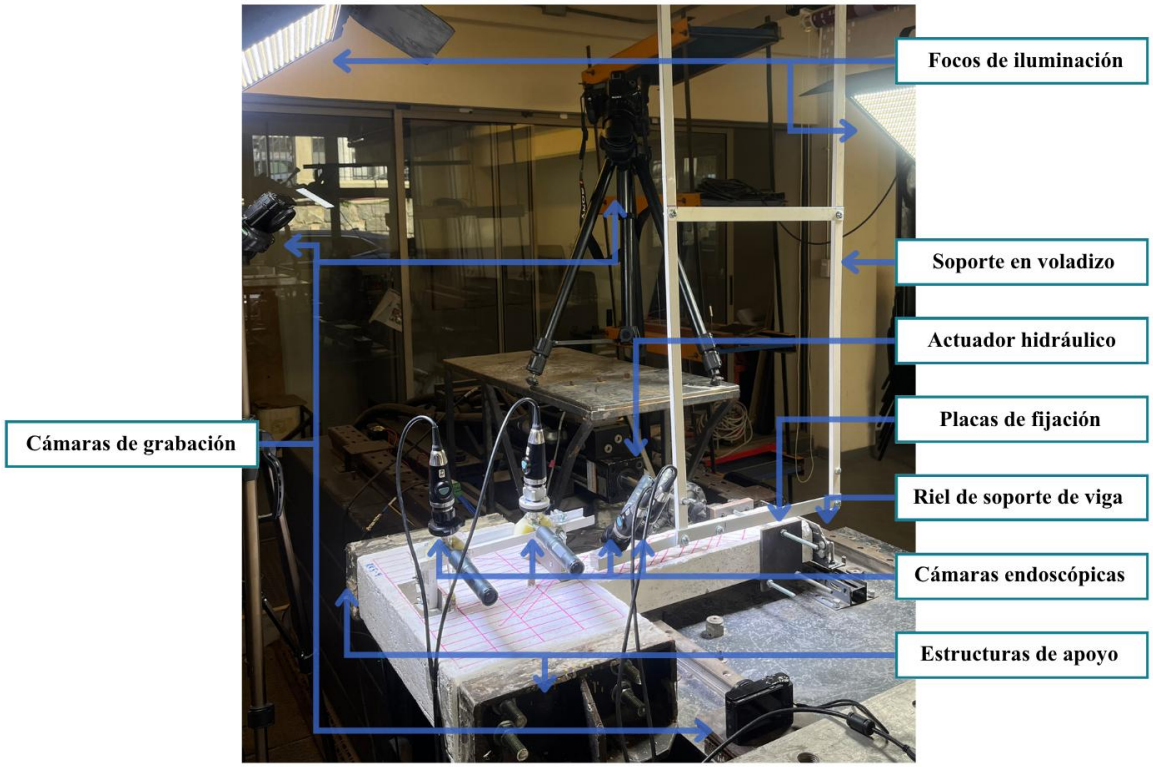


Figura 24. Montaje y disposición de los equipos de medición y registro.

Con el fin de facilitar la interpretación de las observaciones registradas de cada ensayo, se estableció una nomenclatura, ilustrada en la **Figura 25**, para identificar las cámaras endoscópicas utilizadas en todos los especímenes.

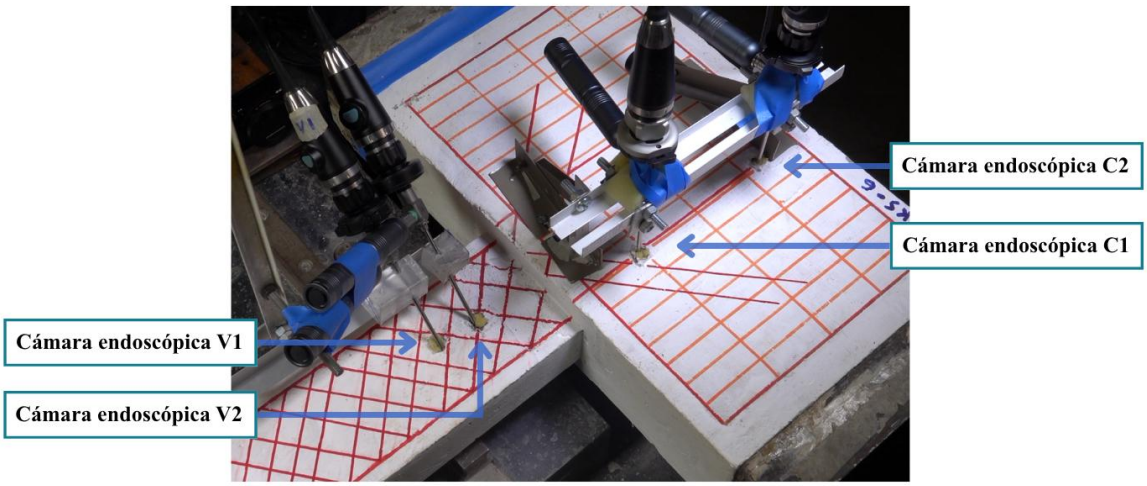


Figura 25. Identificación y ubicación de las cámaras endoscópicas en especímenes.

4.2. Programa de carga

El programa de carga utilizado durante los ensayos **(Figura 26)** fue el empleado en las memorias anteriores y se basó en lo recomendado por el comité ACI-374. Para cada nivel de desplazamiento se aplicaron cinco ciclos de carga, con excepción del nivel de desplazamiento de 25 [mm], en el cual se realizaron diez ciclos.

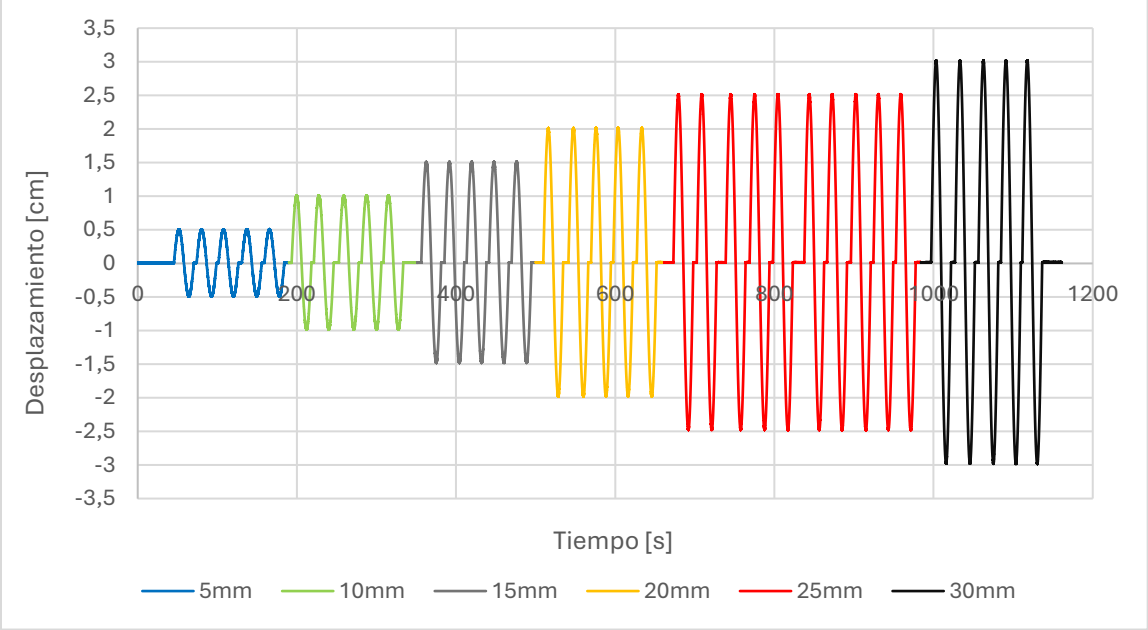


Figura 26. Historia de desplazamiento de especímenes.

El programa de carga indicado antes se aplicó a todos los especímenes excepto a dos: para los especímenes RKS-1 y RKS-3 se suprimieron las series iniciales de menor desplazamiento, concentrando los ensayos en amplitudes de 25 [mm] y superiores, con el objeto de estudiar la respuesta del elemento frente a desplazamientos de gran amplitud.

En RKS-1 se aplicó inicialmente un único ciclo de gran amplitud y a mayor velocidad, debido a un problema surgido en el equipo, pero sirve para evaluar la respuesta del espécimen frente a una solicitación de gran amplitud representativa de un comportamiento sísmico de carácter impulsivo.

En RKS-3 se aplicó un mayor número de ciclos de gran amplitud a menor velocidad, con el objetivo de comparar con RKS-1

Capítulo V:
Resultados experimentales

5.1. General

Se presentan a continuación, los resultados obtenidos para cada espécimen ensayado, destacando las curvas de histéresis obtenidas y fotografías del aspecto de los especímenes en su último ciclo de cada serie de desplazamiento.

Se menciona también, el registro observado por las cámaras endoscópicas cuyo análisis en detalle se encuentra en la memoria de Loyola, K. (2026).

5.2. Espécimen RKS-1

Hormigón armado de resistencia 23,83 [MPa] con armadura de refuerzo ortogonal y sección transversal de viga referencial.

5.2.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-1

El desplazamiento inicial de este espécimen se vio afectado por un comando anticipado por falla de un mouse cuando el espécimen aún no estaba correctamente fijado en las estructuras de apoyo. La **Figura 27** contiene los datos corregidos por giro de este incidente.

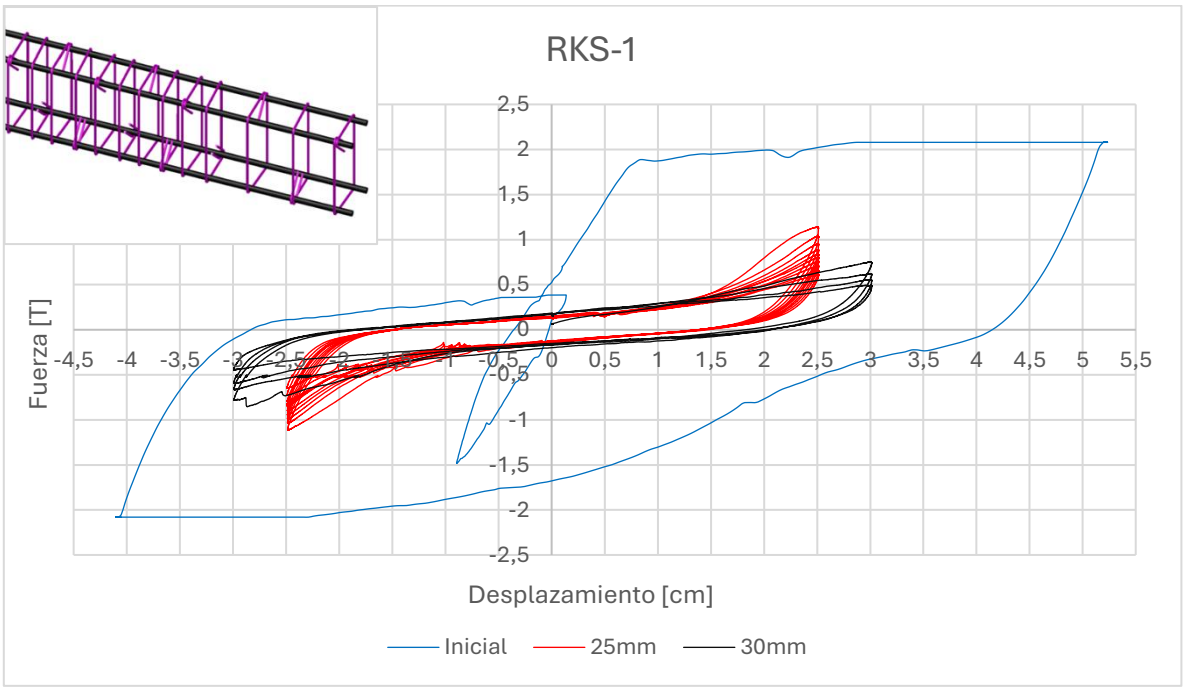


Figura 27. Curvas de histéresis RKS-1.

5.2.2. Registro fotográfico espécimen RKS-1

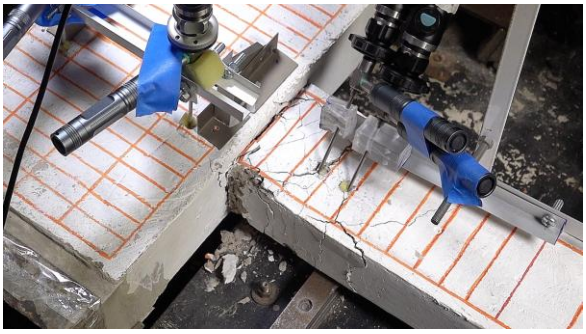


Figura 28. Ciclo inicial RKS-1.



Figura 29. Vista lateral ciclo inicial RKS-1.

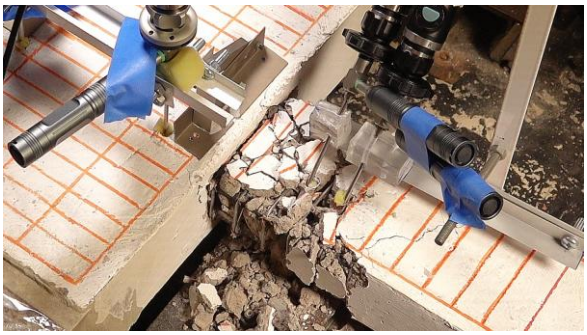


Figura 30. Cuarto ciclo 30mm RKS-1.



Figura 31. Vista lateral post-ensayo RKS-1.

5.2.3. Comentarios espécimen RKS-1

Tabla 5. Eventos ensayo espécimen RKS-1.

Desplazamiento	Eventos
Inicial	• La viga queda deteriorada, aguantando 2,08 [tonf] con un desplazamiento grande.
25 [mm]	• La viga está bastante deteriorada en su primer ciclo, aun así, logra recuperarse y obtener una resistencia de 1,14 [tonf].
30 [mm]	• Ensayo finalizado en el cuarto ciclo de 30mm por riesgo de dañar las cámaras endoscópicas a causa del enorme desprendimiento del hormigón.

5.3. Espécimen RKS-2

Hormigón armado de resistencia 17,55 [MPa] con armadura de refuerzo ortogonal y sección transversal de viga angostada.

5.3.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-2

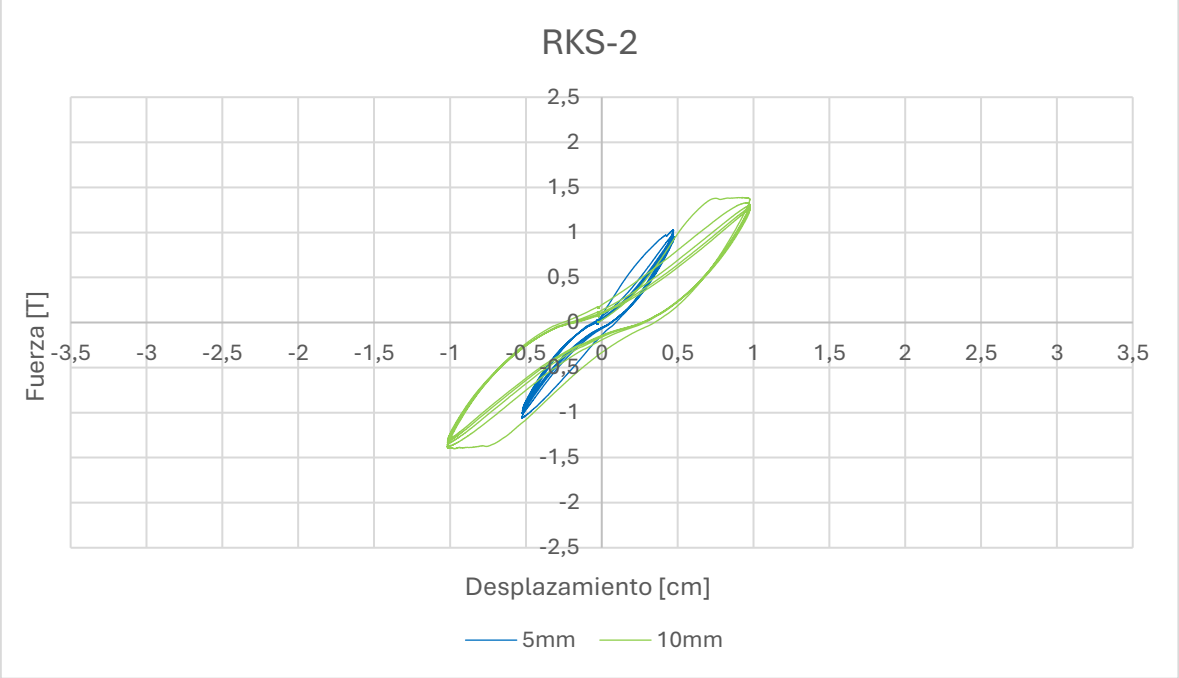


Figura 32. Curva de histéresis parcial 10mm RKS-2.

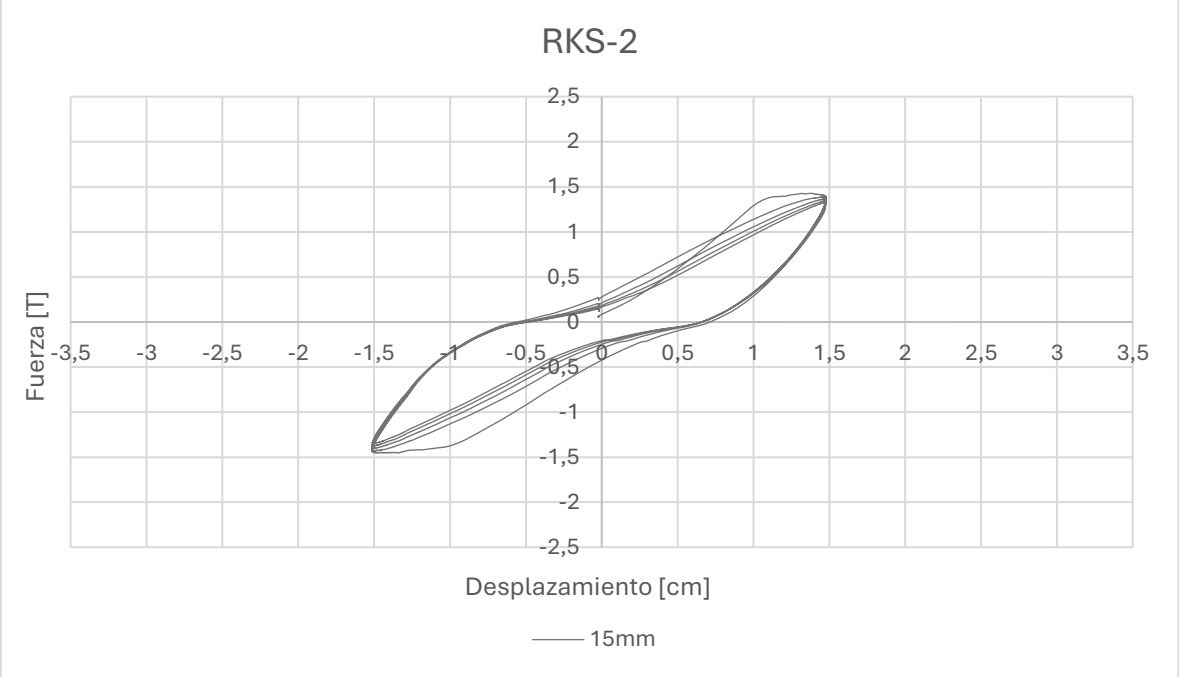


Figura 33. Curva de histéresis parcial 15mm RKS-2.

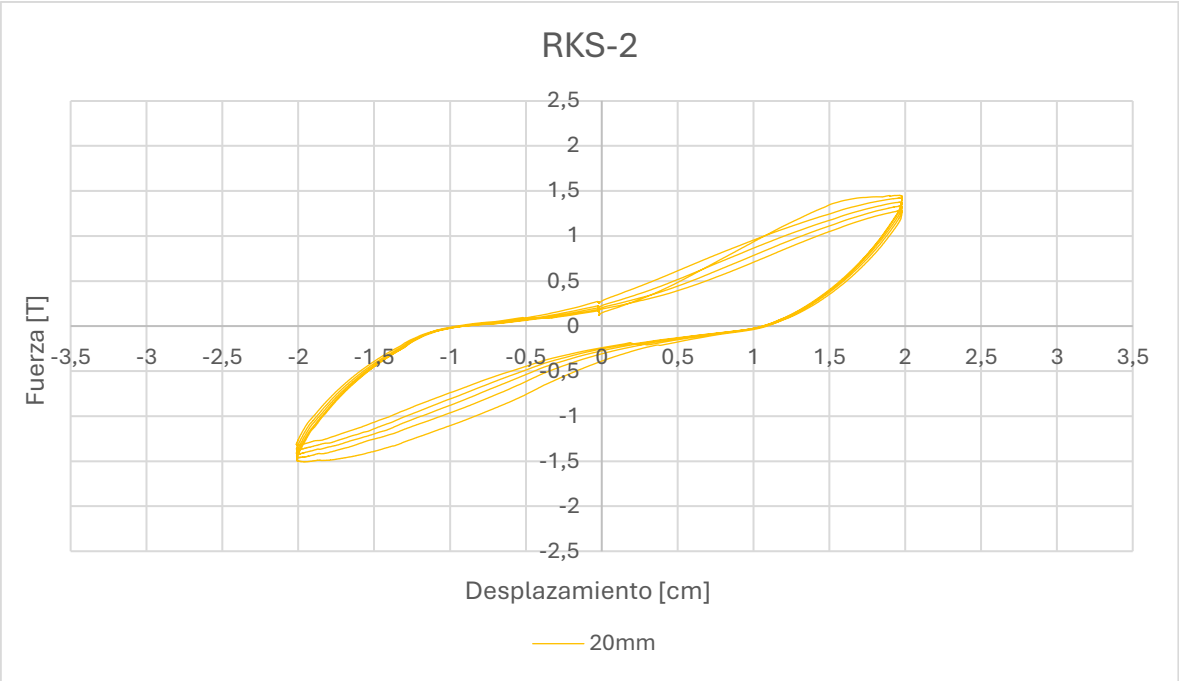


Figura 34. Curva de histéresis parcial 20mm RKS-2.

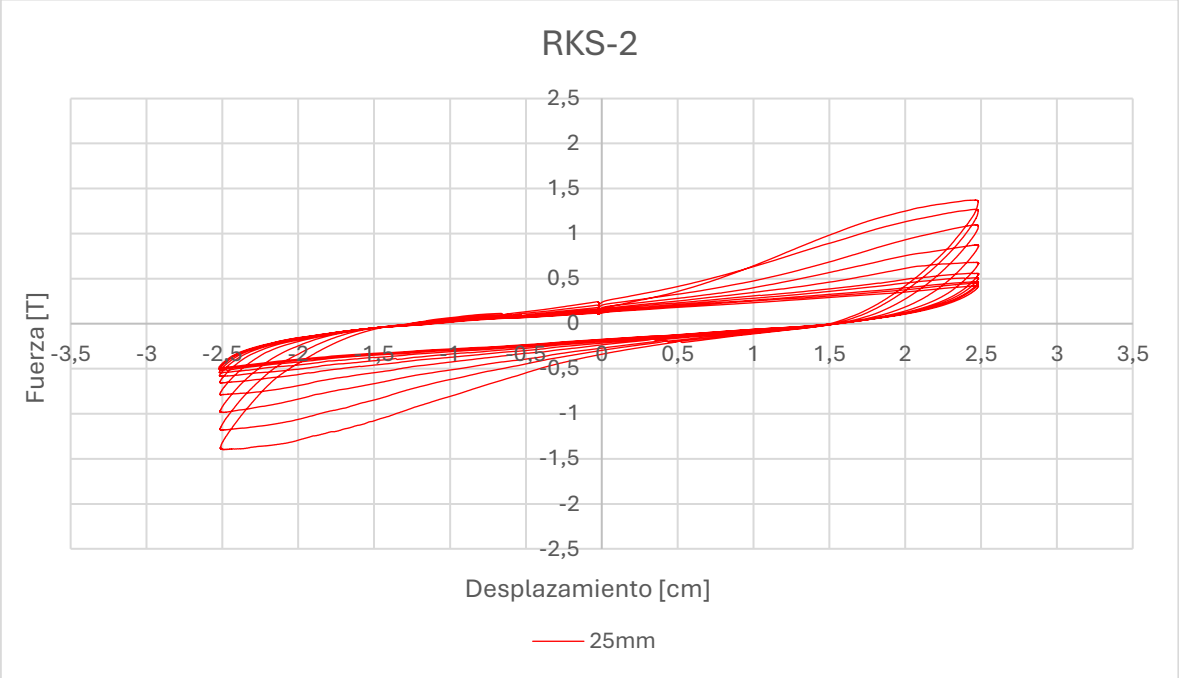


Figura 35. Curva de histéresis parcial 25mm RKS-2.

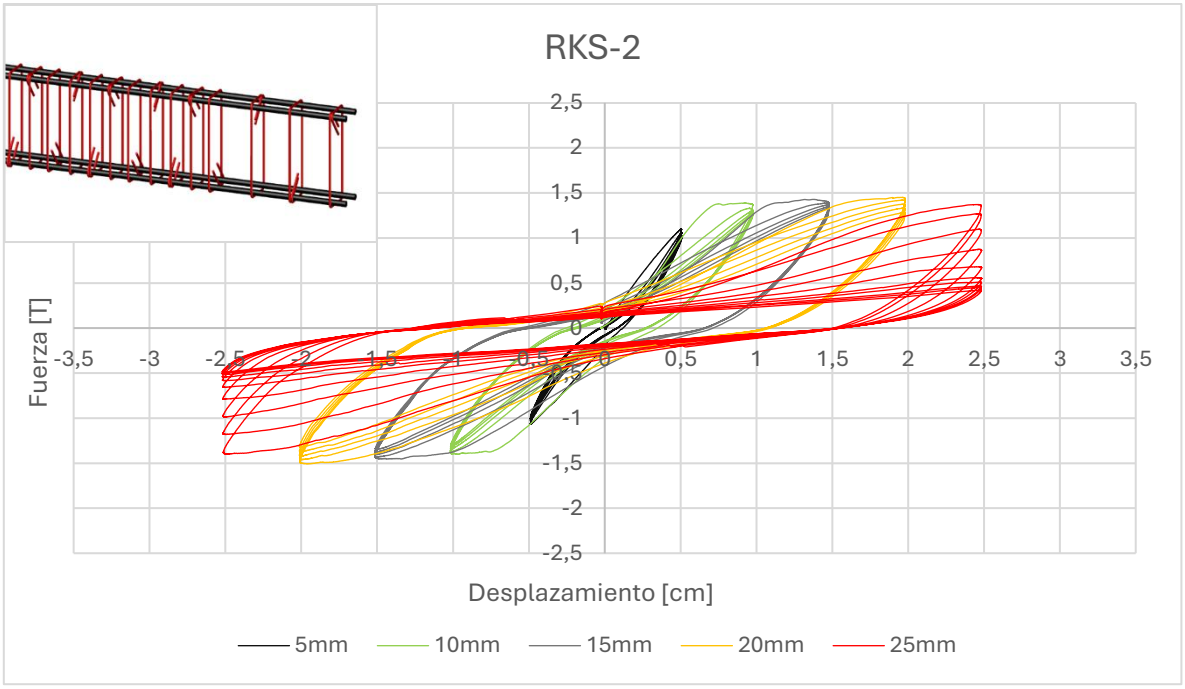


Figura 36. Curvas de histéresis RKS-2.

5.3.2. Registro fotográfico espécimen RKS-2

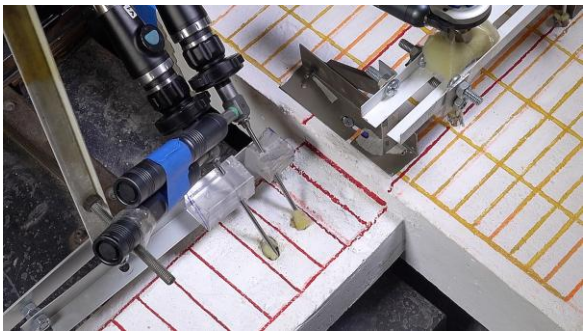


Figura 37. Quinto ciclo 5mm RKS-2.

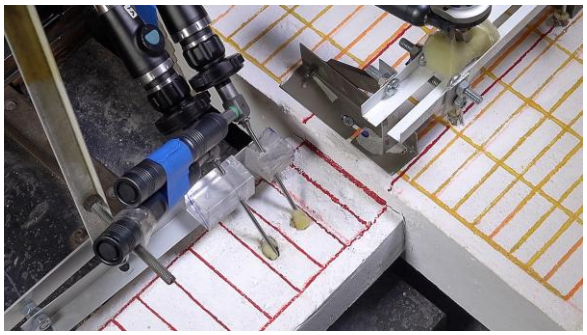


Figura 38. Quinto ciclo 10mm RKS-2.

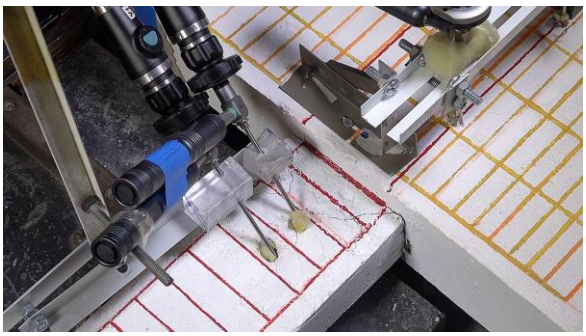


Figura 39. Quinto ciclo 15mm RKS-2.

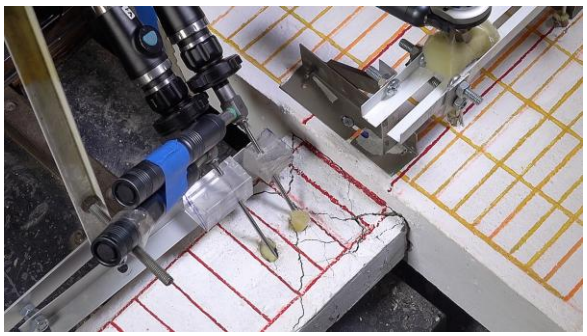


Figura 40. Quinto ciclo 20mm RKS-2.

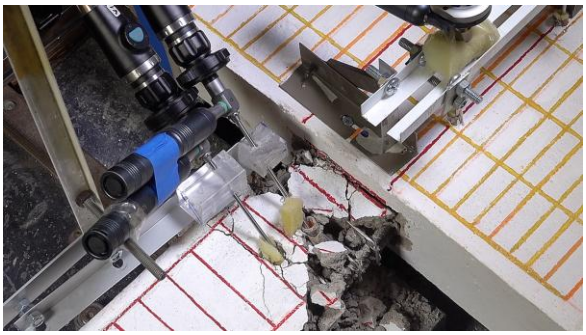


Figura 41. Décimo ciclo 25mm RKS-2.

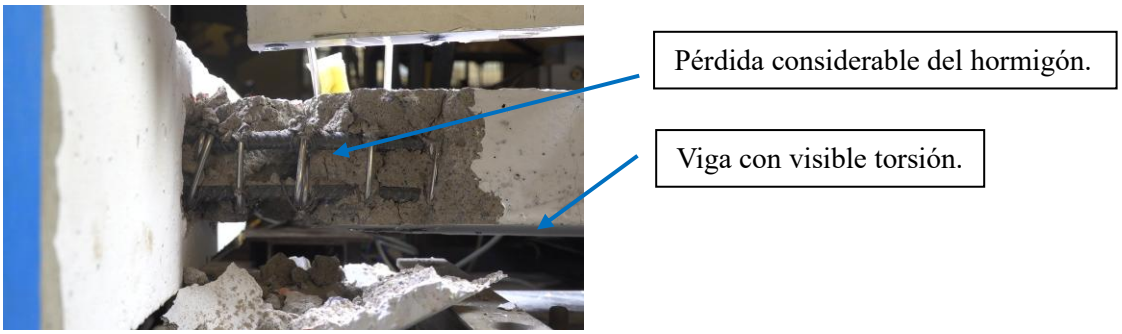


Figura 42. Post-ensayo vista lateral RKS-2.

5.3.3. Comentarios espécimen RKS-2

Tabla 6. Eventos ensayo espécimen RKS-2.

Desplazamiento [mm]	Eventos
5	• En el primer ciclo se observa un leve agrietamiento en la zona de arranque. • En el cuarto ciclo aparecen grietas de corte en la viga. • A inicios del quinto ciclo se observa un leve deslizamiento de la barra longitudinal registrada por la cámara C1.
10	• En el segundo ciclo comienza a observarse un leve deslizamiento en C2.
15	• En el cuarto ciclo comienza un leve desprendimiento del hormigón y el agrietamiento en la zona de arranque se hace más evidente.
20	• En el segundo ciclo el agrietamiento en la zona de arranque se hace notorio. • En el cuarto ciclo aumenta considerablemente el agrietamiento de la viga.
25	• En el segundo ciclo comienza el desprendimiento del hormigón y la pérdida del recubrimiento. • El ensayo finaliza en el décimo ciclo debido a la pérdida considerable del recubrimiento y a la torsión presentada por la viga.

5.4. Espécimen RKS-3

Hormigón armado de resistencia 17,55 [MPa] con armadura de refuerzo ortogonal y sección transversal de viga angostada.

5.4.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-3

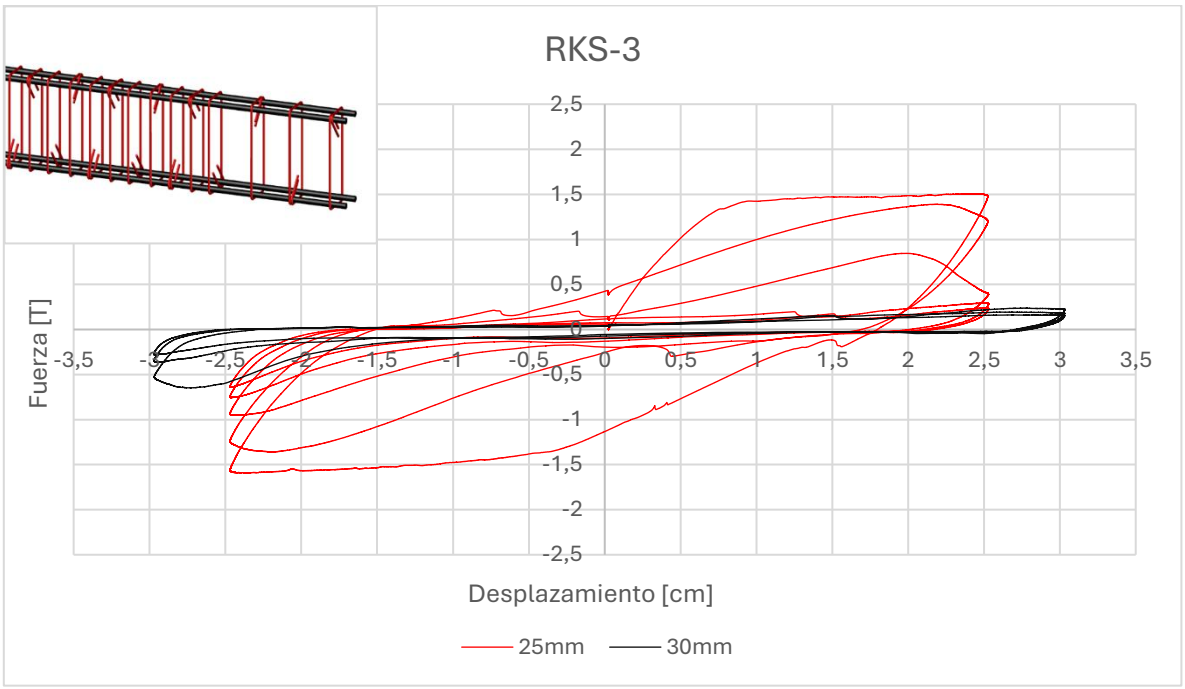


Figura 43. Curvas de histéresis RKS-3.

5.4.2. Registro fotográfico espécimen RKS-3

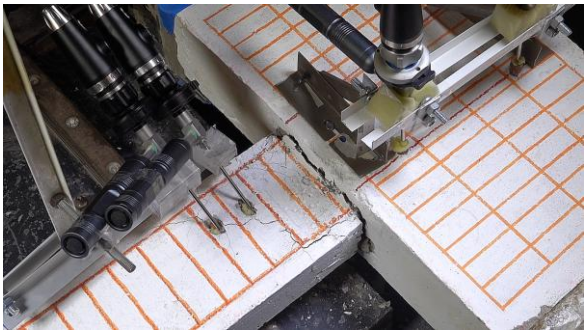


Figura 44. Quinto ciclo 25mm RKS-3.

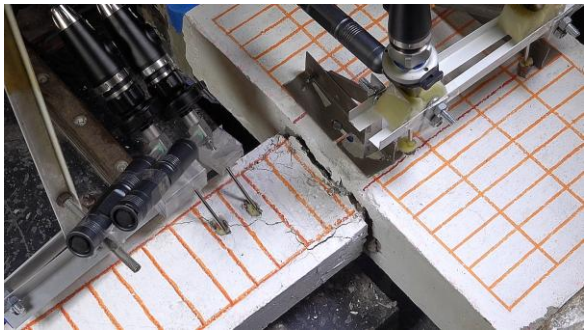


Figura 45. Tercer ciclo 30mm RKS-3.

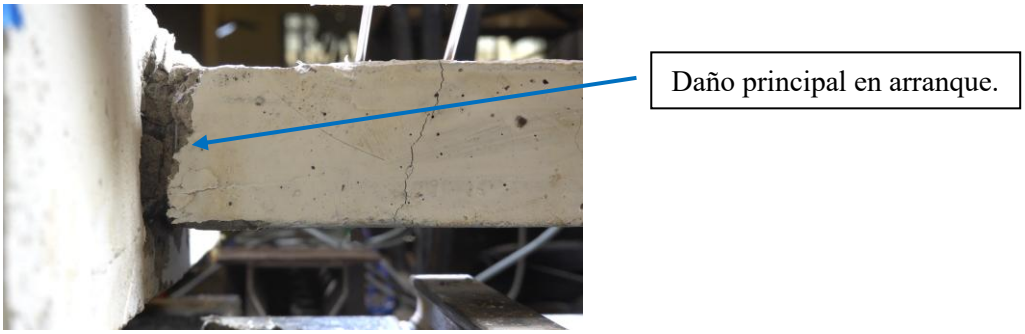


Figura 46. Vista lateral post-ensayo RKS-3.

5.4.3. Comentarios espécimen RKS-3

Tabla 7. Eventos ensayo espécimen RKS-3.

Desplazamiento [mm]	Eventos
25	• En el primer ciclo se observan grietas de corte notorias en la viga y deslizamiento de la barra longitudinal registrado por ambas cámaras endoscópicas de la columna. • En el segundo ciclo, las grietas de corte se hacen más visibles. • En el cuarto ciclo aumenta el agrietamiento en la zona de arranque y las grietas de corte en la viga. • En el quinto ciclo el deslizamiento de la barra longitudinal en la columna es considerable y comienza el desprendimiento del hormigón.
30	• En el primer ciclo aumenta considerablemente el agrietamiento por corte y se observa un deterioro importante del hormigón. • Ensayo finalizado en el tercer ciclo por excesivo daño en el arranque.

5.5. Espécimen RKS-4

Hormigón armado de resistencia 17,55 [MPa] con armadura de refuerzo inclinada y sección transversal de viga referencial.

5.5.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-4

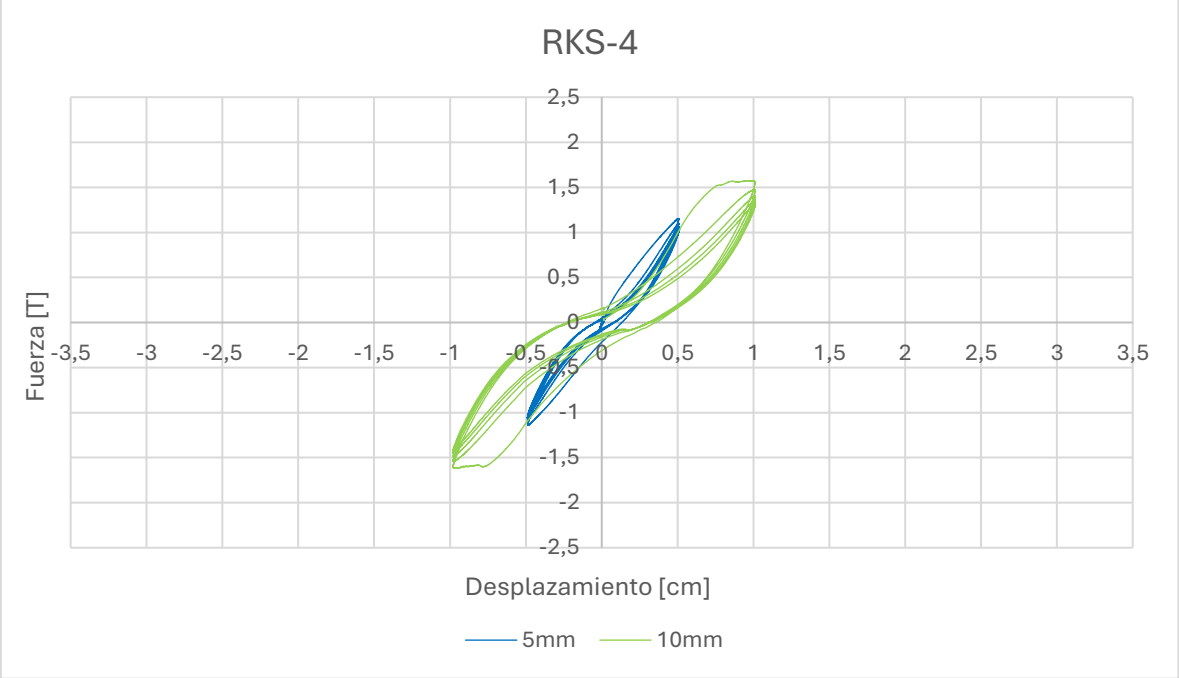


Figura 47. Curvas de histéresis parciales 5 y 10mm RKS-4.

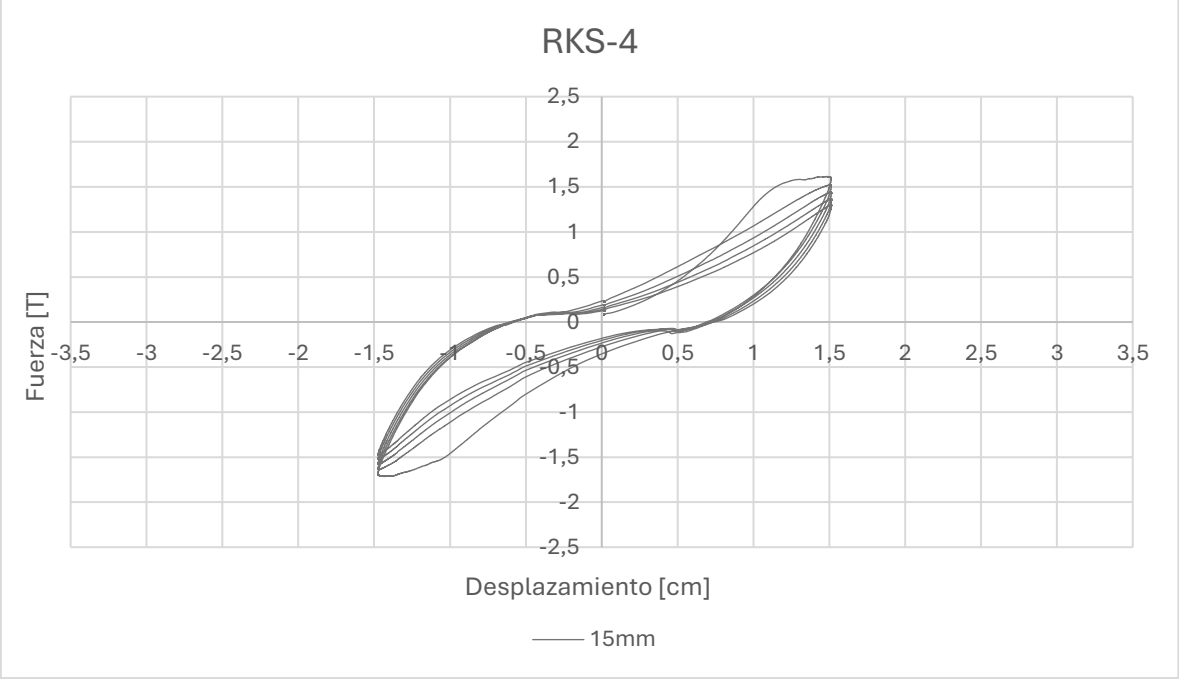


Figura 48. Curva de histéresis parcial 15mm RKS-4.

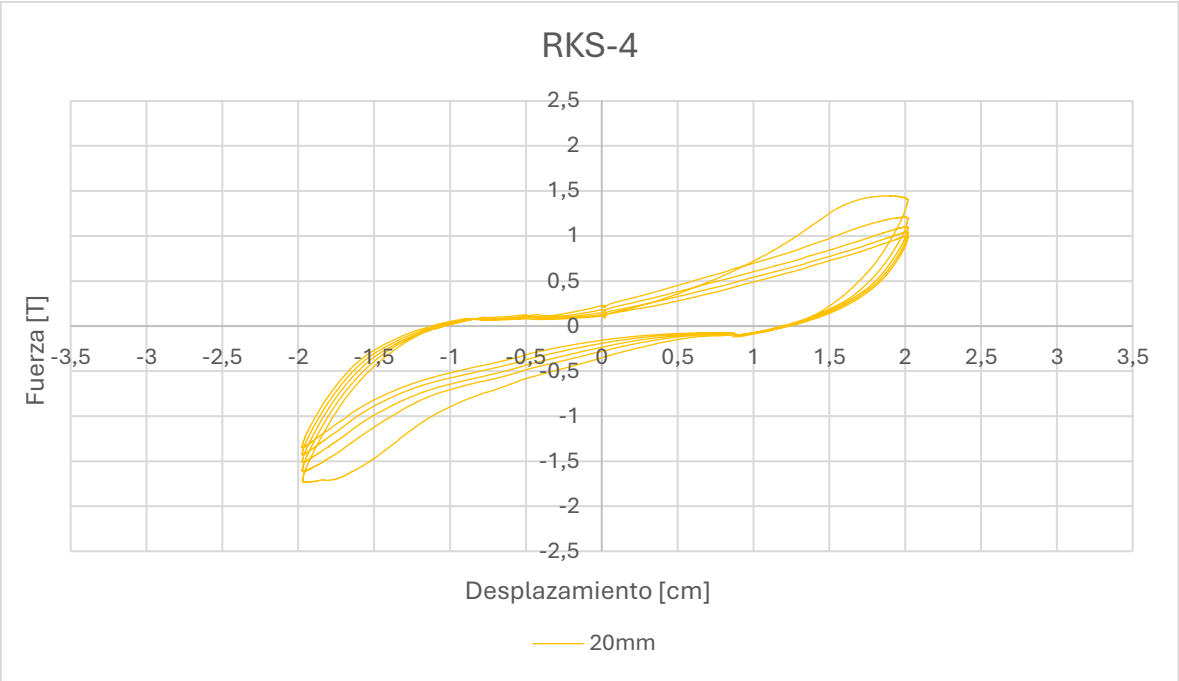


Figura 49. Curva de histéresis parcial 20mm RKS-4.

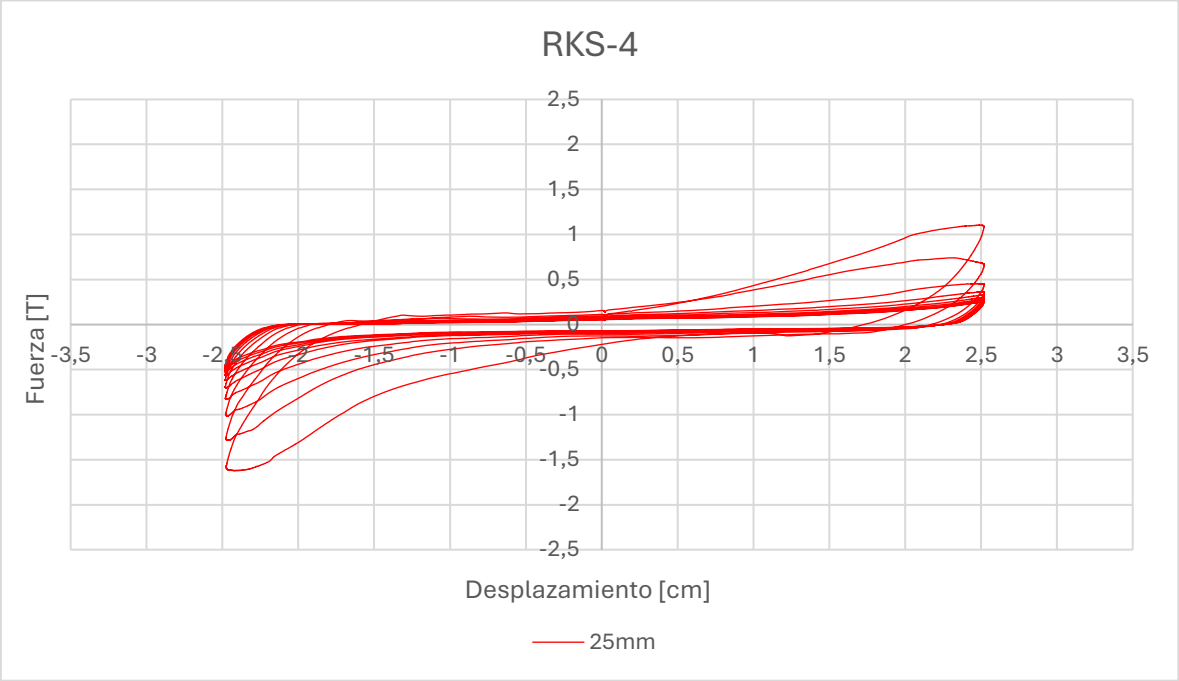


Figura 50. Curva de histéresis parcial 25mm RKS-4.

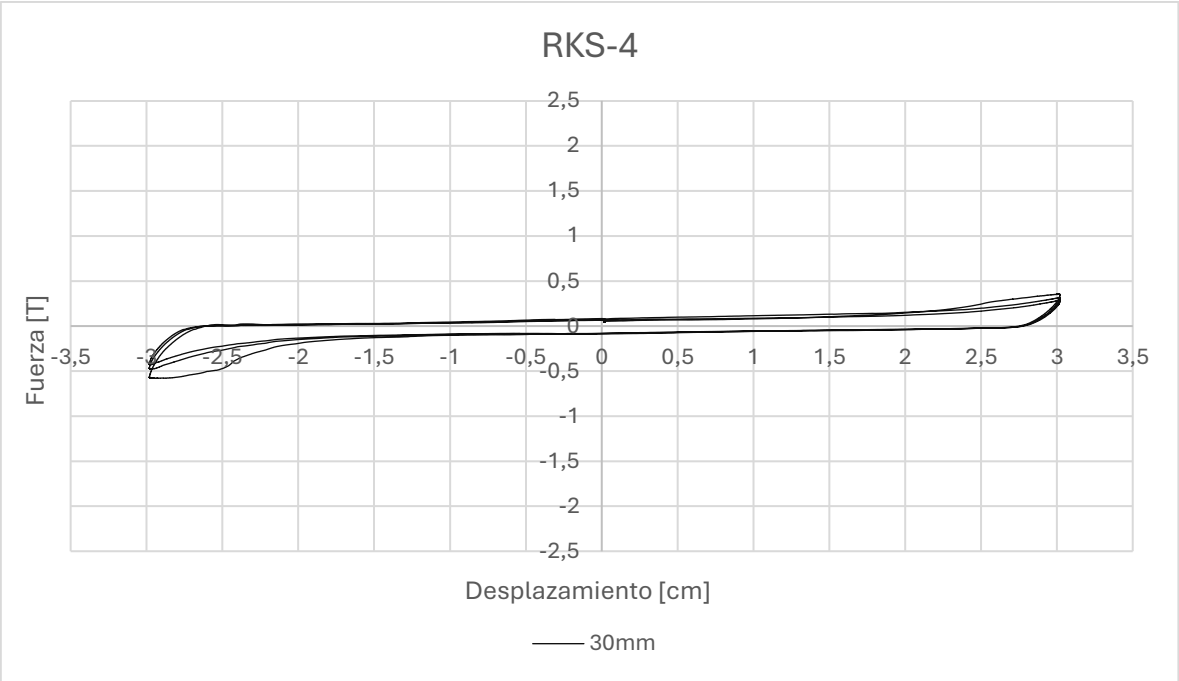


Figura 51. Curva de histéresis parcial 30mm RKS-4.

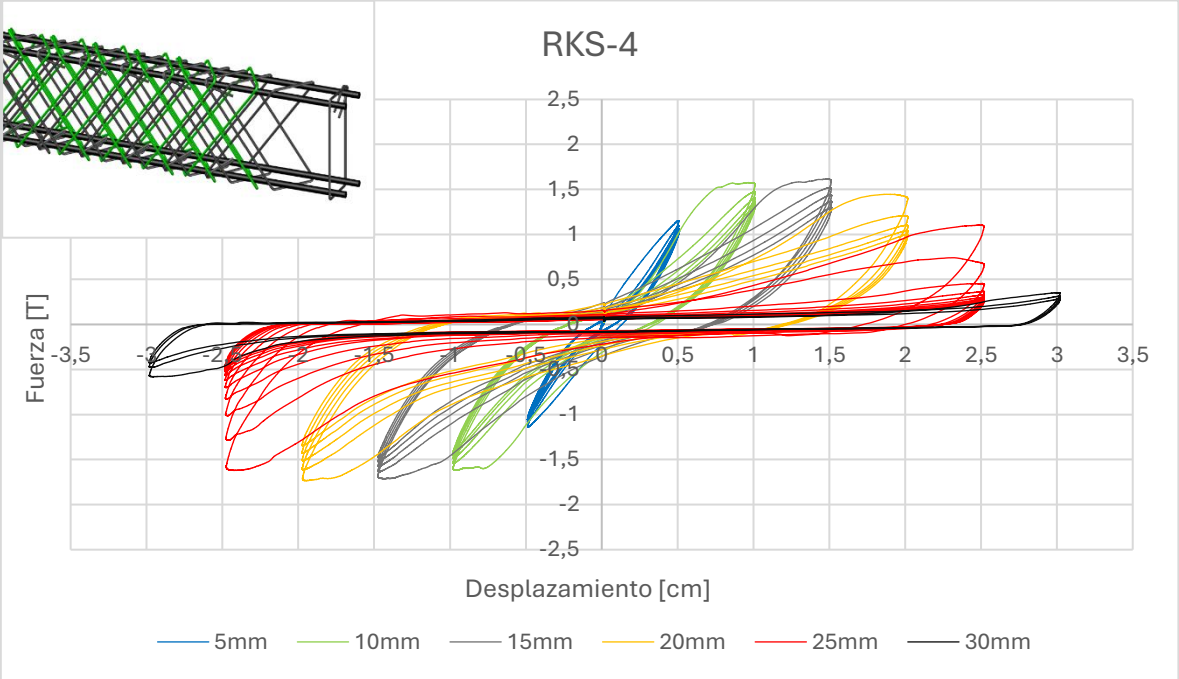


Figura 52. Curvas de histéresis RKS-4.

5.5.2. Registro fotográfico espécimen RKS-4

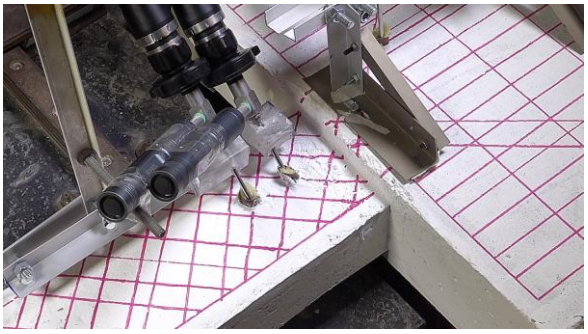


Figura 53. Quinto ciclo 5mm RKS-4.

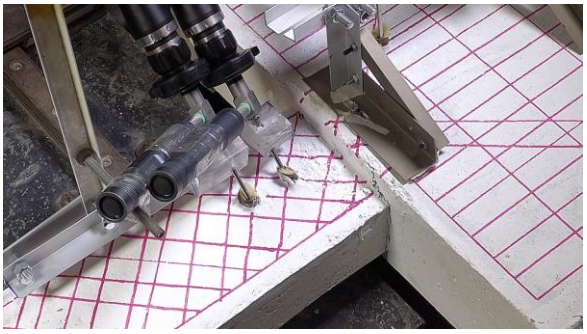


Figura 54. Quinto ciclo 10mm RKS-4.

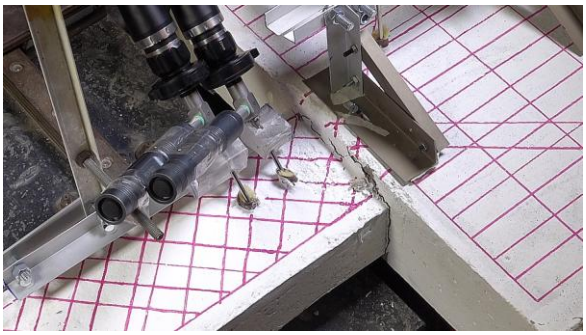


Figura 55. Quinto ciclo 15mm RKS-4.

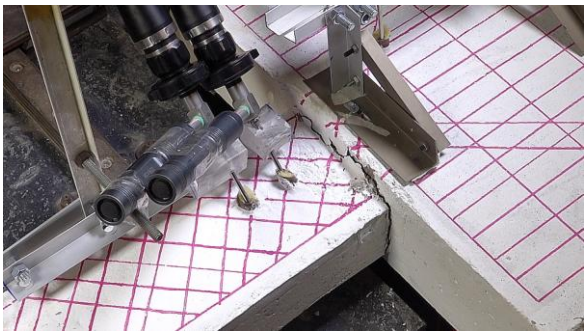


Figura 56. Quinto ciclo 20mm RKS-4.



Figura 57. Décimo ciclo 25mm RKS-4.



Figura 58. Tercer ciclo 30mm RKS-4.

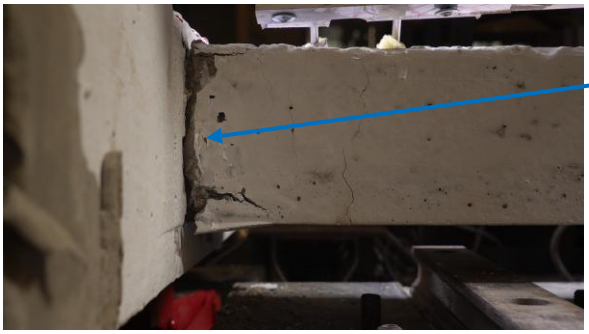


Figura 59. Vista lateral post-ensayo RKS-4.

5.5.3. Comentarios espécimen RKS-4

Tabla 8. Eventos ensayo espécimen RKS-4.

Desplazamiento [mm]	Eventos
5	• En el quinto ciclo comienza a observarse agrietamiento en el arranque acompañado de pequeñas grietas de flexión en la viga.
10	• En el primer ciclo se observa un leve deslizamiento de la barra longitudinal registrada por la cámara C1. • En el quinto ciclo, las cámaras C1 y C2 registran un pequeño deslizamiento de la barra longitudinal.
15	• En el tercer ciclo aumenta el agrietamiento en la zona de arranque. • En el quinto ciclo el deslizamiento de la barra longitudinal en la columna es aún más notorio.
20	• En el cuarto ciclo aumenta el agrietamiento en la zona de arranque y las grietas de flexión en la viga.
25	• En el séptimo ciclo comienza un leve desprendimiento del hormigón.
30	• Ensayo finalizado en el tercer ciclo por falla en el anclaje, sin fractura del refuerzo longitudinal.

5.6. Espécimen RKS-5

Hormigón armado de resistencia 23,83 [MPa] con armadura de refuerzo inclinada y sección transversal de viga angostada.

5.6.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-5

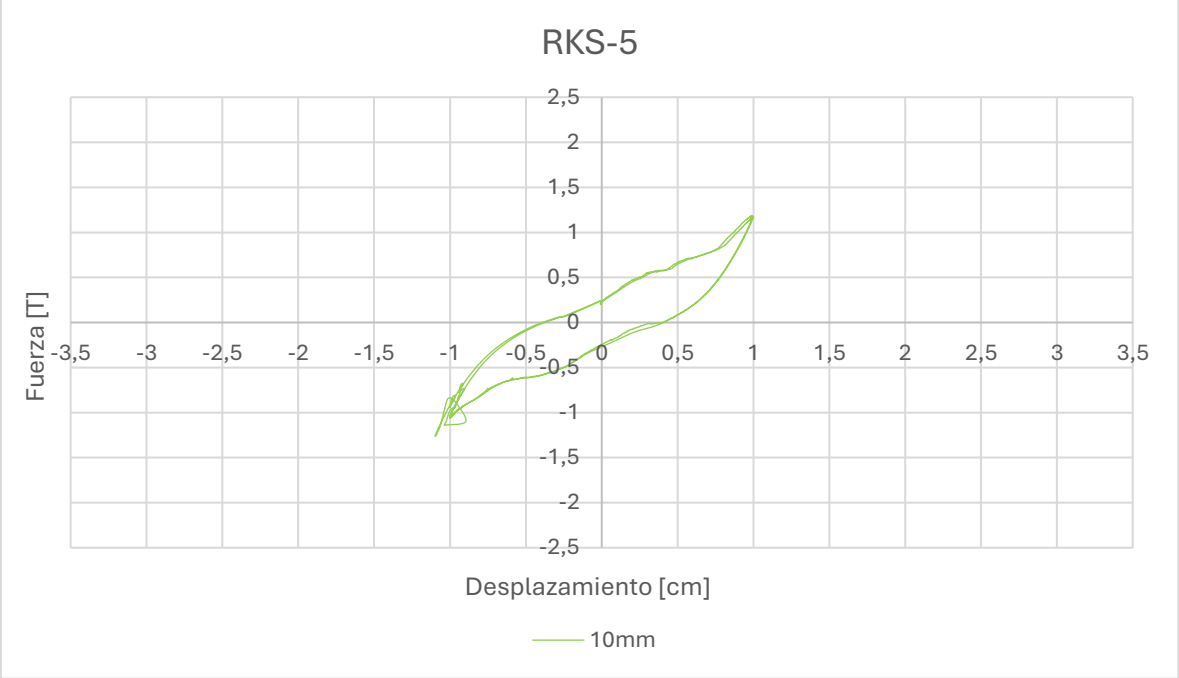


Figura 60. Curva de histéresis parcial 10mm RKS-5.

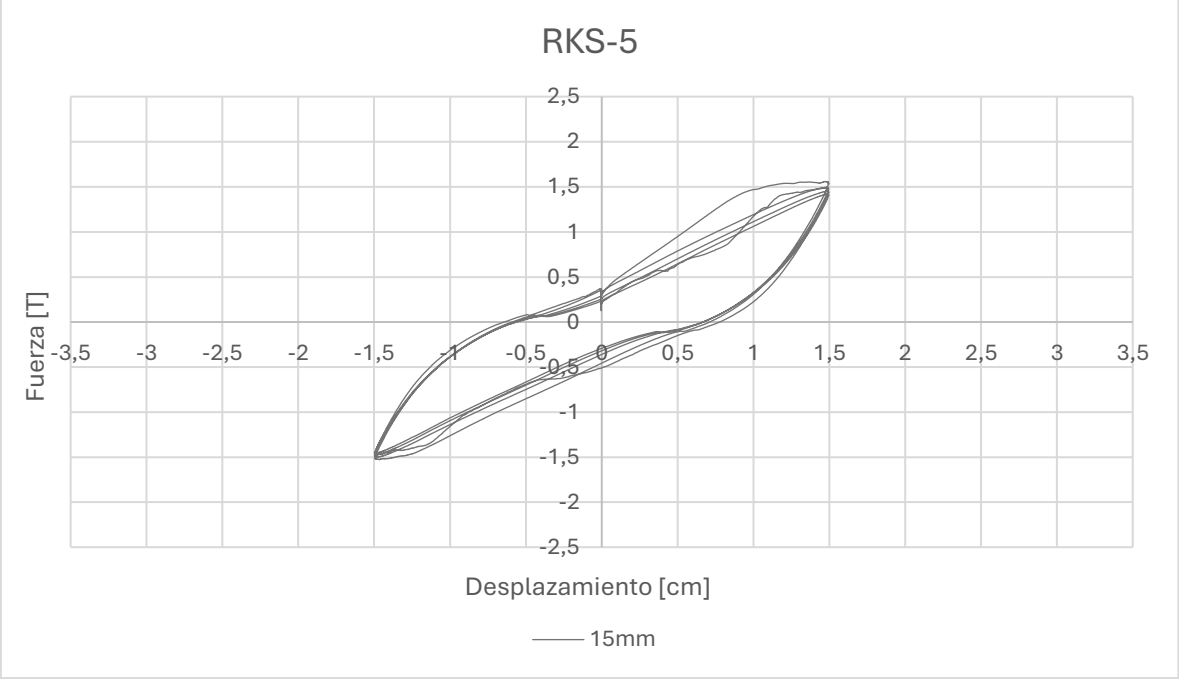


Figura 61. Curva de histéresis parcial 15mm RKS-5.

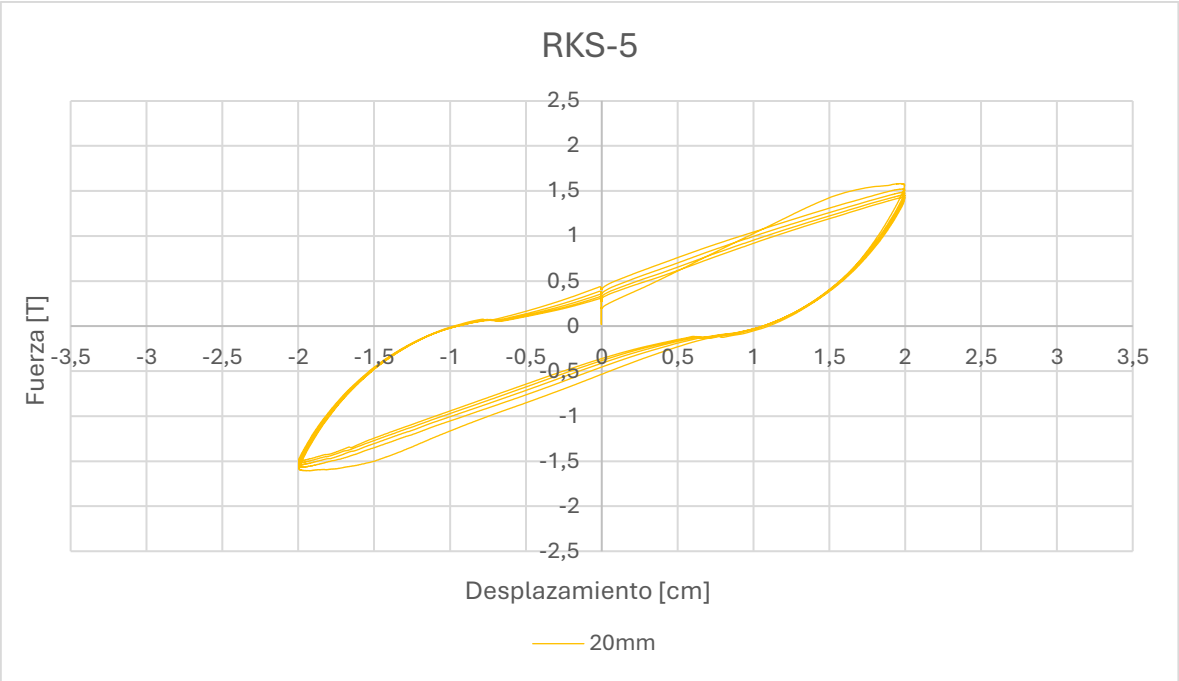


Figura 62. Curva de histéresis parcial 20mm RKS-5.

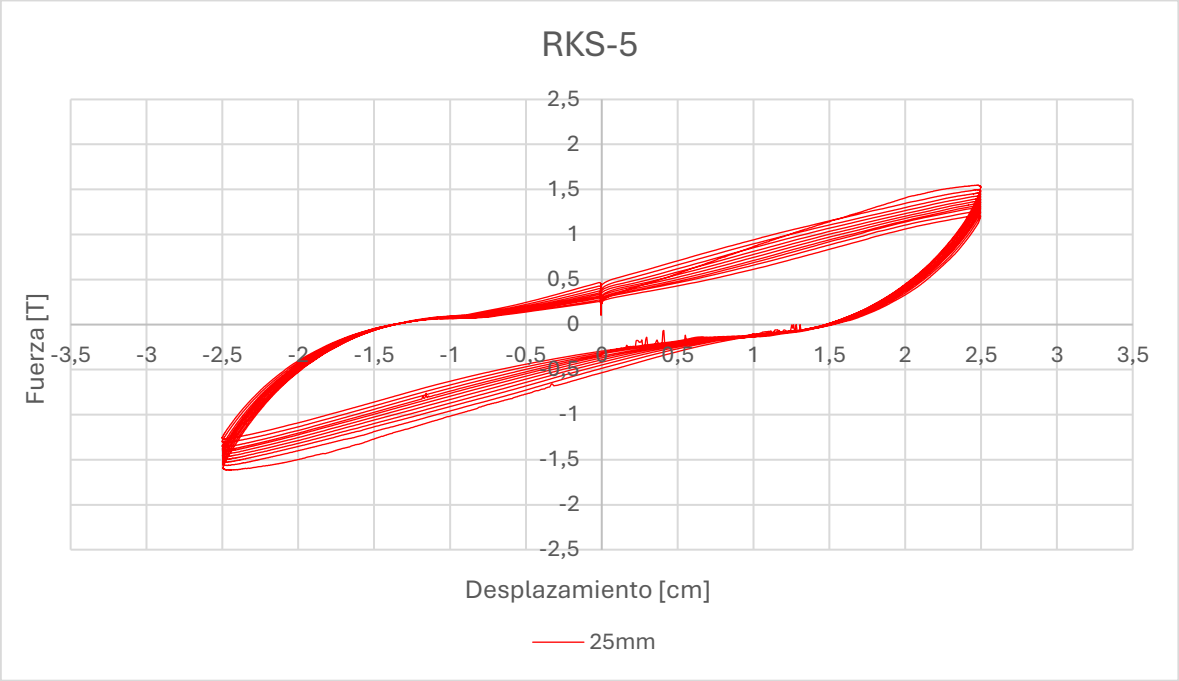


Figura 63. Curva de histéresis parcial 25mm RKS-5.

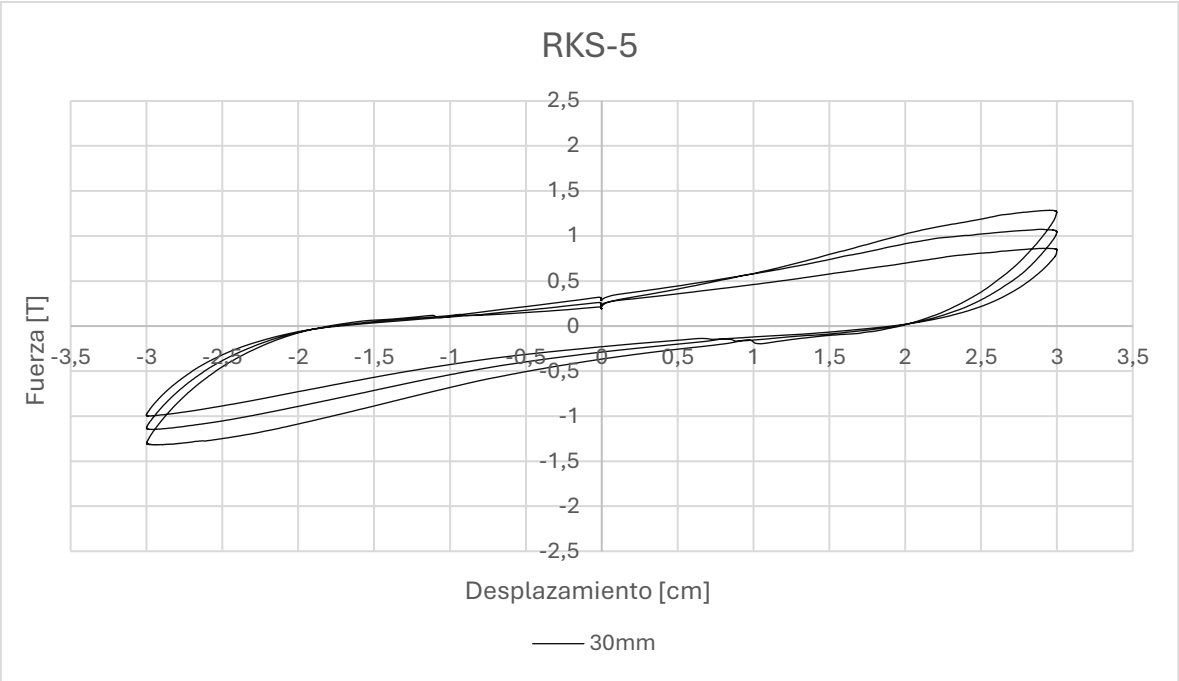


Figura 64. Curva de histéresis parcial 30mm RKS-5.

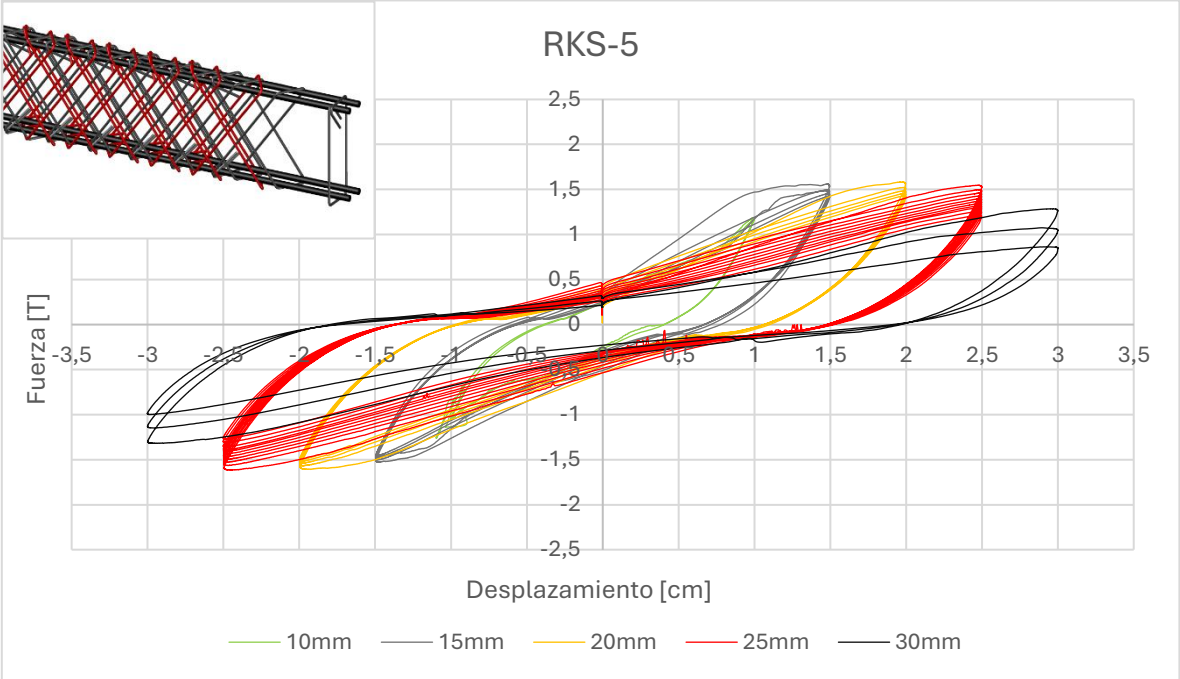


Figura 65. Curvas de histéresis RKS-5.

5.6.2. Registro fotográfico espécimen RKS-5

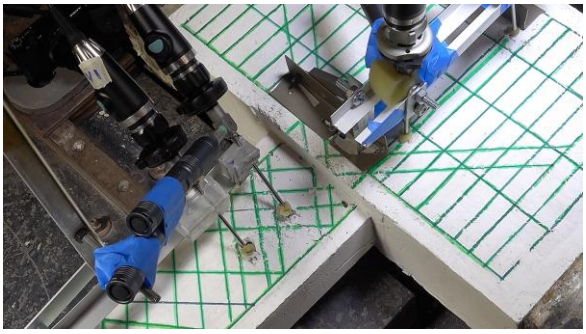


Figura 66. Quinto ciclo 5mm RKS-5.

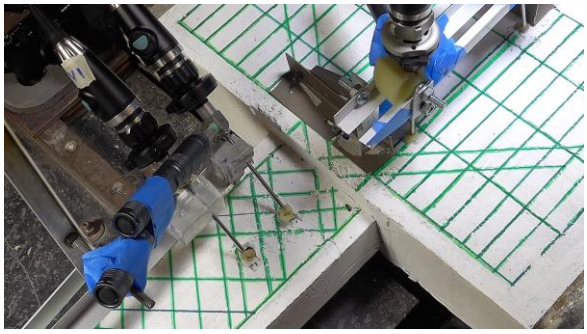


Figura 67. Quinto ciclo 10mm RKS-5.

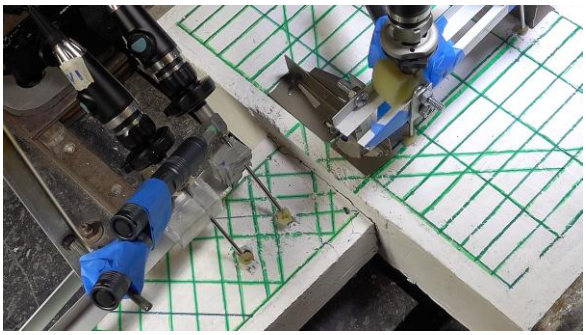


Figura 68. Quinto ciclo 15mm RKS-5.

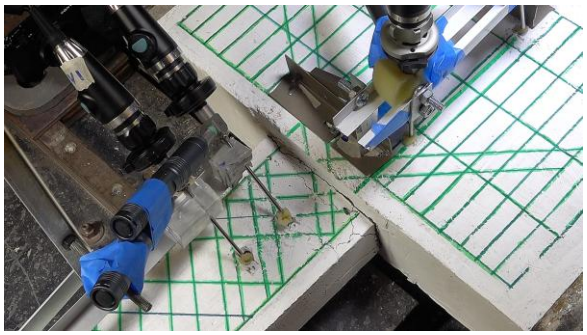


Figura 69. Quinto ciclo 20mm RKS-5.

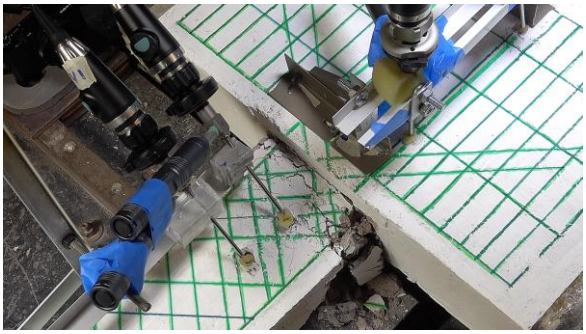


Figura 70. Décimo ciclo 25mm RKS-5.

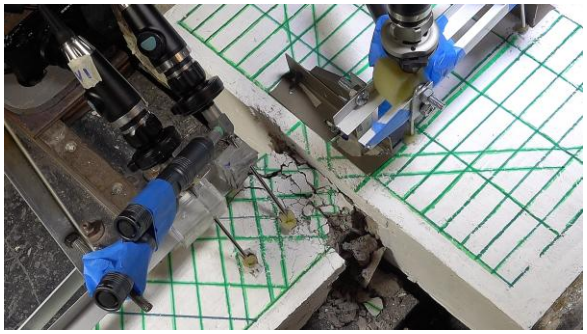


Figura 71. Tercer ciclo 30mm RKS-5.

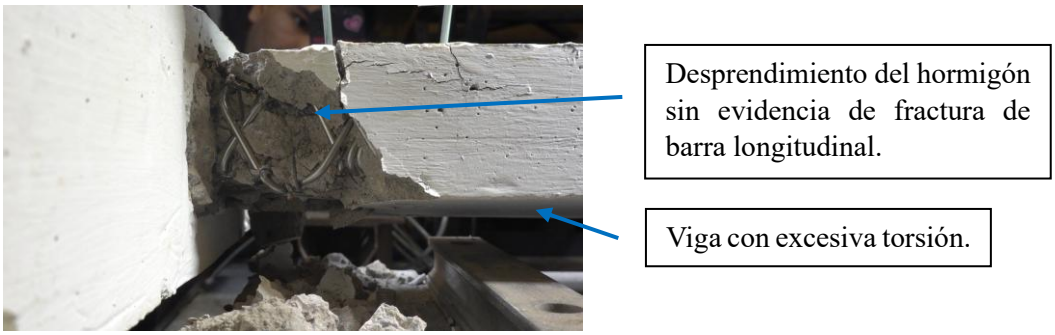


Figura 72. Vista lateral post-ensayo RKS-5.

5.6.3. Comentarios espécimen RKS-5

Debido a problemas asociados a la lectura de la unidad de adquisición de datos MCC, los registros iniciales de 5 [mm] y 10 [mm] fueron descartados, conservándose únicamente los últimos dos ciclos de 10 [mm] que evidencian la falla producida. Véase **Figura 60**.

Tabla 9. Eventos ensayo espécimen RKS-5.

Desplazamiento [mm]	**Eventos**
5	• En el quinto ciclo se observa un leve agrietamiento en la zona de arranque y un pequeño deslizamiento de la barra longitudinal registrado por ambas cámaras endoscópicas de la columna.
10	• En el quinto ciclo se observan pequeñas grietas de flexión en la viga.
15	• En el segundo ciclo aparecen grietas en la viga próximas al arranque. • En el quinto ciclo aumenta el daño en la zona de arranque, manteniéndose pequeñas grietas de flexión en la viga.
20	• En el cuarto ciclo comienza a observarse deterioro del hormigón y un deslizamiento notorio de la barra longitudinal en la columna.
25	• En el tercer ciclo aumenta el agrietamiento de la viga. • En el sexto ciclo comienza a observarse torsión de la viga. • En el octavo ciclo comienza el desprendimiento del hormigón. • En el décimo ciclo se observa un deslizamiento considerable de la barra longitudinal en la columna.
30	• En el primer ciclo aumenta la torsión de la viga y el desprendimiento del hormigón. • El ensayo finaliza en el tercer ciclo debido a la torsión excesiva presentada. • No se presenta fractura del refuerzo longitudinal.

5.7. Espécimen RKS-6

Hormigón armado de resistencia 23,83 [MPa] con armadura de refuerzo inclinada y sección transversal de viga angostada.

5.7.1. Curvas de histéresis espécimen RKS-6

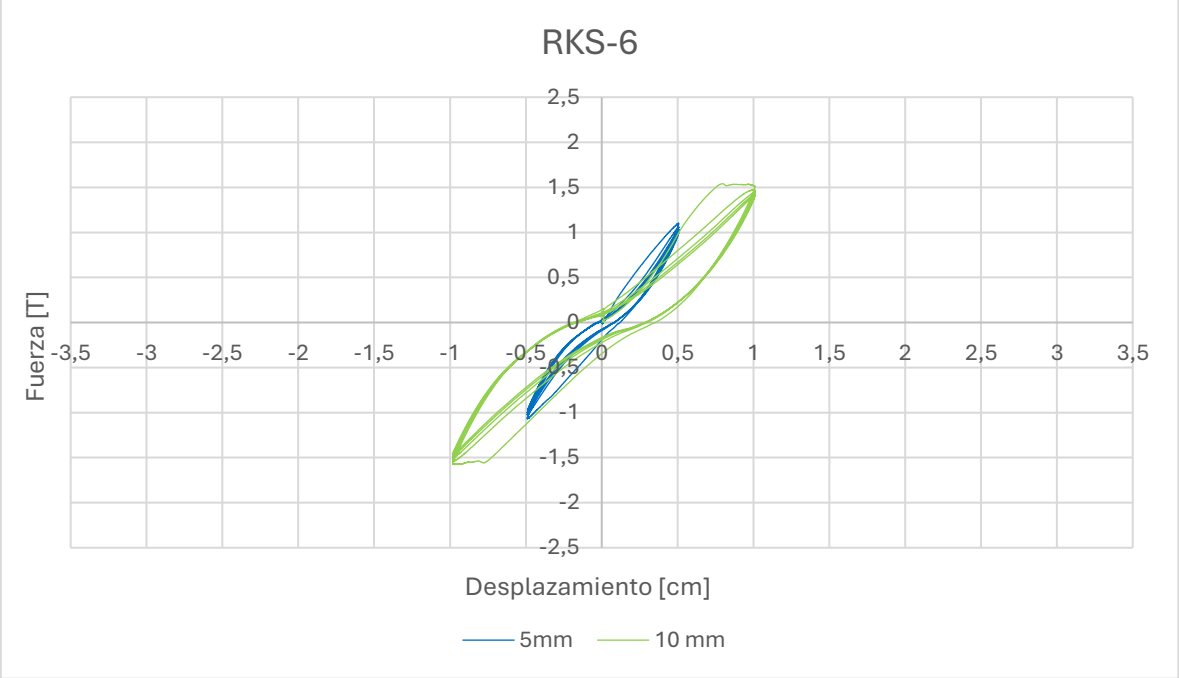


Figura 73. Curvas de histéresis parciales 5 y 10mm RKS-6.

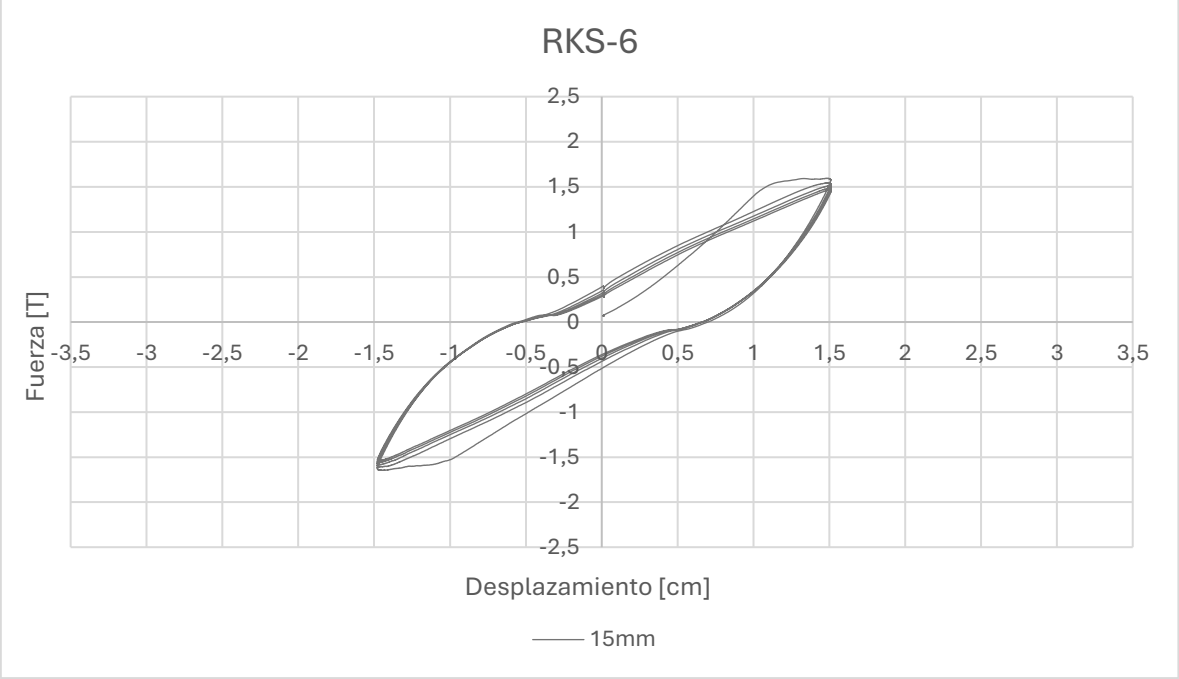


Figura 74. Curva de histéresis parcial 15mm RKS-6.

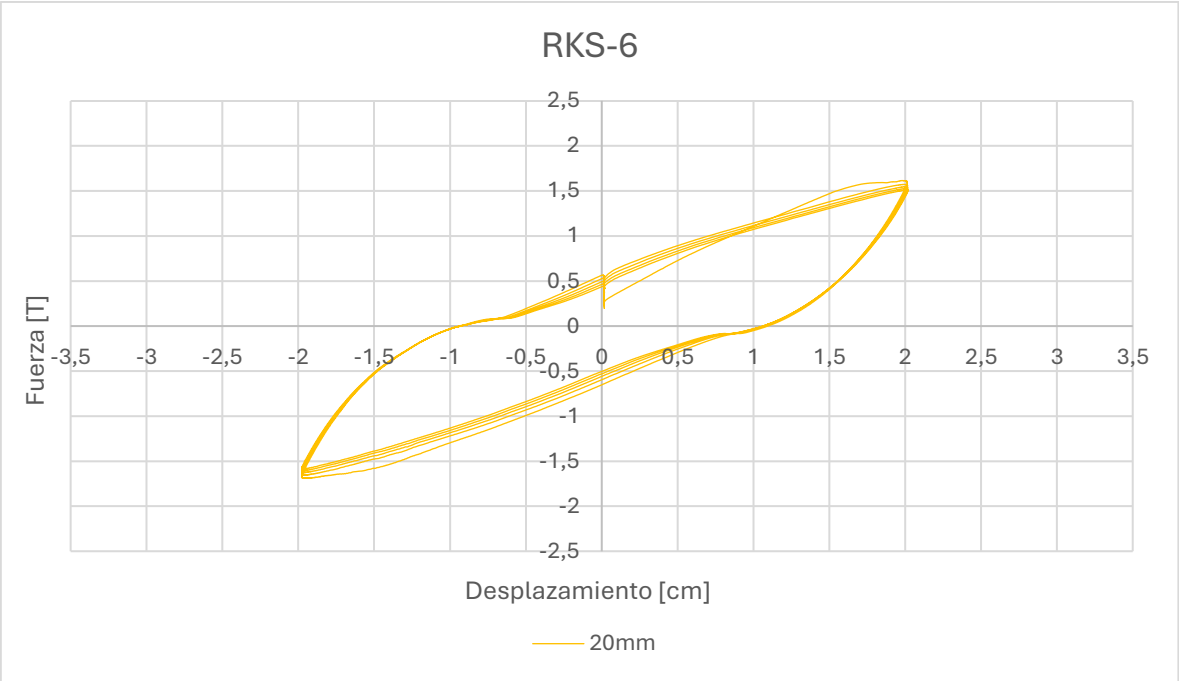


Figura 75. Curva de histéresis parcial 20mm RKS-6.

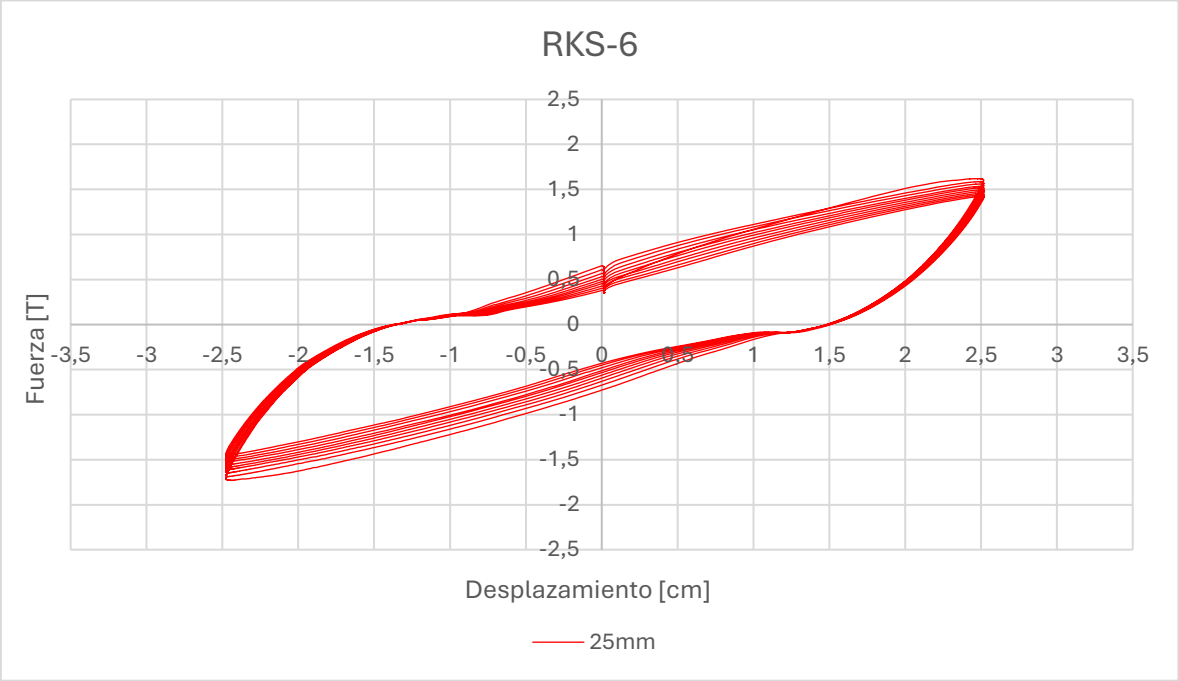


Figura 76. Curva de histéresis parcial 25mm RKS-6.

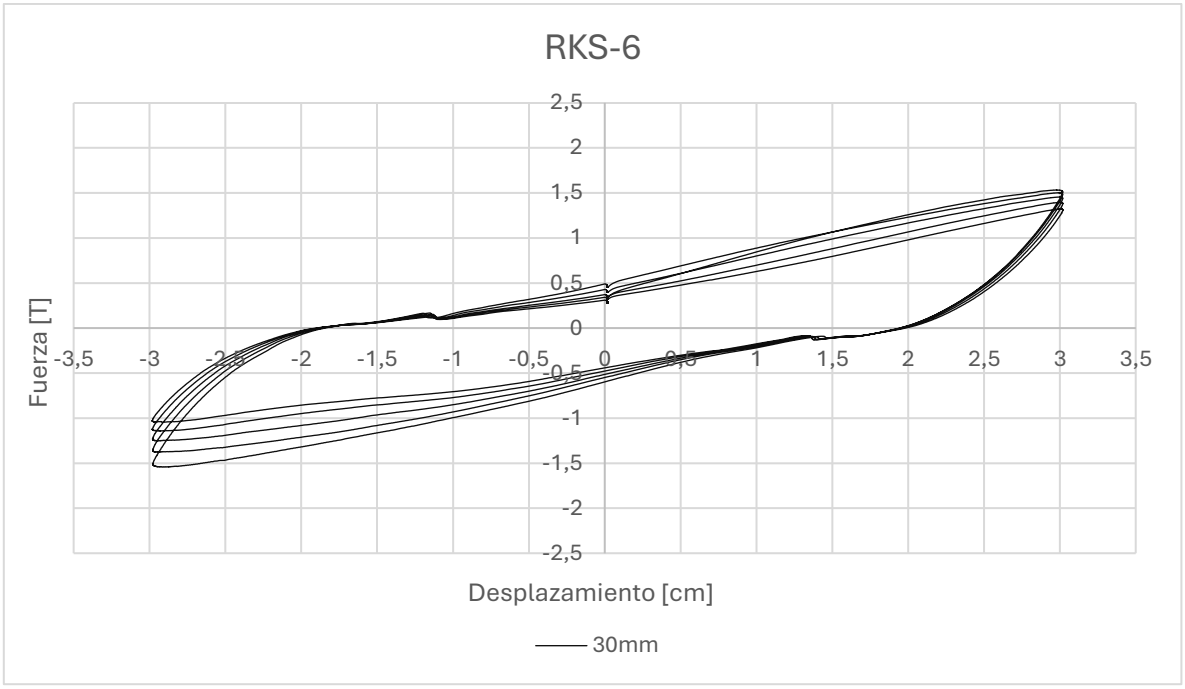


Figura 77. Curva de histéresis parcial 30mm RKS-6.

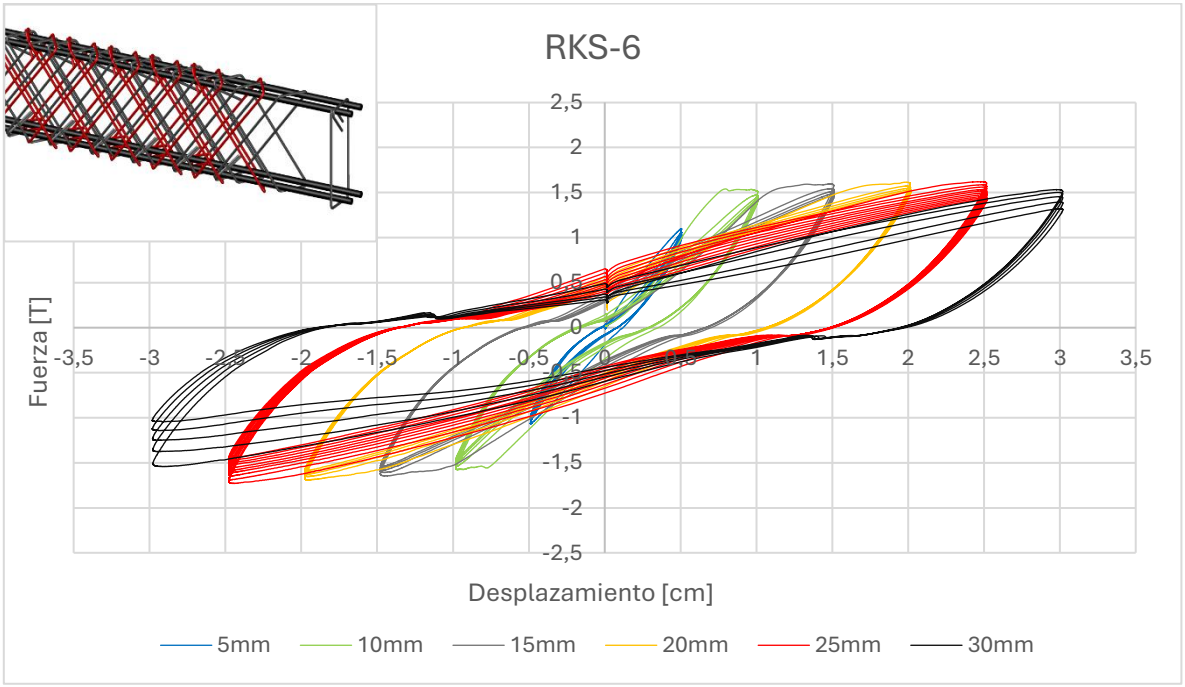


Figura 78. Curvas de histéresis RKS-6.

5.7.2. Registro fotográfico espécimen RKS-6

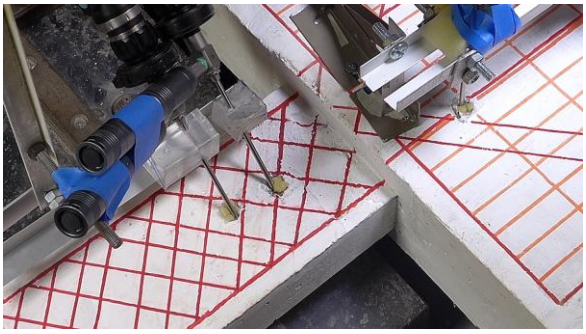


Figura 79. Quinto ciclo 5mm RKS-6.

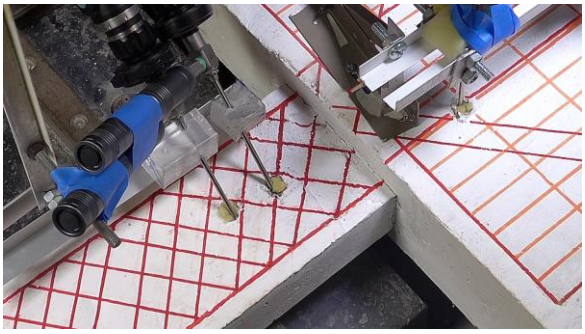


Figura 80. Quinto ciclo 10mm RKS-6.

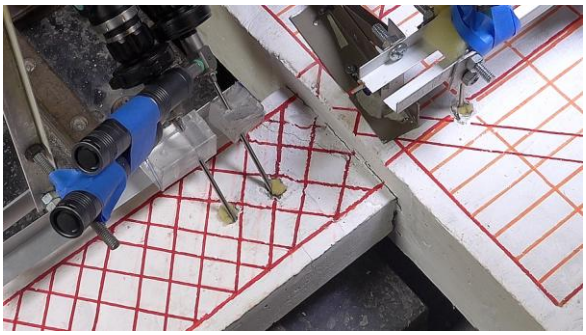


Figura 81. Quinto ciclo 15mm RKS-6.

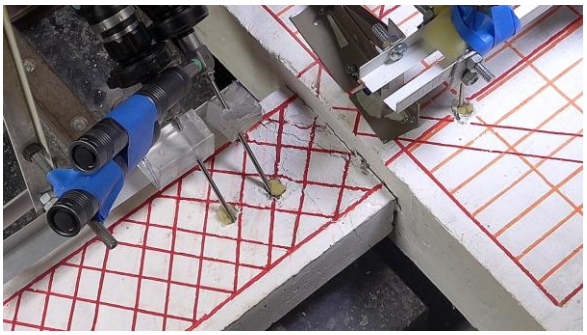


Figura 82. Quinto ciclo 20mm RKS-6.

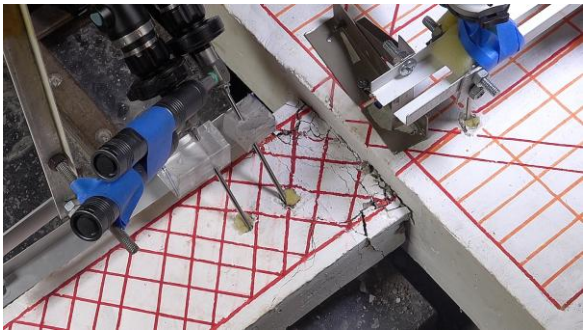


Figura 83. Décimo ciclo 25mm RKS-6.

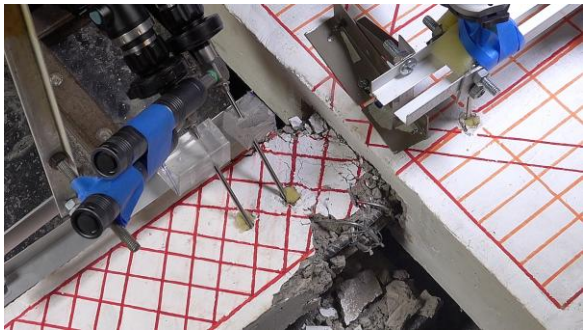


Figura 84. Quinto ciclo 30mm RKS-6.



Figura 85. Vista lateral post-ensayo RKS-6.

5.7.3. Comentarios espécimen RKS-6

Tabla 10. Eventos ensayo espécimen RKS-6.

Desplazamiento [mm]	Eventos
5	• En el primer ciclo, se observa un leve deslizamiento de la barra longitudinal registrada por la cámara C1. • A finales del tercer ciclo se observa un leve deterioro en la zona de arranque, acompañado de pequeñas grietas de flexión.
10	• En el segundo ciclo comienza a observarse agrietamiento en la zona de arranque. • En el tercer ciclo se observa un leve deslizamiento de la barra longitudinal registrada por la cámara C2.
15	• En el segundo ciclo, la barra longitudinal de la columna se desliza sin mostrar grandes desplazamientos.
20	• En el tercer ciclo comienza a observarse un deterioro visible del hormigón. • En el cuarto ciclo, las grietas se hacen más notorias.
25	• En el cuarto ciclo aumenta el agrietamiento en la zona de arranque. • En el séptimo ciclo, se observa un agrietamiento considerable en la viga, aunque con un leve desprendimiento del hormigón y poco desplazamiento de la barra longitudinal en la columna.
30	• En el segundo ciclo, comienza a producirse desprendimiento del hormigón. • En el cuarto ciclo se observa un desprendimiento notorio del hormigón. • Una barra longitudinal registra pandeo incipiente. • No se produce fractura del refuerzo longitudinal.

5.8. Análisis del diseño empleado

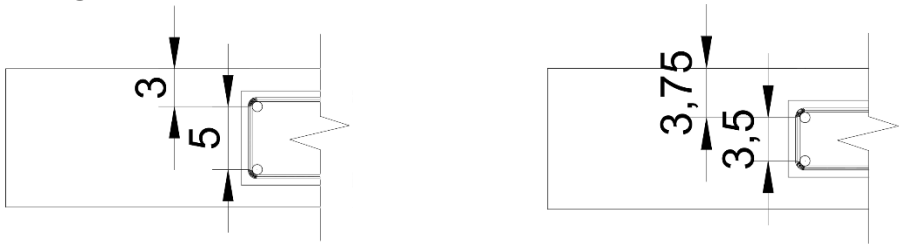
5.8.1. Evaluación de la longitud de anclaje mínima según el ACI-318-25

La longitud de anclaje mínima para el refuerzo longitudinal, especificada por el ACI 318, se determina con la ecuación 25.4.2.4a del código reproducida aquí en la ecuación (1) al igual que la condición establecida en (2) según R25.4.2.4 del ACI para el cálculo de $l_{d,}$.

$$l_d = \frac{f_y \psi_t \psi_e \psi_s \psi_g}{1{,}1\,\lambda \sqrt{f'_c}\left(\frac{C_b + K_{tr}}{db}\right)} d_b \tag{1}$$

$$\left(\frac{C_b + K_{tr}}{db}\right) \leq 2{,}5 \tag{2}$$

El parámetro C_b se determina como el menor valor entre la mitad de la separación entre ejes de las barras longitudinales de la viga y la distancia desde el eje de dichas barras hasta la superficie según detalla la **Figura 86**.



a) Espécimen referencial, C_b = 25 [mm]. b) Espécimen angostado, C_b = 17,5 [mm].

Figura 86. Determinación de C_b (medidas en cm).

El parámetro K_{tr} se determina según (3), donde A_{tr} es el área total del refuerzo que cruza el plano potencial de fisuración, s es la separación del refuerzo y n es el número de barras desarrolladas a lo largo del plano de fisuración considerado. Véase **Figura 87**.

$$K_{tr} = \frac{40 A_{tr}}{sn} \tag{3}$$

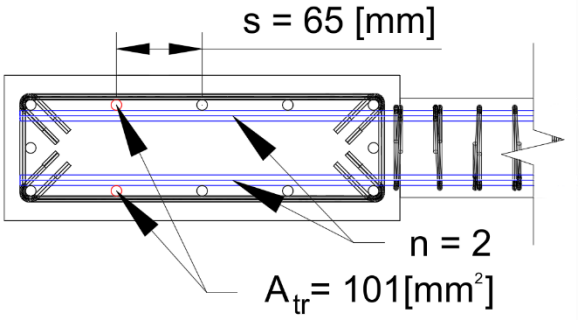


Figura 87. Parámetros para cálculo de K_{tr}.

El esfuerzo de fluencia del acero empleado se determinó en el laboratorio como indica la **Figura 88.**

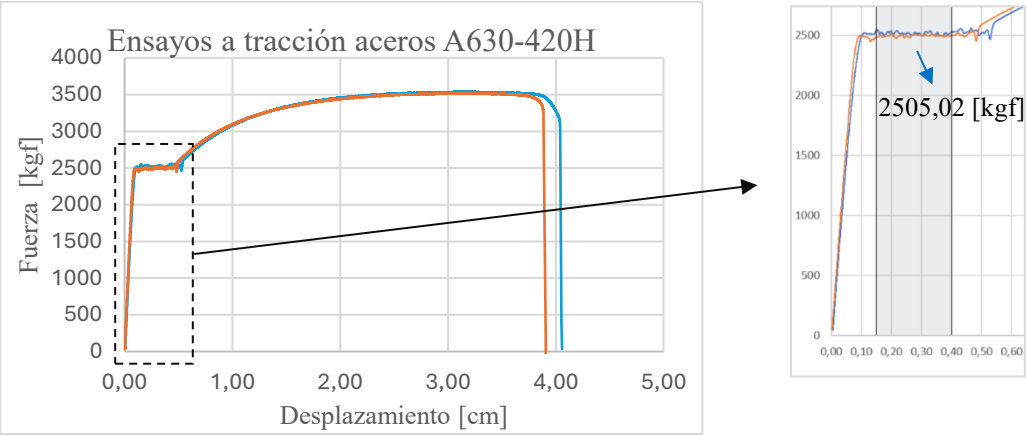


Figura 88. Intervalo de fluencia acero A630-420H.

Tabla 11. Parámetros utilizados en la evaluación del anclaje según ACI-318-25.

Parámetro	Símbolo	Valor
Diámetro de la barra longitudinal	d_b	8 [mm]
Resistencia a compresión RKS-2, RKS-3, RKS-4	f'_c	17,55 [MPa]
Resistencia a compresión RKS-1, RKS-5, RKS-6	f'_c	23,83 [MPa]
Factor para hormigón de peso normal	λ	1,0
Factor por posición del refuerzo durante el hormigonado	ψ_t	1,0
Factor por recubrimiento epóxico	ψ_e	1,0
Factor por tamaño de barra	ψ_s	0,8
Factor por grado del acero	ψ_g	1,0
Esfuerzo de fluencia	f_y	488,72 [MPa]
Contribución del refuerzo de confinamiento	K_{tr}	31,08 [mm]

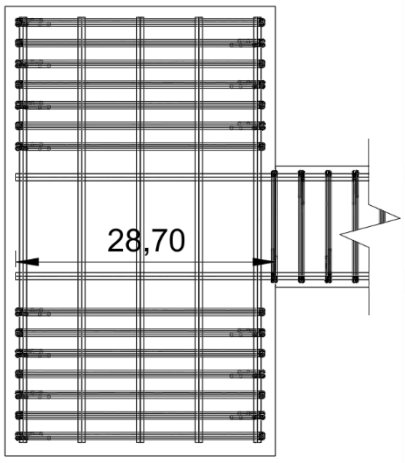


Figura 89. Longitud de anclaje de los especímenes (medidas en cm).

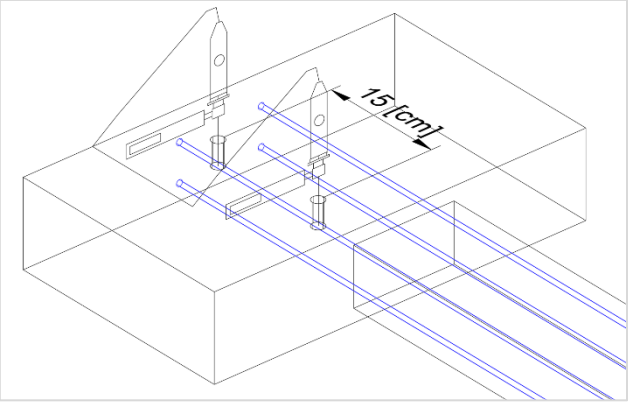
Tabla 12. Valores calculados para la longitud de anclaje mínima.

Espécimen	Resistencia [MPa]	C_b [mm]	Longitud mín. según ACI-318 [cm]
RKS-1	23,83	25	23,30
RKS-2	17,55	17,5	27,15
RKS-3	17,55	17,5	27,15
RKS-4	17,55	25	27,15
RKS-5	23,83	17,5	23,30
RKS-6	23,83	17,5	23,30

5.8.2. Determinación de la fluencia de la barra de acero longitudinal de la viga

Para determinar si la barra de acero fluyó o no, según lo observado en las imágenes provenientes de las cámaras endoscópicas, se calculó el alargamiento de fluencia de la barra utilizando la expresión indicada en (4).

$$\Delta L_y = \frac{f_y}{E_s} L_g \tag{4}$$



Utilizando el esfuerzo de fluencia f_y previamente calculado junto con la longitud entre cámaras endoscópicas (L_g) de la columna ilustrada en la **Figura 90**, se determina el alargamiento de fluencia.

Figura 90. Longitud entre cámaras endoscópicas de columna.

Por lo tanto, el alargamiento de fluencia según los valores nominales expresado en milímetros es:

$$\Delta L_y = \frac{488{,}72\ [MPa]}{200000\ [MPa]}(150\ [mm]) = 0{,}367\ [\text{mm}]$$

Obteniendo el alargamiento de fluencia máximo medido obtenido por las cámaras endoscópicas según detalla la memorista Loyola, K. (2026), se obtiene lo indicado en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Alargamiento de fluencia del refuerzo longitudinal.

Espécimen	Alargamiento máximo medido [mm]	Fluencia generalizada dentro de la columna
RKS-1	No medido	N.A.
RKS-2	0,421	SÍ
RKS-3	1,421	SÍ
RKS-4	2,091	SÍ
RKS-5	1,198	SÍ
RKS-6	0,419	SÍ

Se evidencia también, en las curvas de histéresis, que todas las barras presentaron fluencia entre los 5 y 10 mm antes de que la barra fallara por anclaje. Este análisis se detalla en la memoria de Loyola, K. (2026).

5.8.3. Evaluación de la resistencia por flexión de los especímenes ensayados

Utilizando el método de cálculo proporcionado por el memorista Bermúdez, A. (2024) y de acuerdo con lo establecido en el ACI 318, se obtienen los parámetros comunes para cada espécimen según lo indicado en la **Figura 91**.

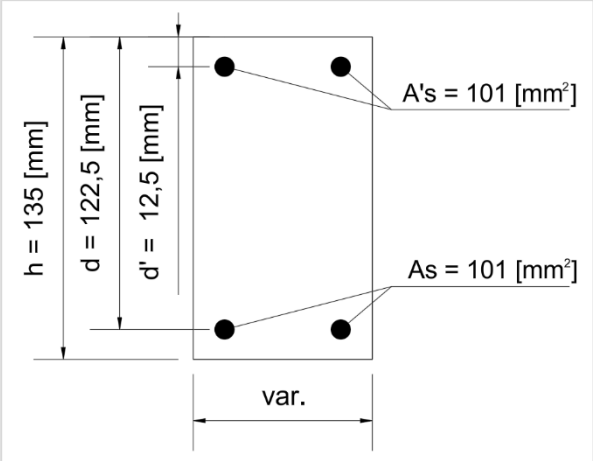


Figura 91. Parámetros comunes utilizados para la evaluación de la resistencia por flexión.

Se determina la profundidad del eje neutro considerando que no existe fuerza axial externa sobre la viga. "c" corresponde a la profundidad del eje neutro. Para ambas resistencias del hormigón, β_1 = 0,85, según el Artículo 22.2.2.4.1 y Tabla 22.2.2.4.3 del ACI 318.

$$a = \beta_1 c \tag{5}$$

$$f'_s = \min\left[E_s \varepsilon_{cu} \frac{c-d\prime}{c},\ f_y\right] \tag{6}$$

$$A_s f_y = 0{,}85 f'_c b a + A'_s (f'_s - 0{,}85 f'_c) \tag{7}$$

Se determina el parámetro "c" indicado en la ecuación (7) y una vez determinado su valor, se calculan a y f'_s.

Finalmente, se verifica que la deformación del acero traccionado obtenida del modelo sea suficiente para alcanzar el esfuerzo adoptado.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c} \geq \frac{f_y}{E_s} \tag{8}$$

Tabla 14. Parámetros obtenidos para el cálculo de la resistencia por flexión.

Espécimen	b [mm]	f'_c [MPa]	c [mm]	a [mm]	f'_s [MPa]
RKS-1	75	23,83	20,88	17,75	240,79
RKS-2	60	17,55	25,75	21,89	308,76
RKS-3	60	17,55	25,75	21,89	308,76
RKS-4	75	17,55	23,52	19,99	281,14
RKS-5	60	23,83	22,95	19,51	273,17
RKS-6	60	23,83	22,95	19,51	273,17

Con los parámetros de la **Tabla 14**, el momento resistente se obtiene sumando los momentos de las fuerzas de compresión respecto del centro del acero traccionado según (9).

$$M_n = 0{,}85f'_c ba\left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s(f'_s - 0{,}85f'_c)(d - d') \quad (9)$$

Convirtiendo el momento en carga del actuador utilizando la fórmula (10) y considerando que la distancia desde la cara de la columna hasta el eje de aplicación de carga es L = 0,40 [m], se obtiene la carga que debería resistir el espécimen por flexión según se detalla en la **Tabla 15**.

$$P_n = \frac{M_n}{L} \quad (10)$$

Tabla 15. Resistencia teórica por flexión y cargas experimentales.

Espécimen	M_n [kNm]	P_n [tonf]	Carga máxima experimental [tonf]
RKS-1	5,502	1,403	2,08
RKS-2	5,435	1,386	1,51
RKS-3	5,435	1,386	1,59
RKS-4	5,460	1,392	1,74
RKS-5	5,470	1,394	1,62
RKS-6	5,470	1,394	1,73

5.8.4. Evaluación de la resistencia por corte

Considerando la capacidad de corte del hormigón en base a la disposición del Artículo 22.5.5.1 del ACI 318 se tiene lo indicado en (11).

$$Vc = \left(0{,}17\,\lambda\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g}\right) bd \quad (11)$$

Tabla 16. Parámetros utilizados para calcular el aporte del hormigón al corte.

Parámetro	Símbolo	Valor
Fuerza axial aplicada a la viga	N_u	0
Factor de modificación por hormigón liviano	λ	1,0

La contribución del refuerzo transversal se calcula de acuerdo con los apartados 22.5.8.5.3 y 22.5.8.5.4 del ACI 318, según la orientación de los estribos. La ecuación (12) permite expresar ambos casos.

$$V_s = \frac{A_v f_{yt}(\sin\alpha + \cos\alpha)\, d}{s} \quad (12)$$

Tabla 17. Parámetros utilizados para calcular la resistencia al corte del refuerzo.

Parámetro	Símbolo	Valor
Distancia entre estribos	s	30 [mm]
Área de dos ramas efectivas del refuerzo transversal	A_v	16,1 [mm^2]

Para estimar el esfuerzo de fluencia del acero inoxidable AISI-304 (f_{yt}), se aplicó el criterio de deformación remanente de 0,002, siguiendo el procedimiento empleado por Bermúdez, A. (2024) conforme con la NCh204:2006 y según detalla la **Figura 92**.

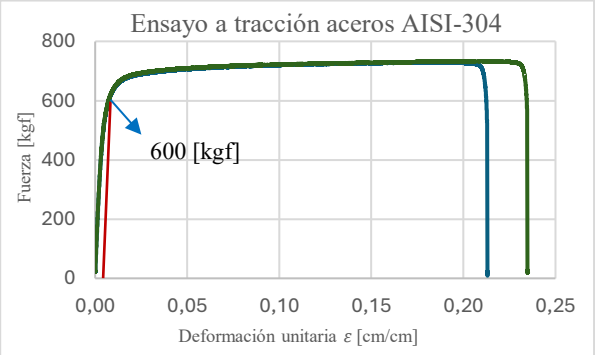


Figura 92. Deformación remanente AISI-304.

Por lo tanto, se estima f_{yt} como:

$$f_{yt} = \frac{5884\ [N]}{\frac{\pi 3{,}2^2}{4}[\text{mm}^2]} = 731{,}6\ [\text{MPa}]$$

La resistencia nominal por corte se obtiene sumando las contribuciones del hormigón y del refuerzo transversal mediante la ecuación (13). En el caso de carga cíclica, se considera $V_c = 0$. Los parámetros utilizados y los resultados de esta evaluación se presentan en la **Tabla 18**.

$$V_n = V_c + V_s \tag{13}$$

Además, según el ACI-318 hay un límite para V_s: $V_s máx$ igual a cuatro veces el valor de Vc.

Tabla 18. Resistencia por corte y cargas experimentales.

Espécimen	b [mm]	f'_c [MPa]	α	V_s [tonf]	V_c [tonf]	$V_s máx$ [tonf]	Carga máxima experimental [tonf]
RKS-1	75	23,83	90°	4,90	0,78	3,12	2,08
RKS-2	60	17,55	90°	4,90	0,53	2,12	1,51
RKS-3	60	17,55	90°	4,90	0,53	2,12	1,59
RKS-4	75	17,55	45°	6,93	0,67	2,68	1,74
RKS-5	60	23,83	45°	6,93	0,62	2,48	1,62
RKS-6	60	23,83	45°	6,93	0,62	2,48	1,73

5.9. Análisis de los resultados

Se logró el objetivo principal de esta investigación que fue evitar la fractura del refuerzo longitudinal en los especímenes con armadura transversal inclinada mientras que se conservó el menor deterioro y comportamiento histerético estable característico de los elementos con este tipo de armadura. La comparación entre ambas configuraciones indica que los estribos inclinados permitieron conservar de mejor manera el hormigón, mientras que los especímenes con estribos ortogonales presentaron una mayor degradación y desprendimiento del hormigón.

En los especímenes inclinados, el ensayo de RKS-4 finalizó por una falla de anclaje durante los ciclos de 30 [mm]. RKS-5 mantuvo ciclos estables hasta 25 [mm] y posteriormente presentó una notable torsión durante los ciclos de 30 [mm]. RKS-6 también conservó ciclos estables hasta 25 [mm], aunque en los ciclos de 30 [mm], mostró deterioro del hormigón en algunas zonas y pandeo incipiente de una barra longitudinal.

En cuanto a los especímenes con estribos ortogonales, RKS-1 presentó una pérdida importante de resistencia después de los primeros ciclos, cuyo desarrollo estuvo afectado por las condiciones iniciales del ensayo. RKS-2 mostró deterioro del recubrimiento y torsión al alcanzar desplazamientos de 25 [mm]. RKS-3 presentó poco deterioro por corte y gran deterioro en el arranque de la viga durante los ciclos de 30 [mm], comparado con RKS-1, lo cual pudo deberse a la menor velocidad del ensaye.

Respecto de la fluencia, el análisis del apartado 5.8.2, complementado con las curvas de histéresis y los registros obtenidos por Loyola, K. (2026), indica que el refuerzo longitudinal observado alcanzó la fluencia antes de que el anclaje limitara la respuesta del espécimen en los ciclos siguientes. Sin embargo, no se desarrolló el mecanismo esperado de aplastamiento, disgregación y vaciado progresivo del hormigón. En su lugar, las barras alcanzaron la fluencia y comenzaron a deslizarse dentro de la columna. A pesar de este deslizamiento, la respuesta mantuvo un comportamiento relativamente dúctil, posiblemente favorecido por el elevado confinamiento de la zona de anclaje.

Pese a utilizar la misma dosificación y adoptar las precauciones necesarias para mantener condiciones similares durante el hormigonado, se obtuvieron dos grupos de hormigón con diferentes resistencias: 17,55 y 23,83 [MPa]. Esta diferencia pudo estar relacionada con el uso de hormigón predosificado de dos distintos lotes de fabricación, así como con las condiciones de hormigonado y curado. Sin embargo, dado que en el programa experimental no se estableció una resistencia específica como requisito, se mantuvieron ambos grupos y se utilizaron las resistencias medidas para el análisis.

En cuanto al anclaje, la longitud calculada en el apartado 5.8.1 supera las longitudes establecidas del ACI 318-25 tanto para el hormigón de 17,55 [MPa] y 23,83 [MPa]. Pese a satisfacer este criterio de cálculo, las cámaras endoscópicas evidenciaron deslizamiento de las barras dentro de la columna. Este fenómeno también fue registrado en investigaciones anteriores que utilizaron hormigones de mayor resistencia, como las de Basualdo, F. (2019), Figueroa, G. (2019) y otros, lo que indicaría que su aparición no puede atribuirse exclusivamente a la reducción de la resistencia. Como referencia, ambas resistencias medidas superan el mínimo general de 17,2 [MPa], establecido para hormigón estructural indicado en la Tabla 19.2.1.1 del ACI CODE 318-25.

Comparando los resultados de las cargas obtenidas con otros memoristas, en particular, los resultados de Ayaviri, R. (2025) y Palacios, M. (2025), correspondientes a la serie RM, muestran cargas máximas del mismo orden que las obtenidas en esta investigación, aun cuando emplearon hormigones de mayor resistencia. Por lo cual, disminuir la resistencia del hormigón no produjo una disminución significativa sobre la carga máxima, pese a que los especímenes presentan una falla combinada de flexión y corte.

Capítulo VI:
Conclusiones y recomendaciones

Buscando evitar la fractura de la armadura longitudinal, problema observado en casi la totalidad de los elementos de hormigón armado con armadura transversal inclinada ensayados antes en la UTFSM, se construyeron y ensayaron nuevos especímenes de uniones viga-columna con ese tipo de armadura, pero con una cuantía de acero más alta y resistencia del hormigón más baja que en investigaciones anteriores desarrolladas en el mismo laboratorio. Por limitaciones en la capacidad de carga del equipo, el aumento de cuantía se logró angostando la viga respecto de las dimensiones que tenían en los trabajos realizados antes.

Ninguno de los seis especímenes construidos y ensayados presentó fractura del refuerzo longitudinal. Este resultado contrasta con lo observado en los casos con estribos inclinados ensayados en investigaciones anteriores. Sin embargo, mediciones con cámaras endoscópicas informadas por una memorista asociada, evidenciaron deslizamiento de las barras en todos los especímenes, a pesar de que en todos los especímenes la longitud de anclaje de las barras era mayor que el mínimo especificado por el código ACI-318, por lo que la ausencia de fractura no significó que se alcanzara íntegramente la secuencia de falla buscada.

Los resultados muestran que fue posible conservar la estabilidad de los ciclos de histéresis característica de los elementos con armadura transversal inclinada, sin que se produjera la fractura del refuerzo longitudinal durante los ensayos realizados. Este comportamiento se observó especialmente en los especímenes RKS-5 y RKS-6, que mantuvieron ciclos estables hasta desplazamientos de 25 [mm], como se aprecia en las **Figuras 63 y 76**, y presentaron un menor deterioro visible del hormigón que los especímenes con estribos ortogonales. En este sentido, se alcanzó el objetivo principal de la investigación que fue lograr una configuración que evitara la fractura del refuerzo longitudinal, conservando una respuesta cíclica favorable. No obstante, este mejor comportamiento, al parecer, se debe al deslizamiento de las barras dentro de la columna, lo cual tampoco es ideal y muestra la necesidad de continuar estudiando el anclaje.

Los resultados respaldan la reducción de la resistencia del hormigón como una alternativa para mitigar la tendencia a la fractura longitudinal, pero también muestran la necesidad de limitar esa reducción. El deterioro y los problemas de adherencia observados, particularmente con el hormigón de 17,55 [MPa], indican que disminuir excesivamente la resistencia puede trasladar el deterioro hacia otros mecanismos que comprometen la respuesta del elemento. Resulta pertinente buscar una resistencia intermedia que favorezca la deformación del acero sin producir una pérdida prematura de la integridad del hormigón o del anclaje.

Referencias

- Alfaro, R. (2026). Efectos de la resistencia del hormigón en el comportamiento de elementos de hormigón armado con estribos inclinados sometidos a solicitación sísmica [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María].
- American Concrete Institute Committee 318. (2025). Building code for structural concrete, code requirements and commentary (ACI CODE-318-25). American Concrete Institute.
- Ayaviri, R. (2025). Estudio experimental sobre la fractura de barras de refuerzo en elementos de hormigón armado con estribos inclinados, sometidos a solicitación sísmica. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Azimi, M., Adnan, A., Tahir, M., Mohd. Sam, A. R., 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.
- Barcley, L., & Kowalsky, M. (2019). Critical bending strain of reinforcing steel and buckled bar tension test. ACI Materials Journal, 116(3), 53–61.
- Basualdo, F. (2019). Efectos de las amarras y soldadura de los estribos en el comportamiento sísmico de los elementos de hormigón armado. [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 solicitación sísmica. Análisis experimental. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- Figueroa, 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. (2006). Acero – Barras laminadas en caliente para hormigón armado. (NCh 204 of. 2006).
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. (NCh 1037 of. 2009).
- Loyola, K. (2026). Medición de deformaciones de barras de refuerzo en elementos de hormigón armado con alta cuantía de acero sometidos a solicitación sísmica [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María].
- 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]. [Documento no disponible en línea]
- Moehle, J. (2015). “Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings” McGraw Hill Education, 760pp, New York, USA.
- Palacios, M. (2025). Deformación de barras de refuerzo en elementos de hormigón armado con estribos inclinados, sometidos a solicitaciones sísmicas. [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, S. A. (2022). “Fracturas de barras de acero para hormigón armado debidas a la deformación crítica por pandeo y a la fatiga de bajo ciclaje”. Tesis de pregrado, U.T.F.S.M.
- 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.

Anexos

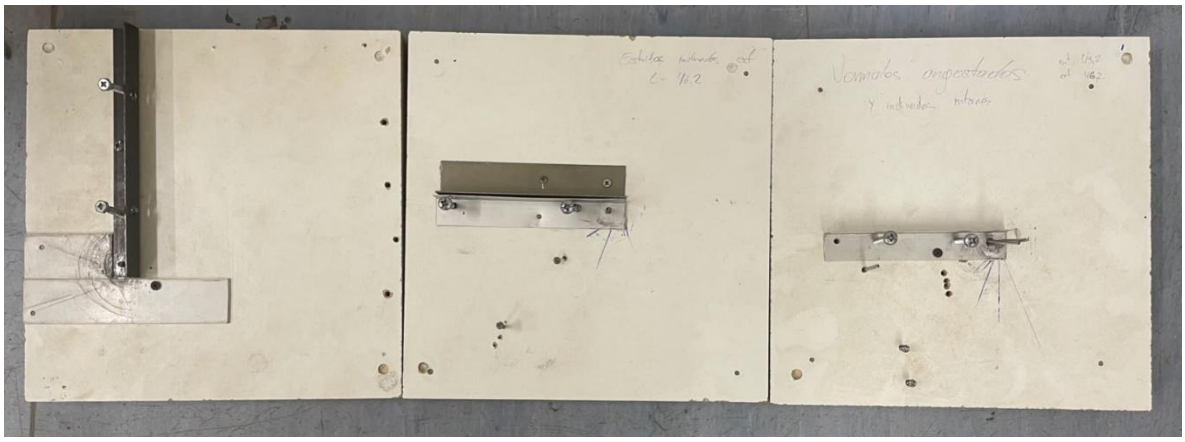


Figura 93. Sistema utilizado para el doblado de estribos.



Figura 94. Primer hormigonado.



Figura 95. Segundo hormigonado.



Figura 96. Sección sobresaliente de perno de anclaje.



Figura 97. Ensayo probeta cilíndrica.



Figura 98. Ensayo acero AT56-50H.



Figura 99. Trazado de especímenes.



Figura 100. Grouting de nivelación.



Figura 101. Instalación de riel de soporte de viga.

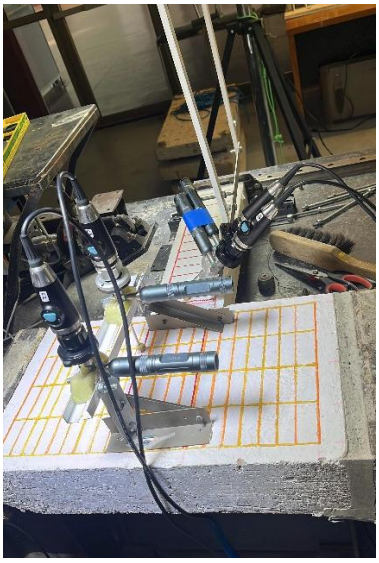


Figura 102. Instalación de cámaras endoscópicas.