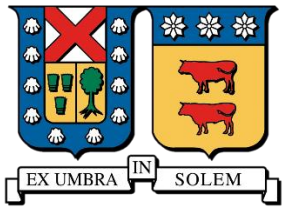
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



MEDICIÓN DE DEFORMACIONES DE BARRAS DE REFUERZO EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON ALTA CUANTÍA DE ACERO SOMETIDOS A SOLICITACIÓN SÍSMICA

Memoria de titulación presentada por
Kimberli Constanza Loyola Tapia

Como requisito parcial para optar al título de
Constructora Civil

Profesor Guia

Rene Enrique Tobar Ramos

Octubre de 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: MEDICIÓN DE DEFORMACIONES DE BARRAS DE REFUERZO EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON ALTA CUANTÍA DE ACERO SOMETIDOS A SOLICITACIÓN SÍSMICA

Nombre del candidato(a): Kimberli Constanza Loyola Tapia

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: 28-10-2026 ; **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28-10-2026 ; **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

Esta memoria forma parte de la línea de investigación desarrollada en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María sobre elementos de hormigón armado con estribos inclinados sometidos a solicitación sísmica. Estudios anteriores han demostrado que esta disposición permite conservar mejor la integridad del hormigón durante grandes deformaciones, sin embargo, frecuentemente se ha observado que conlleva fractura de las barras longitudinales, lo cual es un tipo de falla indeseable. Para abordar este problema y siguiendo recomendaciones de memoristas anteriores, se realizaron algunos cambios en las características de los especímenes de prueba construidos en esta oportunidad, respecto de lo usual, con el objeto de lograr un mejor equilibrio entre las capacidades mecánicas del hormigón y del acero.

En esta investigación, durante los ensayos, se observaron y midieron las deformaciones de las barras longitudinales en la zona de la rótula plástica y en el anclaje mediante cámaras endoscópicas. Estas mediciones permiten distinguir entre el alargamiento de las barras y su deslizamiento dentro de los especímenes, comportamientos que no pueden identificarse únicamente a partir del movimiento exterior de la viga y que hasta ahora solo eran suposiciones.

Para esto, se confeccionaron y ensayaron seis especímenes que representan la región de la viga próxima a la columna, de estas, tres tenían estribos inclinados y tres estribos ortogonales. Dos mantuvieron el ancho referencial de investigaciones anteriores y cuatro tuvieron una reducción del ancho de la viga. Además, se usaron hormigones de menor resistencia que lo acostumbrado. En todos los especímenes se incorporaron ductos de observación para introducir las cámaras en las zonas de interés. Los videos se procesaron mediante un programa de seguimiento de imágenes, obteniendo los desplazamientos de las barras y, a partir de la diferencia entre los puntos observados se obtuvieron sus alargamientos y deformaciones unitarias.

Durante los ensayos no se produjo fractura de las barras longitudinales, lo que representa un hito importante en el estudio de estos elementos. Los registros permitieron identificar una etapa inicial de fluencia, seguida por un movimiento asociado al deslizamiento de las barras en la zona de anclaje. Este deslizamiento se relacionó principalmente con la ausencia de la fractura, presentando una respuesta relativamente dúctil en los elementos altamente confinados del presente estudio. El principal aporte de las cámaras fue observar y medir el movimiento de las barras, distinguiendo su deslizamiento del alargamiento y aportando evidencia concreta sobre el comportamiento del refuerzo al interior del hormigón.

Palabras clave: Deslizamiento, deformación unitaria, estribos inclinados, solicitación sísmica, fluencia.

ABSTRACT

This thesis is part of a line of research conducted at the LEMCO laboratory of the Federico Santa María Technical University on reinforced concrete members with inclined stirrups subjected to seismic loading. Previous studies have shown that this arrangement better preserves the integrity of the concrete during large deformations; however, it has frequently been observed that it leads to fracture of the longitudinal bars, which is an undesirable type of failure. To address this problem and following the recommendations of previous thesis authors, some changes were made to the characteristics of the test specimens constructed for this study, deviating from standard practice, with the aim of achieving a better balance between the mechanical properties of the concrete and the steel.

In this study, during the tests, the deformations of the longitudinal bars in the plastic hinge zone and at the anchorage were observed and measured using endoscopic cameras. These measurements make it possible to distinguish between the elongation of the bars and their slippage within the specimens—behaviors that cannot be identified solely based on the beam's external movement and that, until now, were merely assumptions.

To this end, six specimens representing the region of the beam near the column were fabricated and tested; of these, three had inclined stirrups and three had orthogonal stirrups. Two maintained the reference width from previous studies, and four had a reduced beam width. Additionally, concrete with lower strength than usual was used. Observation channels were incorporated into all specimens to allow cameras to be inserted into the areas of interest. The videos were processed using image-tracking software to determine the displacements of the bars; their elongations and unit deformations were then calculated based on the differences between the observed points.

No fracture of the longitudinal bars occurred during the tests, which represents a significant milestone in the study of these elements. The recordings allowed for the identification of an initial creep stage, followed by movement associated with the slippage of the bars in the anchorage zone. This slippage was primarily related to the absence of fracture, demonstrating a relatively ductile response in the highly confined elements of this study. The main contribution of the cameras was to observe and measure the movement of the bars, distinguishing their slippage from elongation and providing concrete evidence regarding the behavior of the reinforcement within the concrete.

Keywords: Slippage, unit strain, inclined stirrups, seismic loading, creep.

Índice de contenido

Capítulo I 8

Introducción 8

1.1. Contextualización 8

1.2. Objetivo general 9

1.3. Objetivos específicos 9

Capítulo II 10

Estudios previos 10

Capítulo III 12

Fabricación de los especímenes 12

3.1. Propiedades de los materiales 12

3.2. Hormigón 12

3.3. Acero 12

3.4. Confección de la armadura 13

3.5. Columna 13

3.6. Vigas 13

3.7. Moldajes 14

3.8. Ductos de observación 14

3.9. Fijación de ductos 15

3.10. Sellado temporal de ductos 15

3.11. Hormigonado de probetas 16

3.12. Ensayos 16

3.13. Probetas cilíndricas 16

3.14. Acero 17

3.15. Montaje de la probeta en la mesa sísmica. 17

3.16. Montaje del sistema de observación. 18

Capítulo IV 19

Sistema de observación 19

4.1. Antecedentes 19

4.2. Características técnicas 19

4.3. Distribución de cámaras 20

4.4. Software de Procesamiento y Análisis digital 20

4.5. Captura de Video 20

4.6. Sincronización de imágenes 20

4.7. Procesamiento y obtención de desplazamientos 21

Capítulo V 24
Resultados experimentales 24
5.1. Ciclos de carga por nivel 24
5.2. Desglose por probeta 24
5.3. RKS1, Ancho referencial con estribos ortogonales 25
5.4. RKS2, Angostada con estribos ortogonales 27
5.5. RKS3, Angostada con estribos ortogonales 31
5.6. RKS4, Ancho referencial con estribos inclinados. 35
5.7. RKS5, Angostada con estribos inclinados 39
5.8. RKS6, Angostada con estribos inclinados 43
Capítulo VI 47
Análisis de resultados 47
6.1. Criterio de referencia para el inicio de fluencia 47
6.2. Longitud de anclaje 48
6.3. Comparación de probetas 48
6.4. Recomendaciones para la instalación y uso de cámaras endoscópicas 49
Capítulo VII 50
Conclusiones 50
Referencias 51

Índice de Figuras

Figura 1. Área de interés unión Viga columna. 8
Figura 2. Secuencia de falla de la barra, a) Pandeo de la barra, b) Falla en tracción 8
Figura 3. *Perforaciones y soporte de columna.* Fuente: *Silva, B. (2022).* 10
Figura 4. *Correlación Digital de imágenes, Fuente: Jorquera, M. (2026).* 11
Figura 5. *Dimensiones especímenes con viga angostada.* 12
Figura 6. *Detalle armadura columna. Vasquez, S.(2026)* 13
Figura 7. *Detalle de Viga con estribos ortogonales* 14
Figura 8. *Dimensiones de Viga con estribos inclinados.* 14
Figura 9. *Ductos de observación, a) Viga , b) Columna.* 15
Figura 10. *Ductos fijados a la armadura* 15
Figura 11. *Tapón interior de ductos* 16
Figura 12. *Jornadas de hormigonado, primera y segunda de izquierda a derecha.* 16
Figura 13. *Diagrama unilineal del sistema de ensayo (Maldonado, 2023).* 17
Figura 14. *Montaje y disposición sistema en voladizo de ensayos.* 18

Figura 15. Cámara endoscópica. 19
Figura 16. Distribución de cámaras endoscópicas en los especímenes. 20
Figura 17. *Sincronización de videos, CapCut.* 21
Figura 18. *Programa de medición de la deformación de las barras longitudinales, Jorge Lagos.* 21
Figura 19. *Modificación del programa de medición con desprendimiento de material.* 22
Figura 20. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS1 25
Figura 21. *Probeta RKS1, previo al ensayo.* 26
Figura 22. Probeta RKS1, posterior al ensayo. 26
Figura 23. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS2 27
Figura 24. Probeta RKS2, previo al ensayo. 28
Figura 25. Probeta RKS2, posterior al ensayo. 28
Figura 26. Probeta RKS2, 10° Ciclo Positivo 25[mm] 29
Figura 27. Probeta RKS2, 10° Ciclo Negativo 25[mm] 29
Figura 28. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS3 31
Figura 29. *Probeta RKS3, previo al ensayo.* 32
Figura 30. *Probeta RKS3, posterior al ensayo.* 32
Figura 31. Probeta RKS3, 5° Ciclo Positivo 25[mm]. 33
Figura 32. Probeta RKS3, 5° Ciclo Negativo 25[mm] 33
Figura 33.Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS4 35
Figura 34. *Probeta RKS4, previo al ensayo.* 36
Figura 35. *Probeta RKS4, posterior al ensayo.* 36
Figura 36. *Probeta RKS4, 5° Ciclo Positivo 25[mm].* 37
Figura 37. *Probeta RKS4, 5° Ciclo Negativo25[mm].* 37
Figura 38. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS5 39
Figura 39. *Probeta RKS5, previo al ensayo.* 40
Figura 40. *Probeta RKS5, posterior al ensayo.* 40
Figura 41. *Probeta RKS5, 5° Ciclo Positivo 25[mm].* 41
Figura 42. *Probeta RKS5, 5° Ciclo Negativo 25[mm].* 41
Figura 43. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS6 43
Figura 44. *Probeta RKS6, previo al ensayo.* 44
Figura 45. *Probeta RKS6, posterior al ensayo.* 44
Figura 46. *RKS6, 5° Ciclo Positivo 25[mm].* 45
Figura 47. *Probeta RKS6, 5° Ciclo Negativo 25[mm].* 45

Índice de Graficas

Grafica 1. Curva e*sfuerzo vs deformación unitaria de los aceros utilizados.* **17**
Grafica 2. *Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS1.* **25**
Grafica 3. *Desplazamiento barra longitudinal con cámara endoscópica C1* **26**
Grafica 4. *Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS2.* **27**
Grafica 5. *Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS3.* .. **30**
Grafica 6. *Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS3.* **31**
Grafica 7. *Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS3.* .. **34**
Grafica 8. *Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS4.* **35**
Grafica 9. *Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS4.* .. **38**
Grafica 10. *Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS5.* **39**
Grafica 11. *Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS5.* **42**
Grafica 12. *Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS6.* **43**
Grafica 13. *Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS6.* **46**

Índice de Tablas

Tabla 1. *Dosificación utilizada en la confección de especímenes y probetas cilíndricas* **12**
Tabla 2. *Detalle barras de acero utilizadas* **13**
Tabla 3. *Cantidad de ciclos por Nivel de desplazamiento.* **24**
Tabla 4. Comparación alargamiento teórico de referencia y alargamiento medido máximo. **48**
Tabla 5. Longitud de anclaje teórica. **48**

Capítulo I
Introducción

1.1. Contextualización

En marcos de hormigón armado sometidos a solicitación sísmica, la región de la viga próxima a la columna como la que se muestra en la **Figura 1** es una zona crítica donde se requiere un comportamiento dúctil, ya que en ese lugar se tiende a formar una rótula plástica capaz de disipar energía de la solicitación. Investigaciones realizadas en la UTFSM han demostrado que el uso de estribos inclinados en 45°/135° mejora sustancialmente la respuesta sísmica, especialmente en vigas de luces intermedias, manteniendo la integridad del hormigón, aún para grandes deformaciones de los elementos estructurales. Sin embargo, se ha observado en estos casos una temprana fractura de las barras longitudinales, lo cual llevaría a un tipo de falla indeseado de la estructura. Diversos estudios han propuesto configuraciones alternativas para mitigar este problema (Silva, B. 2022; Maldonado, J. 2023). En esta investigación, donde participa la autora junto con los memoristas Alfaro, R. (2026) y Vásquez, S. (2026), se propone una solución al problema anterior mediante el aumento de la cuantía del acero longitudinal.

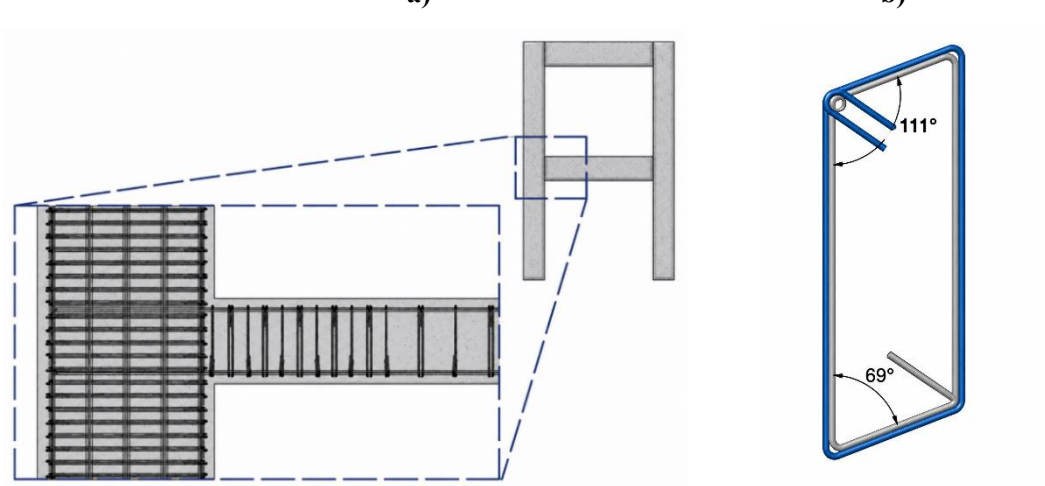


Figura 1. Área de interés unión Viga columna.

Cuando el espécimen de prueba experimenta deformaciones grandes, la barra se pandea, supera este umbral y en el siguiente medio ciclo de tracción se fractura **(Figura 2.)** Esto ha sido estudiado por Rojas S. (2022). Se ha visto también en el laboratorio que pequeños deslizamientos de las barras en la zona de anclaje pueden disminuir su tendencia al pandeo y posterior fractura. Este fenómeno ocurre en forma errática y es necesario mayor estudio. Se implementó entonces un sistema de visualización mediante cámaras endoscópicas que permitió observar y registrar la deformación de las barras longitudinales.

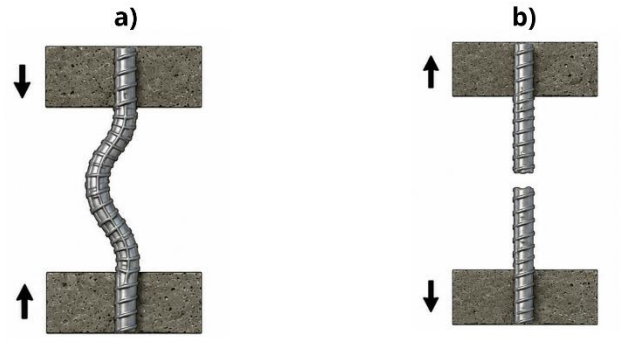


Figura 2. Secuencia de falla de la barra, a) Pandeo de la barra, b) Falla en tracción

Para esta memoria se construyeron y ensayaron seis especímenes viga columna a una escala que se puede interpretar como 1:3 o 1:4, por las limitaciones de capacidad de carga del equipo. De estas, tres fueron con armadura transversal inclinada y tres con estribos ortogonales tradicionales. Buscando un mejor equilibrio entre la capacidad mecánica del hormigón y del refuerzo, disminuyendo el riesgo de fractura, en dos especímenes de cada tipo, la cuantía de acero longitudinal fue un 20% mayor a la usual en los elementos construidos por memoristas anteriores, conseguido vía angostamiento de la sección transversal de la viga. Adicionalmente, en todos los especímenes se usó un hormigón de menor resistencia que lo usual en los trabajos de memoristas anteriores.

1.2.Objetivo general

Medir las deformaciones de las barras de acero en la zona donde se produce la rótula plástica y en la zona de anclaje, mediante un sistema de cámaras endoscópicas introducidas en el hormigón, con el objeto de visualizar el comportamiento de las barras, especialmente en los casos de armadura transversal inclinada

1.3.Objetivos específicos

- Lograr el diseño y construcción de una probeta con una disposición de la armadura longitudinal tal que se evite la fractura de las barras, lo cual se espera conseguir aumentando la cuantía de acero y disminuyendo la sección transversal
- Estudiar una forma óptima e implementar un sistema de visualización con cámaras endoscópicas, de manera que se puedan registrar de forma clara y continua las deformaciones de las barras longitudinales, tanto en la zona de pandeo y fractura, como en la zona de anclaje de estas durante los ensayos.

Capítulo II
Estudios previos

Una de las alternativas estudiadas para mitigar la fractura del refuerzo longitudinal fue favorecer el deslizamiento de las barras en su anclaje con el propósito de disminuir la deformación del refuerzo en la zona de la viga próxima a la columna y, con ello, reducir su tendencia a la fractura. Para observar este comportamiento, Silva, B. (2022) ensayó especímenes con una longitud de anclaje reducida al 70% de la indicada por el código ACI-318. La reducción no afectó significativamente la resistencia de los especímenes, pero tampoco evitó por completo la fractura de las barras. Sin embargo, permitió estudiar el deslizamiento del refuerzo dentro de la columna mediante un sistema de cámaras.

Silva utilizó un sistema desarrollado por Lagos, J.(2026), que observaba dos puntos de una barra longitudinal en la zona de anclaje. Para permitir la visualización se dejaron perforaciones mediante tubos de aluminio dentro del hormigón. Las cámaras se fijaron a un soporte sobre la columna como se muestra en la **Figura 3** y se instalaron marcas de seguimiento sobre la barra. Los registros mostraron un aumento del deslizamiento durante los ensayos y permitieron comparar el movimiento en ambos puntos. Sin embargo, como limitación, Silva señala que fue necesario reducir la velocidad de aplicación de carga para hacerla compatible con el sistema de observación.

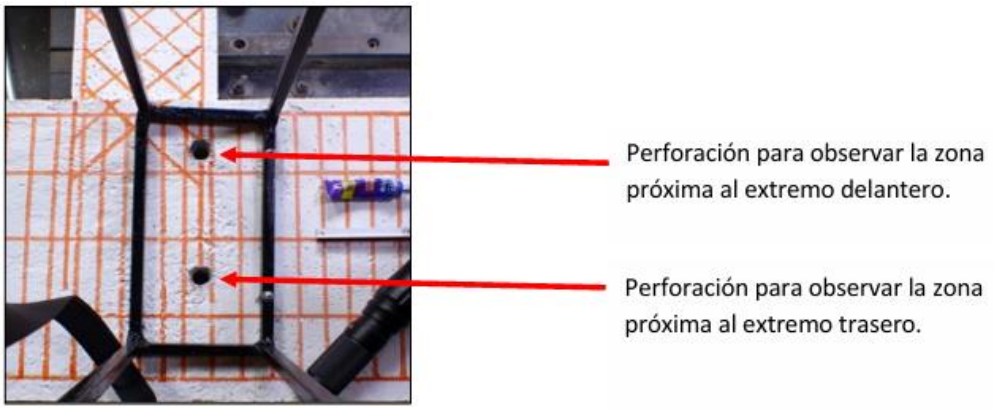


Figura 3. ***Perforaciones y soporte de columna.*** **Fuente:** ***Silva, B. (2022).***

Posteriormente, Palacios, M. (2025) utilizó cámaras endoscópicas para medir la deformación de las barras longitudinales en la viga. A diferencia de la observación en la columna, fue necesario disponer un soporte que acompañara el movimiento de la viga y mantuviera la separación entre las cámaras. A partir de las imágenes se determinaron los desplazamientos de dos puntos de la barra y la deformación unitaria *del tramo comprendido entre ellos.* Palacios concentró la medición de deformaciones en las probetas RM4 y RM6, cuyos registros presentaron condiciones adecuadas de resolución, posición de los puntos de observación y estabilidad de la separación entre cámaras.

Las principales dificultades encontradas por Palacios fueron la calidad de las grabaciones, la alineación de los conductos y la variación de la separación entre cámaras por el deterioro del montaje. Además, al iniciarse el pandeo, la barra se desplazaba fuera de su plano original, modificando su distancia respecto de la cámara y afectando la conversión de las imágenes a desplazamientos. Por esta razón, las mediciones se consideraron válidas solo hasta el inicio del pandeo.

Palacios (2025) también utilizó *strain gauges* en dos estribos inclinados de la probeta RM2. Sin embargo, obtuvo registros utilizables únicamente en los primeros ciclos, debido al desprendimiento o falla de esos dispositivos. Esta experiencia evidenció dificultades para mantener la medición durante el ensayo cíclico, peor cuando su aplicación correspondió sólo a los estribos y no a las barras longitudinales.

Por su parte, Jorquera, M. (2026) utilizó cámaras endoscópicas para estudiar el anclaje de barras de acero y de fibra de vidrio dentro de la columna. Las cámaras se fijaron a un soporte anclado a esta observándose las barras a través de tubos de cobre. Los registros permitieron medir sus desplazamientos y visualizar el aplastamiento del hormigón próximo a los resaltes de las barras de acero, así como el desgaste superficial de las barras de fibra de vidrio. Se utilizó un programa de correlación digital de imágenes como la que se muestra en la **Figura 4.** para realizar las mediciones.



Figura 4. ***Correlación Digital de imágenes, Fuente: Jorquera, M. (2026).***

Estos trabajos muestran que la observación interna permite relacionar el desplazamiento de las barras con su deformación y con el comportamiento del anclaje. También evidencian que la confiabilidad de las mediciones depende de la estabilidad del montaje, la calidad de las imágenes y la posición de la barra respecto de las cámaras. Estos antecedentes orientan el uso del sistema de observación en la presente investigación, tanto en la viga como en la columna.

Capítulo III
Fabricación de los especímenes

Los seis especímenes fueron basados en el diseño propuesto por memoristas anteriores, con una sección de viga de 13,5 x 7,5 [cm]. De estos, dos conservaron la geometría referencial, mientras que en los cuatro restantes se redujo el ancho de la viga a 6 [cm]. La geometría modificada se presenta en la **Figura 5.**

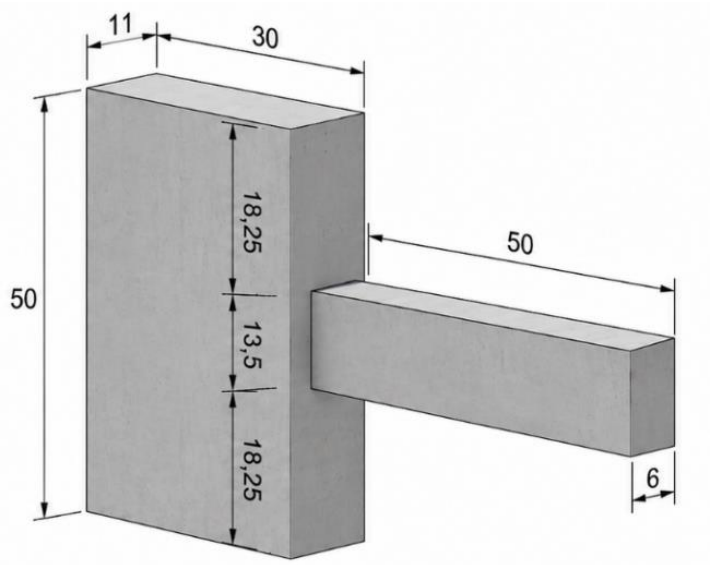


Figura 5. ***Dimensiones especímenes con viga angostada.***

3.1. Propiedades de los materiales

3.2.Hormigón

Atendiendo las recomendaciones de Palacios, M.(2025) y Ayaviri, R. (2025), se buscó obtener una resistencia relativamente baja. Para esto, se utilizó hormigón predosificado H20 (cuya resistencia real es entre 16 y 17 MPa, similar a un G17). A esta mezcla se le incorporó una cantidad adicional de cemento con el propósito de aumentar levemente la resistencia final, siguiendo las proporciones que se indican en la **Tabla 1**. Con esta dosificación, se efectuaron dos jornadas de hormigonado realizando cuatro probetas cilíndricas y tres especímenes de unión viga-columna.

Tabla 1. ***Dosificación utilizada en la confección de especímenes y probetas cilíndricas***

Descripción	Marca	Cantidad	Unidad
Hormigón predosificado	Presec H-02 Homecrete - Sika	175	kg
Cemento especial	Polpaico	2	kg
Aditivo Plastificante	EUCON 610 – Euclid chemical cave	0,11	L
Agua	-	19,6	L

3.3.Acero

Los tipos de barra utilizados se indican a continuación en la **Tabla 2.** Para todos los modelos se utilizó el mismo diseño de columna cambiando solo la configuración de la viga, los amarres se realizaron con acero galvanizado de 2 mm de diámetro.

Tabla 2. ***Detalle barras de acero utilizadas***

Elemento	Barra	Calidad	Diámetro [mm]
Viga	Longitudinal	A630-420H	8
	Estribos	Acero inoxidable AISI-304	3,2
Columna	Longitudinal	A630-420H	8
	Estribos	AT56-50H	4,2

3.4. Confección de la armadura

3.5.Columna

La armadura de la columna fue la misma en todos los especímenes. Se confeccionó con barras longitudinales de acero de 8 [mm] A630-420H y estribos de acero de 4,2 [mm] AT56-50H, sus dimensiones y distribución se presentan en la **Figura 6.**

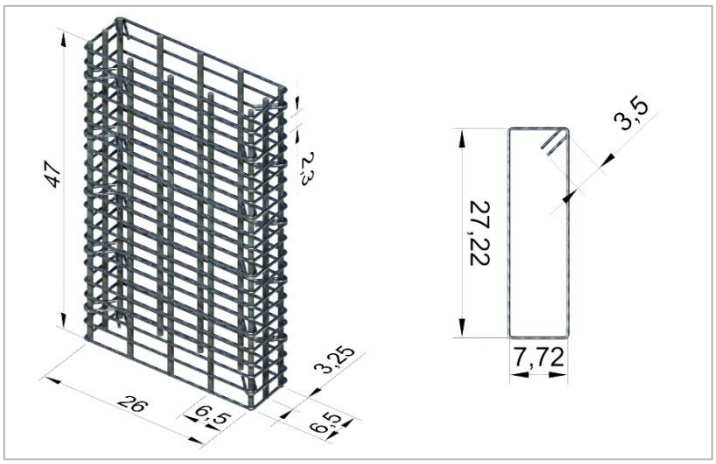


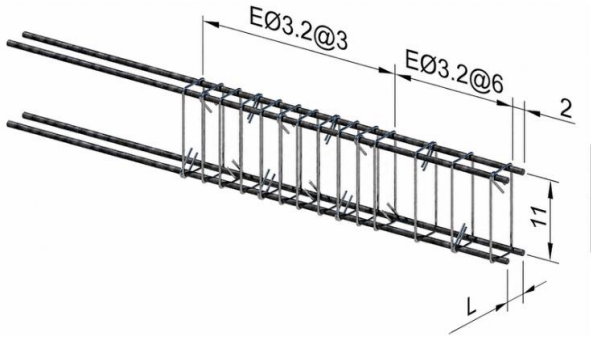
Figura 6. ***Detalle armadura columna. Vasquez, S.(2026)***

3.6.Vigas

Las vigas fueron construidas utilizando cuatro barras longitudinales de acero A630-420H. Para el refuerzo transversal se utilizaron en algunas vigas estribos ortogonales y en otras estribos inclinados.

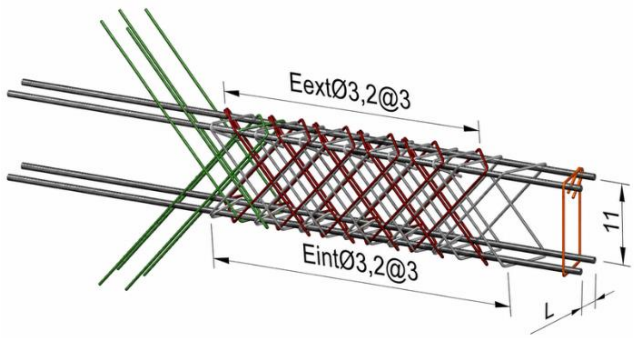
- **Vigas con estribos ortogonales**
  La probeta RKS1 fue construida considerando la geometría tradicional utilizada en investigaciones, mientras que las probetas RKS 2 y RKS 3 corresponden a la nueva configuración con sección angostada. Las dimensiones se presentan en la **Figura 7.**

- **Vigas con estribos inclinados**
  Las siguientes probetas se construyeron siguiendo la configuración en dos planos desarrollada por Bermúdez, A. (2024). La probeta RKS 4 mantiene la geometría referencial utilizada en dichos estudios, mientras que las probetas RKS 5 y RKS 6 fueron construidas con la nueva sección angostada propuesta en esta investigación. Estas dimensiones se muestran en la **Figura 8.**



ESPECÍMEN	L [cm]
RKS 1	5
RKS 2	3,5
RKS 3	3,5

Figura 7. ***Detalle de Viga con estribos ortogonales***



ESPECÍMEN	L [cm]
RKS 4	5
RKS 5	3,5
RKS 6	3,5

Figura 8. ***Dimensiones de Viga con estribos inclinados.***

3.7.Moldajes

El diseño y fabricación de los moldajes utilizados fueron desarrollados en conjunto con los memoristas asociados, En términos generales, se emplearon dos configuraciones de moldaje, una correspondiente a vigas tradicionales y otra adaptada para vigas angostadas. Para más detalles ver memoria de Vásquez, S. (2026).

3.8. Ductos de observación

Para permitir el paso de las sondas de fibra óptica de las cámaras, se instalaron ductos de observación con cañerías guía de cobre de ½" de diámetro bajo las siguientes especificaciones:

3.8.1. Geometría:

- **Extremo interno:** Se le realizo un desbaste semi circular con el objetivo de que este encaje de la mejor manera en las barras longitudinales de la viga.
- **Extremo externo (viga):** Se llevó a cabo un corte diagonal de aproximadamente 60° en la cara que va hacia afuera del moldaje, con el objetivo de que los ductos queden perpendiculares a las barras y este extremo no interfiera con la inserción de las cámaras. Ver la **Figura 9 a).**
- **Extremo externo (columna):** Como en la columna no existen barras que interfieran con la instalación de los ductos, el corte realizado fue recto, facilitando la confección de estos. Ver la **Figura 9 b).**

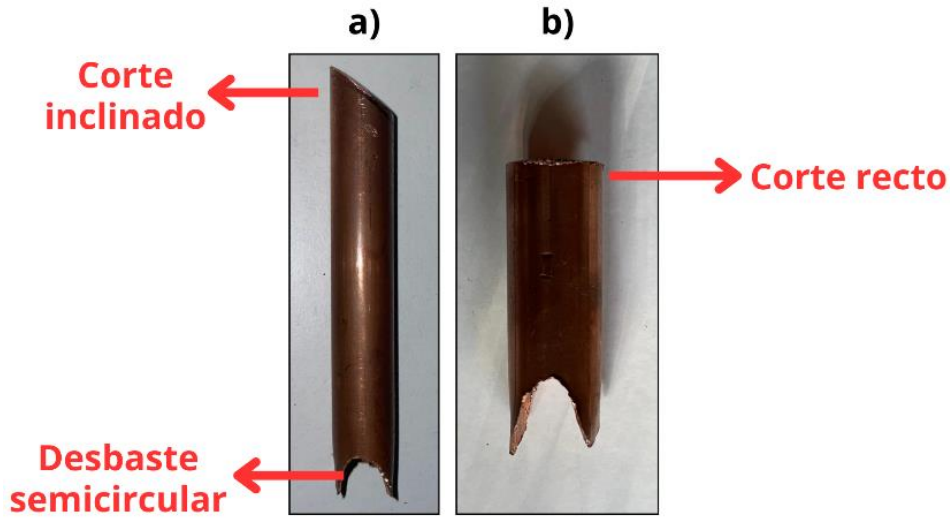


Figura 9. ***Ductos de observación, a) Viga , b) Columna.***

3.9.Fijación de ductos

Los ductos se fijaron a las barras longitudinales rodeando el extremo interno con masilla epóxica (Poxilina) y procurando utilizar la menor cantidad de esta (**Figura 10),** para no interferir el movimiento de las barras durante los ensayos. Su aplicación permitió sellar posibles oquedades o imperfecciones del desbaste, evitando filtraciones de lechada al interior de las tuberías. Al endurecerse, la masilla actúa como un soporte rígido que mantiene los tubos en su posición.

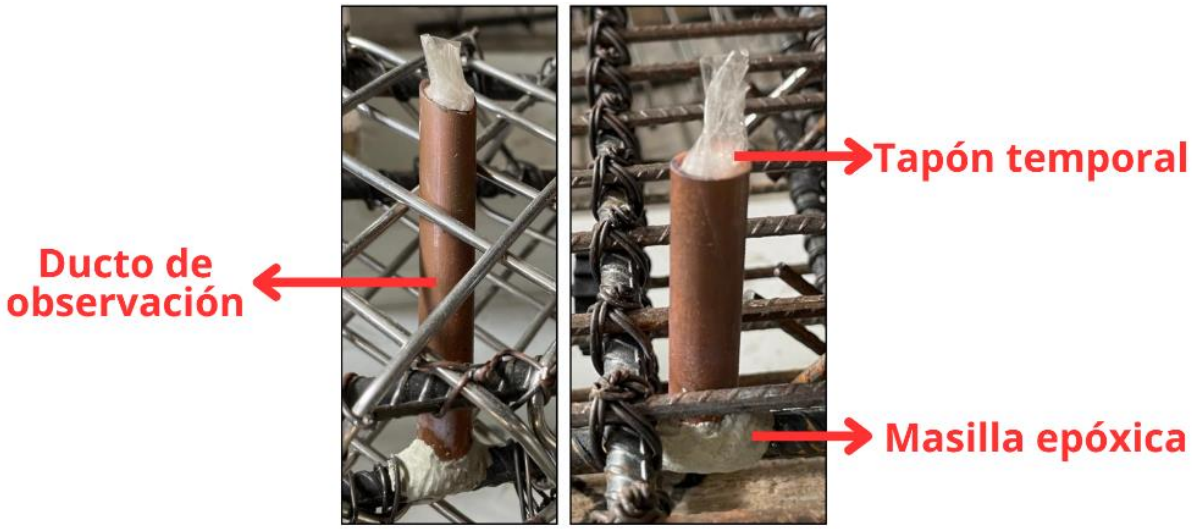


Figura 10. ***Ductos fijados a la armadura***

3.10. Sellado temporal de ductos

Tomando en consideración las observaciones de memorias anteriores Palacios, M (2025) y Ayaviri, R (2025), se ajustó el método de sellado para asegurar que el interior del tubo y la superficie de la barra queden libres de lechada durante el proceso de hormigonado, especialmente en la etapa de vibrado. En lugar de tapones de silicona moldeados, los cuales suelen dejar residuos difíciles de limpiar, se utilizó espuma de polietileno insertada a presión.

- Primero se cortaron cilindros de espuma con un diámetro igual o levemente superior al del tubo. Asegurando que al introducirlos queden ajustados a presión.
- Luego se envolvió con cinta de embalaje, dejando una parte sobre saliente, la cual, por un lado, minimiza la infiltración de lechada y, por otro, facilita la extracción del tapón luego de hormigonar.
- Después, los cilindros se empujan a presión dentro de los ductos **Figura 11.** hasta que la espuma quede al ras con el extremo exterior.
- Finalmente, como medida adicional, la cinta sobresaliente del tapón se sujetó al extremo exterior con más cinta de embalaje, reforzando el sellado y evitando cualquier desplazamiento durante el proceso de hormigonado.



Figura 11. ***Tapón interior de ductos***

3.11. Hormigonado de probetas

Se llevó a cabo en el Laboratorio Lemco del Departamento de Obras Civiles. Para este trabajo se utilizó una betonera, un vibrador de inmersión y otros materiales de apoyo. En la **Figura 12** se pueden ver las probetas durante la primera y segunda jornada de hormigonado.



Figura 12. ***Jornadas de hormigonado, primera y segunda de izquierda a derecha.***

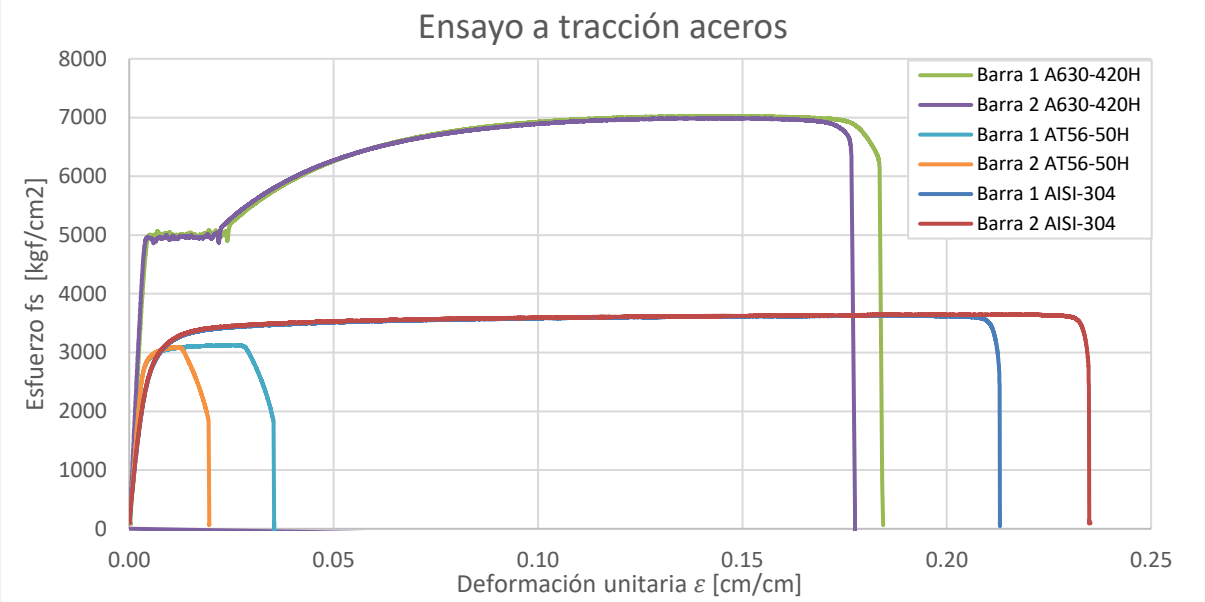
3.12. Ensayos

3.13. Probetas cilíndricas

Los ensayos de resistencia a compresión del hormigón se realizaron de acuerdo con la NCh1037.Of2009. El hormigón utilizado en los especímenes RKS-1, RKS-5 y RKS-6 alcanzó una resistencia de 23,83 [MPa], mientras que el correspondiente a RKS-2, RKS-3 y RKS-4 alcanzó 17,55 [MPa]. Los detalles de estos ensayos se presentan en la memoria de Vásquez, S. (2026).

3.14. Acero

Por cada tipo de material se ensayaron dos barras mediante la máquina MTS 810 del laboratorio. Los resultados se presentan en los gráficos a continuación.



Grafica 1. Curva e*sfuerzo vs deformación unitaria de los aceros utilizados.*

3.15. Montaje de la probeta en la mesa sísmica.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente del LEMCO. Para la ejecución de estos, la columna se fijó a los apoyos mediante pernos y mortero de nivelación, mientras que en el extremo libre de la viga se instaló un carro deslizante para restringir el movimiento fuera del plano. Los detalles del montaje, la fijación y alineación de la probeta, así como del sistema de aplicación de carga y adquisición de datos, se presentan en la memoria de Vásquez, S. (2026).

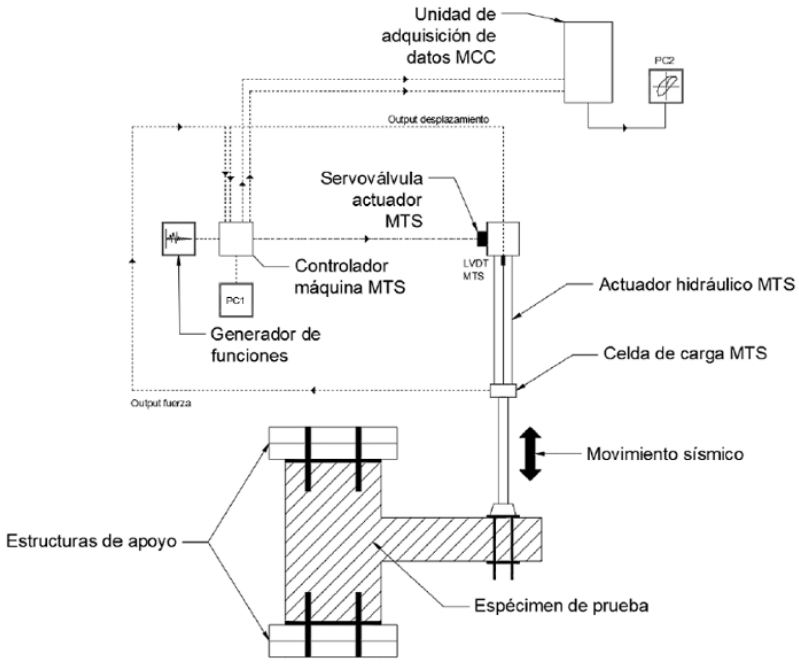


Figura 13. *Diagrama unilineal del sistema de ensayo (Maldonado, 2023).*

3.16. Montaje del sistema de observación.

Para la instalación de las cámaras endoscópicas destinadas a observar las barras longitudinales se consideró el movimiento de cada zona durante el ensayo. En la viga, se implementó un sistema de soporte en voladizo, similar al utilizado en investigaciones anteriores, como se muestra en la **Figura 14**. Esta configuración permitió que las cámaras acompañaran el desplazamiento de la viga durante el ensayo, sin interferir ni restringir su movimiento ni sufrir daños.

Las cámaras de la viga se fijaron al sistema en voladizo mediante bloques de acrílico perforados con una inclinación aproximada de 45°. Estos bloques permitieron orientar las cámaras hacia los ductos de observación y mantenerlas en posición. La alineación entre la cámara y el ducto fue necesaria para dirigir la vista de la cámara hacia la barra y evitar que se giraran hacia las paredes del ducto.

En el caso de la columna, las cámaras endoscópicas se instalaron mediante un soporte fijo, debido a que sus deformaciones resultaban despreciables.

Para reducir la holgura entre las cámaras y los ductos, se incorporó espuma de tapicería de baja densidad. Este material se introdujo en los espacios dentro de los ductos y se utilizó para limitar los pequeños movimientos de las cámaras que podían alterar el desplazamiento de las barras en las imágenes. Finalmente, las cámaras endoscópicas se aseguraron con cinta adhesiva de papel.

Además de las cámaras endoscópicas, se instalaron cámaras filmadoras para registrar el comportamiento general de la probeta acompañados de dos focos LED para iluminar los especímenes.

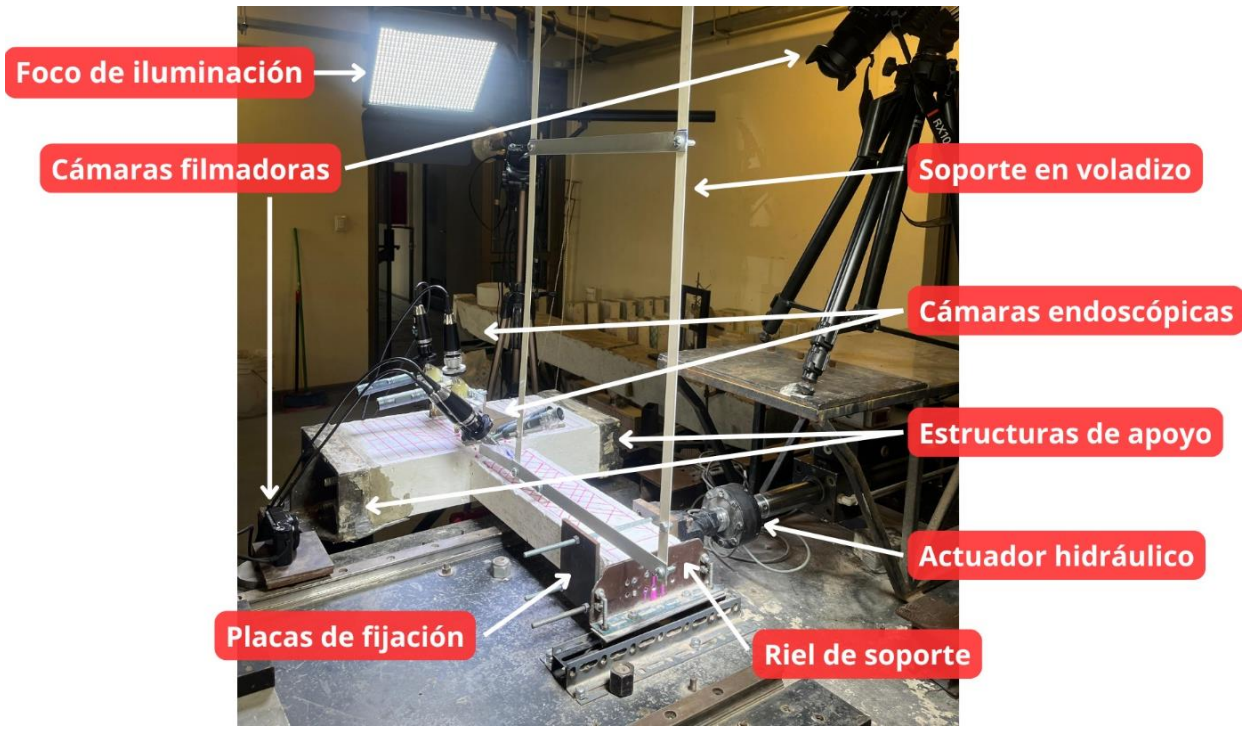


Figura 14. ***Montaje y disposición sistema en voladizo de ensayos.***

Capítulo IV
Sistema de observación

4.1. Antecedentes

Debido a la imposibilidad de observar directamente el comportamiento y nivel de deformaciones que existen en las barras longitudinales de la viga, se vio en la necesidad de establecer un método de observación que no altere el comportamiento de estas.

Como se dijo antes, métodos tradicionales, como los *strain gauges*, presentan limitaciones para registrar grandes deformaciones cíclicas, ya que el adhesivo puede perder adherencia y el cable conductor del sensor puede fallar por fatiga. Estas dificultades pueden interrumpir la medición antes de alcanzar las etapas de mayor interés, como el pandeo o la fractura de las barras.

Por esta razón, se implementó un sistema de cámaras endoscópicas como la que se muestra en la **Figura 15** que permite registrar el movimiento de las barras a través de ductos de observación al interior del hormigón. Esta novedosa técnica fue empleada por primera vez en la UTFSM por Palacios, M.(2025) y Ayaviri, R.(2025).

A partir de los videos se determinan los desplazamientos de diferentes puntos de una barra y se estima la deformación unitaria del tramo comprendido entre ellos. Además, las imágenes permiten observar el deslizamiento de las barras respecto del hormigón y el deterioro de su entorno, aportando antecedentes para interpretar el comportamiento en los diferentes puntos de observación.

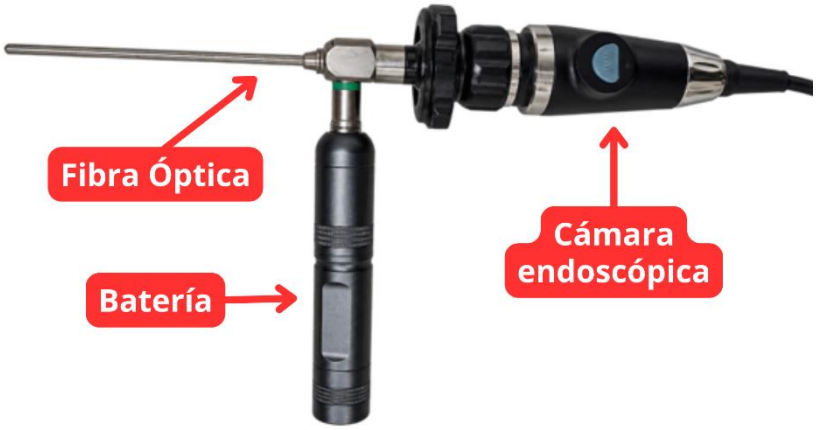


Figura 15. Cámara endoscópica.

4.2. Características técnicas

Las cámaras utilizadas corresponden al modelo ENT1080p y permiten registrar imágenes al interior de ductos de observación incorporados en los especímenes, son dispositivos diseñados originalmente para procedimientos médicos menores. Sus características principales son:

- Resolución: 2.07 megapíxeles (Full HD)
- Velocidad de captura: 60 cuadros por segundo (FPS)
- Sistema de fibra óptica intercambiable que incorpora iluminación de alta intensidad
- Conexión USB para visualización y registro mediante monitores

4.3. Distribución de cámaras

La ubicación de cámaras se distribuyó en la viga y en la columna para observar el comportamiento de las barras longitudinales en dos zonas de interés, como se muestra en la **Figura 16**, según dos objetivos de medición:

- En la viga se dispusieron dos puntos de observación V1 y V2, con una separación de 5 cm, con el propósito de registrar el comportamiento y nivel de deformación de las barras en la zona de la rótula plástica.

- En la columna se dispusieron los puntos C1 y C2, con una separación de 15 cm entre los ductos de observación. Su propósito fue observar el desplazamiento de las barras longitudinales de la viga al interior de la columna y evaluar la pérdida progresiva de adherencia durante los ensayos en la zona de anclaje.

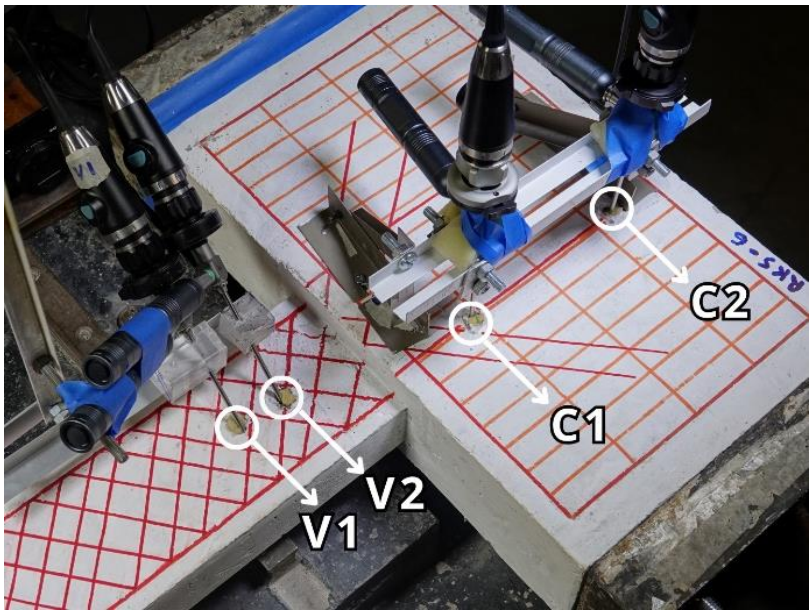


Figura 16. Distribución de cámaras endoscópicas en los especímenes.

4.4.Software de Procesamiento y Análisis digital

4.5. Captura de Video

Para la visualización y grabación de las imágenes de las cámaras endoscópicas se utilizó OBS Studio. Las cámaras se conectaron mediante USB a un computador. Uno de los computadores empleados tenía capacidad de procesamiento que permitió grabar dos cámaras simultáneamente.

4.6. Sincronización de imágenes

Los videos de las cámaras endoscópicas C1, C2, V1 y V2 se sincronizaron mediante CapCut, utilizando como apoyo el registro de la cámara principal Nikon ubicada sobre la probeta. Esta última proporciono una vista general del ensayo.

La sincronización permitió comparar imágenes en un mismo instante y relacionar el movimiento de las barras con el comportamiento general de la probeta, como se muestra en la **Figura 17.** De estos registros se seleccionaron los momentos de mayor interés que se presentan en el capítulo de resultados y análisis. La medición de los desplazamientos se realizó posteriormente con el programa de análisis de imágenes.

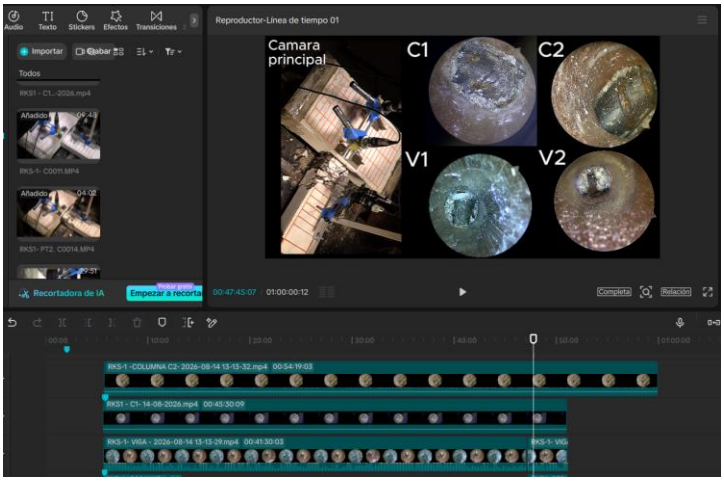


Figura 17. ***Sincronización de videos, CapCut.***

4.7. Procesamiento y obtención de desplazamientos

Los videos obtenidos mediante las cámaras endoscópicas fueron procesados mediante un programa de análisis de imágenes creado por Jorge Lagos, para su memoria todavía en desarrollo.

El programa permite seguir simultáneamente dos regiones de interés dentro de cada video. La primera región se ubica sobre la barra longitudinal y se identifica como ROI1, representada mediante el rectángulo de color calipso de la **Figura 18**. La segunda corresponde a una región fija de referencia, identificada como ROI2 y representada mediante el rectángulo naranjo en la misma figura.

A partir del seguimiento de ambas regiones, el programa determina el desplazamiento de ambas regiones a lo largo del tiempo y genera un archivo CSV para cada una. Estos archivos contienen los datos utilizados para obtener las gráficas que se muestran en la misma figura y cálculos posteriores.

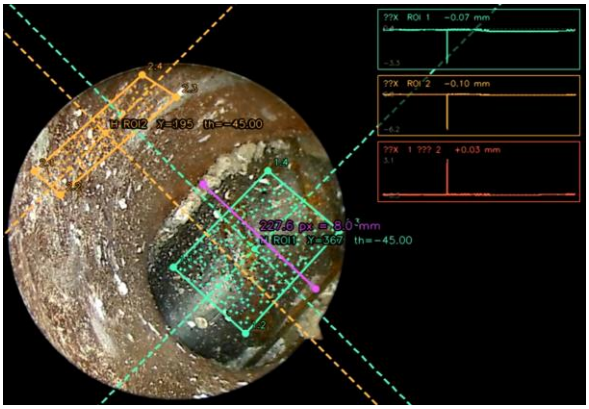


Figura 18. ***Programa de medición de la deformación de las barras longitudinales, Jorge Lagos.***

Cuando la barra queda parcialmente cubierta por material desprendido, como poxilina u hormigón, es necesario ajustar el seguimiento de imágenes para evitar que el programa confunda el movimiento de estos fragmentos con el de la barra. Para ello, se amplía la región de interés ROI1, correspondiente a la barra longitudinal, para abarcar una mayor superficie de esta. Además, se aplica un filtro de color que permite seleccionar los puntos de la barra y excluir los del material desprendido. En la **Figura 19** se muestra la región ROI1 ampliada, delimitada en color calipso, y los puntos utilizados para el seguimiento. Este ajuste permite continuar la medición mientras exista una superficie visible suficiente de la barra.

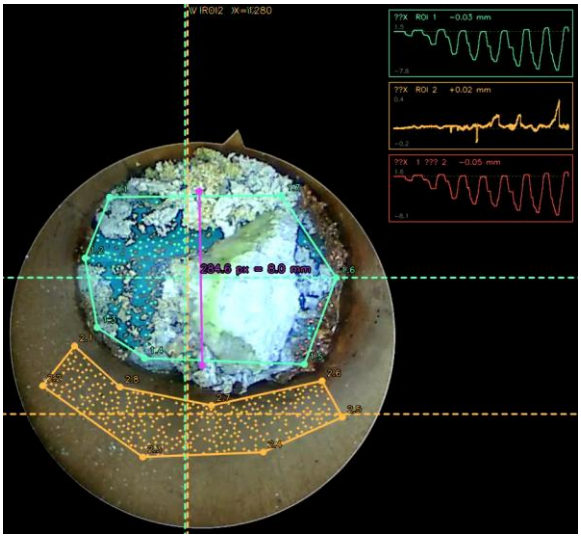


Figura 19. ***Modificación del programa de medición con desprendimiento de material.***

4.7.1. Desplazamiento de la barra respecto de la referencia.

Debido a que las cámaras pueden experimentar pequeños movimientos durante los ensayos, el desplazamiento registrado directamente sobre la barra no corresponde necesariamente a su movimiento real. Para compensar este efecto, se resta el desplazamiento de ROI2 al de ROI1.

En las cámaras de la columna, el cálculo se realiza mediante:

$$\delta_{C1}(t) = \delta_{ROI1,C1}(t) - \delta_{ROI2,C1}(t) \quad (1)$$
$$\delta_{C2}(t) = \delta_{ROI1,C2}(t) - \delta_{ROI2,C2}(t) \quad (2)$$

En las cámaras de la viga se aplica el mismo procedimiento:

$$\delta_{V1}(t) = \delta_{ROI1,V1}(t) - \delta_{ROI2,V1}(t) \quad (3)$$
$$\delta_{V2}(t) = \delta_{ROI1,V2}(t) - \delta_{ROI2,V2}(t) \quad (4)$$

Donde;

$\delta_{ROI1,C1}(t)$: Desplazamiento registrado sobre la barra
$\delta_{ROI2,C1}(t)$: Desplazamiento registrado sobre la región de referencia
$\delta_{C1}(t)\ y\ \delta_{C2}(t)$: Desplazamientos de la barra respecto a las referencias en las cámaras de la Columna.
$\delta_{V1}(t)\ y\ \delta_{V2}(t)$: Desplazamientos de la barra respecto a las referencias en las cámaras de la Viga
t: Tiempo transcurrido durante el ensayo

Estos valores corresponden al movimiento relativo de la barra en cada punto observado, no al desplazamiento global de esta.

4.7.2. Cambio de longitud del tramo observado

A partir de los desplazamientos corregidos obtenidos para ambas cámaras, se determina la diferencia de los desplazamientos relativos entre los puntos de observación. Este valor corresponde al cambio de longitud o alargamiento medido en el tramo de barra comprendido entre ambas posiciones.

Para la columna:

$$\Delta L(t) = \delta_{C2}(t) - \delta_{C1}(t) \quad (5)$$

Para la viga:

$$\Delta L(t) = \delta_{V2}(t) - \delta_{V1}(t) \quad (6)$$

4.7.3. Deformación unitaria

La deformación unitaria se obtiene dividiendo el cambio de longitud del tramo por la distancia inicial entre las cámaras, considerando esta longitud como Lg.

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta L(t)}{L_g} \quad (7)$$

Los valores máximos de alargamiento obtenidos mediante este procedimiento son utilizados posteriormente como parámetro de comparación con el fin de evaluar si el alargamiento medido alcanza el valor esperado para el inicio de fluencia en el tramo observado.

Capítulo V
Resultados experimentales

5.1. Ciclos de carga por nivel

Los ciclos del plan de carga se realizaron según la base estándar de los otros ensayos ejecutados dentro del LEMCO, a pesar de esto, hubo variaciones los cuales se indican en la siguiente tabla.

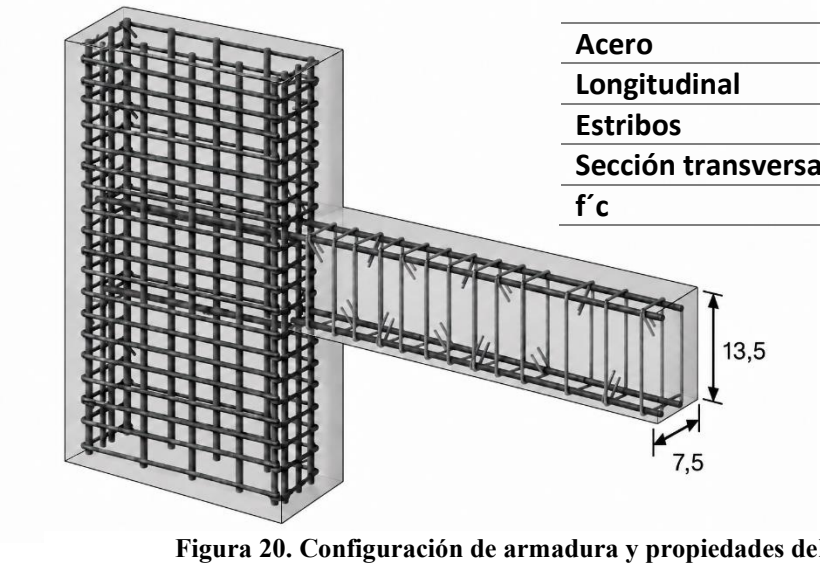
Tabla 3. ***Cantidad de ciclos por Nivel de desplazamiento.***

Nivel de desplazamiento	Estándar	RKS1	RKS2	RKS3	RKS4	RKS5	RKS6
5 [mm]	5	-	5	-	5	-	5
10 [mm]	5	-	5	-	5	-	5
15 [mm]	5	-	5	-	5	5	5
20 [mm]	5	-	5	-	5	5	5
25 [mm]	10	10	10	5	10	10	10
30 [mm]	5	4	-	3	3	3	5

5.2. Desglose por probeta

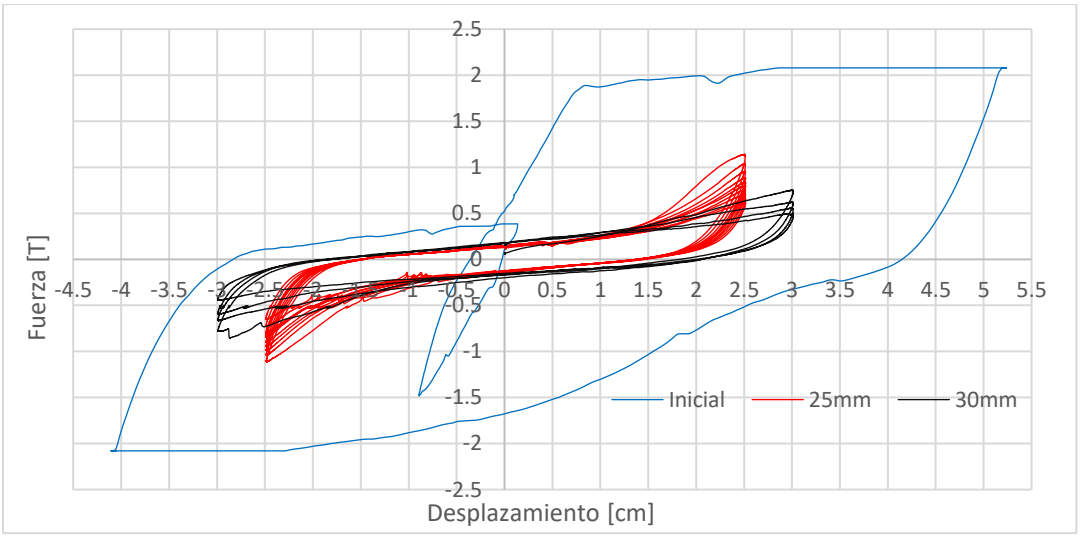
A continuación, se presentan los detalles de cada probeta. Cabe destacar que el análisis de las curvas de histéresis y los daños de las probetas se encuentra en la memoria de Vasquez, S. (2026).

5.3. RKS1, Ancho referencial con estribos ortogonales



Acero	Diámetro	Calidad
Longitudinal	Φ8	A630-420H
Estribos	Φ3,2	AISI-304
Sección transversal	13,5 x 7,5 [cm]	
f´c	**23,83 [Mpa]**	

Figura 20. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS1.



Grafica 2. ***Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS1.***

Al inicio del ensayo de la probeta RKS1 se produjo una activación accidental del sistema de carga, provocando un desplazamiento de gran magnitud en una sola dirección. Este evento alteró la secuencia de carga, por lo que no se siguió el protocolo de ciclos previsto. Los resultados de fuerza y desplazamiento y el análisis del comportamiento general de la probeta se presentan en la memoria de Vásquez, S. (2026).

Durante el ensayo también se presentaron problemas de grabación. El registro de la cámara C2 tuvo varias interrupciones posteriores, lo que impidió disponer de registros simultáneos y continuos de C1 y C2 para calcular la deformación unitaria del tramo de barra observado en la columna. En la viga, los registros de V1 y V2 presentaron congelamientos de imagen y saltos en el seguimiento, asociados a problemas de comunicación entre las cámaras y el computador. Estos saltos no se consideraron confiables para representar el desplazamiento real de las barras.

Por estas razones, no se presentan gráficas de deformación unitaria de este espécimen. Se incluye únicamente el desplazamiento registrado por la cámara C1. Asimismo, debido a la alteración del protocolo de carga, el registro fotográfico se limita al inicial y final del ensayo.

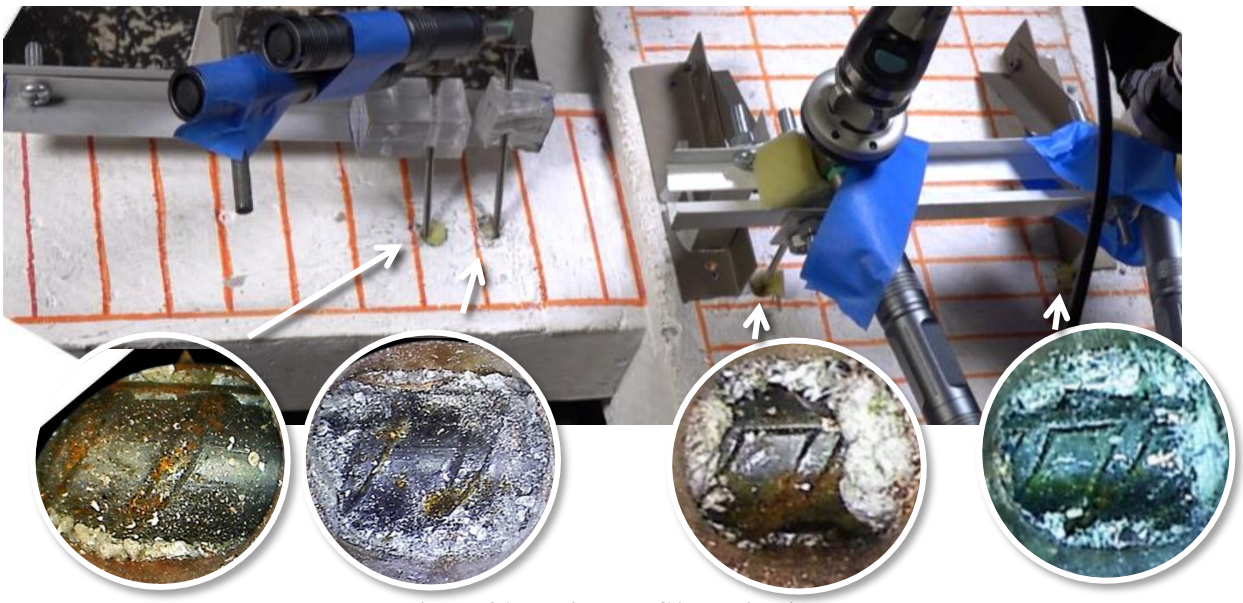


Figura 21. ***Probeta RKS1, previo al ensayo.***

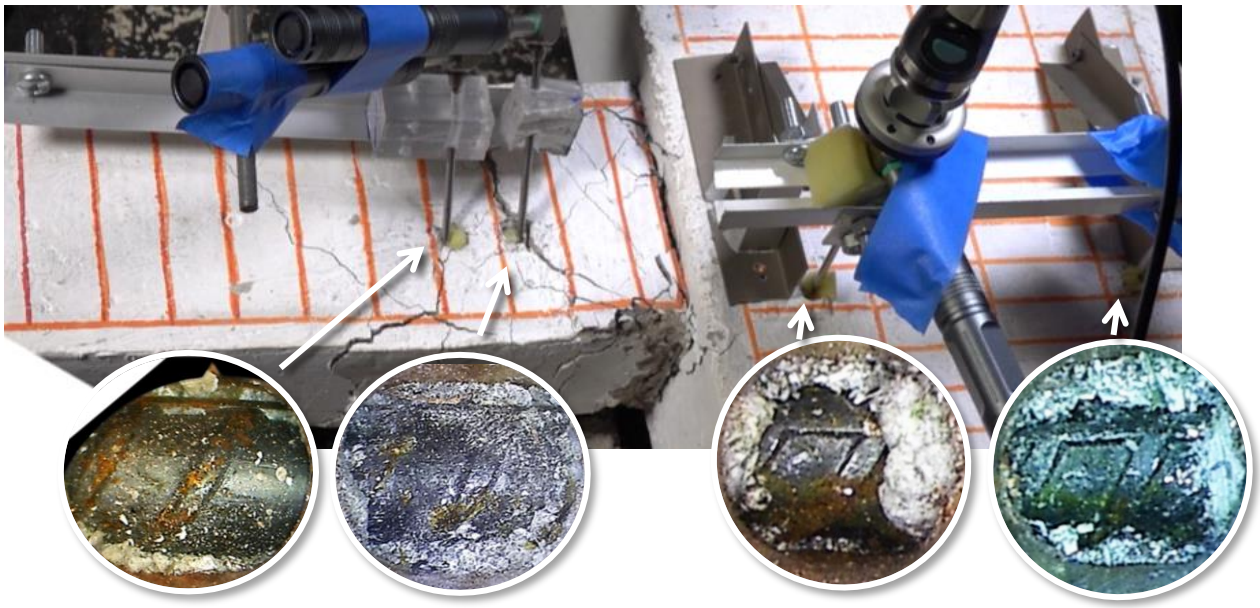
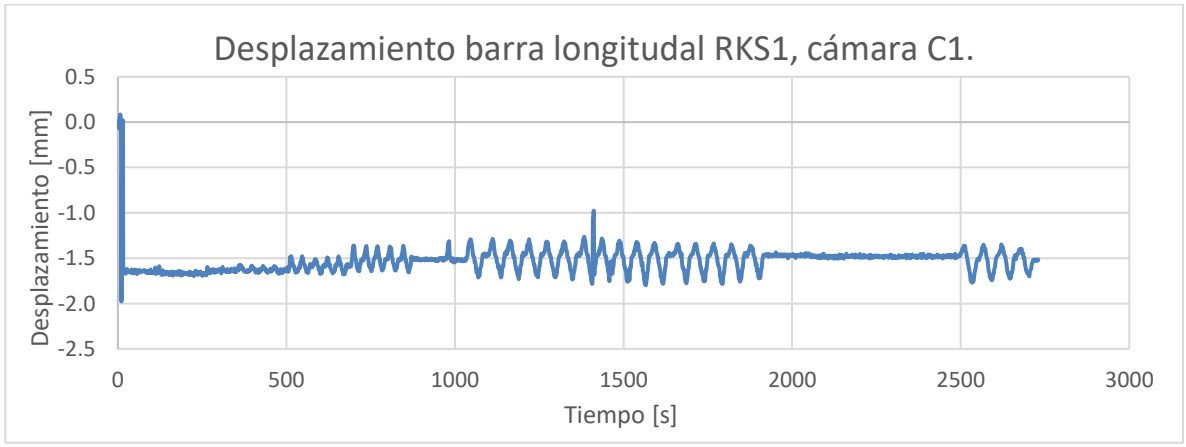
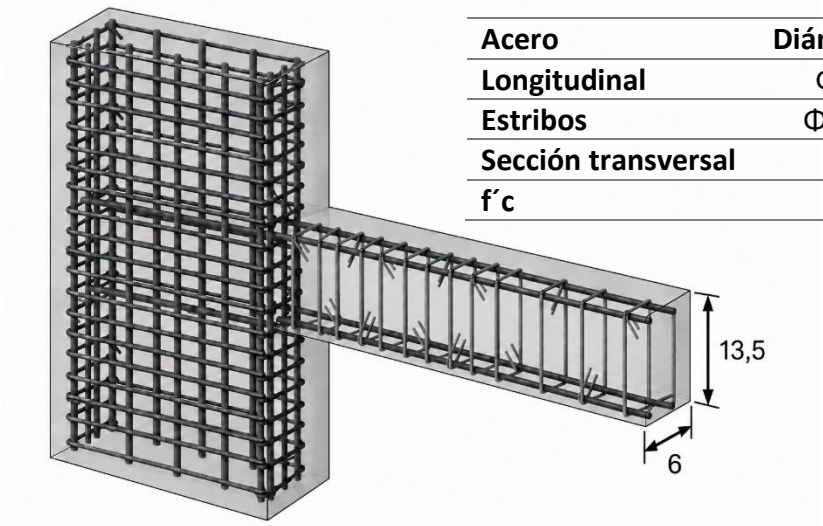


Figura 22. Probeta RKS1, posterior al ensayo.



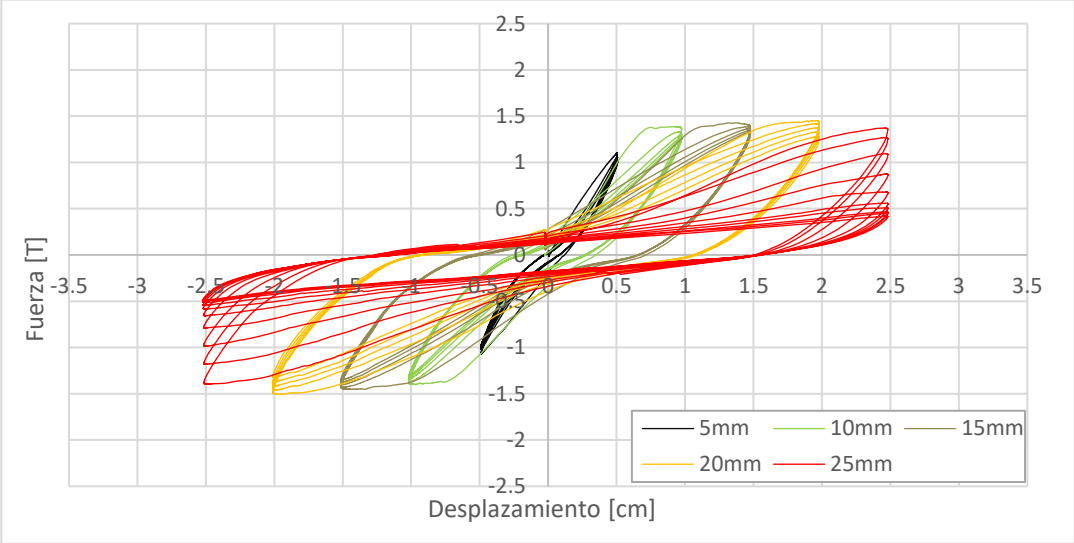
Grafica 3. ***Desplazamiento barra longitudinal con cámara endoscópica C1***

5.4. RKS2, Angostada con estribos ortogonales



Acero	Diámetro	Calidad
Longitudinal	Φ8	A630-420H
Estribos	Φ3,2	AISI-304
Sección transversal	13,5 x 6 [cm]	
f´c	17,55 [Mpa]	

Figura 23. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS2.



Grafica 4. ***Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS2.***

En la zona de la columna, el movimiento de la barra observada mediante la cámara C1 se hizo visible desde el quinto ciclo de 5 [mm]. En la cámara C2, el movimiento comenzó a distinguirse a partir del segundo ciclo de 10 [mm]. Desde el segundo ciclo de 25 [mm], los desplazamientos fueron más evidentes en ambas cámaras.

Al finalizar el tercer ciclo de 25 [mm], las cámaras de la viga dejaron de grabar por falta de espacio de almacenamiento en el computador. Por esta razón, no se dispone de imágenes del cuarto y quinto ciclo de este nivel, y se excluyó ese intervalo del análisis de desplazamientos, deformaciones de la viga y el registro fotográfico presentado a continuación. Tras completar el quinto ciclo, se interrumpió el ensayo para solucionar el problema de almacenamiento. Luego se reanudó y se completaron los ciclos sexto a décimo de 25 [mm]. Durante el séptimo ciclo se observó el inicio de la torsión de la viga, motivo por el cual no se realizaron los ciclos de 30 [mm]. El ensayo finalizo sin que se produjera la fractura de las barras longitudinales.

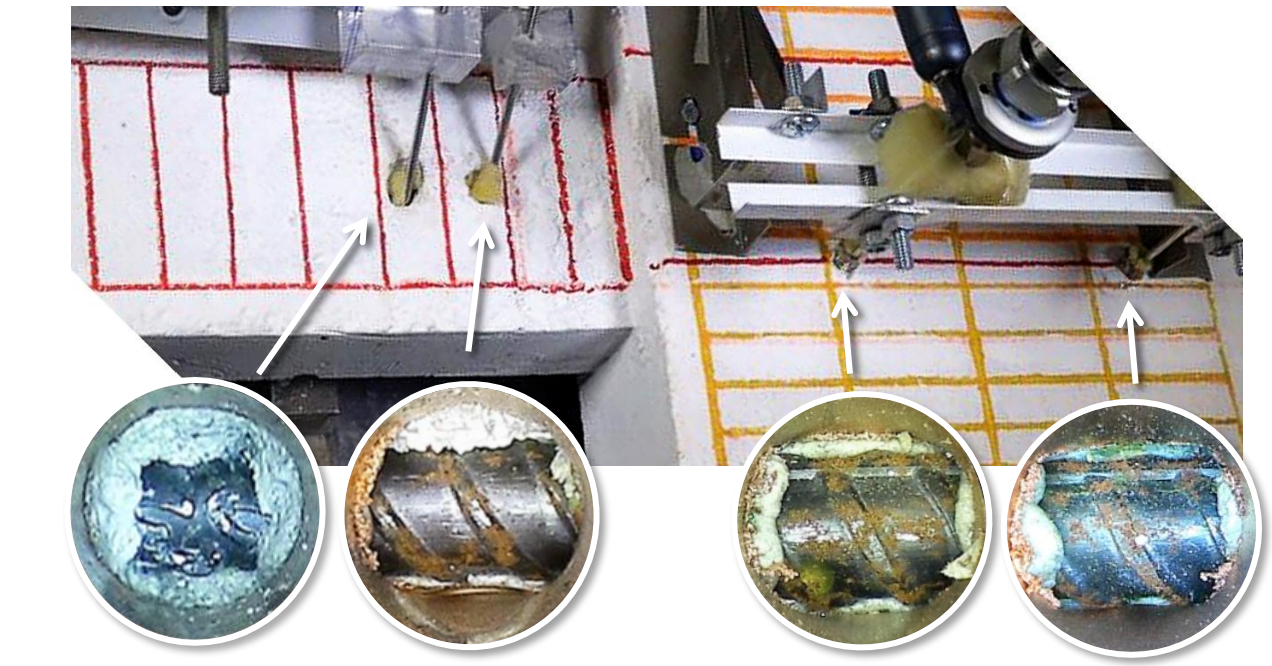


Figura 24. Probeta RKS2, previo al ensayo.

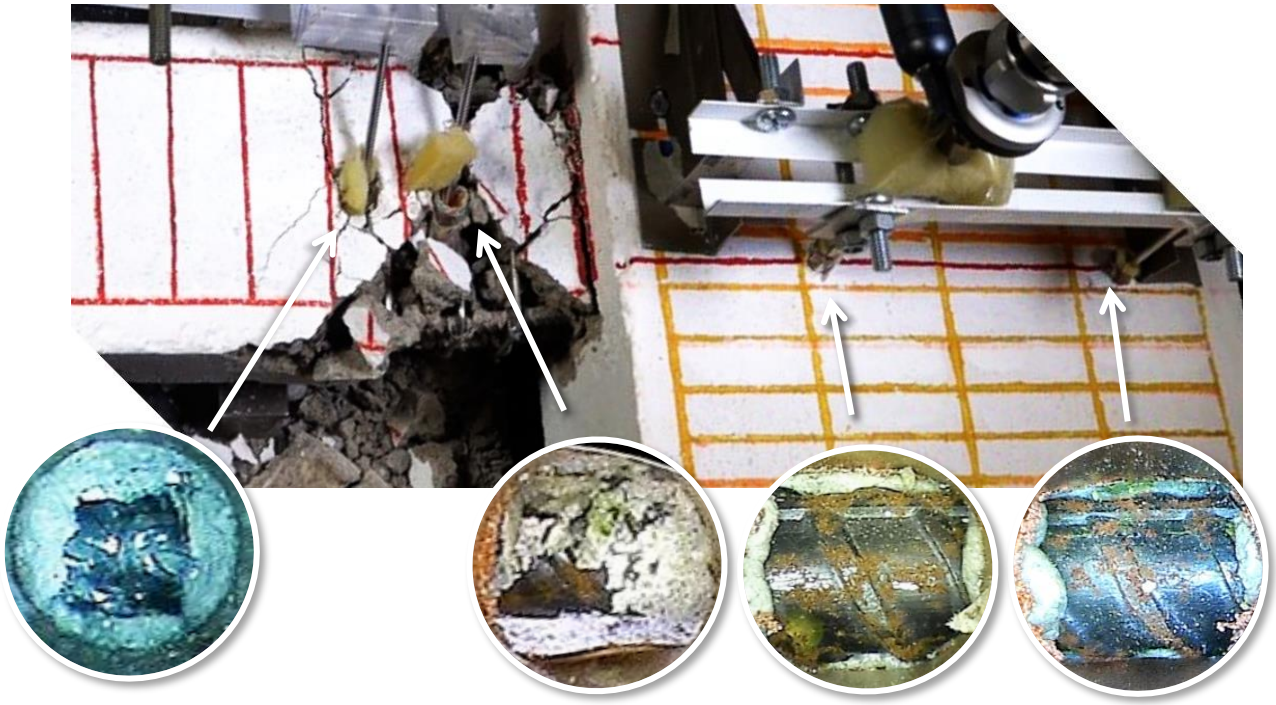


Figura 25. Probeta RKS2, posterior al ensayo.

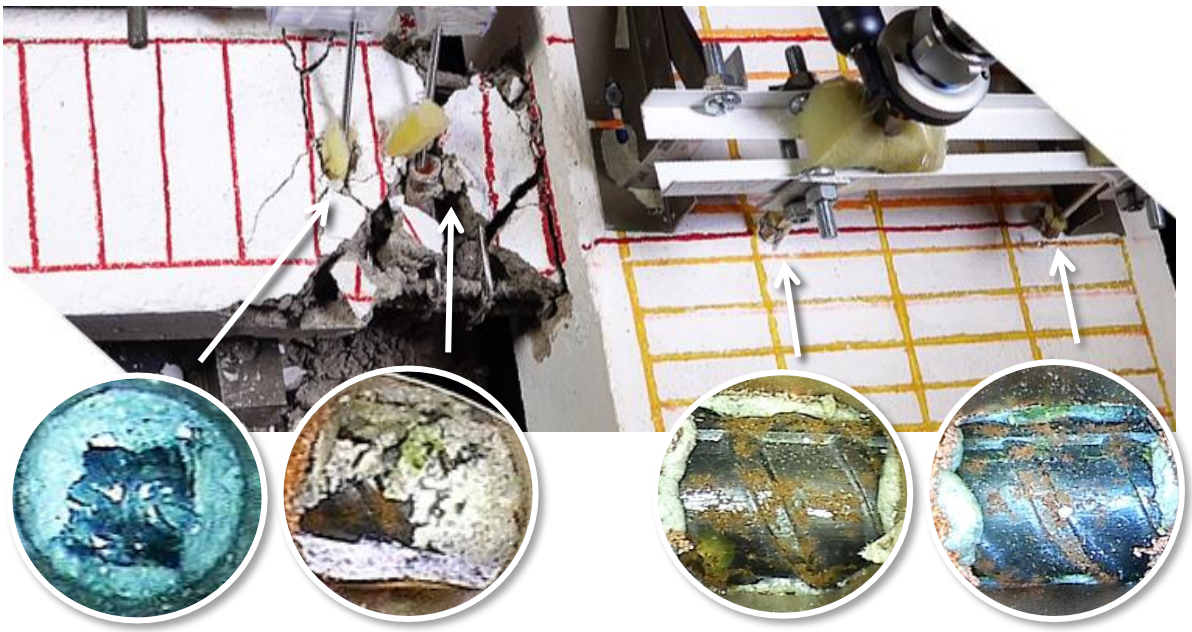


Figura 26. Probeta RKS2, 10° Ciclo Positivo 25[mm]

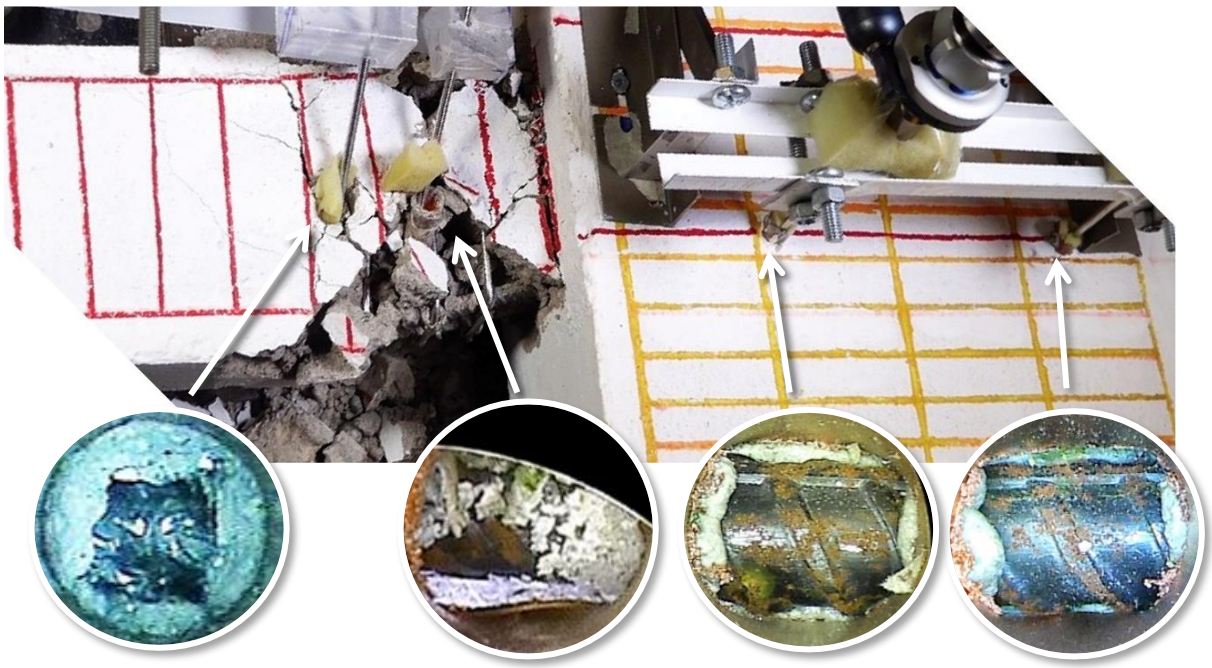
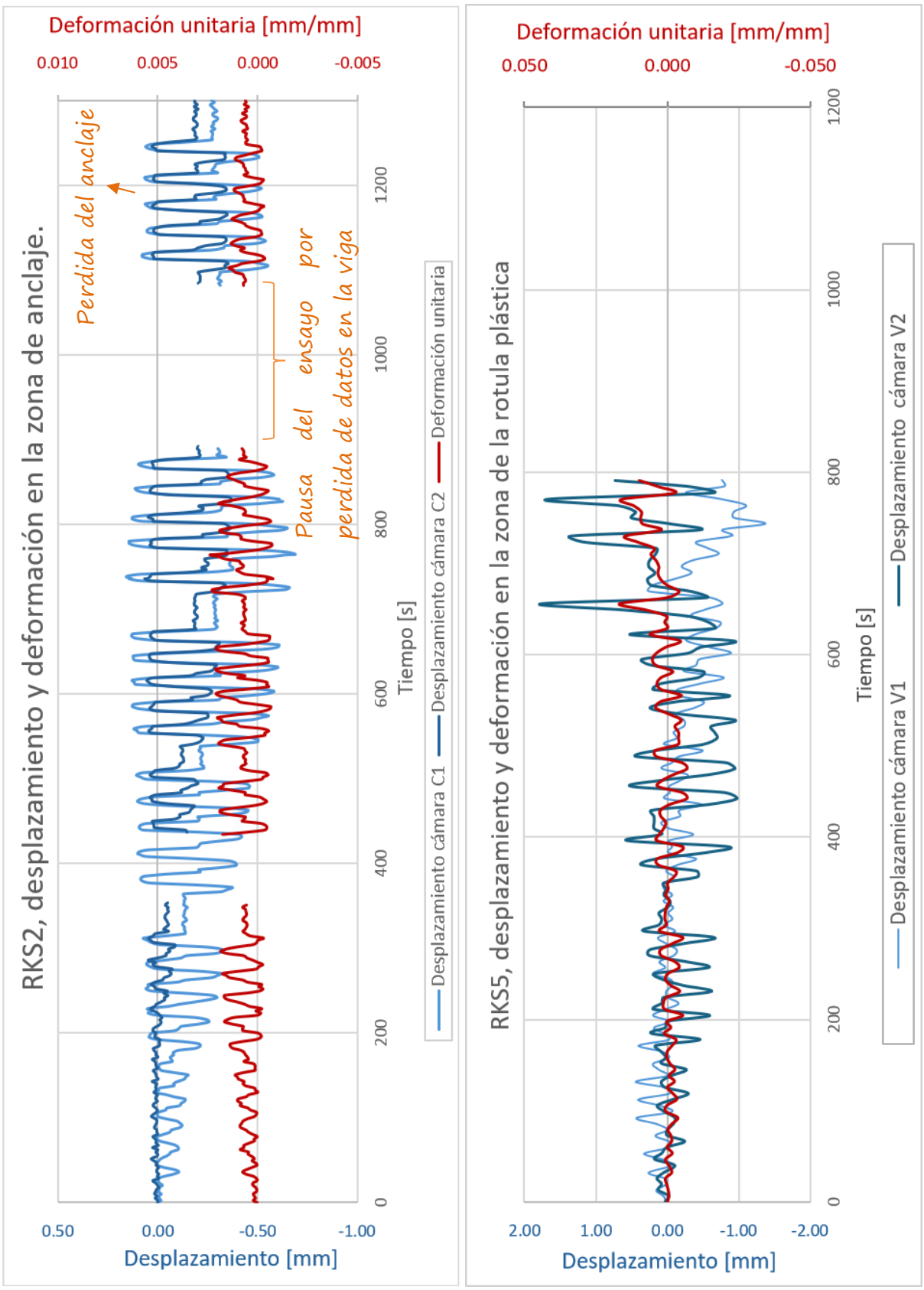
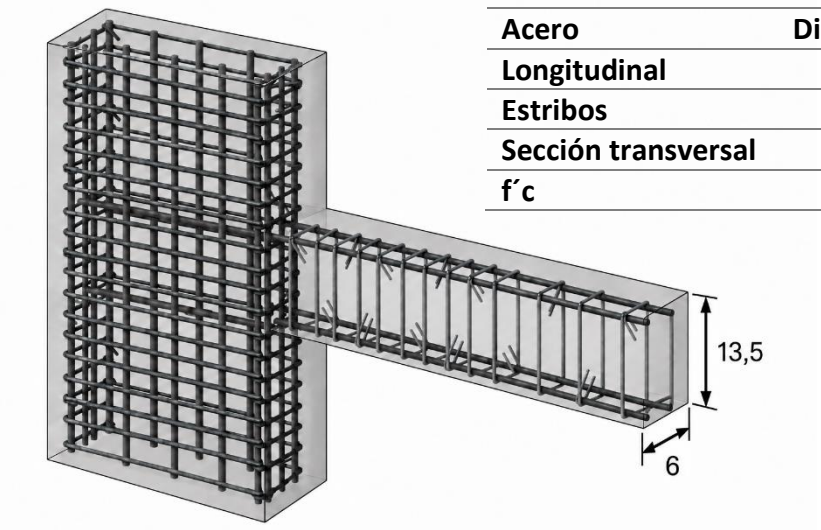


Figura 27. Probeta RKS2, 10° Ciclo Negativo 25[mm]



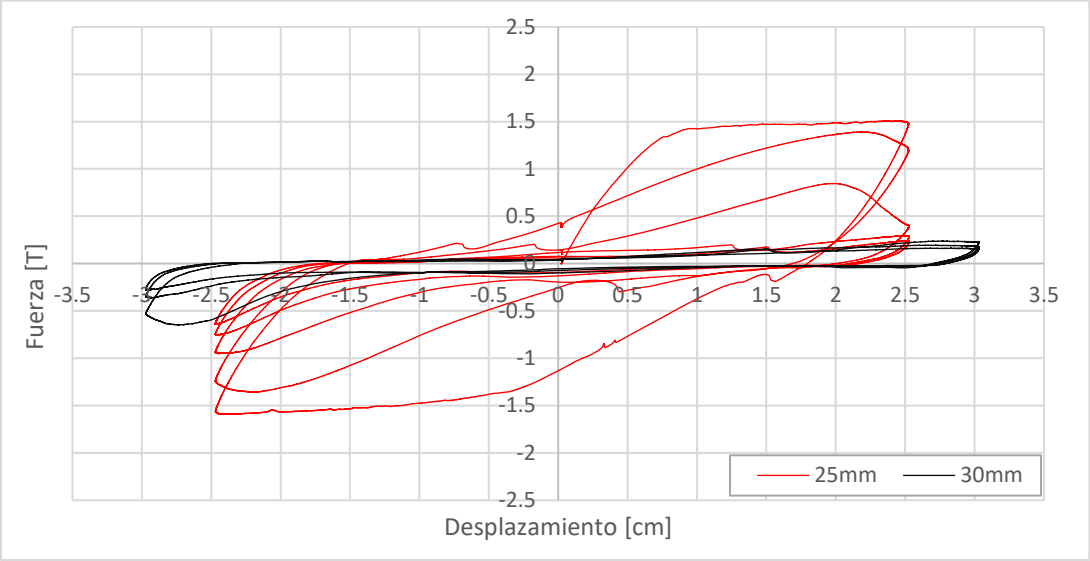
Grafica 5. ***Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS3.***

5.5. RKS3, Angostada con estribos ortogonales



Acero	Diámetro	Calidad
Longitudinal	Φ8	A630-420H
Estribos	Φ3,2	AISI-304
Sección transversal	13,5 x 6 [cm]	
f´c	**17,55 [Mpa]**	

Figura 28. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS3.



Grafica 6. ***Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS3.***

Desde el nivel de 25 [mm], las cámaras endoscópicas C1 y C2 permitieron observar el desplazamiento de las barras longitudinales en la zona de la columna. A partir del tercer ciclo de este nivel se produjo un desprendimiento considerable de hormigón y de la poxilina dispuesta alrededor de las barras. La acumulación de material aumentó durante los ciclos de 30 [mm], dificultando la visualización de las barras hacia el final del ensayo. Por esta razón, fue necesario ajustar el procedimiento de seguimiento de imágenes para identificar el movimiento de la barra y evitar que el desplazamiento de los fragmentos de poxilina se incorporara a la medición. Sin embargo, en el último ciclo la barra dejo de distinguirse, por lo que estos registros se excluyeron del análisis.

En la zona de la viga, las cámaras V1 y V2 registraron desplazamientos de las barras desde el inicio del ensayo, sin que se observaran desprendimientos de material en su entorno. El ensayo finalizó al completar el tercer ciclo de 30 [mm], sin que se produjera la fractura de las barras longitudinales. Por lo tanto, no se dispone del registro fotográfico del quinto ciclo de este nivel.

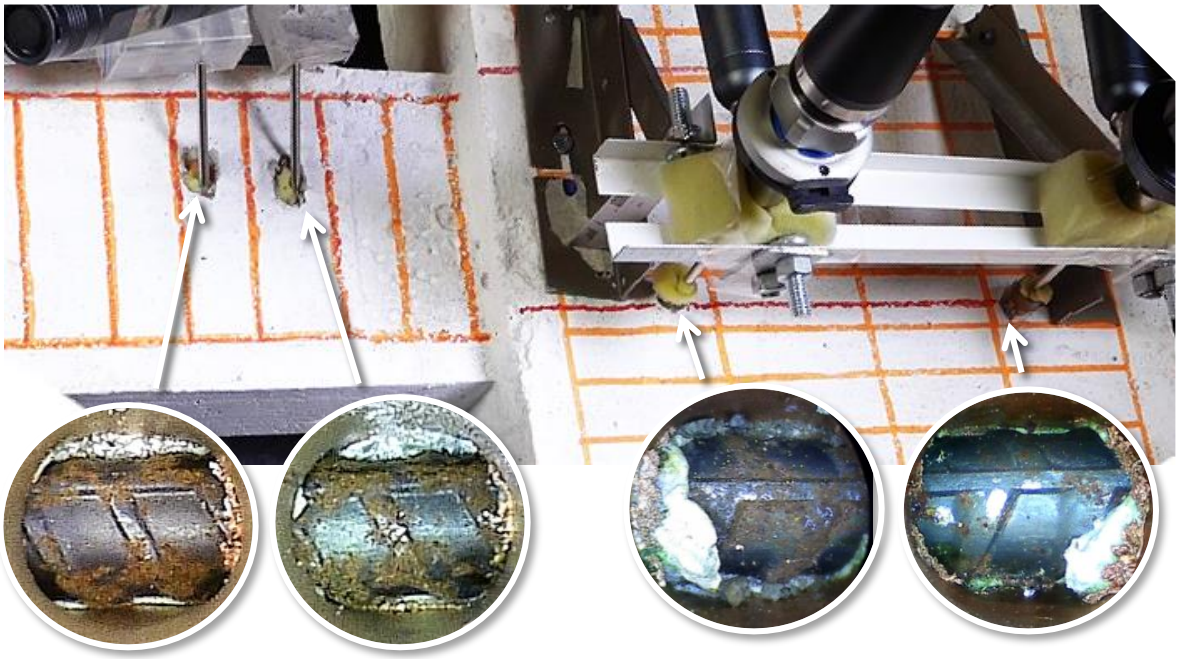


Figura 29. ***Probeta RKS3, previo al ensayo.***

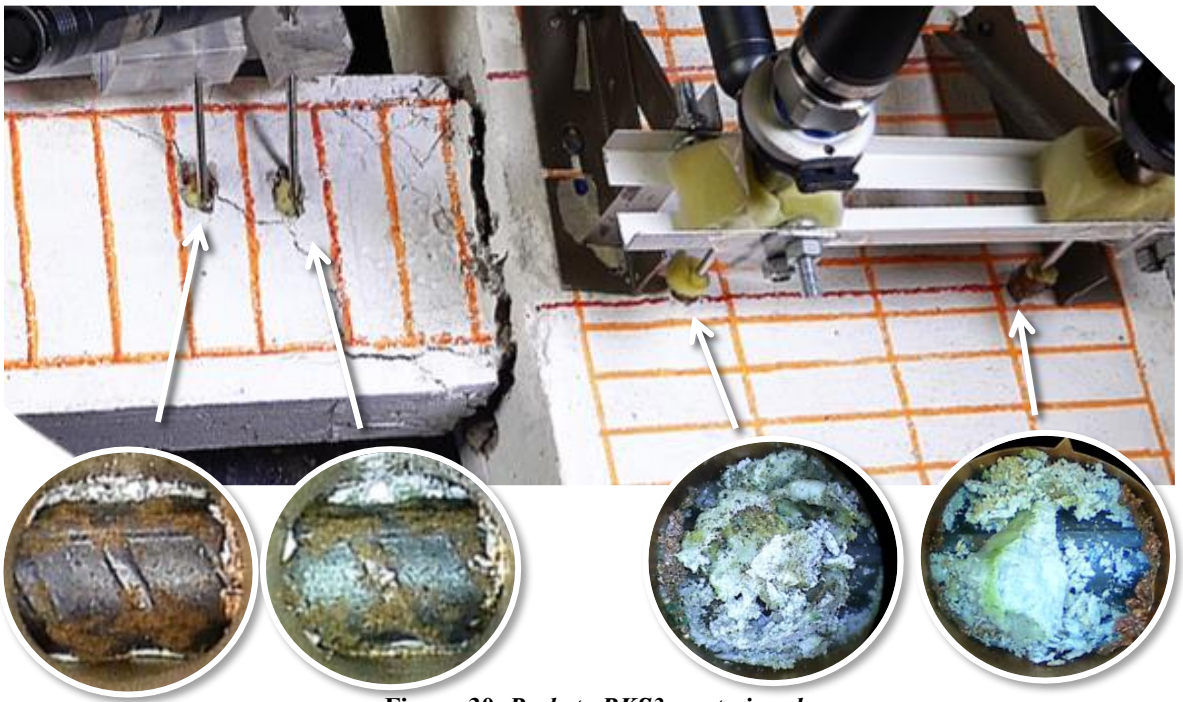


Figura 30. ***Probeta RKS3, posterior al ensayo.***

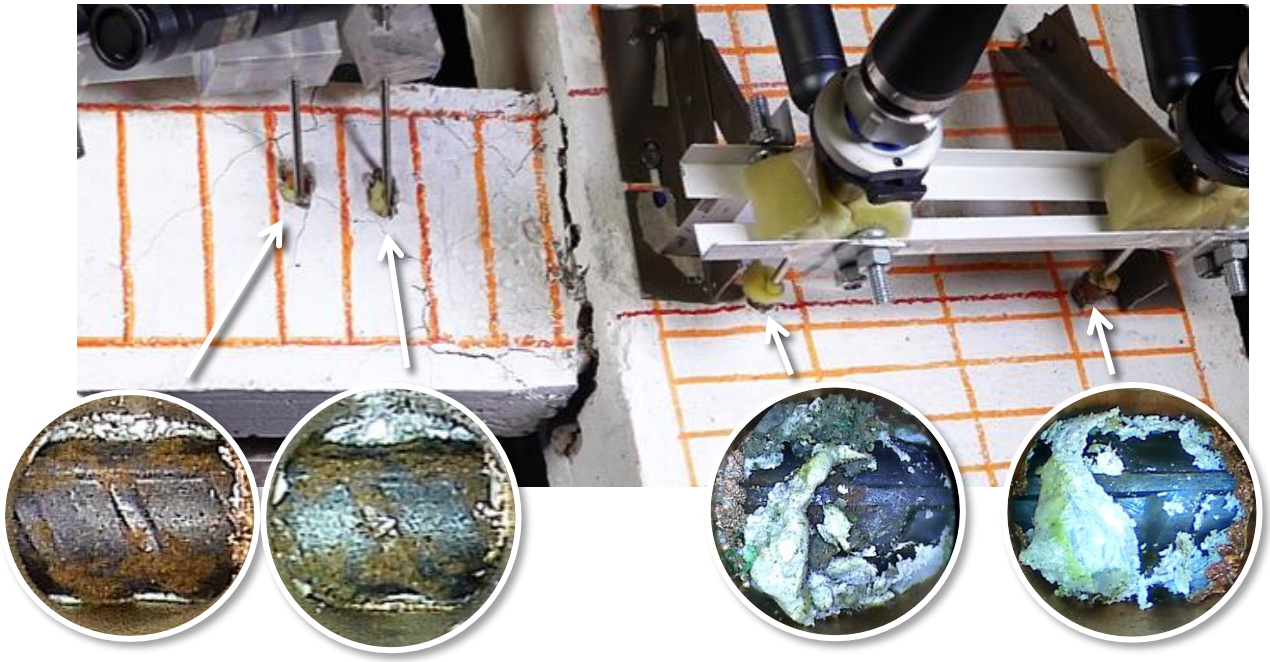


Figura 31. Probeta RKS3, 5° Ciclo Positivo 25[mm].

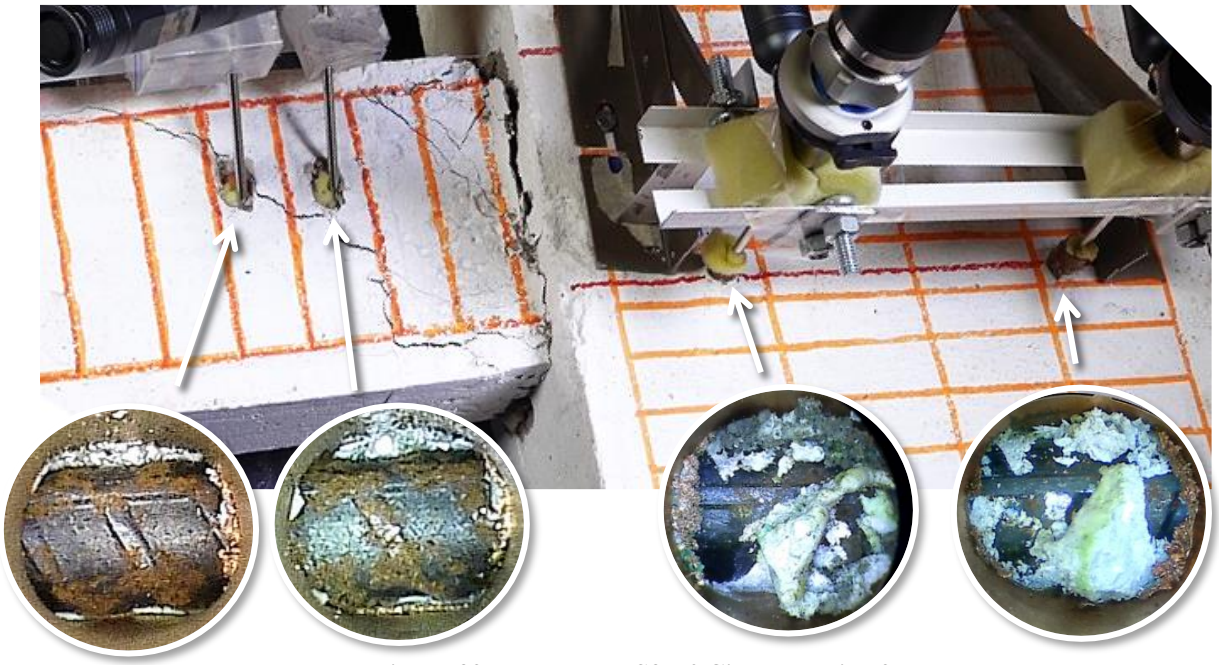
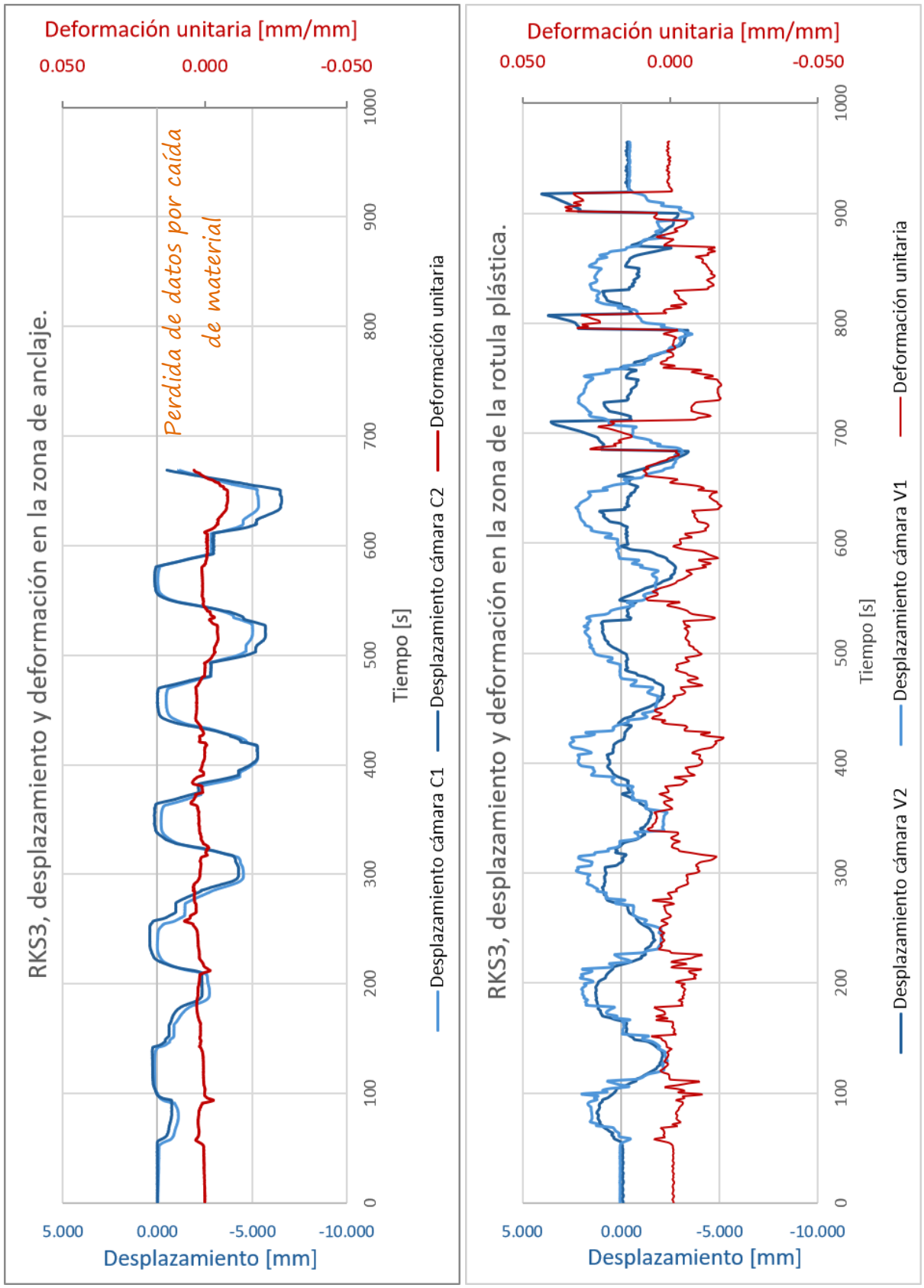
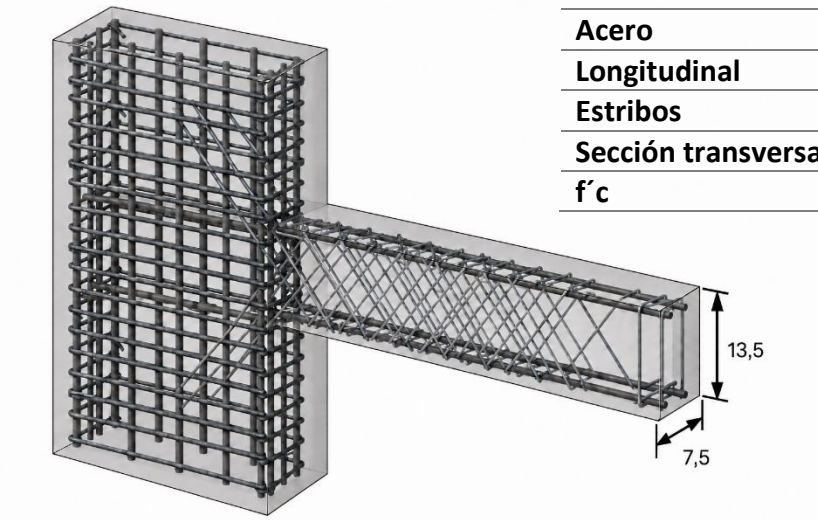


Figura 32. Probeta RKS3, 5° Ciclo Negativo 25[mm].



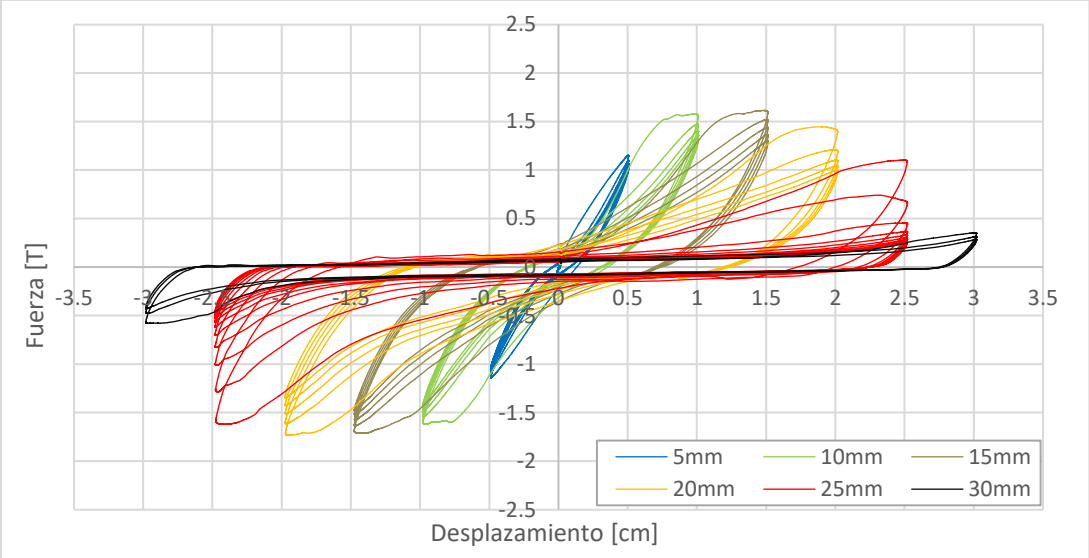
Grafica 7. ***Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS3.***

5.6. RKS4, Ancho referencial con estribos inclinados.



Acero	Diámetro	Calidad
Longitudinal	Φ8	A630-420H
Estribos	Φ3,2	AISI-304
Sección transversal	13,5 x 7,5 [cm]	
f´c	**17,55 [Mpa]**	

Figura 33.Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS4.



Grafica 8. ***Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS4.***

Desde el primer ciclo de 10 [mm] se observaron desplazamientos de la barra mediante las cámaras C1 y C2 siendo más notorio el desplazamiento registrado con la cámara C1, los cuales se hicieron más evidentes a partir del primer ciclo de 15 [mm].

Durante el cuarto ciclo de 20 [mm] comenzó a desprenderse la poxilina ubicada alrededor de la barra. El desprendimiento aumentó progresivamente desde el tercer ciclo de 25 [mm], acompañado de movimientos más pronunciados de las barras. Sin embargo, no se observaron fisuras ni desprendimientos importantes del hormigón fuera de la zona de arranque de la viga.

Por su parte, las gráficas de deformación unitaria de los tramos observados en la columna y en la viga mostraron pequeñas deformaciones. Esto se debe a que la deformación depende de cuánto se alarga o acorta el tramo observado, y no de cuánto se desplaza la barra.

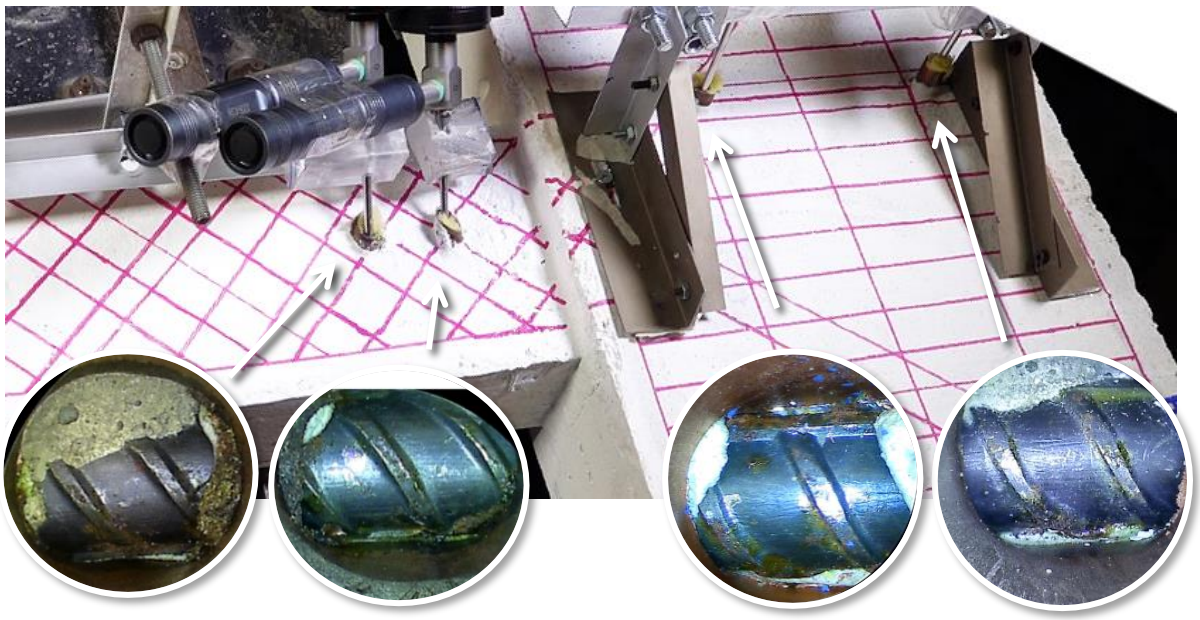


Figura 34. ***Probeta RKS4, previo al ensayo.***

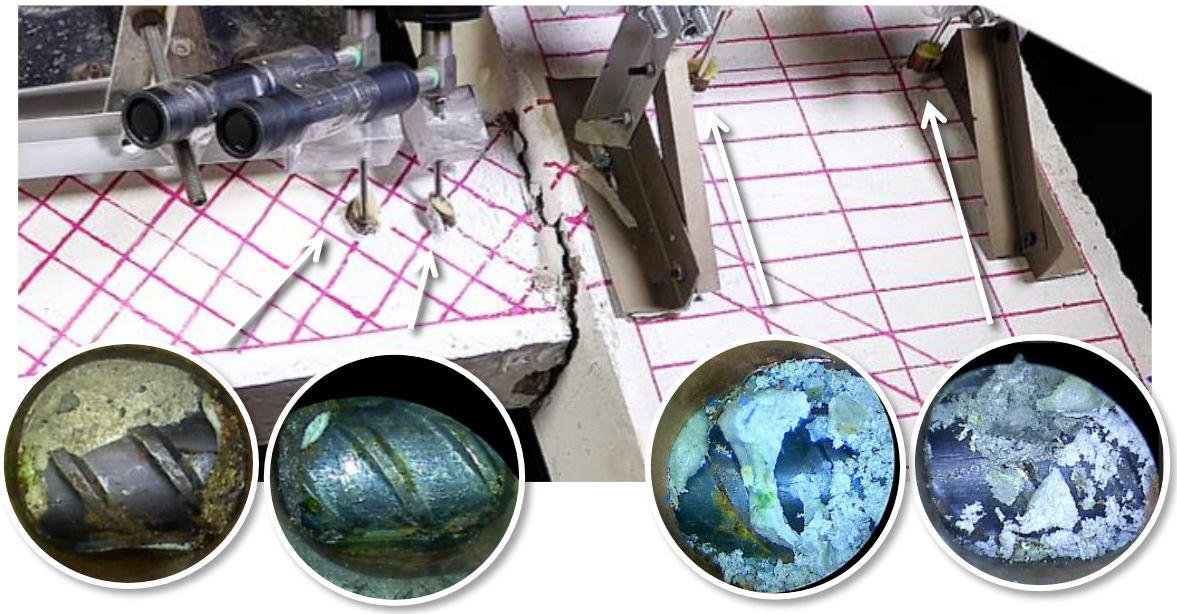


Figura 35. ***Probeta RKS4, posterior al ensayo.***

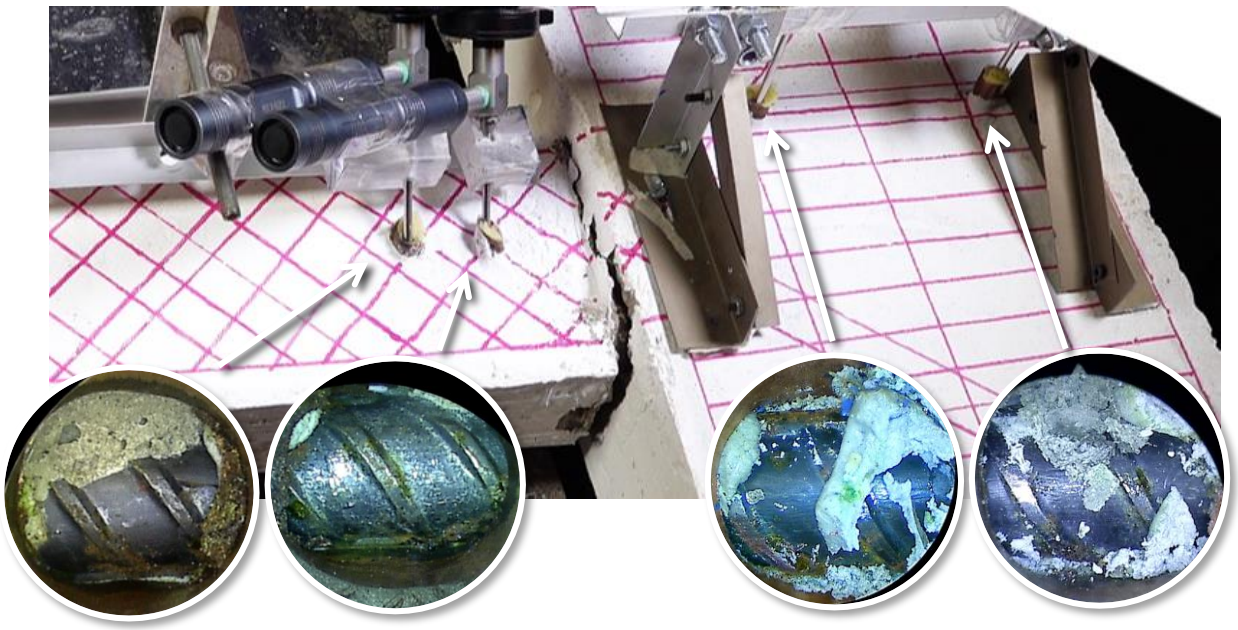


Figura 36. ***Probeta RKS4, 5° Ciclo Positivo 25[mm].***

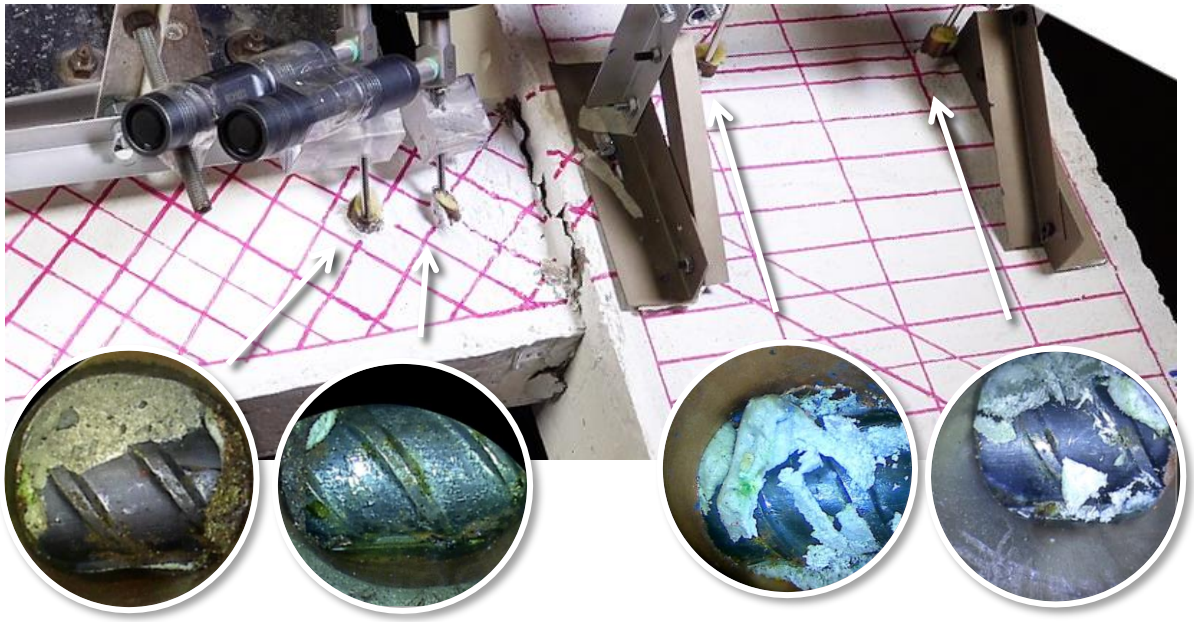
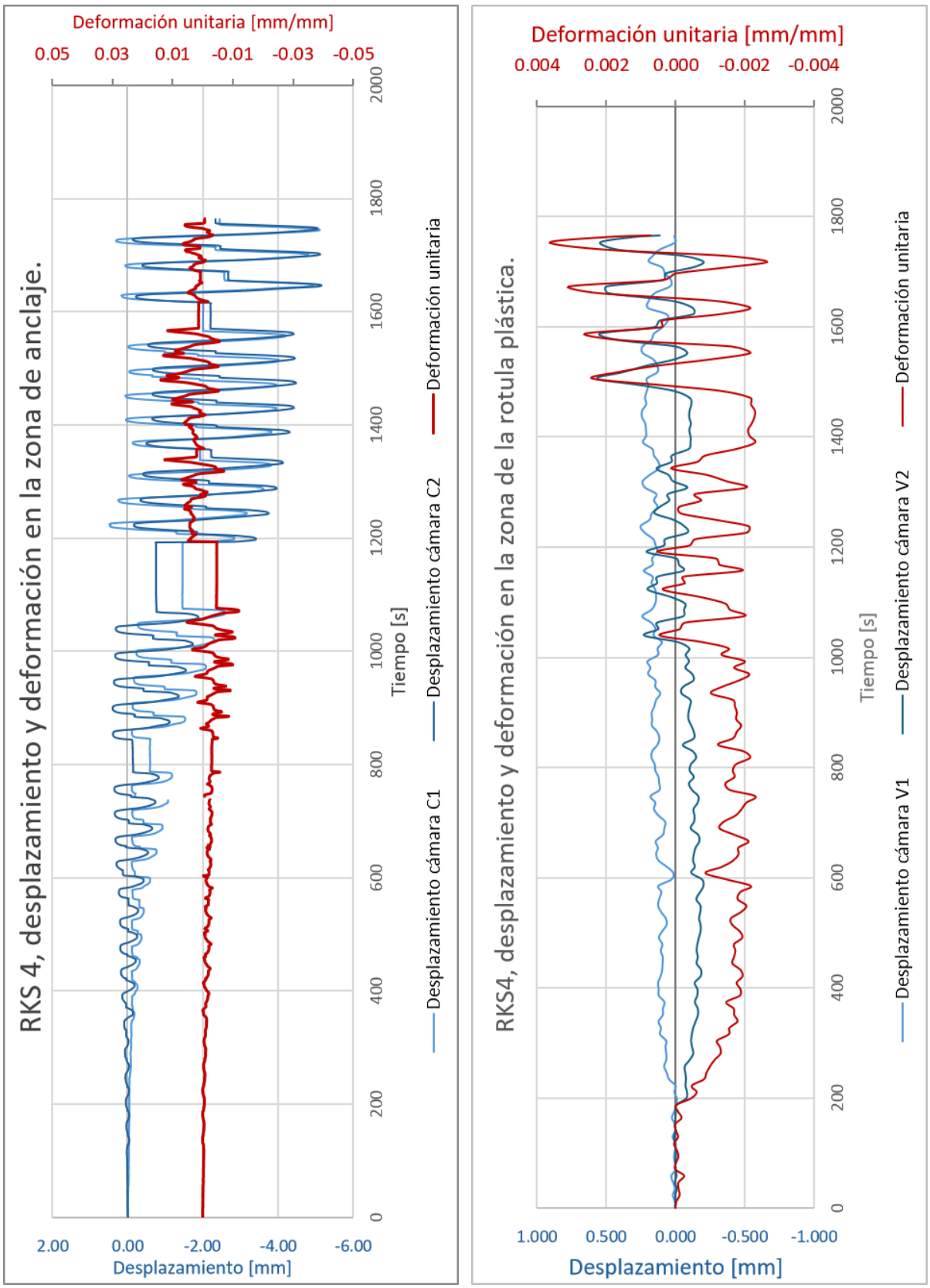
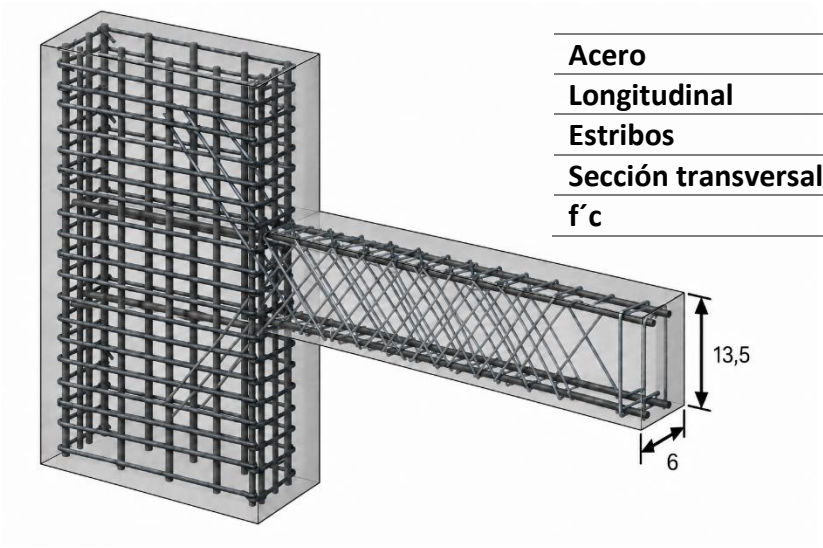


Figura 37. ***Probeta RKS4, 5° Ciclo Negativo25[mm].***



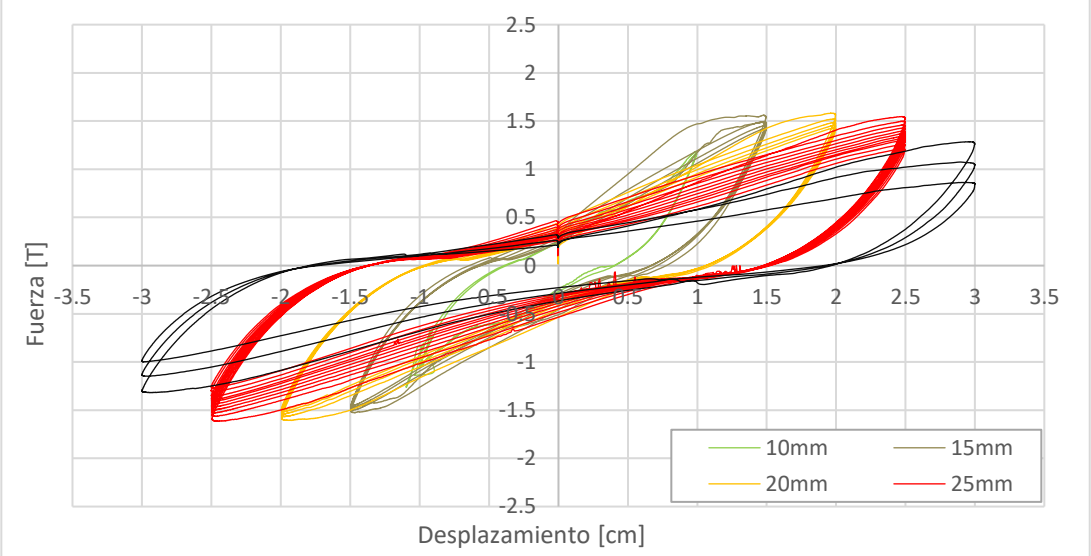
Grafica 9. ***Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS4.***

5.7. RKS5, Angostada con estribos inclinados



Acero	Diámetro	Calidad
Longitudinal	Φ8	A630-420H
Estribos	Φ3,2	AISI-304
Sección transversal	13,5 x 6 [cm]	
f´c	**23,83 [Mpa]**	

Figura 38. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS5.



Grafica 10. ***Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS5.***

Desde el quinto ciclo de 5 [mm], las cámaras C1 y C2 detectaron pequeños deslizamientos de la barra longitudinal en la columna. Estos movimientos se hicieron progresivamente más visibles desde el cuarto ciclo de 20[mm].

Las deformaciones unitarias aumentaron a medida que avanzaron los ciclos, tanto en el tramo observado en la viga como en el de la columna. En los ciclos finales, las deformaciones tendieron a acumularse en sentido positivo.

Los registros de desplazamiento de la viga se utilizaron únicamente hasta los 1019 [s]. A partir de ese instante, la barra quedó fuera del campo de observación de la cámara, impidiendo continuar su seguimiento, como se aprecia en la **Figura 40.**

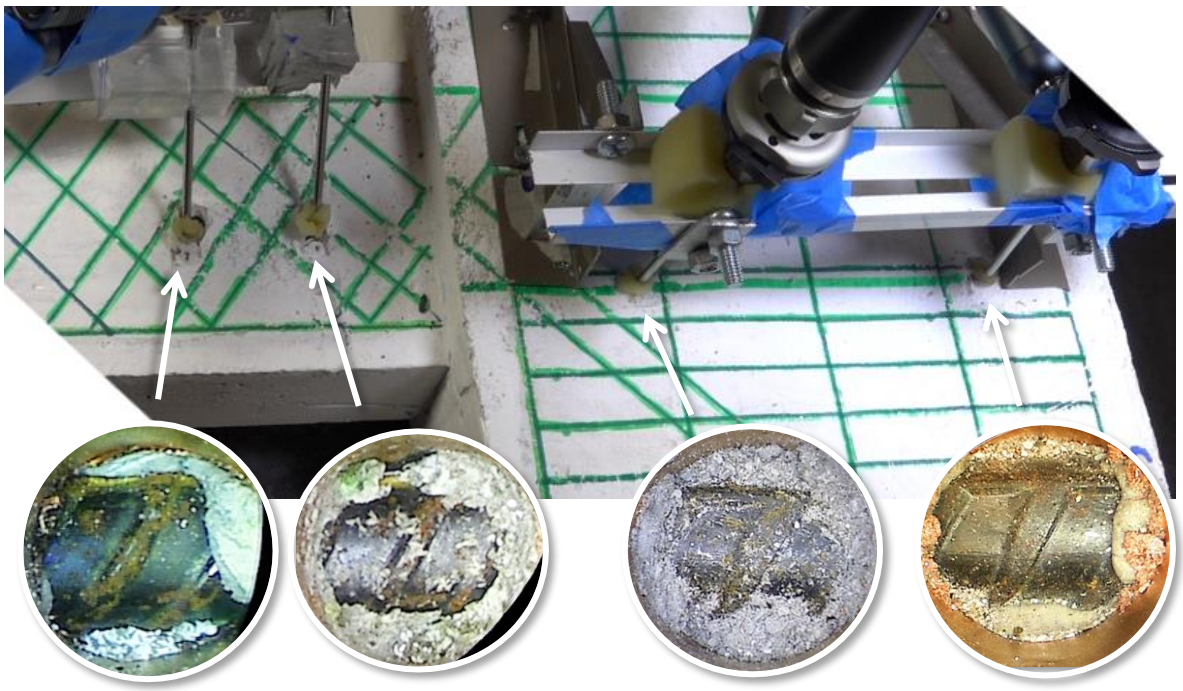


Figura 39. ***Probeta RKS5, previo al ensayo.***

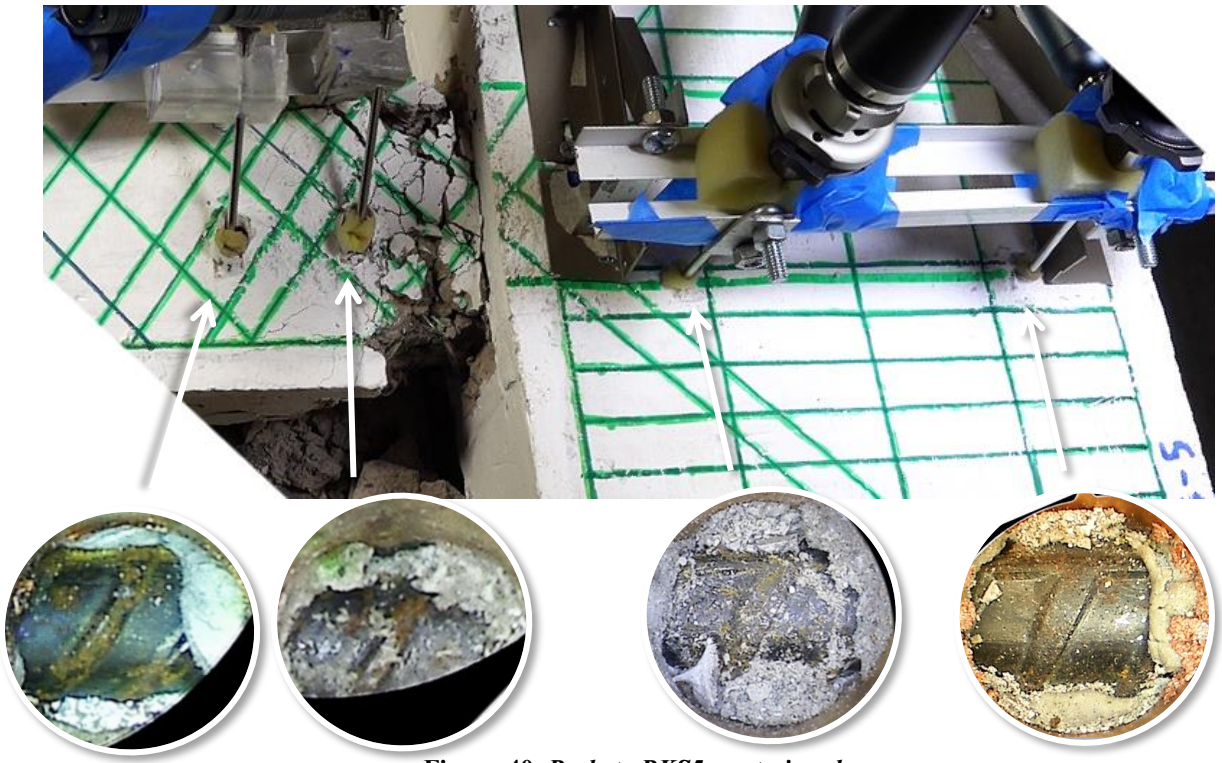


Figura 40. ***Probeta RKS5, posterior al ensayo.***

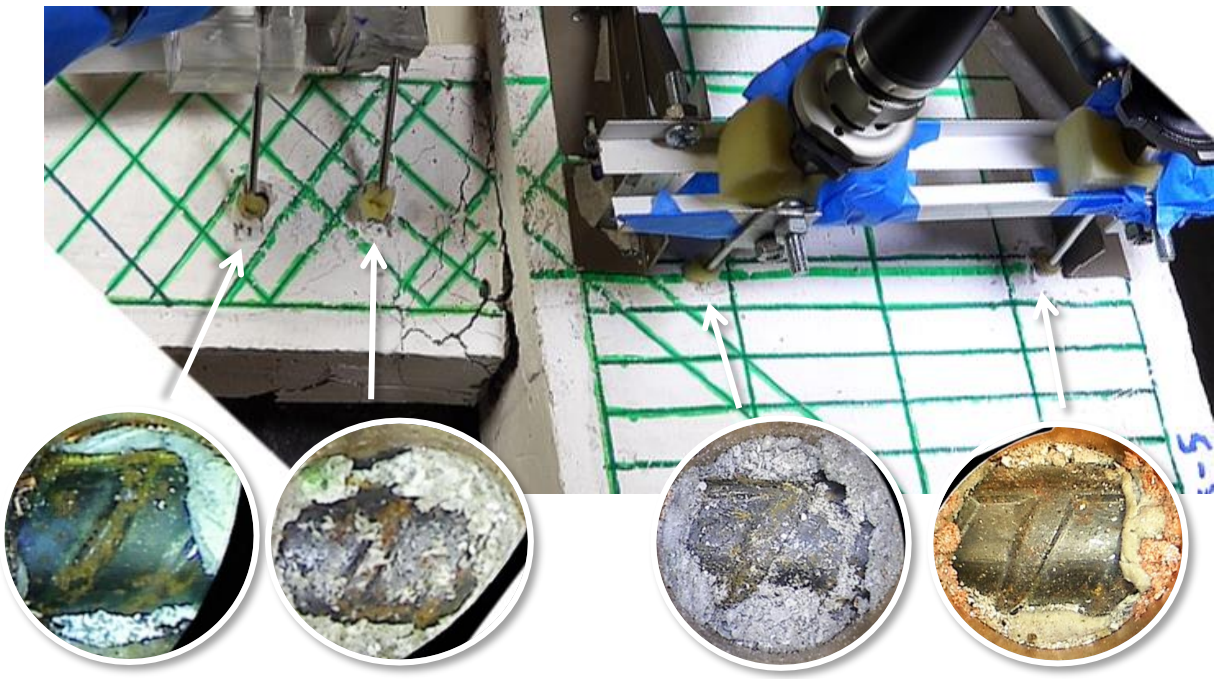


Figura 41. ***Probeta RKS5, 5° Ciclo Positivo 25[mm].***

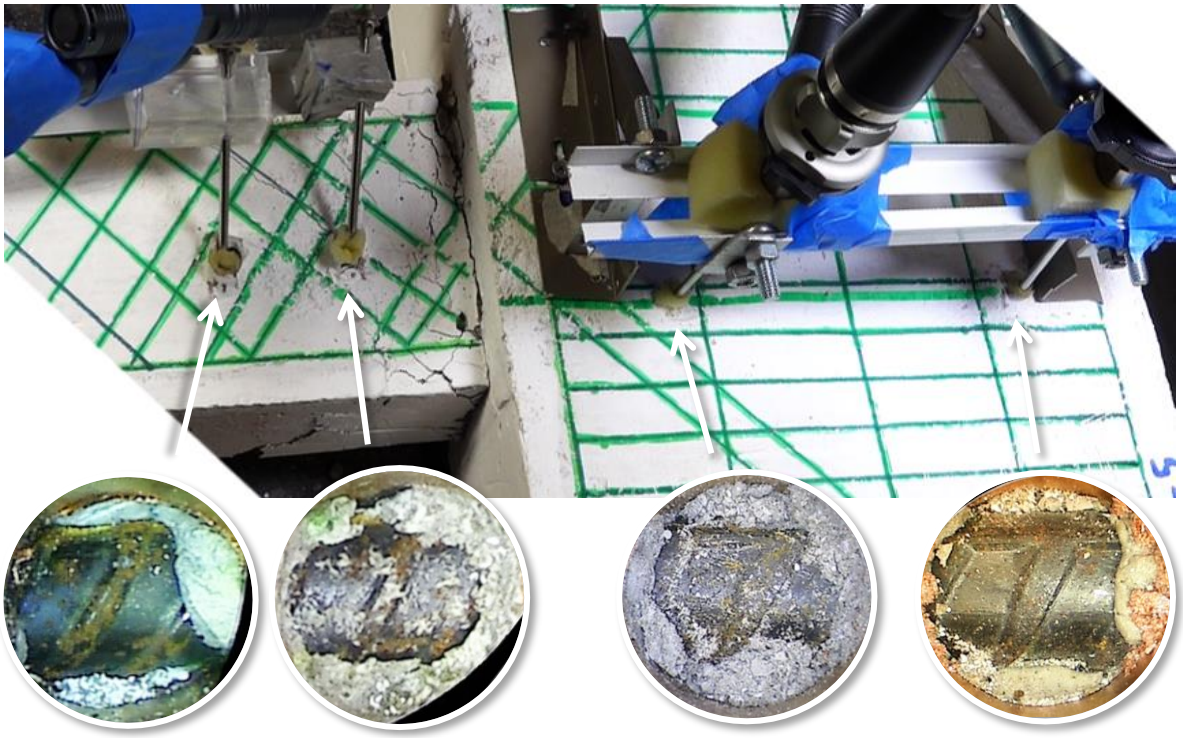
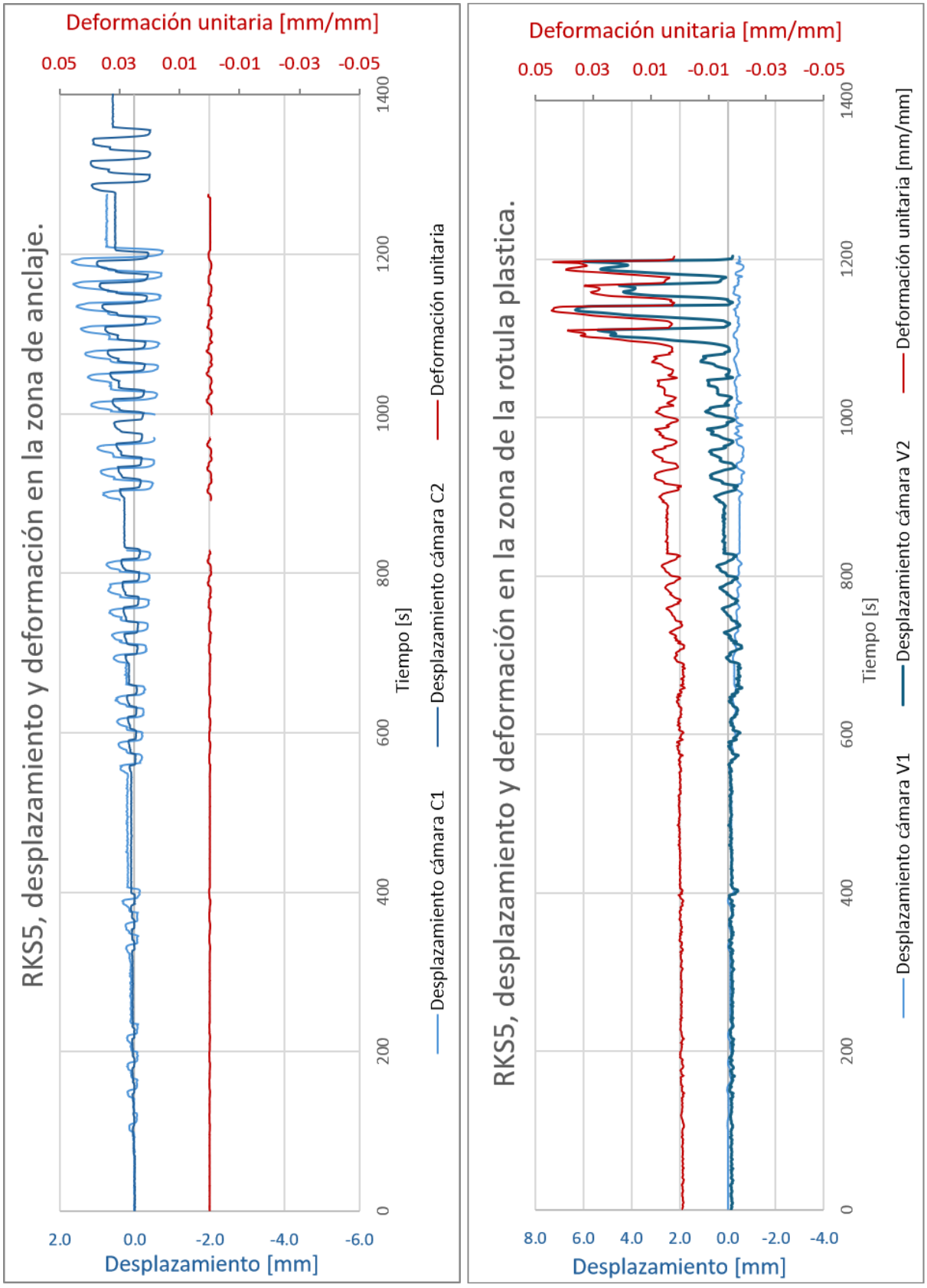
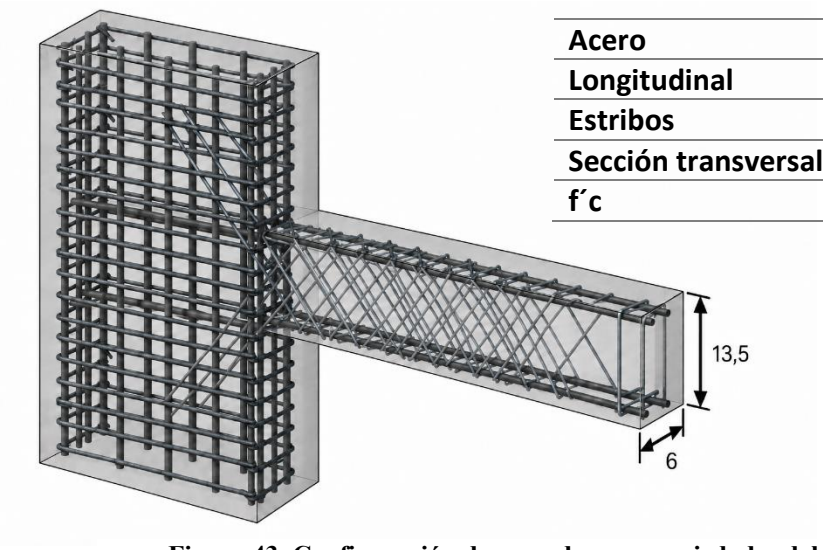


Figura 42. ***Probeta RKS5, 5° Ciclo Negativo 25[mm].***



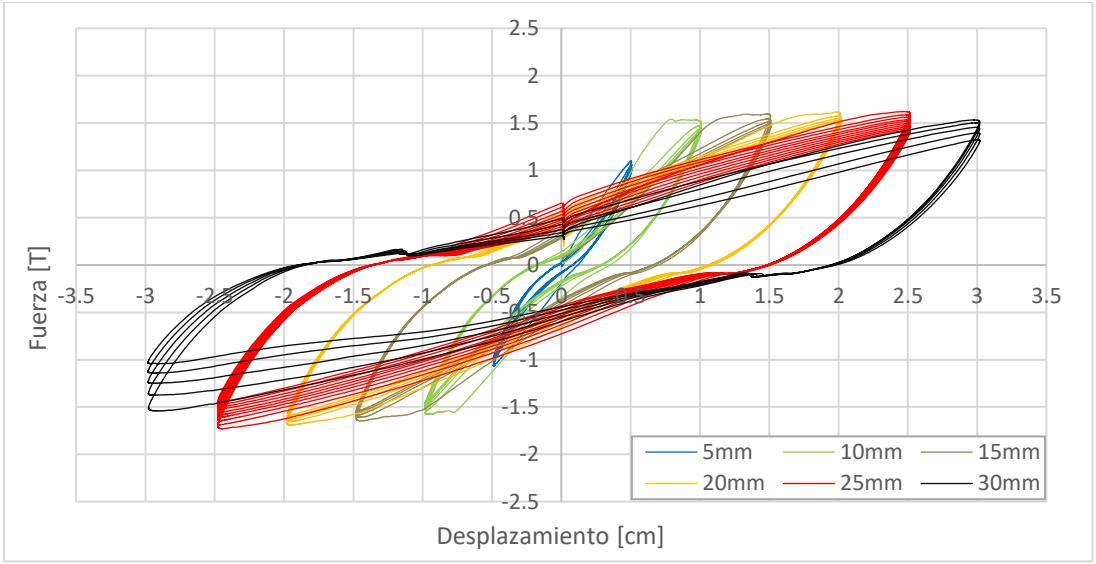
Grafica 11. ***Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS5.***

5.8.RKS6, Angostada con estribos inclinados



Acero	Diámetro	Calidad
Longitudinal	Φ8	A630-420H
Estribos	Φ3,2	AISI-304
Sección transversal	13,5 x 6 [cm]	
f´c	**23,83 [Mpa]**	

Figura 43. Configuración de armadura y propiedades del espécimen RKS6.



Grafica 12. ***Curva de histéresis fuerza/desplazamiento en espécimen RKS6.***

Durante el ensayo, se observó un deslizamiento progresivo de las barras longitudinales al interior de la columna. La cámara C1 registró pequeños desplazamientos desde el primer ciclo de 5 [mm], mientras que en C2 el movimiento comenzó a distinguirse durante el tercer ciclo de 10 [mm]. A partir del segundo ciclo de 15 [mm], se observaron desplazamientos similares en ambos puntos, lo que sugiere un movimiento de la barra dentro del anclaje con un pequeño cambio de longitud del tramo comprendido entre ellos.

Los desplazamientos se hicieron más notorios entre los 25 [mm] y 30 [mm], acompañados por un mayor agrietamiento y desprendimiento del hormigón. En la viga, a partir del primer ciclo de 30 [mm], la cámara V2 permitió observar indicios de pandeo en la barra, como se muestra en la ¡Error! No s e encuentra el origen de la referencia. Pese a ello, el ensayo finalizó sin que se produjera la fractura de las barras longitudinales.

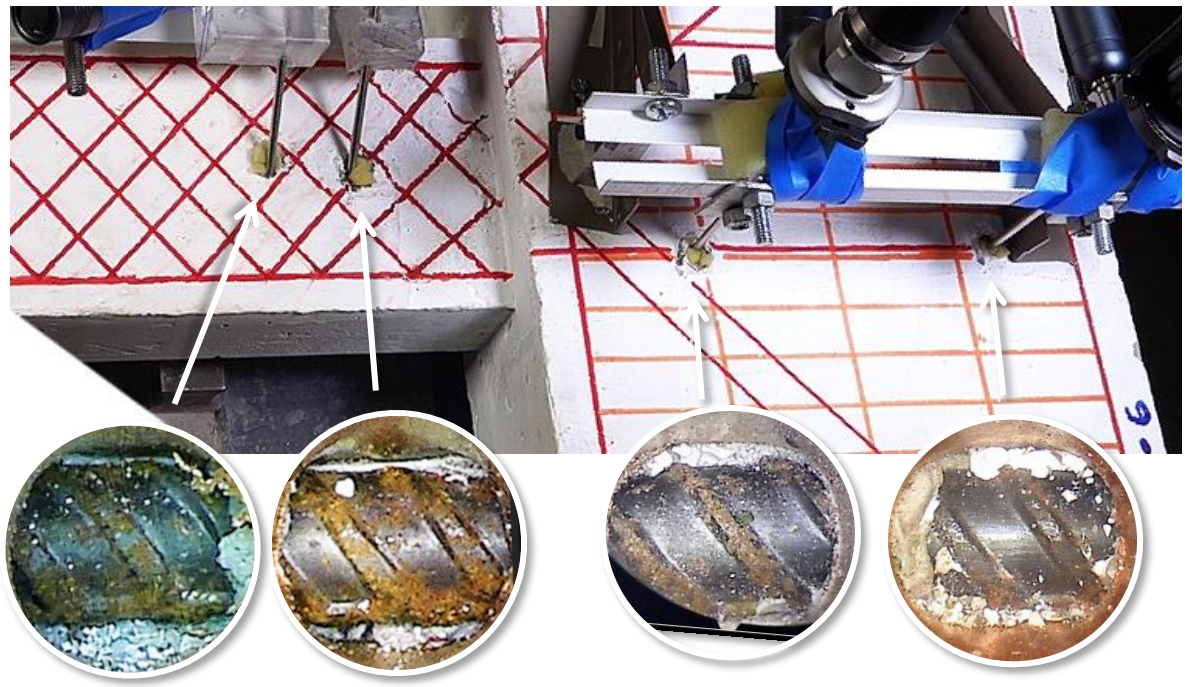


Figura 44. ***Probeta RKS6, previo al ensayo.***

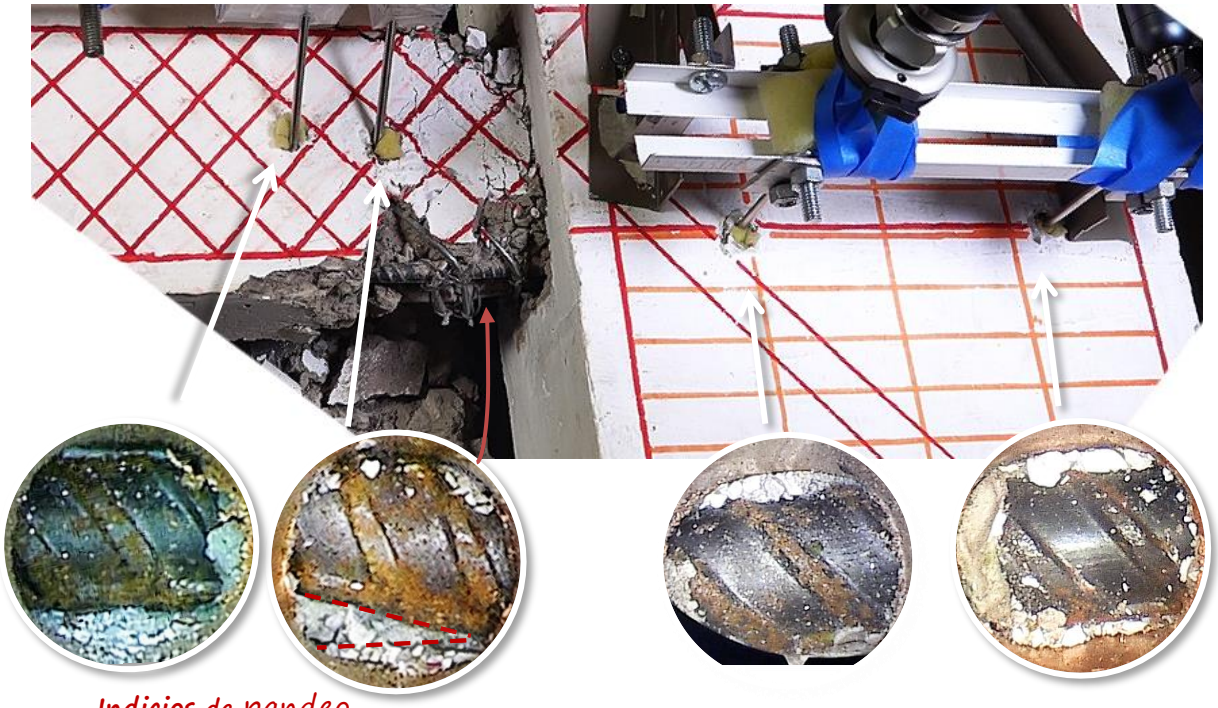


Figura 45. ***Probeta RKS6, posterior al ensayo.***

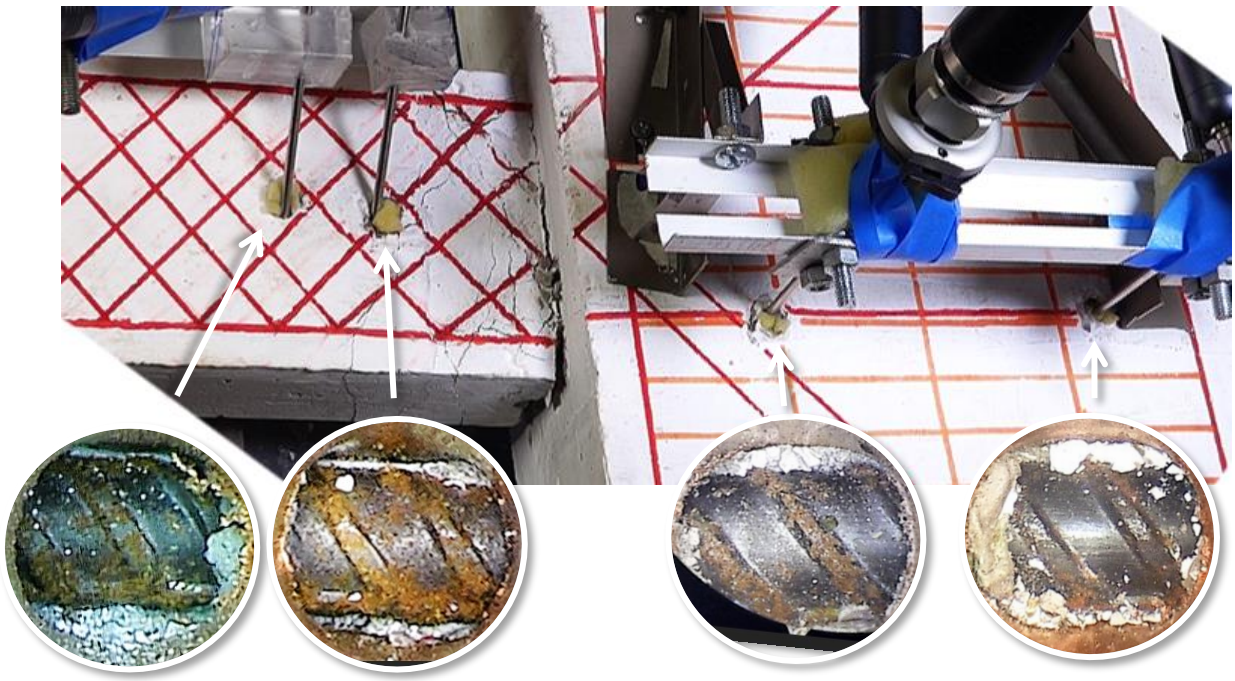


Figura 46. ***RKS6, 5° Ciclo Positivo 25[mm].***

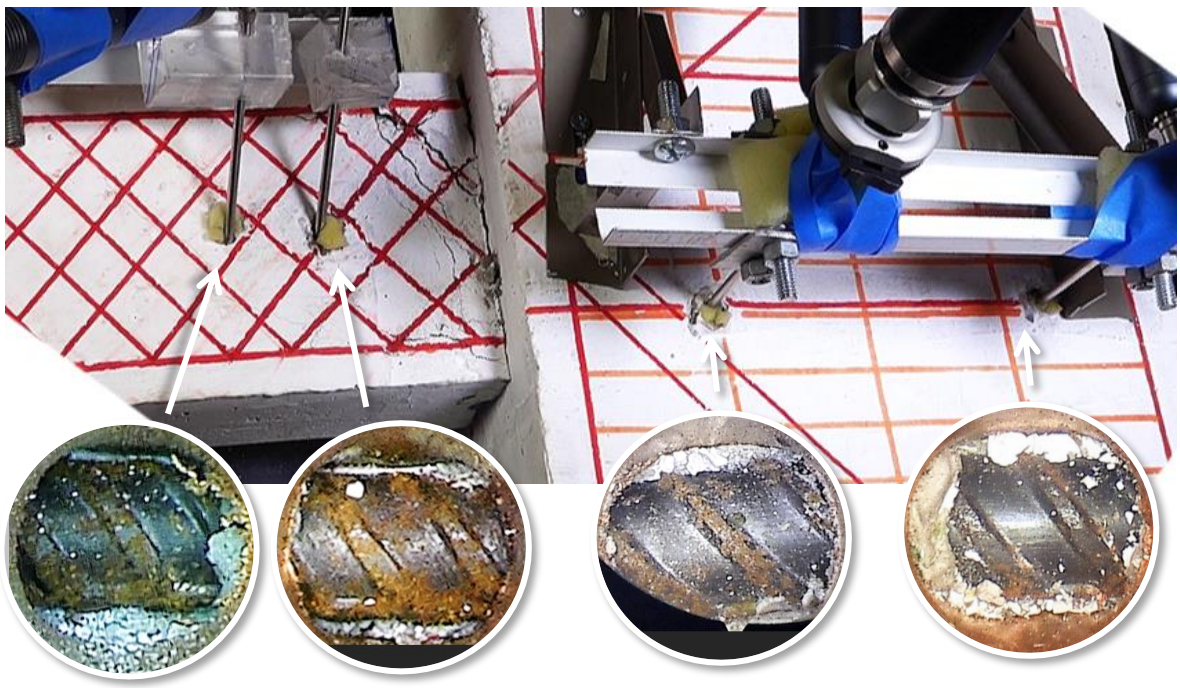
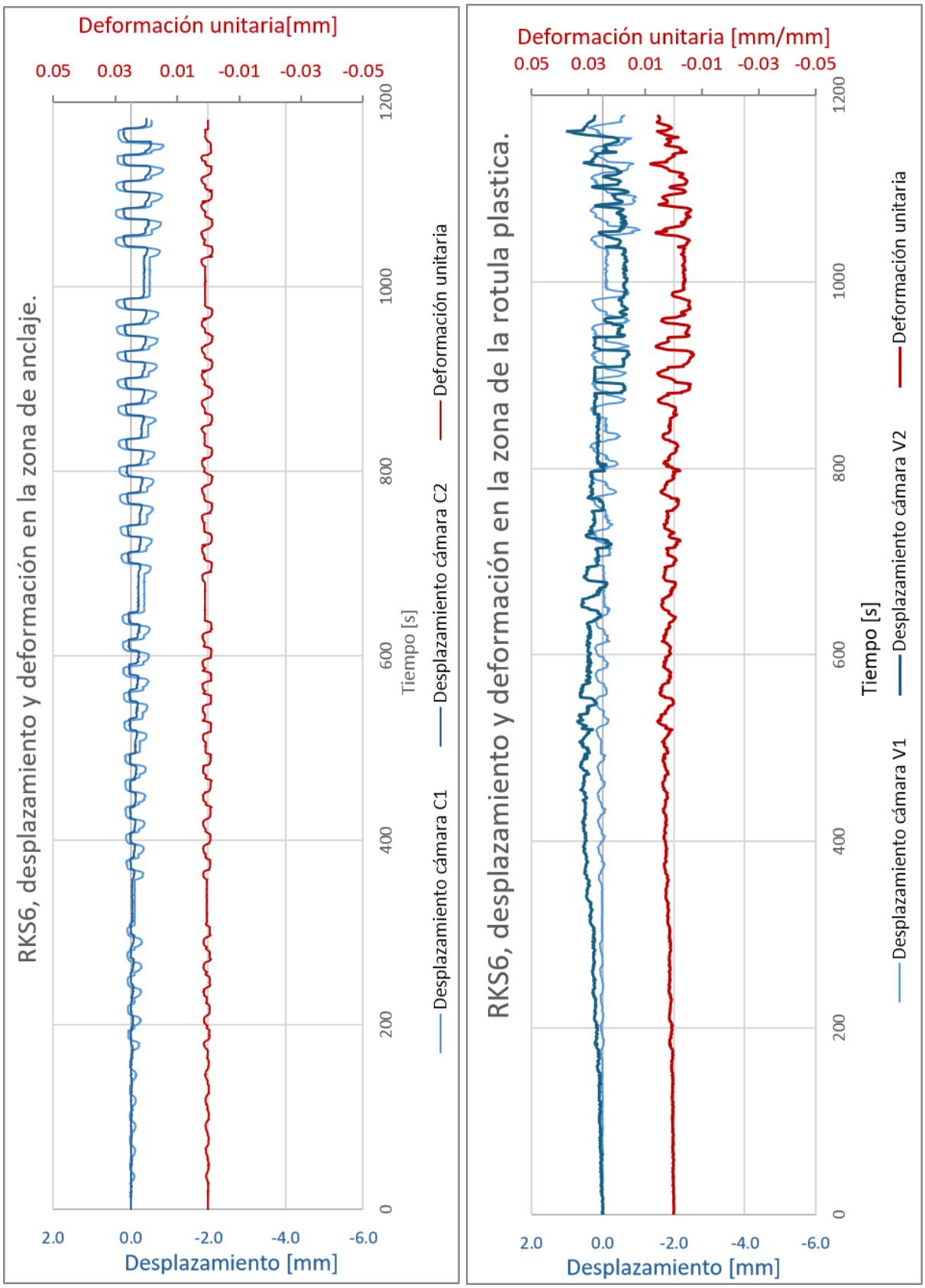


Figura 47. ***Probeta RKS6, 5° Ciclo Negativo 25[mm].***



Grafica 13. ***Curvas desplazamiento y deformación en zonas de interés, espécimen RKS6.***

Capítulo VI
Análisis de resultados

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos mediante las cámaras endoscópicas, donde se pudo observar que ninguno de los especímenes presentó fractura de las barras longitudinales. Para garantizar la adherencia de las barras y el hormigón y determinar si el acero fluyó, primero se compararon los alargamientos medidos con los valores calculados para el inicio de la fluencia. Esta información se compartió al memorista Vasquez, S. (2026) el cual corroboró los resultados mediante las curvas de histéresis y, finalmente, se elaboró una tabla con los momentos de mayor interés.

6.1. Criterio de referencia para el inicio de fluencia

A partir del procesamiento de videos descrito en la sección 4.5, se obtuvo para cada probeta la deformación como la resta del desplazamiento entre los puntos de observación C1 y C2, definido como:

$$\Delta L(t) = \delta_{C2}(t) - \delta_{C1}(t) \tag{6}$$

Para evaluar estos desplazamientos se estableció un valor teórico de referencia correspondiente al alargamiento del tramo de barra al alcanzar el esfuerzo de fluencia del acero. Considerando un comportamiento lineal elástico previo a la fluencia, la deformación unitaria del acero se puede relacionar con el esfuerzo a partir de la ley de Hooke en la siguiente expresión:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{Es} \tag{8}$$

Y, considerando la longitud base Lg utilizada en el sistema de medición:

$$\Delta Ly = \varepsilon_y L_g \tag{9}$$

Por lo tanto:

$$\Delta Ly = \frac{f_y}{E_s} L_g \tag{10}$$

Este valor se utilizó como referencia para comparar el alargamiento experimentado en cada probeta. El cálculo de estas expresiones está desarrollado en la memoria de Vásquez, S. (2026) y se presentan en la **Tabla 4.**

Tabla 4. Comparación alargamiento teórico de referencia y alargamiento medido máximo.

Espécimen	Alargamiento teórico [mm]		Alargamiento máximo medido [mm]	Interpretación
RKS-1	0,3665		-	No evaluable con los registros
RKS-2	0,3665	≈	0,421	Levemente Compatible con el inicio de fluencia
RKS-3	0,3665	<	1,201	Alargamiento superior, comportamiento de fluencia
RKS-4	0,3665	<	2,091	Alargamiento superior. comportamiento de fluencia
RKS-5	0,3665	<	1,198	Alargamiento superior, comportamiento de fluencia
RKS-6	0,3665	≈	0,419	Levemente Compatible con el inicio de fluencia

6.2. Longitud de anclaje

Con respecto a la longitud de anclaje del refuerzo longitudinal se utilizó la ecuación 25.4.2.4ª del ACI CODE-318-25 de la cual se obtuvieron las longitudes mínimas de anclaje indicadas en la **Tabla 5.** En todos los especímenes se utilizó una longitud de anclaje de 28,7 [cm].

Tabla 5. Longitud de anclaje teórica.

Espécimen	Longitud min según ACI CODE [cm]
RKS-1, RKS-5, RKS-6	23,30
RKS-2, RKS-3, RKS-4	27,15

6.3. Comparación de probetas

Para comparar el comportamiento del anclaje del espécimen RKS-4 se utilizaron los especímenes RKS-5 y RKS-6, ya que los tres tenían estribos inclinados. RKS-4 mantuvo el ancho referencial de 7,5 [cm], mientras que RKS-5 y RKS-6 fueron angostadas a 6 [cm], aumentando la cuantía longitudinal al mantener la misma armadura. Además, RKS-4 tenía un hormigón de 17,55 [MPa], frente a los 23,83 [MPa] de los especímenes RKS-5 y RKS6.

RKS-4 presentó mayores desplazamientos de las barras en el anclaje que RKS-5 y RKS-6. La deformación medida alcanzó la referencia de fluencia antes de los ciclos de 25 [mm]. Al comenzar este nivel, las cámaras C1 y C2 registraron movimientos más similares, lo que indica un mayor deslizamiento de la barra dentro del anclaje e indica una pérdida progresiva de adherencia.

La menor resistencia del hormigón pudo contribuir al mayor deslizamiento observado en RKS-4. Sin embargo, como también cambió el ancho de la viga, no es posible atribuir esta diferencia solamente a la resistencia del hormigón o al aumento de la cuantía longitudinal.

6.4. Recomendaciones para la instalación y uso de cámaras endoscópicas

- Utilizar la menor cantidad de poxilina necesaria para sellar y ajustar los ductos de observación.

- Revisar antes y constantemente durante los ensayos que las cámaras estén grabando y que las imágenes no se encuentren congeladas.

- Verificar que el computador disponga de espacio suficiente para almacenar el ensayo completo y evitar interrupciones.

- Registrar la distancia entre ductos de observación antes del ensayo para facilitar los cálculos de deformación unitaria y alargamiento.

- Ubicar las cámaras endoscópicas lo más cercano a la barra, manteniendo un buen enfoque para distinguir mejor los detalles de las imágenes y evitar disminuir la calidad de estas a la hora de presentar los resultados.

- Mejorar la fijación de las cámaras de la viga para reducir sus movimientos independientes y mantener estable la separación entre ellas.

- Incluir el nombre de la probeta en las fotografías tomadas antes y después del hormigonado, así como en los registros del ensayo, para evitar confusiones al ordenar y comparar los resultados.

- Mejorar el método de traspaso del trazado de barras desde el moldaje al hormigón con el fin de que estas no se borren y la probeta no se mueva durante el hormigonado.

- Grabar las cámaras de cada par, es decir, C1–C2 y V1–V2, en un mismo computador cuando su capacidad lo permita. Esto facilita la sincronización de los registros utilizados para calcular la deformación de la barra

Capítulo VII
Conclusiones

Junto con los memoristas asociados se confeccionaron seis probetas, cuya escala puede interpretarse como 1:3 o 1:4. Algunas con armadura transversal inclinada y otras con estribos ortogonales tradicionales. Dos mantuvieron la sección referencial utilizada en investigaciones anteriores y las cuatro restantes tuvieron una reducción en el ancho de la viga, con el objeto de lograr un mejor equilibrio entre las capacidades mecánicas del hormigón y del acero y evitar la fractura de las barras longitudinales comúnmente observada en los especímenes con armadura transversal inclinada.

En todas las probetas se incorporaron ductos de observación tanto en la zona del anclaje como en la zona de la rótula plástica. El principal aporte de las cámaras fue observar y medir tanto desplazamientos como deformaciones, permitiendo distinguir comportamientos que antes solamente podían suponerse. A partir de estas mediciones, se pudo comprobar que las barras longitudinales fluyen durante los primeros ciclos y que, posteriormente, su movimiento se asocia principalmente al deslizamiento dentro de la zona de anclaje.

A este deslizamiento se asocia el hecho de que en ninguno de los seis especímenes se produjera la fractura de las barras longitudinales. Este buen comportamiento no se debe a una fluencia continua de las barras, sino, en gran medida, a su deslizamiento dentro de la columna. Esto ocurrió a pesar de que en todos los especímenes la longitud de anclaje de las barras era superior al mínimo establecido en el código ACI-318. (Vásquez, S, 2026).

Generalmente, la falla por anclaje es considerada como un tipo de rotura desfavorable, pero en los especímenes estudiados se pudo comprobar que, con un suficiente grado de confinamiento, como en estos casos, el deslizamiento presenta un comportamiento relativamente dúctil y menos desfavorable que la fractura de las barras.

Para estudios posteriores de esta misma línea investigativa, se recomienda continuar con el uso de cámaras endoscópicas, especialmente en la zona de anclaje, para observar con mayor detalle el deslizamiento de las barras y su relación con la pérdida de adherencia. Además, se recomienda mejorar el dispositivo de fijación de las cámaras de las vigas, para facilitar las mediciones de desplazamiento y deformación.

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, U.T.F.S.M.

American Concrete Institute Committee 318. (2014). *Building code for structural concrete—Code requirements and commentary* (ACI CODE-318).

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, U.T.F.S.M, Repositorio USM.

Instituto Nacional de Normalización. (2009). *Hormigón — Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas (NCh1037.Of2009)*.

Bermúdez, A. 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, U.T.F.S.M.

Jorquera, M. (2026). *"Elementos de hormigón armado con barras de refuerzo de fibra de vidrio sometidos a solicitación sísmica".* Tesis de pregrado, U.T.F.S.M, Repositorio USM.

Lagos, J. (2026). *Comunicación personal.*

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, U.T.F.S.M.

Palacios, M. (2025). *"Deformación de barras de refuerzo en elementos de hormigón armado con estribos inclinados, sometidos a solicitaciones sísmicas"*. Tesis de pregrado, U.T.F.S.M, 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, P, 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, U.T.F.S.M.

Vasquez, S. (2026). "*Elementos de hormigón armado con armadura transversal inclinada y alta cuantía de acero sometidos a solicitación sísmica"*. Tesis de pregrado, U.T.F.S.M.