

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
VALPARAISO – CHILE



**DEFORMACIÓN DE BARRAS DE REFUERZO EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO  
CON ESTRIBOS INCLINADOS, SOMETIDOS A SOLICITACIONES SÍSMICAS**

Memoria de titulación presentada por  
**Martín Nicolás Ignacio Palacios Erazo**

Como requisito parcial para optar al título de  
**Constructor Civil**

Profesor Guía  
**René Tobar Ramos**

Agosto de 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: DEFORMACIÓN DE BARRAS DE REFUERZO EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON ESTRIBOS INCLINADOS, SOMETIDOS A SOLICITACIONES SÍSMICAS

Nombre del candidato(a): Martín Nicolás Ignacio Palacios Erazo

Carrera / Grado: Construcción civil

Campus: Casa Central Valparaíso ; Departamento: Obras Civiles

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

### 4.- FIRMAS

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

Fecha: 08-08-2025 ; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08-08-2025 ; Firma: 

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

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a todas las personas que me acompañaron durante este camino de aprendizaje, formación como profesional y persona. Mi familia, mi Mamá, mi Papá, mis amigos, compañeros de trabajo y mis profesores por todo el conocimiento otorgado.

Solo me queda dar las gracias a que siguen en mi vida y a todas aquellas personas que quedaron atrás. Porque cada una ayudó a formar quien soy hoy y de cómo quiero vivir mi futuro. Este no es el fin de una etapa, es la continuación de una vida con muchas metas, alegrías, así como de enormes experiencias.

## RESUMEN

La presente memoria forma parte de un programa de estudios realizados en el laboratorio LEMCO del Departamento de Obras Civiles de la UTFSM con respecto al comportamiento de elementos estructurales de hormigón armado con armadura transversal inclinada. Se ha comprobado que este tipo de armadura garantiza un menor deterioro de los elementos en comparación con la armadura ortogonal tradicional cuando son sometidos a una sollicitación sísmica. No obstante, en los ensayos de elementos con armadura transversal inclinada se ha visto una tendencia general a la fractura del refuerzo longitudinal, lo cual lleva a un tipo de falla muy indeseable. Esto tiene relación con el pandeo de las barras durante los ciclos de carga y con las grandes deformaciones implicadas. Así, durante los últimos años la investigación se ha enfocado en evitar o disminuir la tendencia al pandeo obteniéndose hasta ahora un éxito parcial, como lo indican los resultados de los ensayos realizados dentro de esta memoria.

Sin embargo, aun cuando se logre evitar completamente el pandeo de las barras, estas podrían romperse por fatiga con el hormigón todavía sano, lo cual produciría otro tipo de falla indeseable de la estructura. Entonces, para estudiar esta posibilidad, es imperativo conocer el nivel e historia de las deformaciones de las barras de refuerzo en estos elementos con armadura transversal inclinada, lo cual es difícil de lograr porque, en la situación que interesa, las barras ya han fluido en tracción y compresión, y sufrido fuertes incursiones en el rango de comportamiento inelástico.

En esta memoria entonces se ha investigado cómo obtener datos sobre la deformación unitaria que se alcanza en las barras realmente durante los ensayos por medio de su visualización directa con cámaras endoscópicas. Para esto, se construyeron y ensayaron seis vigas en voladizo que representan la zona de la viga contigua a una columna exterior de un marco dúctil, las cuales fueron sometidas a una carga cíclica equivalente a la sollicitación sísmica. Las vigas se pueden considerar a escala 1:3 del tamaño real, y tienen geometría similar a las ensayadas en memorias anteriores, siendo cuatro con estribos inclinados en dos planos y dos con armadura tradicional. Durante el desarrollo del trabajo se fue implementando progresivamente la medición de las deformaciones de las barras por medio de cámaras endoscópicas, lográndose medir las deformaciones con bastante éxito en los últimos especímenes ensayados, llegando hasta al principio del pandeo de las barras longitudinales.

Un resultado interesante fue que, las mediciones con las cámaras endoscópicas muestran que, al inicio del pandeo, las barras están todavía lejos del riesgo de falla por fatiga, de modo que, al tratar de eliminarlo, se está en un buen camino para conseguir un tipo de falla favorable de estos elementos con armadura transversal inclinada, ya que la falla por fatiga no se presentaría.

Palabras clave: Hormigón armado, Armadura transversal inclinada, Sollicitaciones sísmicas, Fractura del refuerzo longitudinal, Cámaras endoscópicas.

## ABSTRACT

This report is part of a program of studies carried out at the LEMCO laboratory of the Civil Works Department of the UTFSM, regarding the behavior of reinforced concrete structural elements with inclined transverse reinforcement. It has been proved that this type of reinforcement guarantees a lower deterioration of the elements in comparison with the traditional orthogonal reinforcement when they are subjected to seismic solicitation. However, in tests of elements with inclined transverse reinforcement, a general tendency to fracture of the longitudinal reinforcement has been observed, which leads to a very undesirable type of failure. This is related to the buckling of the bars during loading cycles and to the large deformations involved. Thus, during the last few years, research has focused on avoiding or decreasing the tendency to buckling, with partial success so far, as indicated by the results of the tests carried out in this report.

However, even if buckling of the bars is completely avoided, they could still break due to fatigue while the concrete is still sound, which would produce another type of undesirable failure of the structure. Then, to study this possibility, it is imperative to know the level and history of deformations of the reinforcing bars in these elements with inclined transverse reinforcement, which is difficult to achieve because, in the situation of interest, the bars have already yielded in tension and compression, and suffered strong incursions in the range of inelastic behavior.

In this report, it has been investigated how to obtain data off the unit deformation actually reached in the bars during the tests by means of direct visualization with endoscopic cameras. For this purpose, six cantilever beams representing the beam area adjacent to an external column of a ductile frame were constructed and tested, which were subjected to a cyclic loading equivalent to the seismic loading. The beams can be considered at 1:3 scale of the real size, and have similar geometry to those tested in previous reports, being four with inclined stirrups in two planes and two with traditional reinforcement. During the development of the work, the measurement of the deformations of the bars by means of endoscopic cameras was progressively implemented, being able to measure the deformations quite successfully in the last specimens tested, reaching the beginning of the buckling of the longitudinal bars.

An interesting result was that, the measurements with the endoscopic cameras show that, at the beginning of the buckling, the bars are still far from the risk of fatigue failure, so that, by trying to eliminate it, one is on a good way to achieve a favorable type of failure of these elements with inclined transverse reinforcement, since fatigue failure would not occur.

Keywords: Reinforced concrete, Inclined transverse reinforcement, Seismic stresses, Fracture of longitudinal reinforcement, Endoscopic cameras.

# INDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>11</b>
1.1. Objetivos .....	13
1.1.1. Objetivo general .....	13
1.1.2. Objetivos específicos .....	13
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>14</b>
<b>2. Estado del arte</b> .....	<b>14</b>
2.1. Comportamiento de elementos de hormigón armado con estribos inclinados .....	14
2.2. Deformación crítica por flexión de la barra pandeada .....	15
2.3. Deformación de las barras longitudinales durante el ensayo.....	16
2.4. Máximos desplazamientos durante sismos .....	17
2.4.1. Agrietamiento del hormigón con estribos inclinados .....	17
2.4.2. Fractura de la barra longitudinal en máximos desplazamientos .....	17
2.5. Diseño actualizado de estribos inclinados .....	18
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>19</b>
<b>3. Elaboración de probetas</b> .....	<b>19</b>
3.1. Análisis sobre la propuesta para estribos inclinados .....	19
3.2. Característica de los materiales .....	20
3.2.1. Hormigón.....	20
3.2.2. Acero .....	21
3.3. Confección de armadura .....	24
3.3.1. Columna .....	24
3.3.2. Viga .....	24
3.3.2.1. Viga con estribos ortogonales .....	25
3.3.2.2. Viga con estribos inclinados .....	25
3.4. Instalación de armadura en moldaje.....	27
3.4.1. Armado moldaje .....	27
3.4.2. Tubos para cámaras .....	28
3.4.2.1. Desbaste en forma circular .....	29
3.4.2.2. Corte diagonal inclinado en 60° .....	29
3.4.2.3. Tapón tubular de silicona y alambre .....	30
3.4.3. Colocación de la armadura en moldaje.....	31

3.5. Hormigonado de probetas .....	34
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>35</b>
<b>4. Montaje para ensayo y medición.....</b>	<b>35</b>
4.1. Equipos utilizados.....	35
4.2. Preparación del sistema .....	36
4.3. Instalación del soporte para cámaras endoscópicas.....	37
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>39</b>
<b>5. Resultados.....</b>	<b>39</b>
5.1. Ciclos de carga por nivel.....	39
5.1.1. RM1, probeta con estribos inclinados.....	41
5.1.2. RM2, probeta con estribos inclinados.....	44
5.1.3. RM3, probeta con estribos inclinados.....	47
5.1.4. RM4, probeta con estribos inclinados.....	50
5.1.5. RM5, probeta con estribos ortogonales.....	53
5.1.6. RM6, probeta con estribos ortogonales.....	56
5.2. Selección de probetas para medir la deformación con las cámaras endoscópicas. ....	59
5.3. Deformación de las barras longitudinales.....	60
5.3.1. Fotografías por ciclos.....	61
5.3.2. Medidas iniciales .....	61
5.3.3. Análisis de distancias medidas .....	62
5.4. Análisis de los resultados .....	70
5.5. Recomendaciones para la instalación y uso de cámaras endoscópicas.....	72
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>73</b>
<b>6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>73</b>
<b>7. Referencias.....</b>	<b>74</b>
<b>8. Anexos .....</b>	<b>76</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Figura 1</b> Fotografía de la estructura del ascensor aeropuerto dañada en el terremoto 2010. (Schnaidt 2010, fotografía proporcionada al profesor guía).....	11
<b>Figura 2</b> Fractura de armadura longitudinal pandeada a) Probeta MVC1 y b) Probeta MVC2 (Matson, 2018) .....	12
<b>Figura 3</b> Montaje para las probetas y disposición de equipo para estudio de refuerzos longitudinales con cámaras endoscópicas.....	12
<b>Figura 4</b> Disposición de estribos en marcos estructurales con el diseño de estribos en espiral doble .....	14
<b>Figura 5</b> Disipación de energía porcentual y curvas de histéresis de las probetas, de izquierda a derecha .....	14
<b>Figura 6</b> Secuencia de prueba de tensión de barra doblada.....	15
<b>Figura 7</b> Pandeo de barras por fatiga de bajo ciclaje, sin restricción.....	15
<b>Figura 8</b> Pandeo de barras por fatiga de bajo ciclaje, con restricción .....	16
<b>Figura 9</b> Deformación unitaria refuerzo longitudinal medido desde la base con estribos tradicionales (izquierda) e inclinados (derecha).....	16
<b>Figura 10</b> Sistema de marco con estribos tradicionales y sistema de marco con estribos inclinados, de izquierda a derecha .....	17
<b>Figura 11</b> Geometría de los especímenes, medidas en centímetros .....	19
<b>Figura 12</b> Dimensionado de estribos inclinados en dos planos internos y externos, medidas en centímetros .....	20
<b>Figura 13</b> Curva de ensayo tracción para acero AZA A630-420H .....	22
<b>Figura 14</b> Curva de ensayo tracción para acero CAP A630-420H .....	22
<b>Figura 15</b> Curva de ensayo tracción para acero AT56-50H .....	23
<b>Figura 16</b> Curva de ensayo tracción para acero inoxidable AISI-304.....	23
<b>Figura 17</b> Armadura de columna para especímenes, medidas en centímetros .....	24
<b>Figura 18</b> Dimensiones de viga para especímenes, medidas en centímetros .....	24
<b>Figura 19</b> Armado de probetas con estribos ortogonales en columna y viga, medidas en centímetros....	25
<b>Figura 20</b> Distribución de estribos inclinados en dos planos interiores, medidas en centímetros .....	26
<b>Figura 21</b> Distribución de estribos inclinados en dos planos exteriores, medidas en centímetros.....	26
<b>Figura 22</b> Distribución de estribos inclinados para anclaje a columna y estribo ortogonal para contención de extremo de viga, medidas en centímetros.....	26
<b>Figura 23</b> Armado de probetas con estribos inclinados y dimensiones de anclajes a columna, medidas en centímetros .....	27
<b>Figura 24</b> Moldaje para especímenes terminado .....	27
<b>Figura 25</b> Corte transversal de la viga, representando tubos para cámaras endoscópicas, medidas en centímetros .....	28
<b>Figura 26</b> Distribución de tubos en RM4 de estribos inclinados y RM6 con estribos ortogonales respectivamente de izquierda a derecha .....	28
<b>Figura 27</b> Diseño de tubos en base a Figura 25, se identifica desbaste circular y corte diagonal en 60° ...	29

<b>Figura 28</b> Colocación de tubos para cámaras endoscópicas en 30° para armadura tradicional .....	29
<b>Figura 29</b> Tapón de silicona utilizado para sellar el extremo del tubo en contacto con el refuerzo longitudinal.....	30
<b>Figura 30</b> Tapón de silicona retirado posterior al hormigonado de la probeta .....	31
<b>Figura 31</b> Tubo sellado con silicona en extremo cortado en 60° .....	31
<b>Figura 32</b> Moldaje con aplicación de desmoldante un día previo al hormigonado.....	32
<b>Figura 33</b> Instalación de separadores para columna y viga .....	32
<b>Figura 34</b> Longitud externa al moldaje de barras roscadas de 6,5 [cm] .....	33
<b>Figura 35</b> Montaje final de armadura al interior del moldaje.....	33
<b>Figura 36</b> Proceso de hormigonado especímenes, traslado de hormigón a betonera, vibrado y preparación de probetas cilíndricas, de izquierda a derecha.....	34
<b>Figura 37</b> Fin del proceso de hormigonado en probetas cilíndricas y segmentos de marcos estructurales .....	34
<b>Figura 38</b> Diagrama unilineal del sistema MTS utilizado en los ensayos .....	35
<b>Figura 39</b> Cámara endoscópica utilizada en estudio, con sus piezas.....	36
<b>Figura 40</b> Residuos de silicona y de lechada posterior al retiro del tapón una vez hormigonada la probeta .....	36
<b>Figura 41</b> Soporte en voladizo para estudio de deformación de las barras longitudinales con cámaras endoscópicas.....	37
<b>Figura 42</b> Esquema que describe soporte voladizo desde base elevada del Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente.....	37
<b>Figura 43</b> Montaje final de probeta para ensayo.....	38
<b>Figura 44</b> Esquema de distanciamiento entre cámaras endoscópicas (DECE) .....	40
<b>Figura 45</b> Probeta RM1 sin carga al comienzo del ensayo.....	41
<b>Figura 46</b> Espécimen RM1 posterior a ensayo de sollicitación sísmica .....	41
<b>Figura 47</b> Secuencia de barra longitudinal en RM6 en el 5° ciclo por nivel de carga y el último ciclo del ensayo .....	42
<b>Figura 48</b> Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM1.....	43
<b>Figura 49</b> Probeta RM2 sin carga al comienzo del ensayo.....	44
<b>Figura 50</b> Instalación de galgas extensiométricas en estribos inclinados de espécimen RM2.....	44
<b>Figura 51</b> Curva obtenida respecto al comportamiento de los strain gauges .....	45
<b>Figura 52</b> Espécimen RM2 posterior a ensayo de sollicitación sísmica .....	45
<b>Figura 53</b> Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM2.....	46
<b>Figura 54</b> Placa plástica para mantener distancia entre cámaras (DECE) constante.....	47
<b>Figura 55</b> Riel mejorado posterior a ensayo de RM5 y distribución de grouting .....	47
<b>Figura 56</b> Secuencia de barra longitudinal en RM3 en el 5° ciclo por nivel de carga con excepciones y el último ciclo del ensayo.....	48
<b>Figura 57</b> Espécimen RM3 posterior a ensayo de sollicitación sísmica .....	49
<b>Figura 58</b> Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM3.....	49
<b>Figura 59</b> Probeta RM4 sin carga al comienzo del ensayo.....	50

<b>Figura 60</b> Secuencia de barra longitudinal en RM4 en el 5° ciclo por nivel de carga y el último ciclo del ensayo .....	51
<b>Figura 61</b> Espécimen RM4 posterior a ensayo de sollicitación sísmica .....	52
<b>Figura 62</b> Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM4.....	52
<b>Figura 63</b> Probeta RM5 sin carga al comienzo del ensayo.....	53
<b>Figura 64</b> Espécimen RM5 posterior a ensayo de sollicitación sísmica .....	53
<b>Figura 65</b> Secuencia de barra longitudinal en RM5 en el 5° ciclo por nivel de carga y el último ciclo del ensayo .....	54
<b>Figura 66</b> Aplastamiento de tubos, espesor de 0,6 [mm] no fue suficiente .....	55
<b>Figura 67</b> Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM5.....	55
<b>Figura 68</b> Probeta RM6 sin carga al comienzo del ensayo.....	56
<b>Figura 69</b> Probeta RM6 posterior a ensayo de sollicitación sísmica .....	56
<b>Figura 70</b> Secuencia de barra longitudinal en RM6 en el 5° ciclo por nivel de carga y el último ciclo del ensayo .....	57
<b>Figura 71</b> Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM6.....	58
<b>Figura 72</b> Curvas de histéresis por probeta para comparación visual de ellas .....	59
<b>Figura 73</b> Datos útiles de Software “Paint.net”, donde se ve ubicación del puntero y capas.....	61
<b>Figura 74</b> Distancia relativa entre cámara endoscópica y barra longitudinal.....	62
<b>Figura 75</b> Distancia entre punto para medición y centro de la cámara por medio de software “Paint.net” .....	62
<b>Figura 76</b> Posición de puntos estudio para valor SEP para obtener distancia inicial entre puntos (DIEP) .	63
<b>Figura 77</b> Secuencia de imágenes de la barra, ubicando puntos de medición .....	64
<b>Figura 78</b> Explicación sobre variación en la equivalencia de píxeles a lo largo de la barra para cada cámara .....	65
<b>Figura 79</b> Gráfica de deformación unitaria ( $\epsilon$ ), espécimen RM4 con estribos inclinados en dos planos ...	69
<b>Figura 80</b> Gráfica de deformación unitaria ( $\epsilon$ ), espécimen RM6 con estribos ortogonales .....	69
<b>Figura 81</b> Consecuencia del pandeo para medición de deformación de las barras .....	70
<b>Figura 82</b> Placa guía para doblado de estribos inclinados en 2 planos internos y externos, con dimensiones .....	76
<b>Figura 83</b> Electrodo para acero inoxidable empleados para la soldadura de estribos inclinados en 2 planos, marca Indura .....	76
<b>Figura 84</b> Bases para doblado del acero, correspondientes a estribos ortogonales de viga, de columna y estribos inclinados en dos planos para viga, de arriba hacia abajo .....	76
<b>Figura 85</b> Herramientas utilizadas para limpieza de barras longitudinales .....	76
<b>Figura 86</b> Tipos de amarras con alambre para barras de acero, las empleadas consistieron en la tipo 1, 2, 3 y 6 .....	76
<b>Figura 87</b> Placas con cavidades para encaje de cámaras endoscópicas .....	77
<b>Figura 88</b> Estribos inclinados en dos planos internos y externos para viga.....	77
<b>Figura 89</b> Pie de metro digital .....	77
<b>Figura 90</b> Soporte en voladizo para cámaras endoscópicas .....	77

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Desplazamientos máximos obtenidos a escala 1:3 (Bermúdez, 2024) .....	17
<b>Tabla 2</b> Dosificación para hormigón utilizada para dos especímenes y tres probetas cilíndricas .....	20
<b>Tabla 3</b> Resistencia de las probetas cilíndricas, incluyendo fechas de ensayo del espécimen.....	21
<b>Tabla 4</b> Detalle de barras de acero para columna y viga de especímenes tradicionales.....	21
<b>Tabla 5</b> Detalle de barras de acero para columna y viga de especímenes con estribos inclinados .....	21
<b>Tabla 6</b> Ciclos utilizados en cada probeta .....	39
<b>Tabla 7</b> Distancia entre cámaras endoscópicas por probeta .....	39
<b>Tabla 8</b> Equivalencia píxel a milímetros para cada cámara de las probetas RM4 y RM6 .....	61
<b>Tabla 9</b> Separación entre puntos de medición y eje cámara (SEP) para probeta RM4 y RM6 .....	63
<b>Tabla 10</b> Distancia inicial entre los puntos (DIEP) para probeta RM4 y RM6 .....	63
<b>Tabla 11</b> Obtención de deformación unitaria ( $\epsilon$ ), espécimen RM6 con estribos ortogonales .....	67
<b>Tabla 12</b> Obtención de deformación unitaria ( $\epsilon$ ), espécimen RM4 con estribos inclinados en dos planos, considerando equivalencia en cada ciclo de medición para los niveles de carga.....	68
<b>Tabla 13</b> Carga máxima resistida y desplazamiento máximo generado por cada nivel de carga.....	71
<b>Tabla 14</b> Resumen de cada probeta con detalles observados, destacando los más desfavorables.....	71
<b>Tabla 15</b> Resumen de detalles .....	72

# Capítulo I

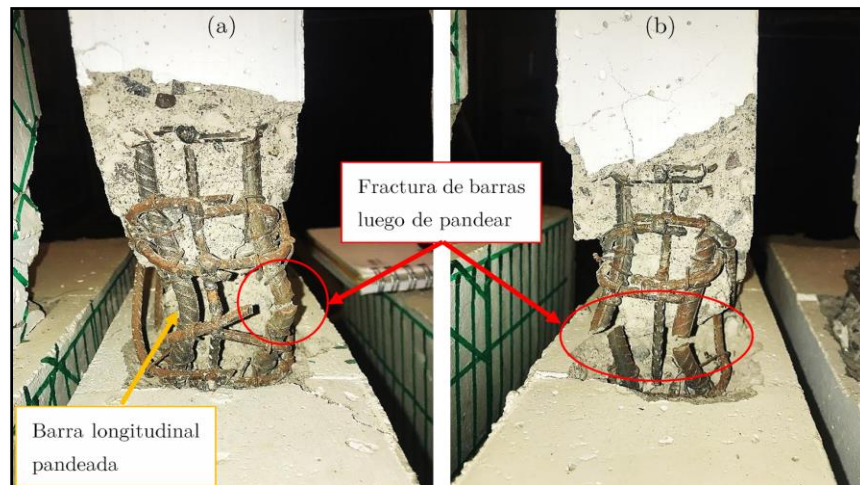
## 1. Introducción

En la última década, en la UTFSM se han realizado varios estudios respecto al comportamiento de marcos estructurales durante eventos sísmicos significativos, para buscar un mejor diseño respecto al uso de armadura transversal que pueda reducir el alto deterioro observado durante los últimos terremotos en el hormigón, especialmente en la zona de la rótula plástica, como el caso que muestra la **Figura 1**.

En consecuencia, con tal de reducir el efecto de este comportamiento, se modificó la configuración de los estribos a un formato inclinado, como lo empleado en los ensayos desarrollados por Pino, C. (2017), Rojas, R. S. (2022), Maldonado, J. (2023) entre otros. Identificando un mejor desempeño de los especímenes durante ciclos de carga sísmica, donde se redujo la degradación del hormigón. Sin embargo, esto provocó la tendencia de que las barras longitudinales en las vigas se fracturaran como indica la **Figura 2**. Es por esto, que dentro de la presente memoria se desarrolla un sistema para medir la deformación unitaria de la armadura longitudinal mediante cámaras endoscópicas de alta resolución con el objetivo de obtener datos para el estudio de este fenómeno.

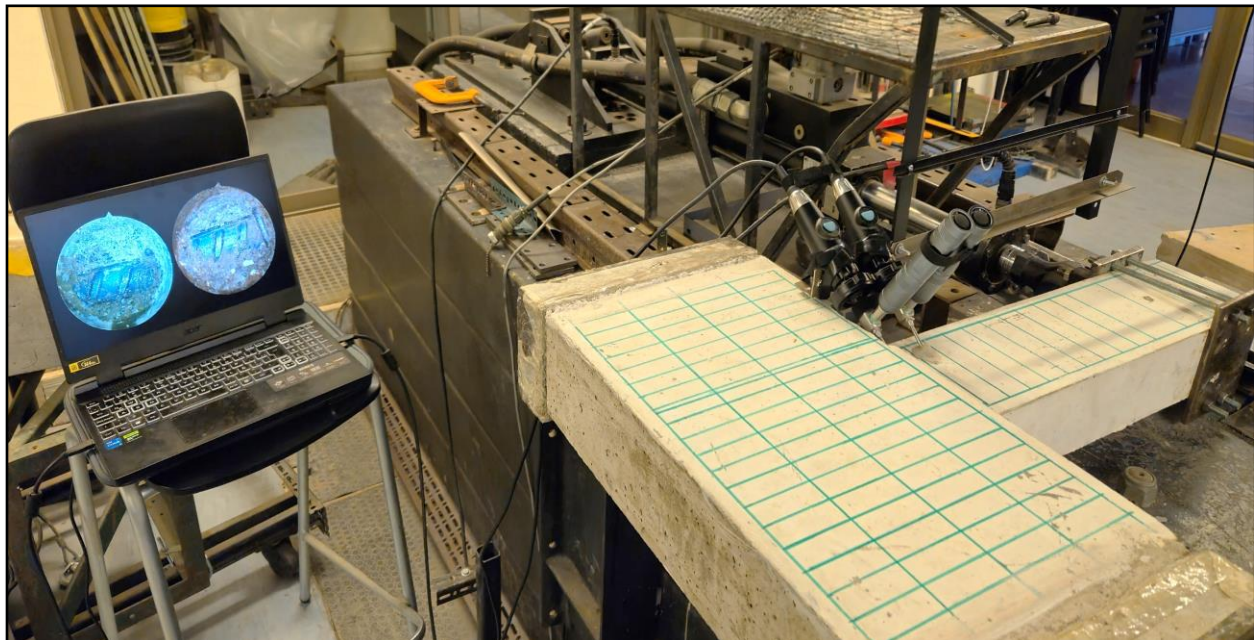


**Figura 1** Fotografía de la estructura del ascensor aeropuerto dañada en el terremoto 2010. (Schnaidt 2010, fotografía proporcionada al profesor guía).



**Figura 2** Fractura de armadura longitudinal pandeada a) Probeta MVC1 y b) Probeta MVC2 (Matson, 2018)  
*Fuente:* Rojas, R. S. (2022).

Para esto, se construyeron seis probetas de hormigón armado con geometría y armaduras similares a las memorias anteriores, compuestas de un tramo de columna con un segmento de viga escala 1:3. Se hicieron dos probetas con estribos tradicionales rectos y cuatro con estribos inclinados en dos planos. Estas se sometieron a cargas cíclicas alternadas simulando un sismo, mientras se visualizaban las barras al interior de la viga como se puede ver en la **Figura 3**.



**Figura 3** Montaje para las probetas y disposición de equipo para estudio de refuerzos longitudinales con cámaras endoscópicas

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

El objetivo general consistió en determinar el nivel de las deformaciones de las barras de refuerzo en los elementos longitudinales de la viga para aclarar la causa que ocasiona las fracturas de estas observadas en los ensayos, verificando la injerencia del pandeo en el asunto, y ver si eliminando éste hay riesgo de falla de las barras por fatiga de bajo ciclaje.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

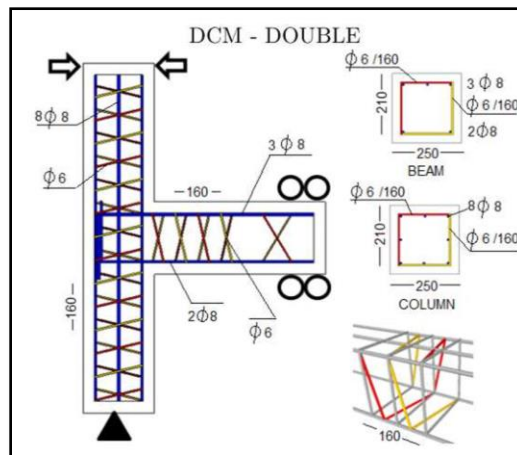
- Lograr una construcción adecuada de las probetas de hormigón armado, incluyendo su preparación para la introducción de las cámaras endoscópicas. Principalmente la colocación de un tubo diagonal pegado a una de las barras previo al hormigonado, permitiendo visualizar la deformación de ésta desde la cara opuesta durante el ensayo.
- Encontrar una forma conveniente de instalar las dos cámaras endoscópicas con tal de no influir en el comportamiento de la probeta y, a su vez, lograr seguir el movimiento de la viga sin perder la posición relativa entre ellas.
- Analizar los resultados, con tal de aclarar el nivel de deformaciones previo al pandeo y a la rotura en las barras de refuerzo.

# Capítulo II

## 2. Estado del arte

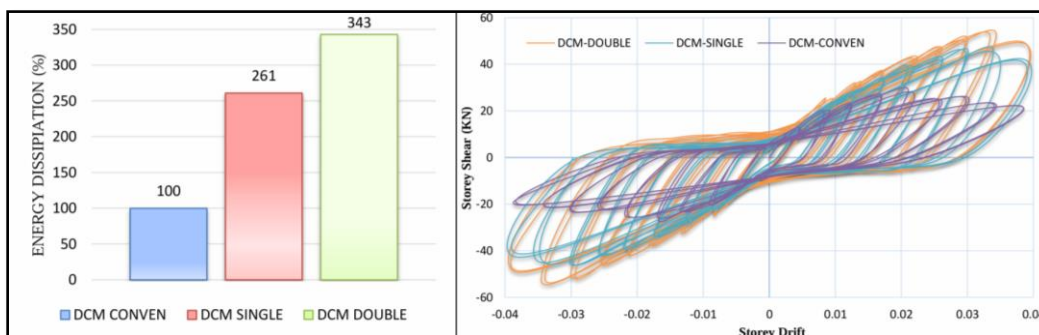
### 2.1. Comportamiento de elementos de hormigón armado con estribos inclinados

Los trabajos de Azimi et al. (2015) respecto al uso de estribos inclinados en espiral para probetas columna-viga como se observa en la **Figura 4**, avanzaron en aclarar ideas sobre la mayor capacidad de soportar cargas y de disipar energía con este diseño en comparación al tradicional con estribos ortogonales.



**Figura 4** Disposición de estribos en marcos estructurales con el diseño de estribos en espiral doble  
*Fuente:* Azimi et al. (2015).

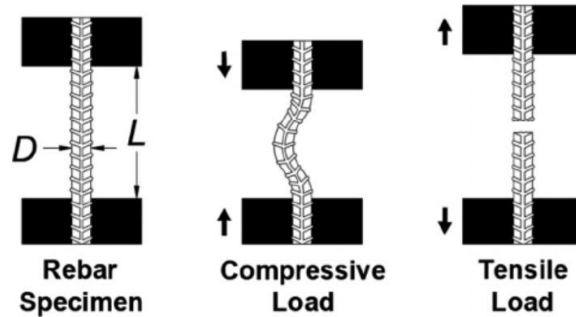
Según los resultados presentados, se obtuvo una mayor disipación de energía con estribos inclinados en espiral doble respecto al uso convencional de los estribos ortogonales, como también al de espiral simple indicado en la **Figura 5**.



**Figura 5** Disipación de energía porcentual y curvas de histéresis de las probetas, de izquierda a derecha  
*Fuente:* Azimi et al. (2015).

## 2.2. Deformación crítica por flexión de la barra pandeada

Respecto al comportamiento de las barras ensayadas por Barclay, L. & Kowalsky, M. (2019), mediante el método BBT (Buckled Bar Tension) según la **Figura 6**, se observó la fractura de estas precisamente en la zona donde se genera el pandeo, según los autores esto se produce cuando las barras longitudinales alcanzan la llamada “deformación crítica por compresión”. Durante cargas cíclicas, a la siguiente carga de tracción, aunque esta no sea muy grande, se produce la fractura.



**Figura 6** Secuencia de prueba de tensión de barra doblada

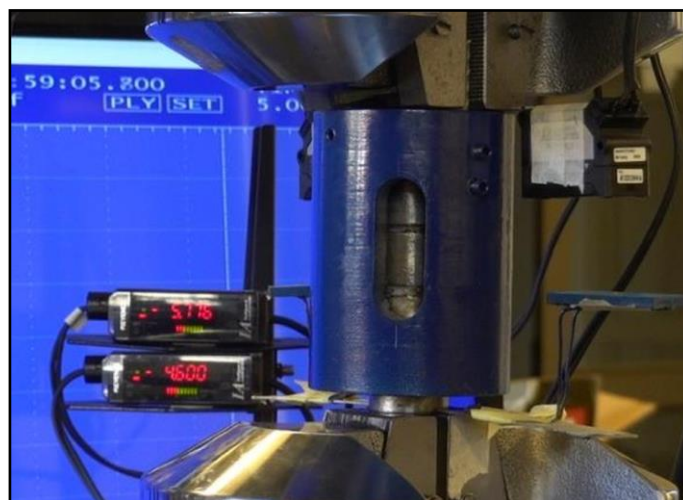
Fuente: Barclay, L. & Kowalsky, M. (2019).

Con lo anterior, en la UTFSM, y con aceros similares a los empleados en la presente memoria, se utilizó el método BBT para medir la deformación de las barras por la fatiga de bajo ciclaje. Una serie de estos ensayos la realizó Rojas, R. S. (2022), donde la barra estaba libre de pandear, como se indica en la **Figura 7**. Los mismos ensayos los repitió Rojas, H. S. (2022), pero restringió la barra mediante una camisa metálica personalizada como se muestra en la **Figura 8**.



**Figura 7** Pandeo de barras por fatiga de bajo ciclaje, sin restricción

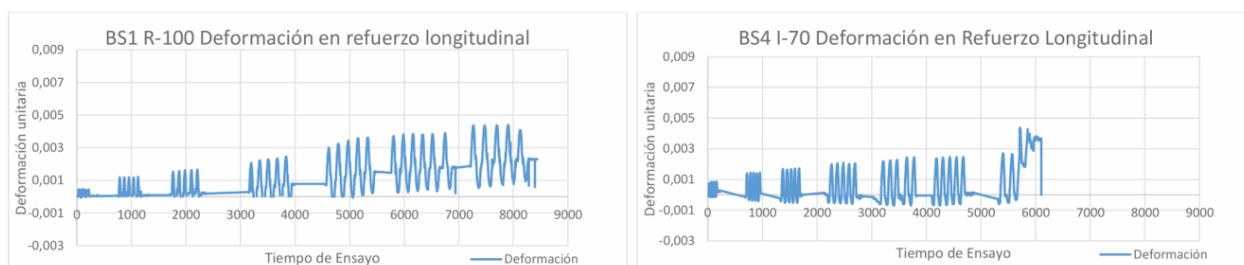
Fuente: Rojas, R. S. (2022).



**Figura 8** Pandeo de barras por fatiga de bajo ciclaje, con restricción  
*Fuente:* Rojas, H. S. (2022).

### 2.3. Deformación de las barras longitudinales durante el ensayo

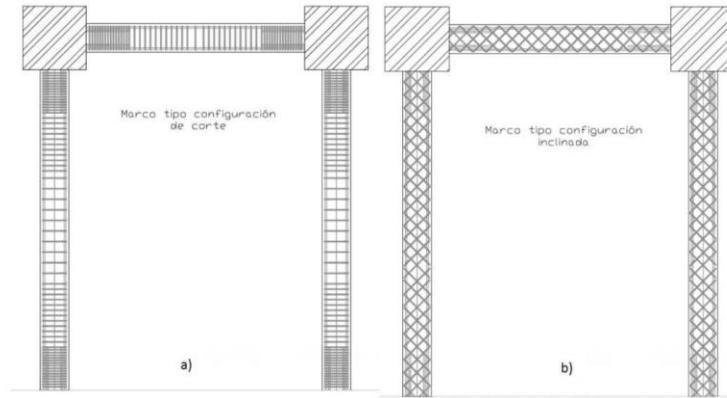
La memoria de Silva, P. B. (2022), es la única con datos sobre la deformación unitaria de las barras medida con cámaras, pero es sólo en la zona del anclaje dentro de la columna. Probó para vigas con estribos tradicionales e inclinados según los resultados proporcionados por Lagos, J. (2022). Obteniendo el máximo desplazamiento de las barras ancladas a la columna desde la viga en cada probeta. Destaca una mayor deformación con la armadura tradicional en comparación a la inclinada como se ve en la **Figura 9**, lo cual se explica considerando el aporte al anclaje que realizan los estribos inclinados.



**Figura 9** Deformación unitaria refuerzo longitudinal medido desde la base con estribos tradicionales (izquierda) e inclinados (derecha)  
*Fuente:* Silva, P. B. (2022).

## 2.4. Máximos desplazamientos durante sismos

Respecto lo visto por Lobera, R. (2016) durante sus ensayos a marcos con estribos convencionales e inclinados según la **Figura 10**, se obtuvieron dos conclusiones a considerar:



**Figura 10** Sistema de marco con estribos tradicionales y sistema de marco con estribos inclinados, de izquierda a derecha

Fuente: Lobera, R. (2016).

### 2.4.1. Agrietamiento del hormigón con estribos inclinados

Silva, B. B. (2014) logró definir que, el agrietamiento se produce paralelamente al armado transversal de la estructura, por lo que, con estribos inclinados los fragmentos de hormigón se mantienen anclados en el interior de la viga, evitando su deslizamiento fuera de esta. Esto fomenta la conclusión de que, con el diseño de armadura transversal inclinada, el acero con el hormigón continúan trabajando al unísono durante la compresión por un tiempo más prolongado.

### 2.4.2. Fractura de la barra longitudinal en máximos desplazamientos

Con los valores de las estructuras sometidas a sismos históricos como indica la **Tabla 1**, se llegó a desplazamientos máximos cercanos a 15 [mm] y 20 [mm] para movimientos de muy alto potencial destructivo según lo indicado por Lobera, R. (2016), por ende, la fractura de las barras durante los ciclos de mayor desplazamiento estaría alejada de la realidad y no podría ser probable su ocurrencia a menos que haya sismos que provoquen desplazamientos mayores a los ya ocurridos durante estos años.

**Tabla 1** Desplazamientos máximos obtenidos a escala 1:3

Sismo	Desplazamiento Y max. Escala 1:3 [cm]	
	V21	VC6
Kobe 1995	2,605	1,913
México 1985	2,368	1,741
Concepción 2010	1,004	1,018
Viña del Mar 1985	1,082	1,141

Nota. Datos adaptados de Lobera, R. (2016).

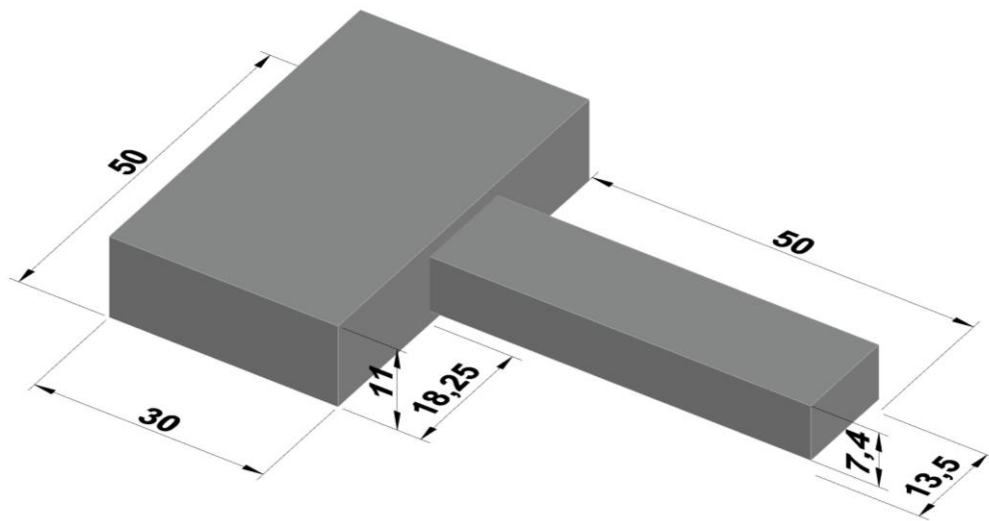
## 2.5. Diseño actualizado de estribos inclinados

Según lo visto en los puntos anteriores, así también, en base a las recomendaciones entregadas por Reyes, G. (2023), Maldonado, J. (2023) y de Bermúdez, A. (2024), se elaboraron las probetas que se desarrollan en el **Capítulo III** de esta memoria. Por una parte, se mejora el diseño de los estribos inclinados con tal de que limiten el movimiento de la viga tanto en el eje del movimiento axial y en el eje perpendicular. Así mismo, se modificó el riel de ensayo para que la viga estuviese limitada a solo seguir el movimiento axial de las cargas con tal de evitar la torsión de esta y, por consiguiente, minimizar incongruencias en los resultados del ensayo.

# Capítulo III

## 3. Elaboración de probetas

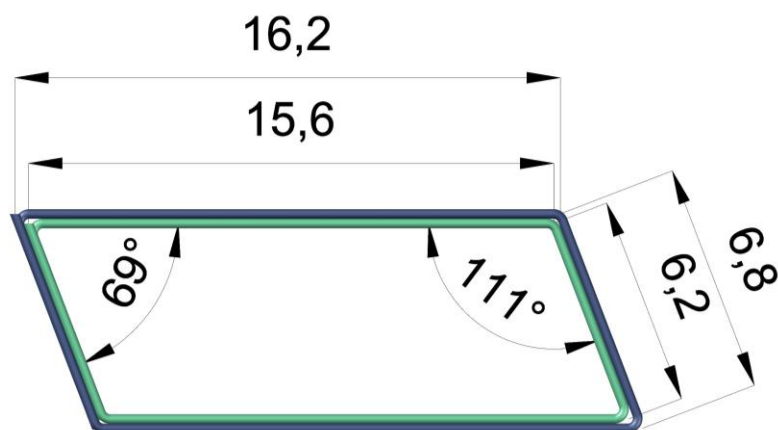
Junto con el memorista asociado Ayaviri, R. (2025), se elaboraron seis especímenes según el diseño propuesto por memoristas anteriores (Reyes, G. (2023), Maldonado, J. (2023) y de Bermúdez, A. (2024)), con una modificación en el ancho de la viga, para facilitar la construcción del moldaje, lo que se puede ver en la **Figura 11**.



**Figura 11** Geometría de los especímenes, medidas en centímetros  
*Fuente:* Elaboración propia.

### 3.1. Análisis sobre la propuesta para estribos inclinados

Debido a que se buscó un método para impedir que las barras longitudinales de la viga sufran del pandeo, se propuso el diseño correspondiente a estribos inclinados en dos planos, internos y externos respectivamente, los que se pueden visualizar en la **Figura 12**. Este diseño aportó un mayor confinamiento del hormigón dentro de la viga, además de limitar el pandeo en todas las direcciones, obteniendo ciclos más estables.



**Figura 12** Dimensionado de estribos inclinados en dos planos internos y externos, medidas en centímetros  
*Fuente:* Elaboración propia basada en Bermúdez, A. (2024).

### 3.2. Característica de los materiales

#### 3.2.1. Hormigón

Durante el hormigonado de los elementos a ensayar se realizó la dosificación indicada en la **Tabla 2** para **dos especímenes propuestos**, más tres probetas cilíndricas de 30 [cm] de altura y 15 [cm] de diámetro. Lo anterior, para tener una condición similar a los ensayos previos realizados en la memoria de Pino, C. (2017), Figueroa, G. (2019), Maldonado, J. (2023) y Bermúdez, A. (2024). Aun así, se buscó **obtener resistencias mayores a la compresión** del hormigón en comparación a los estudios antes mencionados, con tal de verificar si esto afectase directamente a la disipación de energía en los especímenes y a la fractura de las barras longitudinales de la viga.

**Tabla 2** Dosificación para hormigón utilizada para dos especímenes y tres probetas cilíndricas

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

Considerando la dosificación anterior y luego de otro proceso de hormigonado en distinta fecha, se elaboraron en total seis especímenes de viga-columna más siete probetas cilíndricas. En donde estas últimas, se ensayaron de acuerdo con la **NCh 1037 of. 2009**, obteniendo los resultados de la **Tabla 3**, cabe destacar que se realizó un ensayo a los 7 días para verificar la resistencia de las probetas cilíndricas, la cual dio 30,50 MPA aproximadamente, lo que permitió verificar el buen nivel de resistencia del hormigón usado.

**Tabla 3** Resistencia de las probetas cilíndricas, incluyendo fechas de ensayo del espécimen

Probeta cilíndrica	Fecha hormigonada	Resistencia (MPa)	Fecha ensayo	Días transcurridos
RMC (estribos ortogonales)	11-07-2024	77,61	06-12-2024	148 días
RMC (estribos ortogonales)	11-07-2024	83,04	06-12-2024	148 días
RMC (estribos ortogonales)	11-07-2024	71,71	07-01-2025	180 días
RMC (estribos inclinados)	08-11-2024	30,50	15-11-2024	7 días
RMC (estribos inclinados)	08-11-2024	35,09	06-12-2024	28 días
RMC (estribos inclinados)	08-11-2024	53,64	07-01-2025	60 días
RMC (estribos inclinados)	08-11-2024	48,49	06-12-2024	28 días

### 3.2.2. Acero

Para el diseño de las armaduras, se consideraron los aceros de la **Tabla 4** y **Tabla 5**.

**Tabla 4** Detalle de barras de acero para columna y viga de especímenes tradicionales

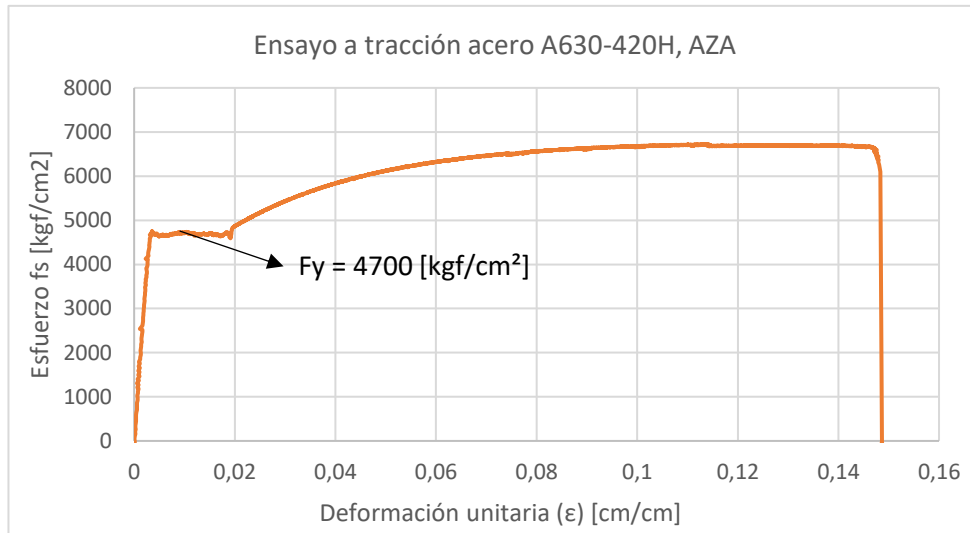
Refuerzo	Calidad	Diámetro [mm]
Longitudinal (AZA)	A630-420H	8
Transversal	AT56-50H	4,2

**Tabla 5** Detalle de barras de acero para columna y viga de especímenes con estribos inclinados

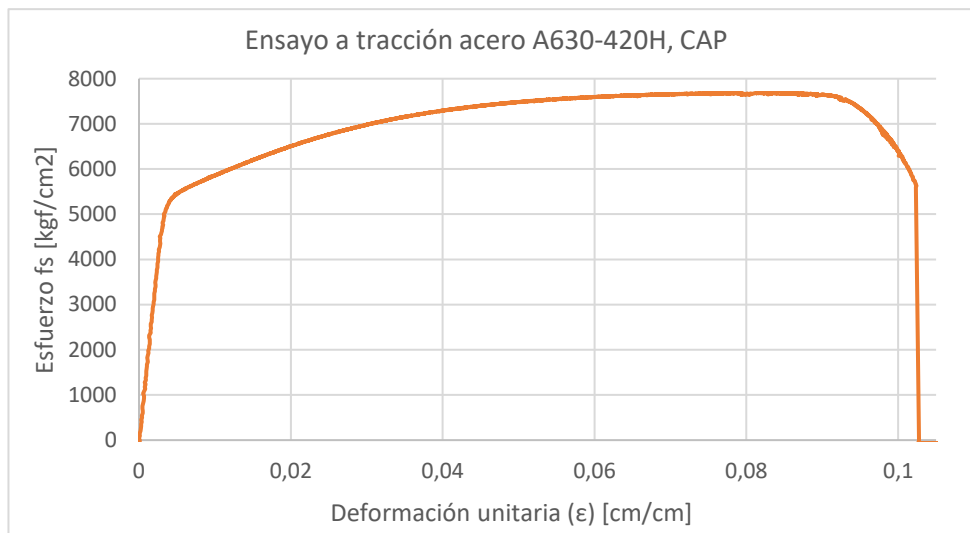
Refuerzo	Calidad	Diámetro [mm]
Longitudinal (AZA)	A630-420H	8
Transversal	Acero inoxidable AISI -304	3,175
Estribo extra	AT56-50H	4,2

Por otro lado, los estribos inclinados de la viga al ser de acero inoxidable se soldaron y se amarraron a las barras longitudinales con alambre negro recocido N°18.

A continuación, se presentan los resultados del ensayo a tracción de las barras longitudinales indicadas en la **Figura 13** y **Figura 14**. En las vigas se utilizó acero AZA y en las columnas se sustituyeron algunas con barras CAP.

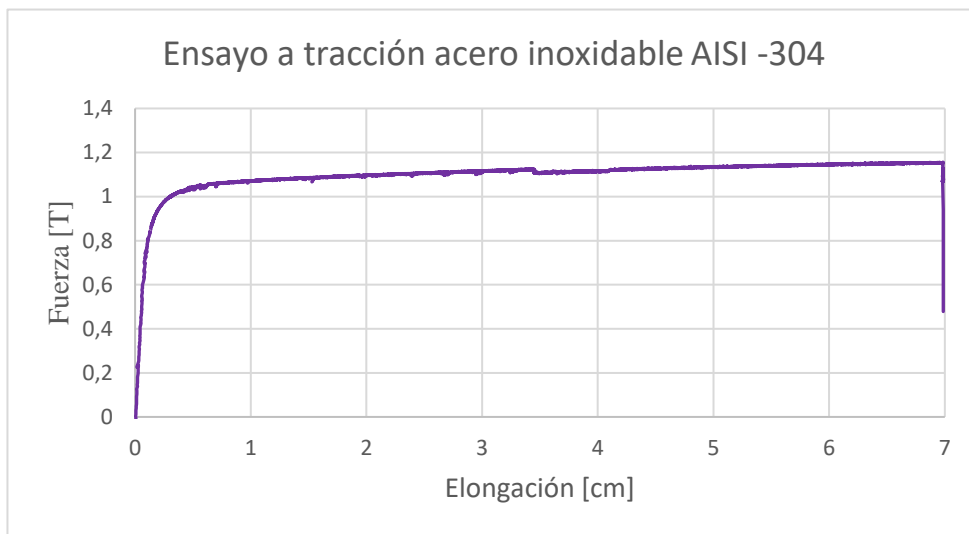


**Figura 13** Curva de ensayo tracción para acero AZA A630-420H





**Figura 15** Curva de ensayo tracción para acero AT56-50H

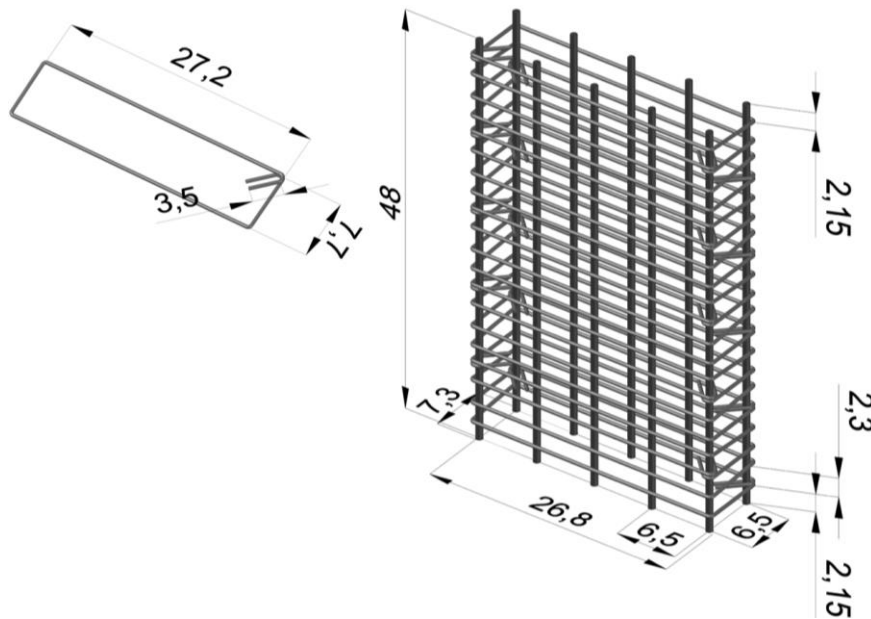


**Figura 16** Curva de ensayo tracción para acero inoxidable AISI-304

### 3.3. Confección de armadura

#### 3.3.1. Columna

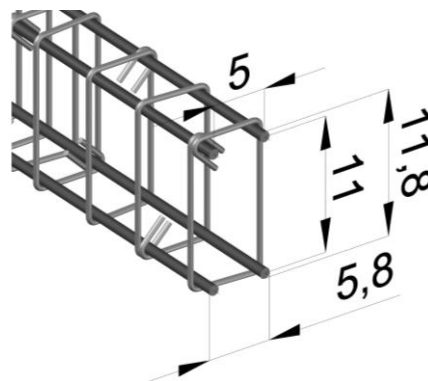
Para la elaboración de la armadura, se utilizaron barras longitudinales A630-420H en la columna de largo 48 [cm] y estribos con barras AT56-50H de longitud total 79 [cm], incluyendo ganchos sísmicos de 3,5 [cm]. Para mayores detalles, ver la **Figura 17**.



**Figura 17** Armadura de columna para especímenes, medidas en centímetros

#### 3.3.2. Viga

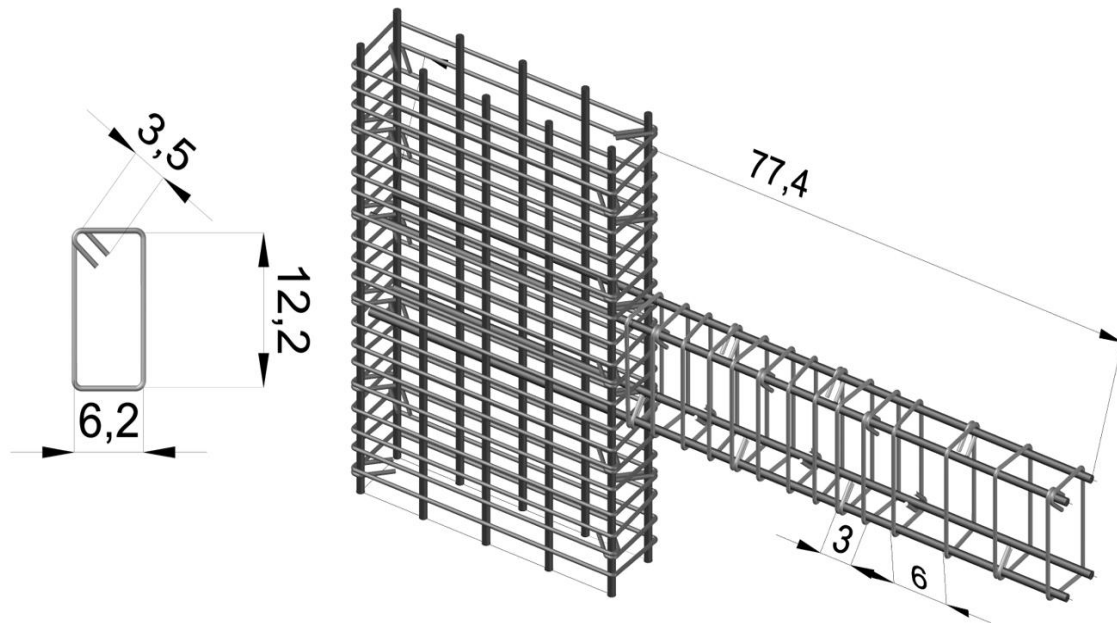
Las vigas tienen las dimensiones que se pueden observar en la **Figura 18**. Estas medidas se mantuvieron en las seis probetas.



**Figura 18** Dimensiones de viga para especímenes, medidas en centímetros

### 3.3.2.1. Viga con estribos ortogonales

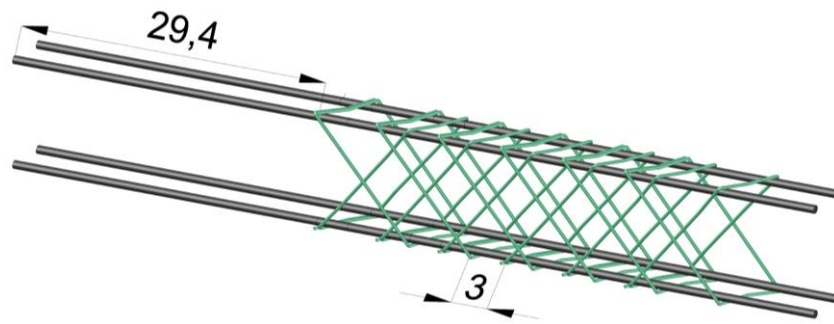
Para la elaboración de la viga en las dos primeras probetas las cuales se denominaron RM5 y RM6, se utilizaron barras longitudinales A630-420H en la viga de largo 77,4 [cm] y estribos con barras AT56-50H de longitud total de 43,8[cm], incluyendo ganchos sísmicos de 3,5 [cm]. Para mayores detalles, ver la **Figura 19**.



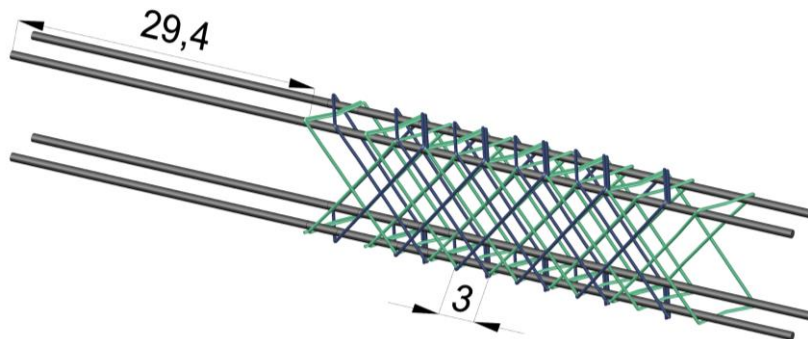
**Figura 19** Armado de probetas con estribos ortogonales en columna y viga, medidas en centímetros

### 3.3.2.2. Viga con estribos inclinados

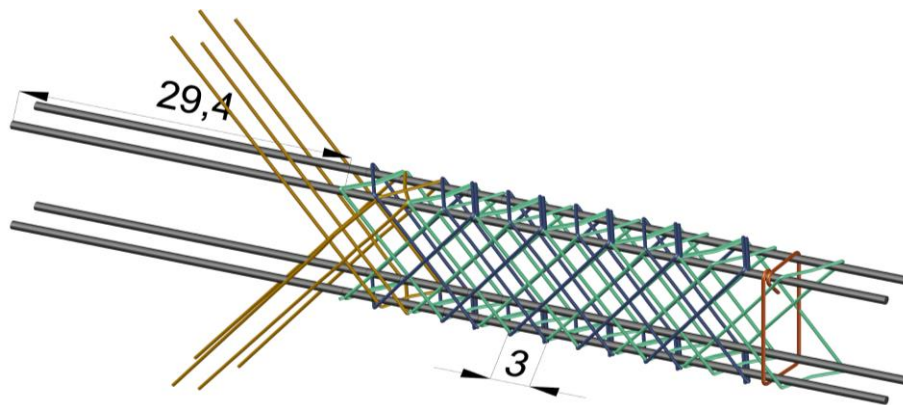
Para las otras cuatro probetas denominadas RM1, RM2, RM3 y RM4, también se utilizaron en la viga barras longitudinales A630-420H de las mismas dimensiones y separación entre ellas que lo indicado en el punto anterior. Pero en esta ocasión, se realizó el armado con estribos inclinados en dos planos de acero inoxidable AISI-304 de diámetro y dimensiones según lo observado en la **Figura 12** de esta memoria. Para esto, el armado se hizo correlativamente según lo que indica la **Figura 20 a 23**.



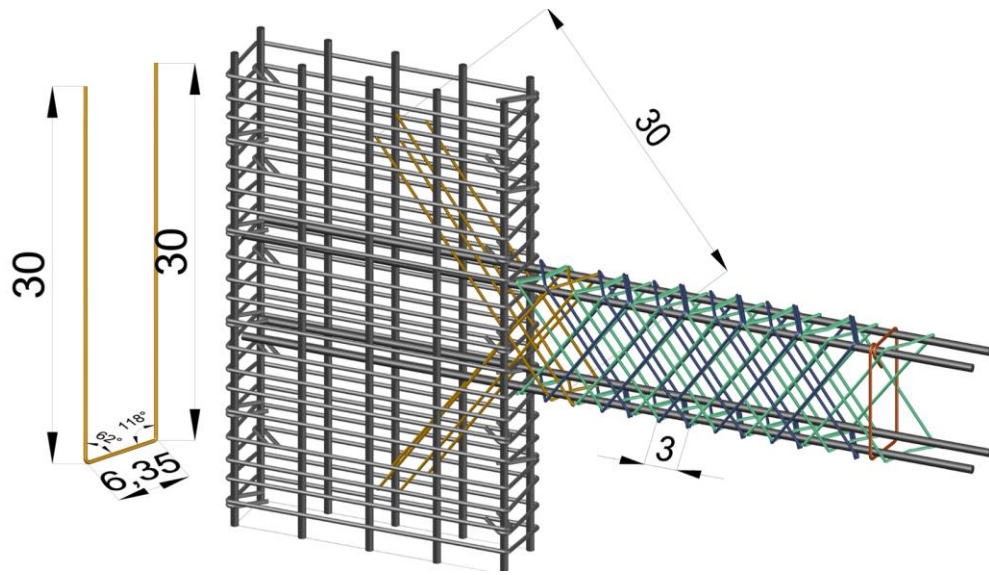
**Figura 20** Distribución de estribos inclinados en dos planos interiores, medidas en centímetros



**Figura 21** Distribución de estribos inclinados en dos planos exteriores, medidas en centímetros



**Figura 22** Distribución de estribos inclinados para anclaje a columna y estribo ortogonal para contención de extremo de viga, medidas en centímetros



**Figura 23** Armado de probetas con estribos inclinados y dimensiones de anclajes a columna, medidas en centímetros

### 3.4. Instalación de armadura en moldaje

#### 3.4.1. Armado moldaje

Se construyó el moldaje según las indicaciones de Maldonado, J. (2023) y en base a las dimensiones de las probetas de Bermúdez, A. (2024) como se ve en la **Figura 24**.

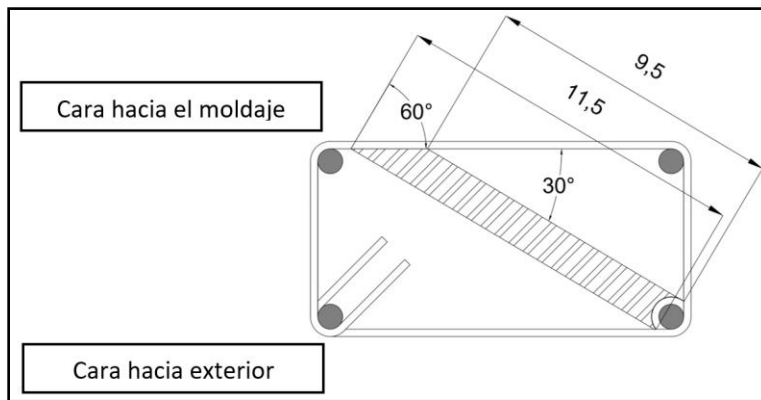


**Figura 24** Moldaje para especímenes terminado

### 3.4.2. Tubos para cámaras

Para este proyecto se buscó desarrollar un método para observar la armadura de la viga desde el interior a través de un endoscopio durante el ensayo cíclico, evitando interferir la zona del recubrimiento donde se genera el pandeo de la armadura. Además, para determinar si el uso de este equipamiento afecta la resistencia de la probeta, no se lo instaló en una de ellas (RM2).

Con lo anterior, se decidió instalar tubos de  $\varnothing 19$ [mm], con una longitud de 10,5 [cm] de eje a eje en la posición que se ve en la **Figura 25**.



**Figura 25** Corte transversal de la viga, representando tubos para cámaras endoscópicas, medidas en centímetros

Sin embargo, estas medidas solo se utilizaron en las probetas con estribos tradicionales debido a que los inclinados forman un enrejado, que impide la fácil instalación de los tubos dentro de la viga y que estos queden paralelos entre sí. Esto provocó que, en los especímenes con refuerzos transversales inclinados, la barra estudiada fuera la ubicada en el lado contrario a las de estribos ortogonales, como se ve en la **Figura 26**.



**Figura 26** Distribución de tubos en RM4 de estribos inclinados y RM6 con estribos ortogonales respectivamente de izquierda a derecha

A pesar de lo anterior, estos tubos comparten 3 rasgos distintivos:

#### 3.4.2.1. Desbaste en forma circular

Este se hizo con tal de que el tubo se ajuste con la forma del refuerzo longitudinal, así también, para visualizar el comportamiento interno de la estructura y el hormigón que rodea la barra durante las cargas cíclicas. Esto se observa en la **Figura 27**.



**Figura 27** Diseño de tubos en base a Figura 25, se identifica desbaste circular y corte diagonal en 60°

#### 3.4.2.2. Corte diagonal inclinado en 60°

El detalle se indica en la **Figura 25**, quedando este extremo a 30° en la zona inferior del moldaje como se ve en la **Figura 28** con la intención de que la estructura unitaria de la viga no se vea afectada por la pérdida de hormigón en su interior. Además, este una vez hormigonada la probeta, concede un acceso más fácil para el retiro del tapón de silicona que estará en su interior.



**Figura 28** Colocación de tubos para cámaras endoscópicas en 30° para armadura tradicional

### 3.4.2.3. Tapón tubular de silicona y alambre

Con tal de que el hormigón no ingrese al tubo y permitir el correcto acceso de las cámaras endoscópicas dentro de la viga, se dispuso un tapón de silicona dentro del conducto. Es esencial que esta pieza de sellado se pueda retirar fácilmente luego de fraguado el hormigón del espécimen. Por ende, se siguieron los siguientes pasos para su elaboración y previa instalación al hormigonado:

- I. Para un correcto **retiro de los tapones** en cada tubo, se corta un alambre negro N°18 de largo aproximadamente 24 [cm]. Luego de esto, este se dobla por la mitad y en el extremo de las esquinas se hace un doblez para lograr una forma de “Y”, generando la forma de la cavidad desbastada lo que se indica de color café en la **Figura 29**. Se debe procurar que estos últimos dobleces queden bien firmes, porque en caso de que sea necesario tirar muy fuerte del tapón cuando se vaya a extraer, estos no se desarmen y pueda quedar material dentro de la probeta, impidiendo ver la barra, lo cual ocurrió en las probetas de estribos ortogonales.
- II. Se colocó silicona caliente en la zona del alambre que tiene forma de “Y” para instalarlo donde está el desbaste circular, luego se rellenó el resto dentro del tubo **procurando sellar** todas las posibles partes donde pudiera ingresar el hormigón. También, se le colocó un trozo de barra longitudinal en el extremo desbastado para darle forma circular a la silicona quedando como resultado la **Figura 29**.



**Figura 29** Tapón de silicona utilizado para sellar el extremo del tubo en contacto con el refuerzo longitudinal

- III. Una vez endurecida la silicona, se **retiró el tapón** del tubo para verificar que este se extraiga fácilmente y que no se rompa o que queden restos de material dentro del tubo, proceso el cual se realizó previo al hormigonado. Esto quedó demostrado una vez hormigonada la probeta RM5 en la **Figura 30**. Sin embargo, quedaron restos de lechada y silicona porque no se logró que el tapón quedara bien adherido a la barra.



**Figura 30** Tapón de silicona retirado posterior al hormigonado de la probeta

- IV. Volver a colocar el tapón en su posición para sellar de la misma forma el extremo en 60° del tubo con silicona caliente según la **Figura 31**.



**Figura 31** Tubo sellado con silicona en extremo cortado en 60°

### 3.4.3. Colocación de la armadura en moldaje

Primero, se cortaron ocho barras roscadas de 5/8" con una medida 25 [cm] por probeta, las cuales se instalaron en el moldaje de la columna mediante perforaciones dimensionadas, esto según las placas metálicas del Laboratorio Sismorresistente indicadas por Maldonado, J. (2023).

Segundo, antes de montar la estructura en el moldaje e instalar las barras roscadas, es primordial colocar el desmoldante, según **Figura 32**. Este proceso, se realizó **máximo un día antes del hormigonado** para facilitar el retiro del moldaje post fraguado, aun así, no se colocó desmoldante donde van los tubos de las cámaras porque se debieron pegar con silicona al moldaje.



**Figura 32** Moldaje con aplicación de desmoldante un día previo al hormigonado

Tercero, se colocaron separadores circulares en armadura de columna y viga como se ve en la **Figura 33**. Para la primera se colocan separadores de radio 2 [cm] y son instalados a partir de la barra longitudinal de la columna. En cambio, para la viga se tuvo que colocar un separador cortado de radio 5 [mm] desde el estribo.



**Figura 33** Instalación de separadores para columna y viga

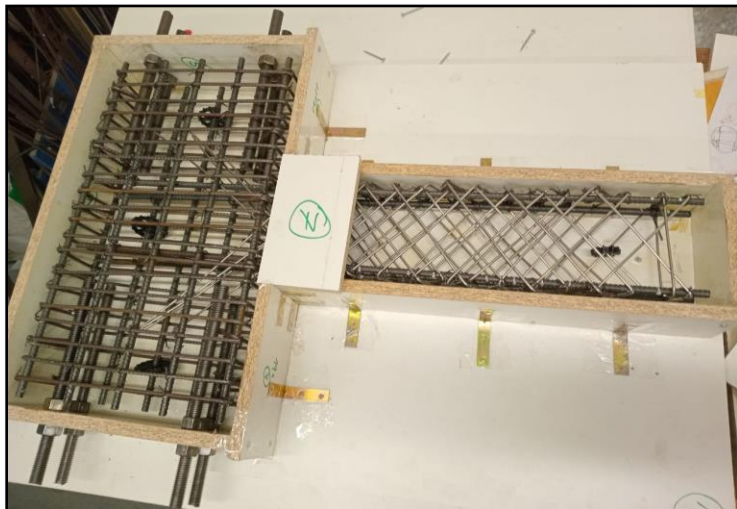
Cuarto, ya con el desmoldante aplicado sobre el moldaje y la armadura con separadores, se instaló la estructura junto con los tubos de las cámaras en sus posiciones, adheridos con silicona caliente, lo cual evitó movimientos del tubo durante el hormigonado y, por consiguiente, permitió un retiro más fácil y eficiente del tapón en el extremo de 60° posterior al endurecimiento del hormigón.

Quinto, se instalaron las barras roscadas en los agujeros de la placa, quedando aproximadamente a 6,5 [cm] desde el exterior del moldaje, las cuales se fijaron con una tuerca externa e interna a la placa de melamina como indica la **Figura 34**.



**Figura 34** Longitud externa al moldaje de barras roscadas de 6,5 [cm]

Finalmente, se tuvo el resultado la **Figura 35**.



**Figura 35** Montaje final de armadura al interior del moldaje

### 3.5. Hormigonado de probetas

Para el proceso de hormigonado, se siguieron las dosificaciones de la **Tabla 2** y con ayuda de personal del LEMCO, se utilizaron distintos equipos y herramientas para obtener los mejores resultados posibles, como la betonera de 200 [L], la mesa vibradora, entre otros más que se indicaron en la memoria de Maldonado, J. (2023).



**Figura 36** Proceso de hormigonado especímenes, traslado de hormigón a betonera, vibrado y preparación de probetas cilíndricas, de izquierda a derecha

Como se puede ver en la **Figura 36**, se indica el proceso de hormigonado, con su respectivo vibrado y en la **Figura 37**, las probetas después de este proceso, las cuales se desmoldaron pasados los 4 días y se mantuvieron hasta los 28 días en la **cámara húmeda** para el término de fraguado.



**Figura 37** Fin del proceso de hormigonado en probetas cilíndricas y segmentos de marcos estructurales

# Capítulo IV

## 4. Montaje para ensayo y medición

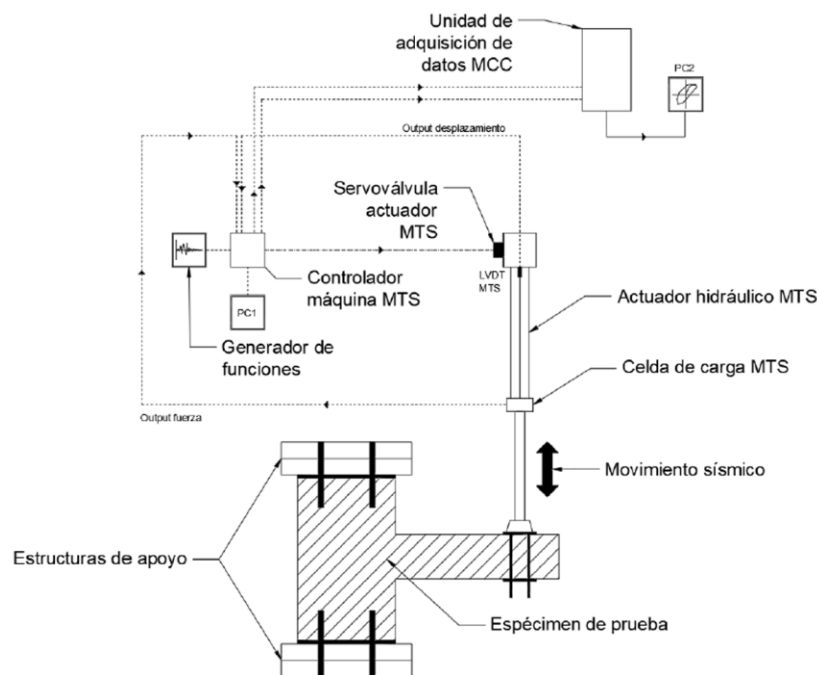
### 4.1. Equipos utilizados

Los ensayos se ejecutaron usando el actuador hidráulico MTS-244 de la mesa sísmica del Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente del LEMCO, para lo cual la plataforma de la mesa fue retirada.

El desplazamiento en el extremo se midió con el transductor interno del actuador mientras que la fuerza aplicada se midió con la celda de carga que el actuador tiene en el extremo. Esta información se recogió con un sistema de adquisición de datos MCC, como se indica en la **Figura 38**.

Es importante mencionar que se instalaron dos cámaras de video que poseen una resolución 4K (3840 x 2160 píxeles) para analizar posteriormente el comportamiento de los especímenes en los ensayos. Una de ellas se colocó sobre la probeta para la visualización completa del montaje y comportamiento de la viga. La otra se posicionó al costado de la viga.

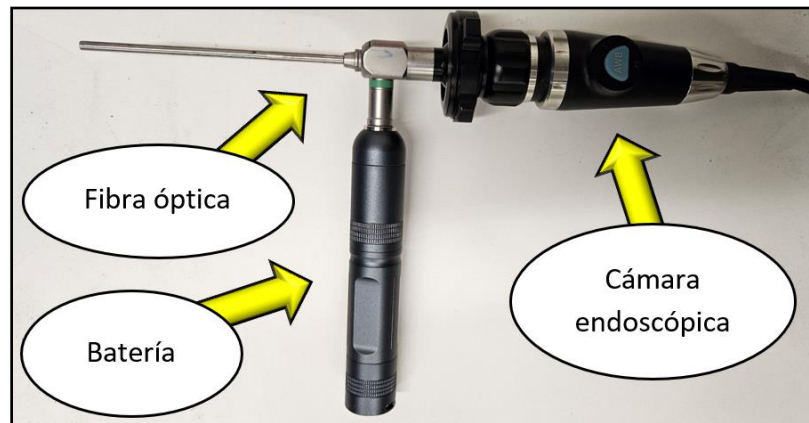
Mayores detalles sobre el montaje de los especímenes aparecen en la memoria de Ayaviri, R. (2025).



**Figura 38** Diagrama unilineal del sistema MTS utilizado en los ensayos

Fuente: Maldonado, J. (2023).

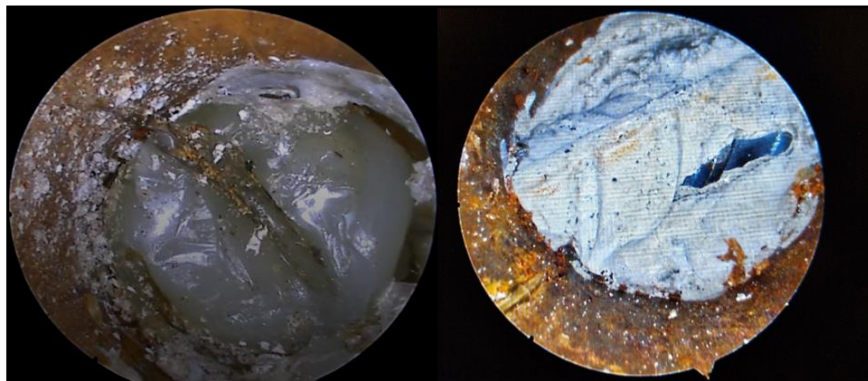
Las cámaras endoscópicas ENT1080p que fueron utilizadas en esta investigación se usan principalmente para procedimientos médicos mínimamente invasivos. Poseen una resolución de 2,07 megapíxeles a 60 cuadros por segundo, capaces de captar videos en alta definición y con una luminosidad de alta intensidad gracias a un tubo que contiene fibra óptica el cual provee iluminación, proveniente de una linterna ubicada en la batería lateral, como indica la **Figura 39**. Estas son compatibles con monitores y cuentan con salida USB que se pueden conectar a cualquier computador. Por último, la grabación del video se hizo por medio del Software "OBS Studio".



**Figura 39** Cámara endoscópica utilizada en estudio, con sus piezas

#### 4.2. Preparación del sistema

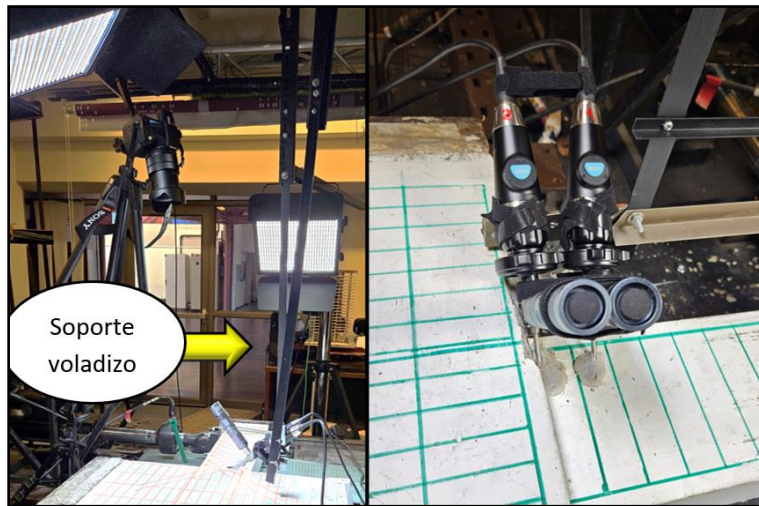
Lo primero fue el pulido y eliminación de la lechada que se encontraba sobre las barras longitudinales, así también como los restos de silicona como indica la **Figura 40**. Esto resultó de suma importancia debido a que los tapones de silicona si bien se pudieron retirar, no quedaron con una buena adherencia a la barra, lo que permitió la entrada de hormigón entre esta y el tapón. También, quedaron residuos de silicona caliente, por lo cual fue necesario utilizar herramientas para la eliminación de estos restos de material, como se muestra en la **Figura 85**.



**Figura 40** Residuos de silicona y de lechada posterior al retiro del tapón una vez hormigonada la probeta

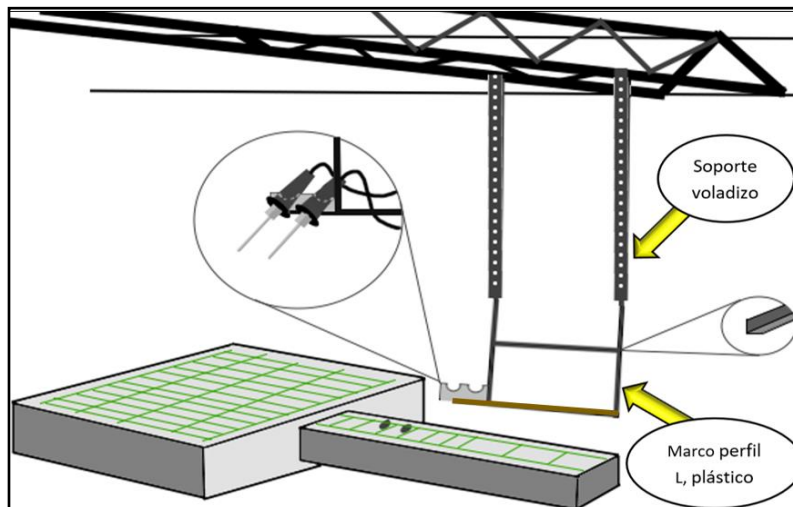
### 4.3. Instalación del soporte para cámaras endoscópicas

El soporte se realizó en voladizo tal como se muestra en la **Figura 41**, para no dañar con fijaciones la probeta y porque las cámaras endoscópicas debían insertarse inclinadas, por ende, estas se encajaron en una placa metálica con cavidades que sirvieron de soporte como indica el esquema de la **Figura 42**. Por lo tanto, las cámaras cuelgan para adaptarse a los desplazamientos de la viga, pero manteniendo la distancia entre ellas.

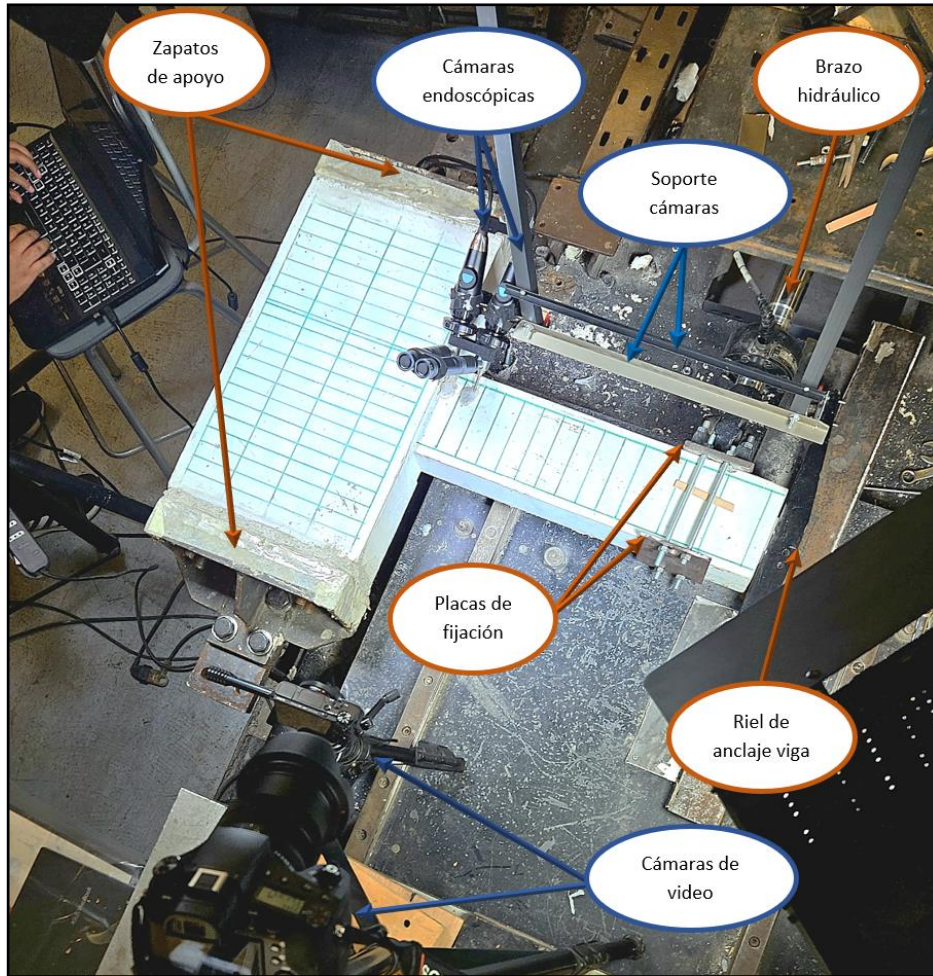


**Figura 41** Soporte en voladizo para estudio de deformación de las barras longitudinales con cámaras endoscópicas

Por último, el montaje para ensayo queda como indica la **Figura 43**:



**Figura 42** Esquema que describe soporte voladizo desde base elevada del Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente



**Figura 43** Montaje final de probeta para ensayo

# Capítulo V

## 5. Resultados

### 5.1. Ciclos de carga por nivel

El plan de carga se hizo en base al estándar usado en otros ensayos dentro del LEMCO, no obstante, hubo variaciones en la cantidad de ciclos durante los ensayos, como indica en la **Tabla 6**.

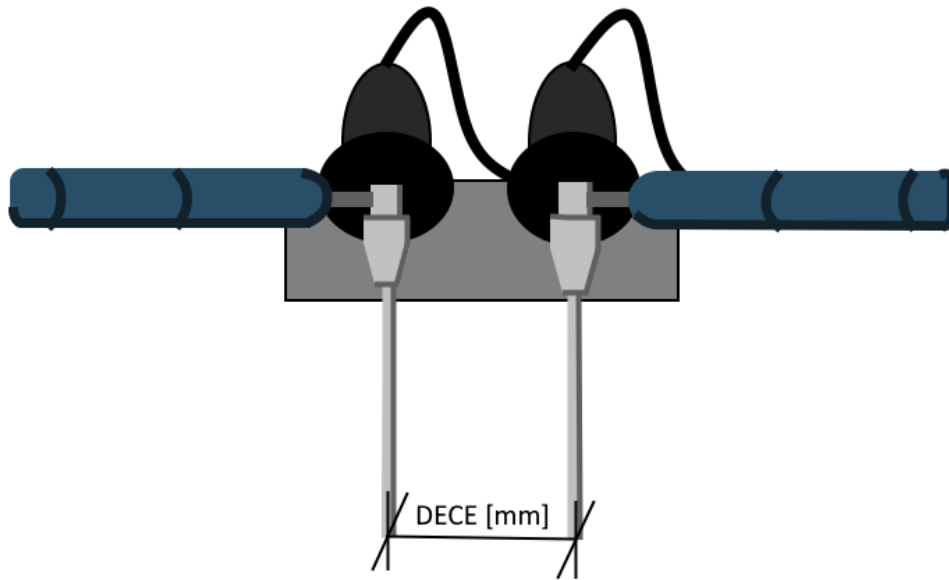
**Tabla 6** Ciclos utilizados en cada probeta

Cantidad de Ciclos por Nivel							
Nivel de desplazamiento	Estándar	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
5 [mm]	5	5	5	5	5	5	5
10 [mm]	5	5	5	5	5	5	5
15 [mm]	5	5	5	5	5	5	5
20 [mm]	5	5	5	6	5	5	5
25 [mm]	10	11	9	11	11	8	10
30 [mm]	5	5	0	3	0	0	1

Previo al ensayo, se midió la separación entre el eje final de cada cámara endoscópica, lo cual es esencial para la medición de la deformación unitaria, obteniendo los valores de la **Tabla 7**. Esta distancia se explica en la **Figura 44**.

**Tabla 7** Distancia entre cámaras endoscópicas por probeta

Probeta	Distancia entre cámaras endoscópicas (DECE) [mm]
RM1	60
RM2	N/A
RM3	60
RM4	60
RM5	38
RM6	39



**Figura 44** Esquema de distanciamiento entre cámaras endoscópicas (DECE)

A continuación, se describen detalles de cada probeta, destacando que el análisis en profundidad de las curvas de histéresis y de los daños en las probetas, fueron realizados por el memorista asociado Ayaviri, R. (2025).

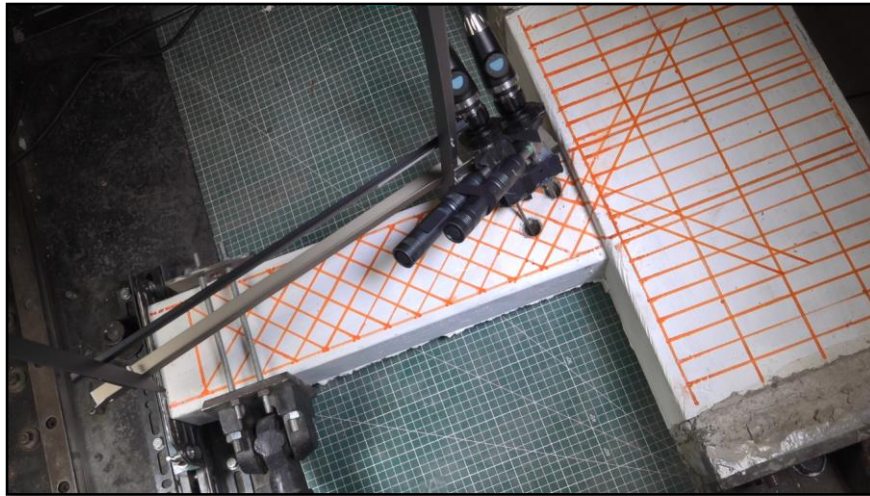
Es importante destacar que el orden cronológico de estos ensayos fue el siguiente:

- i. RM5
- ii. RM3
- iii. RM1
- iv. RM6
- v. RM4
- vi. RM2

Este detalle es necesario para la comprensión de las mejoras realizadas para cada probeta según lo sucedido en cada ensayo, puesto que se cometieron numerosos errores que se produjeron en los primeros tres ensayos y que fueron resueltos en los últimos especímenes.

### 5.1.1. RM1, probeta con estribos inclinados





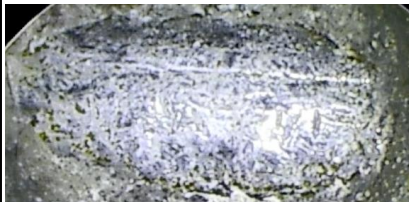



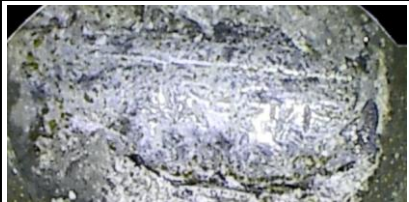



De esta probeta se destaca la mayor cantidad de ciclos previo a la fractura de los elementos longitudinales resistiendo hasta el tercer ciclo de 30 [mm] como se ve en la **Figura 46**. Según lo observado en las cámaras endoscópicas estas no lograron captar la misma zona de la barra puesto que los tubos no quedaron paralelos entre uno y otro como se ve en la **Figura 45**, además, no se logra ver estrías en la cámara 1. También, en la cámara 2 debido al proceso de limpieza de las barras, estas no lograron mantener su apariencia, ni sus dimensiones lo cual impidió la determinación precisa de la deformación de las barras longitudinales. Esto se muestra en la **Figura 47**, donde se observa el comportamiento de la barra en el quinto ciclo por nivel de carga.



**Figura 45** Probeta RM1 sin carga al comienzo del ensayo

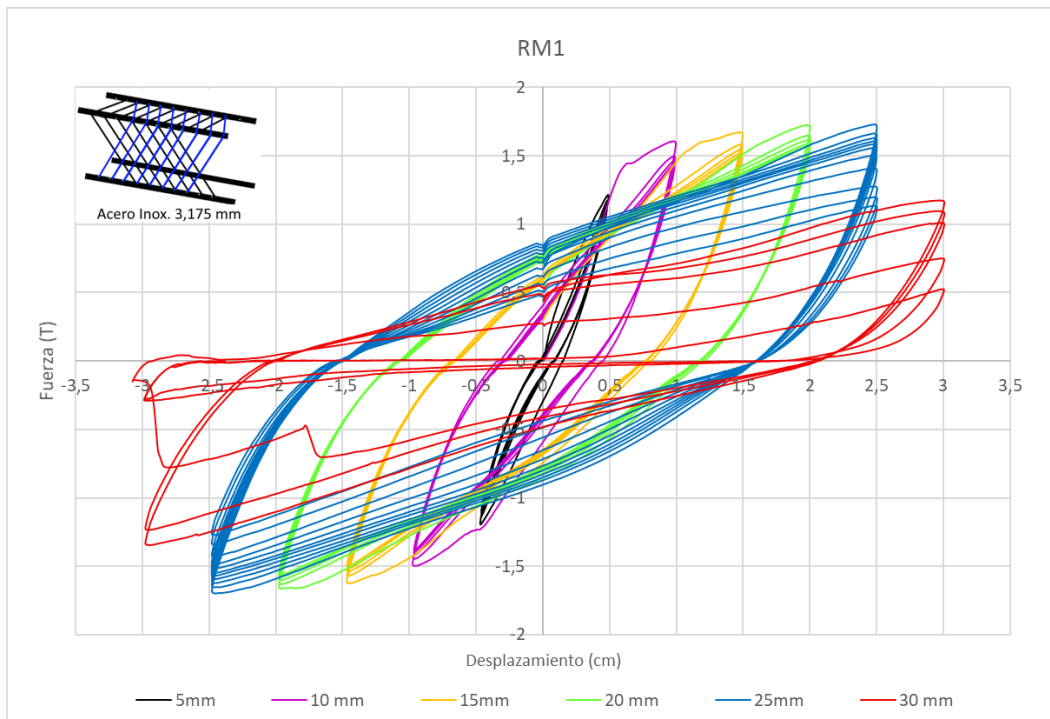


**Figura 46** Especimen RM1 posterior a ensayo de sollicitación sísmica

5° CICLO POR NIVEL - PROBETA RM1 - CARGA POSITIVA		
CICLO	CÁMARA 1	CÁMARA 2
BASE 0 [mm]		
10 [mm]		
15 [mm]		
20 [mm]		
25 [mm]		
30 [mm] (3° CICLO)		

**Figura 47** Secuencia de barra longitudinal en RM6 en el 5° ciclo por nivel de carga y el último ciclo del ensayo

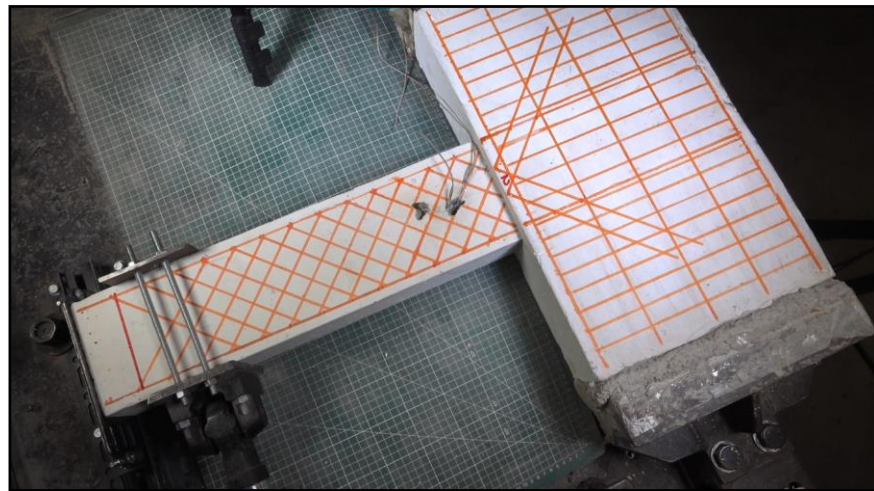
Por último, en la **Figura 48** se muestra la curva de histéresis para la probeta RM1.



**Figura 48** Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM1

### 5.1.2. RM2, probeta con estribos inclinados

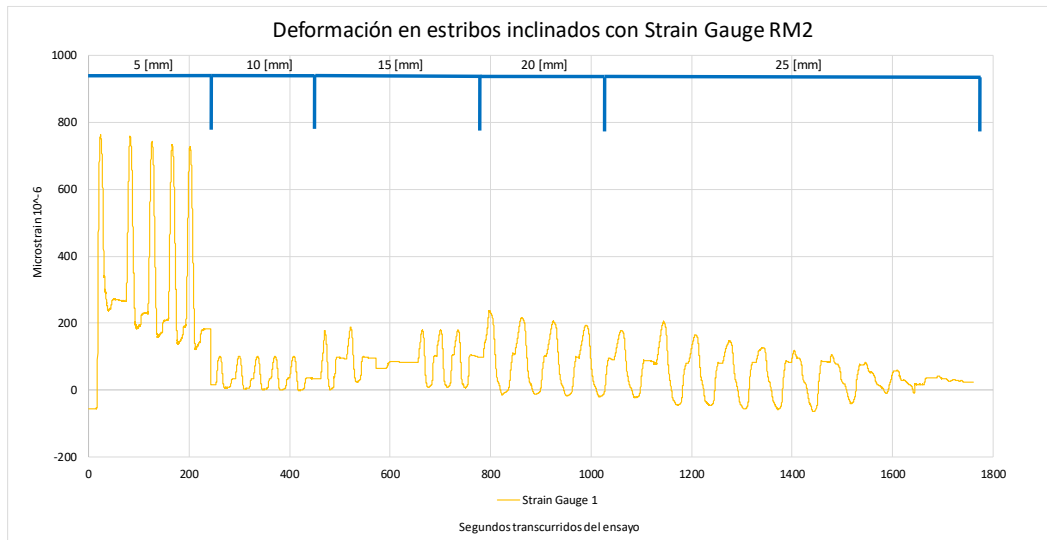
En la probeta RM2, no hubo cámaras endoscópicas en la viga, sino que se colocaron estampillas extensiométricas en dos de los estribos como se ve en la **Figura 49 y 50**. En esta, se obtuvieron fracturas de los elementos longitudinales en una cantidad de ciclos menor a lo ocurrido en los otros ensayos. Por otro lado, el uso de las galgas extensiométricas o strain gauges permitió observar el comportamiento de los estribos inclinados durante las cargas cíclicas positivas y negativas, pero solo hasta los primeros ciclos según indica la **Figura 51**, ya que se despegaron o fallaron. Funcionando solo hasta las deformaciones que corresponden a la fluencia del acero.



**Figura 49** Probeta RM2 sin carga al comienzo del ensayo

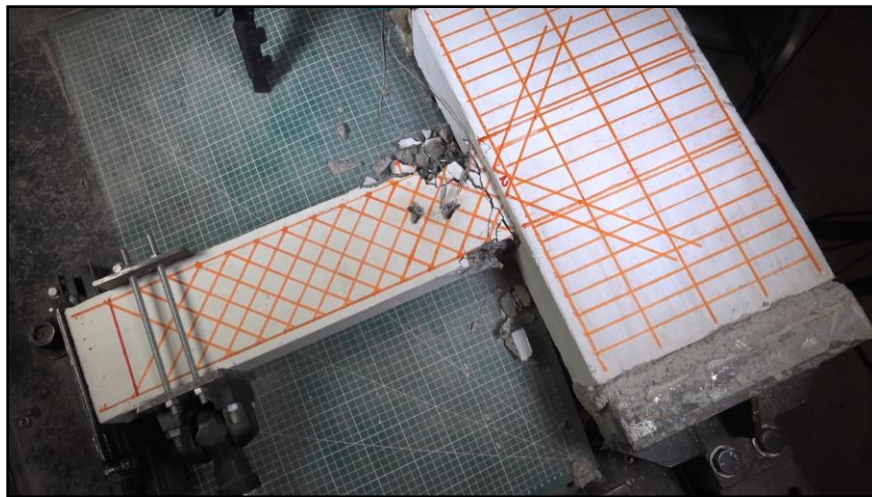


**Figura 50** Instalación de galgas extensiométricas en estribos inclinados de espécimen RM2



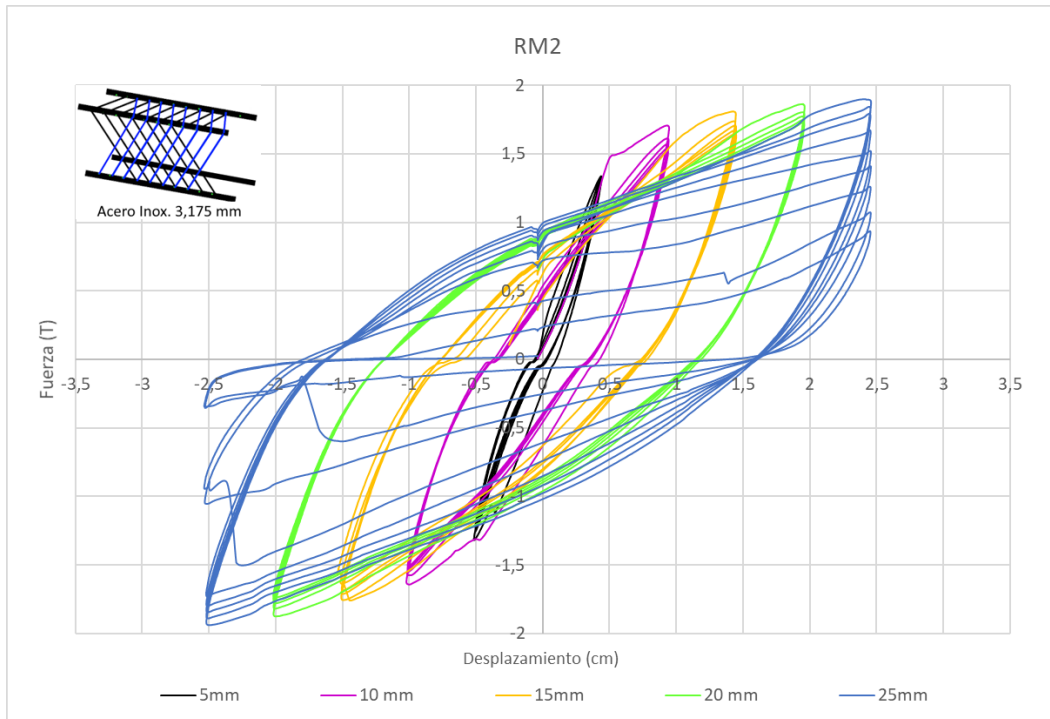
**Figura 51** Curva obtenida respecto al comportamiento de los strain gauges

De lo anterior, se observa que solo hasta los desplazamientos de 5 [mm] se tienen resultados razonables, además de solo aparecer una de las dos estampillas extensiométricas puesto que una se despegó, siendo esta una de las razones de que este sistema no funcionase, así también por la dificultad e inexperiencia en el empleo de estos instrumentos. La probeta resistió hasta el octavo ciclo de 25 [mm], quedando como indica la **Figura 52**.



**Figura 52** Especimen RM2 posterior a ensayo de sollicitación sísmica

Por último, en la **Figura 53** se muestra la curva de histéresis para la probeta RM2.

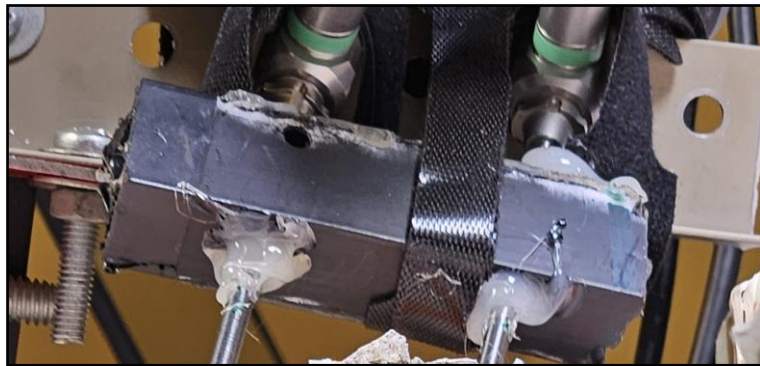


**Figura 53** Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM2

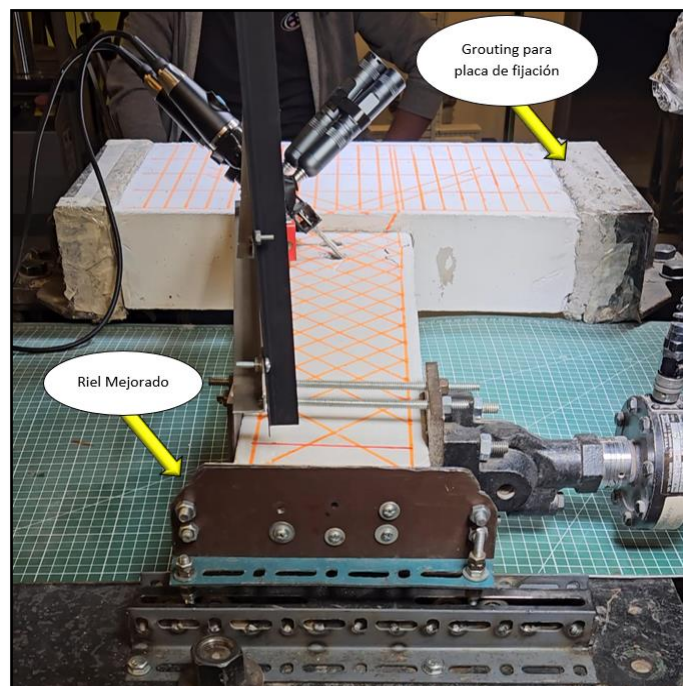
### 5.1.3. RM3, probeta con estribos inclinados

Para este espécimen se mejoró el soporte entre cámaras endoscópicas para mantener la distancia entre ellas constante según la **Figura 54** y se instaló el riel guía indicado en la **Figura 55** debido a que el anterior no evitó la torsión de la viga durante los últimos ciclos.

Un aspecto a considerar es que la materialidad de los tubos se cambió por unos de acero para barras de cortina, que poseen espesor 1,3 [mm] en comparación a los antes utilizados de 0,6 [mm] en RM5 y RM6, puesto que estos últimos se aplastaron en RM5.











**Figura 54** Placa plástica para mantener distancia entre cámaras (DECE) constante



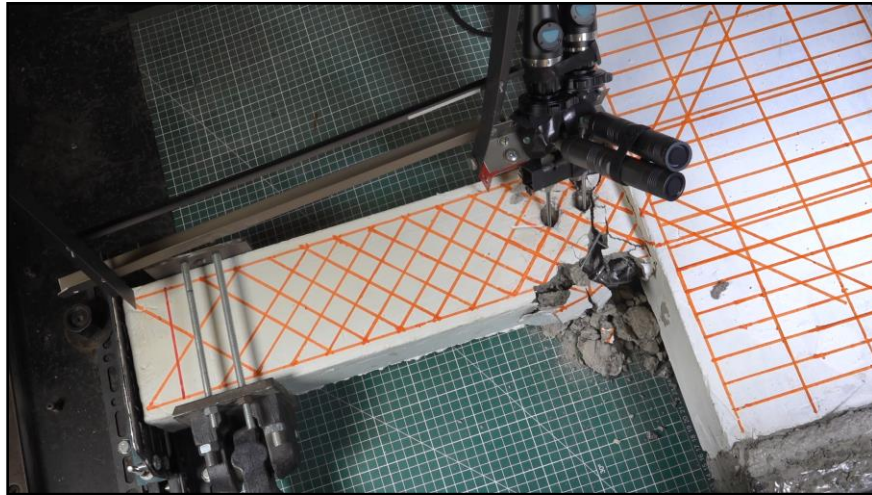
**Figura 55** Riel mejorado posterior a ensayo de RM5 y distribución de grouting

Las fotografías de las cámaras endoscópicas en esta probeta tuvieron mala calidad como se indica en la **Figura 56**, impidiendo mediciones.

5° CICLO POR NIVEL - PROBETA RM3 - CARGA POSITIVA		
CICLO	CÁMARA 1	CÁMARA 2
BASE 0 [mm]		
10 [mm], 15 [mm], 20 [mm]	VIDEOS DAÑADOS	VIDEOS DAÑADOS
25 [mm] (5° CICLO)		
25 [mm] (10° CICLO)		
30 [mm]		

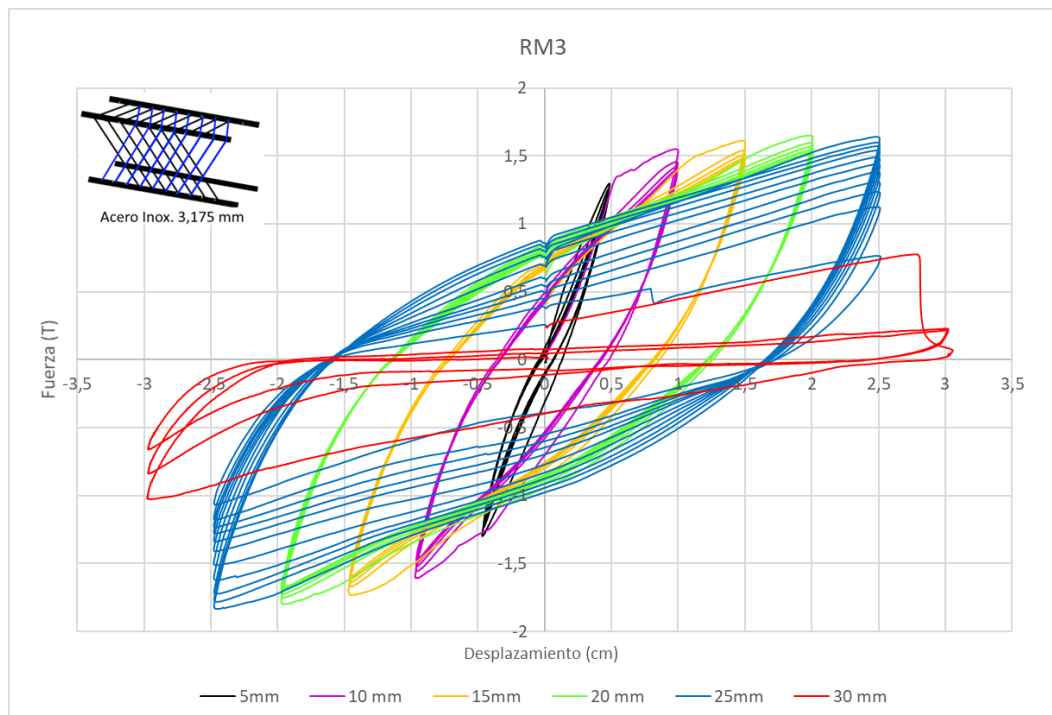
**Figura 56** Secuencia de barra longitudinal en RM3 en el 5° ciclo por nivel de carga con excepciones y el último ciclo del ensayo

Finalmente, la prueba se detuvo en el 1° ciclo de 30 [mm] luego de que dos de sus barras se fracturaran, quedando como indica la **Figura 57**.



**Figura 57** Espécimen RM3 posterior a ensayo de sollicitación sísmica

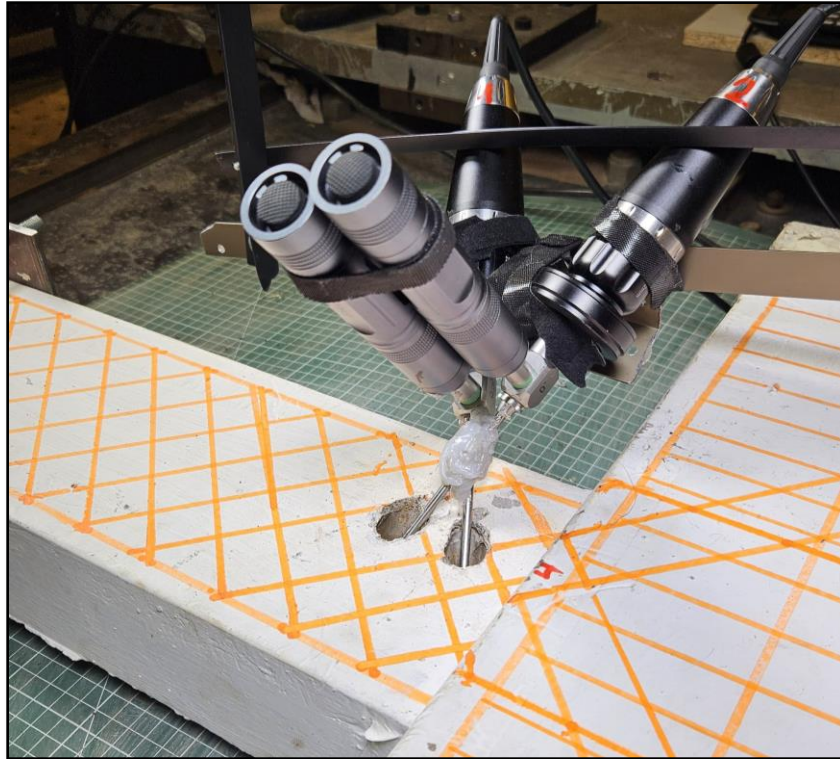
En la **Figura 58** se muestra la curva de histéresis para la probeta RM3.



**Figura 58** Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM3





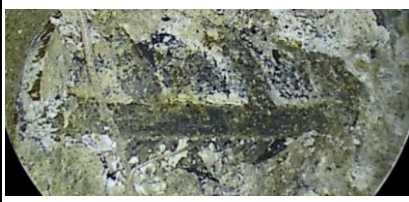





#### 5.1.4. RM4, probeta con estribos inclinados

Lo que destaca de este espécimen es que los tubos quedaron cruzados uno respecto al otro, así que se debió generar una junta entre las cámaras con una pequeña placa al centro y envuelta en silicona caliente para mantener la distancia entre cámaras como se visualiza en la **Figura 59**.



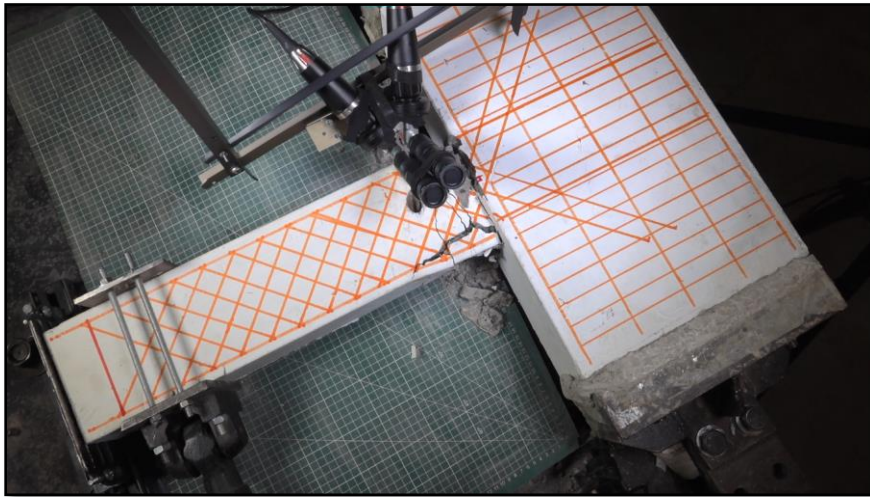
**Figura 59** Probeta RM4 sin carga al comienzo del ensayo

Por otro lado, en la **Figura 60** se indica el comportamiento de las barras longitudinales en los niveles de carga.

5° CICLO POR NIVEL - PROBETA RM4 - CARGA POSITIVA		
CICLO	CÁMARA 1	CÁMARA 2
BASE 0 [mm]		
10 [mm]		
15 [mm]		
20 [mm]		
25 [mm]		

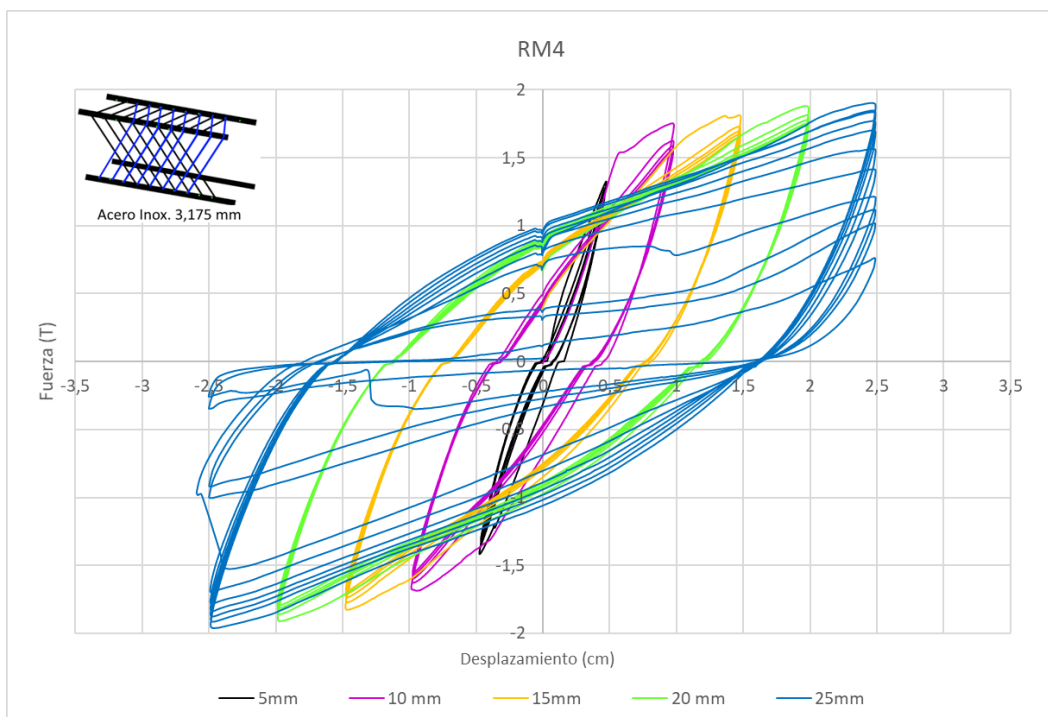
**Figura 60** Secuencia de barra longitudinal en RM4 en el 5° ciclo por nivel de carga y el último ciclo del ensayo

Finalmente, la prueba se detuvo en el 10° ciclo de 25 [mm] luego de que dos de las barras se fracturaran, quedando la probeta como indica la **Figura 61**.



**Figura 61** Espécimen RM4 posterior a ensayo de sollicitación sísmica

La **Figura 62** se muestra la curva de histéresis para la probeta RM4.



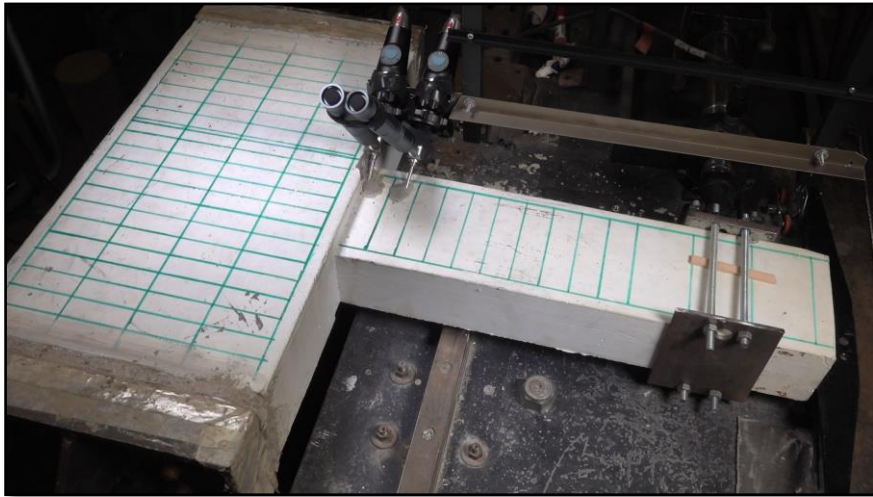
**Figura 62** Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM4

### 5.1.5. RM5, probeta con estribos ortogonales

Esta fue la primera probeta que se ensayó y fue la base para los cambios en el montaje final.

Lo primero consiste en que el riel guía es el usado por Bermúdez, A. (2024) pero con modificaciones, puesto que este no contenía bien la torsión de la viga durante los ciclos de esfuerzo con mucha amplitud.

Lo segundo, se trata de la fijación de las cámaras endoscópicas a los tubos mediante silicona según la **Figura 63**, lo cual en su momento iba a facilitar la observación del desplazamiento de las barras, debido a que estas se mantendrían centradas, pero a causa de que el hormigón deformó los tubos una vez avanzado el ensayo como muestra la **Figura 64**, la distancia entre cámaras endoscópicas (DECE) no fue constante, por lo cual se descartó este diseño para el estudio de la deformación unitaria.










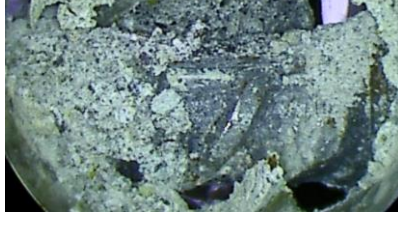


**Figura 63** Probeta RM5 sin carga al comienzo del ensayo



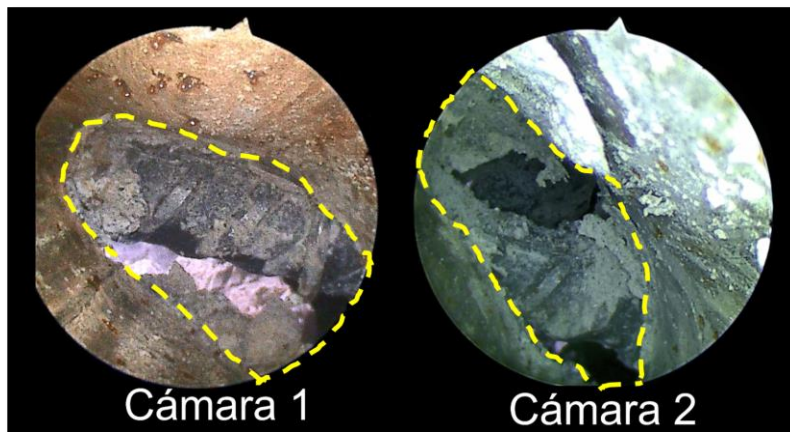
**Figura 64** Espécimen RM5 posterior a ensayo de sollicitación sísmica

Por otro lado, en la **Figura 65** se indica el comportamiento de las barras longitudinales en los niveles de carga.

5° CICLO POR NIVEL - PROBETA RM5 - CARGA NEGATIVA		
CICLO	CÁMARA 1	CÁMARA 2
BASE 0 [mm]		
10 [mm]		
15 [mm]		
20 [mm]		
25 [mm]		

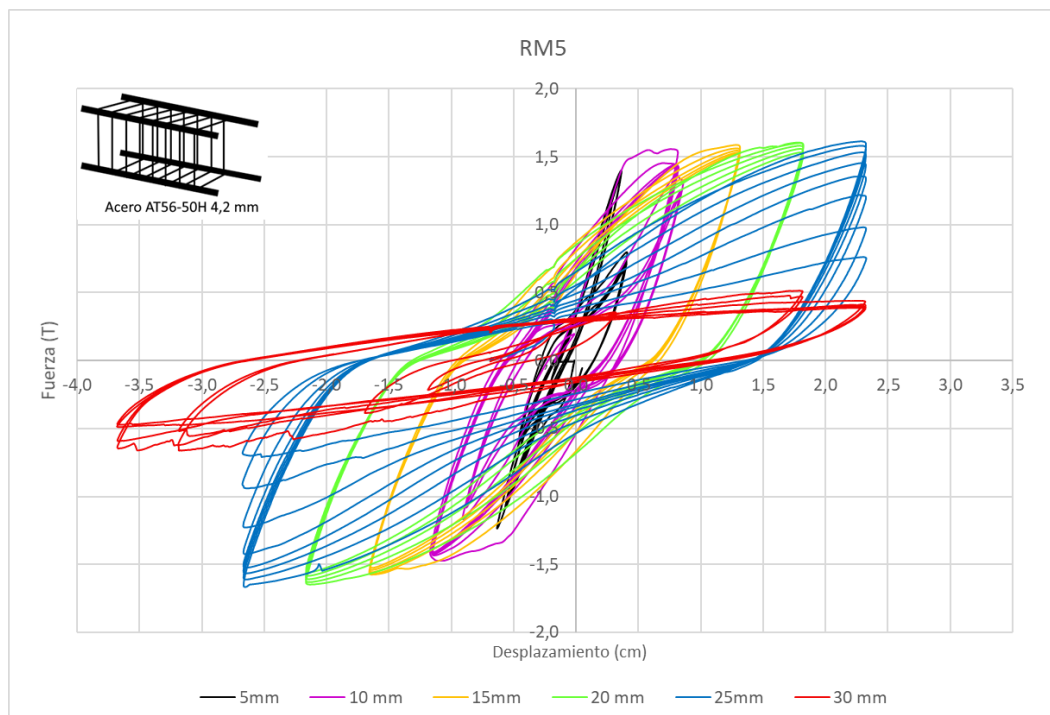
**Figura 65** Secuencia de barra longitudinal en RM5 en el 5° ciclo por nivel de carga y el último ciclo del ensayo

Durante los últimos ciclos, se tuvo un aplastamiento de los tubos usados para las cámaras endoscópicas debido a la alta deformación del hormigón en su interior según la **Figura 66**. En el 8° ciclo de 25 [mm] esto se agravo, por lo que se decidió **no seguir con el ensayo** por riesgo de daño a las cámaras endoscópicas.



**Figura 66** Aplastamiento de tubos, espesor de 0,6 [mm] no fue suficiente

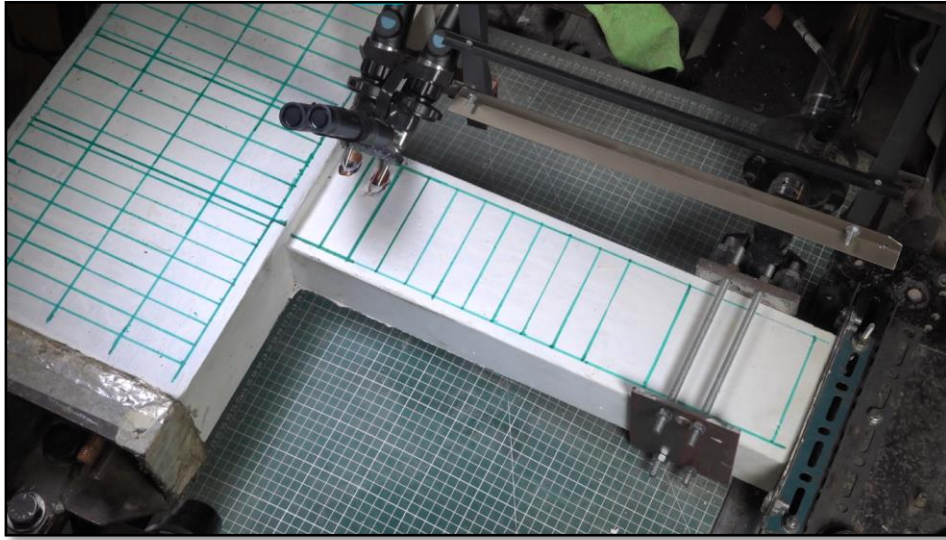
Además, se observa que el riel de fijación pierde su capacidad de regular la torsión de la probeta, como sucedió con Bermúdez, A. (2024), por lo cual se descarta este diseño y se creó otro soporte. Y por último, en la **Figura 67** se muestra la curva de histéresis para la probeta RM5.



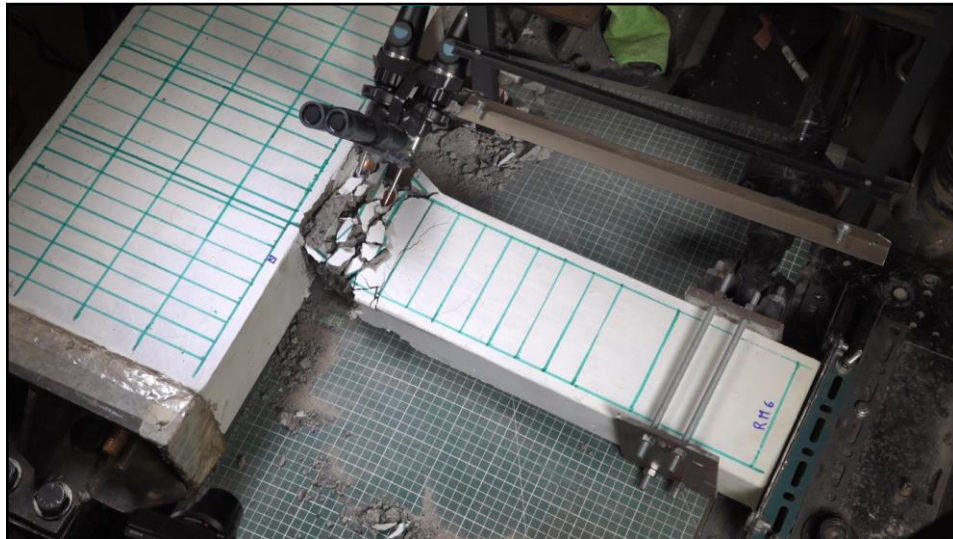
**Figura 67** Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM5

### 5.1.6. RM6, probeta con estribos ortogonales

En esta probeta se instaló en su interior tubos de cobre de espesor 1,3 [mm] para reforzar las paredes como se ve en la **Figura 68**. Cabe destacar que esta probeta tuvo un comportamiento diferente a RM5, y donde también se observó un mayor pandeo de la viga en los niveles de carga mayores, esto se puede ver en la **Figura 69**.









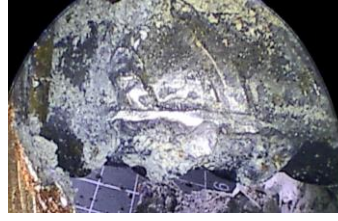
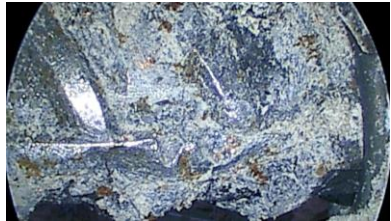
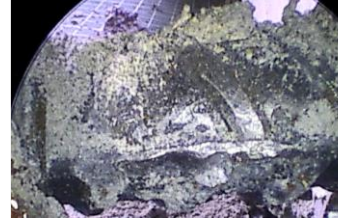



**Figura 68** Probeta RM6 sin carga al comienzo del ensayo



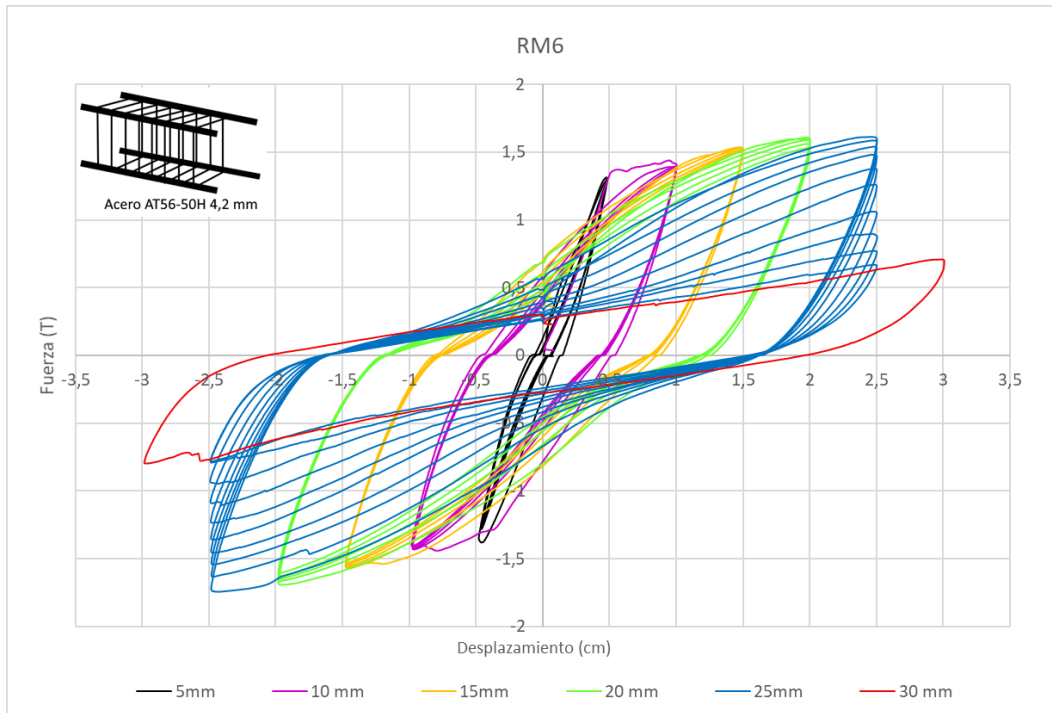
**Figura 69** Probeta RM6 posterior a ensayo de sollicitación sísmica

Por otro lado, en la **Figura 70** se indica el comportamiento de las barras longitudinales en los niveles de carga.

5° CICLO POR NIVEL - PROBETA RM6 - CARGA NEGATIVA		
CICLO	CÁMARA 1	CÁMARA 2
BASE 0 [mm]		
10 [mm]		
15 [mm]		
20 [mm]		
25 [mm]		
30 [mm]		

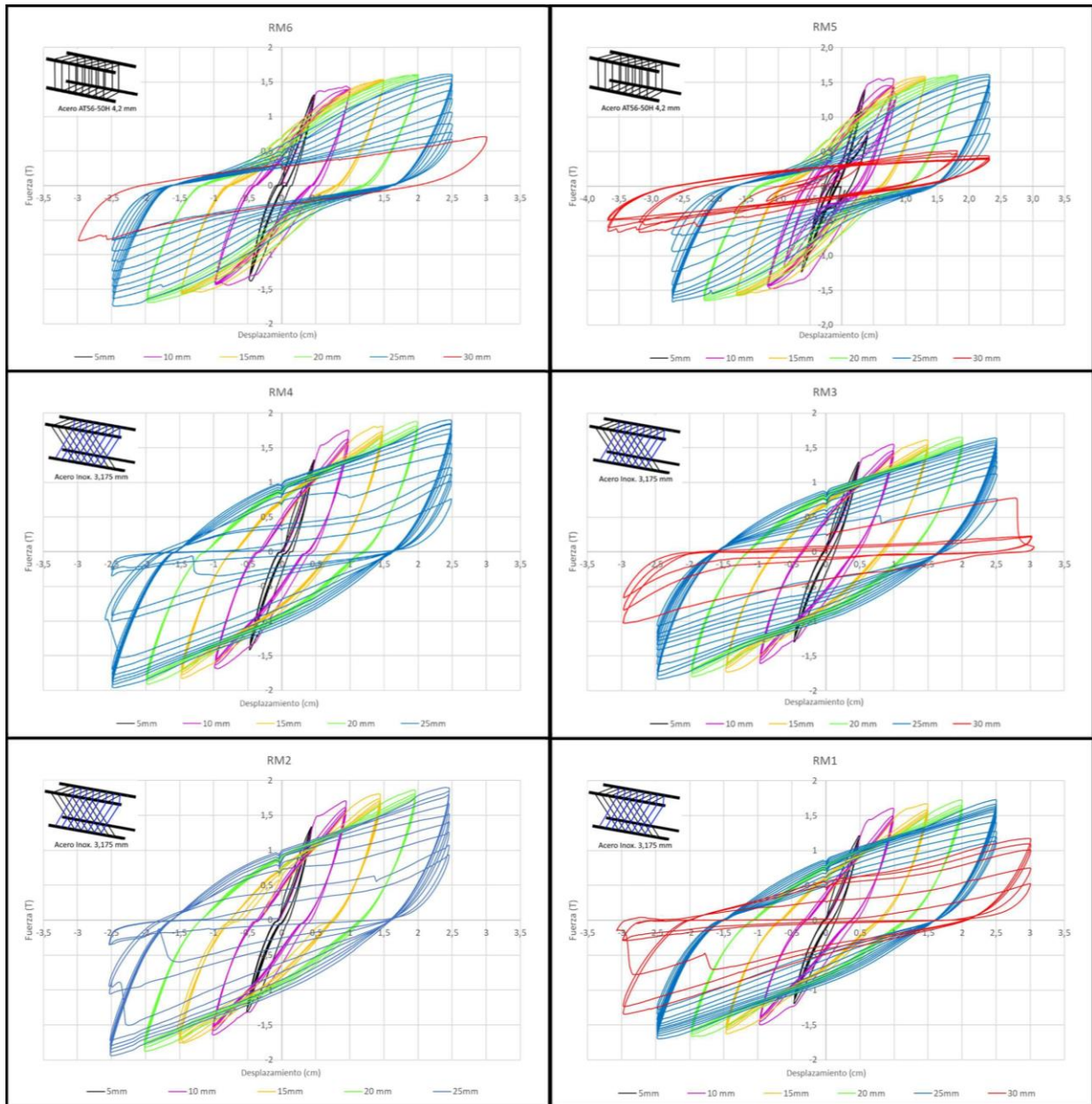
**Figura 70** Secuencia de barra longitudinal en RM6 en el 5° ciclo por nivel de carga y el último ciclo del ensayo

Por último, en la **Figura 71** se muestra la curva de histéresis para la probeta RM6.



**Figura 71** Curva de histéresis fuerza-desplazamiento obtenida en ensayo de espécimen RM6

## 5.2. Selección de probetas para medir la deformación con las cámaras endoscópicas.



**Figura 72** Curvas de histéresis por probeta para comparación visual de ellas

Según la **Figura 72**, se observan ciclos de histéresis más anchos y estables en las probetas con el uso de estribos inclinados en dos planos y, por lo tanto tienen una mejor capacidad de disipación de energía. Además llegan a resistir cargas relativamente mayores que las que tuvieron estribos ortogonales.

Por las razones que se indican más abajo y por el espacio de esta memoria, se limitó el estudio a las probetas RM4 y RM6, con estribos inclinados y estribos ortogonales respectivamente:

- I. Ambas cámaras se separaron en aplicaciones OBS individuales, permitiendo que hubiese una mayor cantidad de píxeles por cámara en cada grabación.
- II. La materialidad de los tubos para cada una resistió la compresión generada por el hormigón sin deformarse durante el proceso.
- III. La posición de los tubos en RM4, aunque no fue tan precisa como en RM6, se logró observar el mismo lado del elemento longitudinal.
- IV. La distancia entre cámaras no se vio afectada puesto que, para ambos estudios, esta se mantuvo constante gracias a que las cámaras no se adhirieron directamente a la viga como si lo fue en RM5.

Las demás probetas se descartaron por lo siguiente:

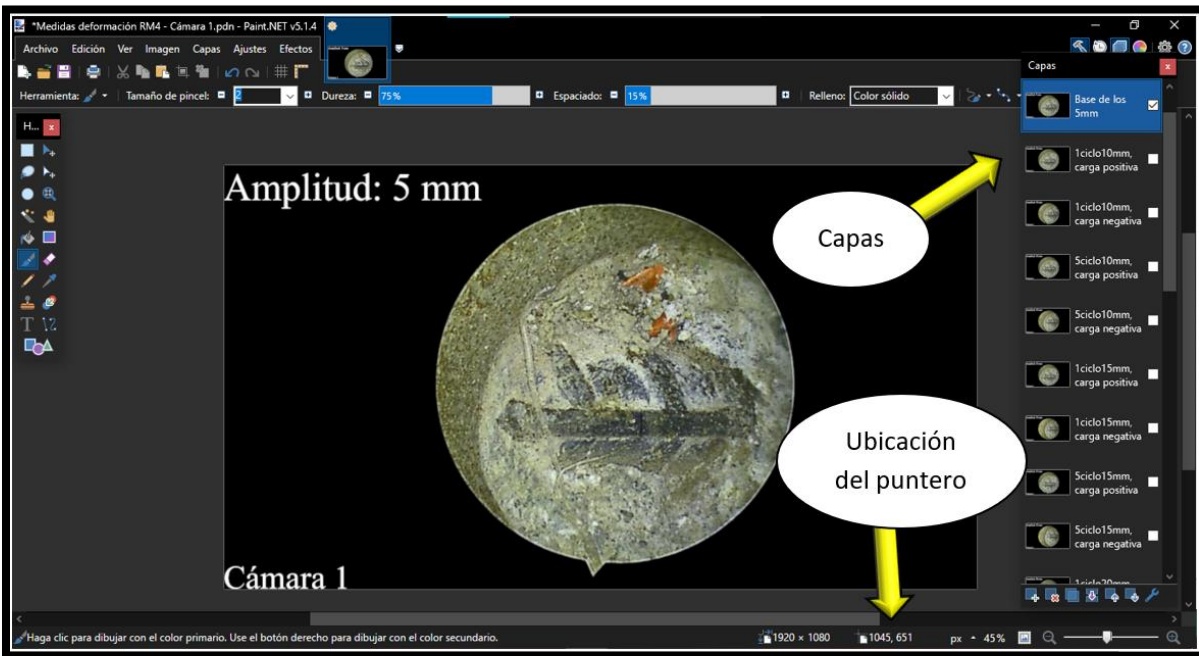
Por un lado, se descartó RM1 porque la inclinación de cada tubo en la viga no fue paralela, dificultando las mediciones. También, se descartó RM5 por un lado debido a la torsión ocurrida en los ciclos de 25 [mm] y, por otra parte, porque el aplastamiento de los tubos afectó a la distancia entre cámaras endoscópicas. Igualmente, RM3 se descartó debido a la falta de calidad en las grabaciones según se evidencia en la **Figura 56**.

### **5.3. Deformación de las barras longitudinales**

Cabe mencionar, que la memoria de Lagos, J. (En desarrollo), tiene como objetivo principal afinar un método mediante el uso de un software especializado en el análisis de imágenes a nivel subpíxel para determinar la deformación de las barras. Mientras tanto, se buscó otro método para realizar estas mediciones debido a que los desplazamientos de interés son bastante grandes, por lo que se consideró suficiente para esta memoria contabilizar directamente esta cantidad y determinar la deformación de las barras mediante un software común de edición de imágenes disponible en internet.

### 5.3.1. Fotografías por ciclos

Lo primero, consiste en obtener de los videos de las cámaras endoscópicas de RM4 y RM6 una fotografía del extremo de cada ciclo por medio del software “Paint.net”. Puesto que este permite guardar las imágenes por capas, así como indicar las mediciones en píxeles y la ubicación que se encuentra el puntero del ratón dentro de la imagen como indica la **Figura 73**.



**Figura 73** Datos útiles de Software “Paint.net”, donde se ve ubicación del puntero y capas

### 5.3.2. Medidas iniciales

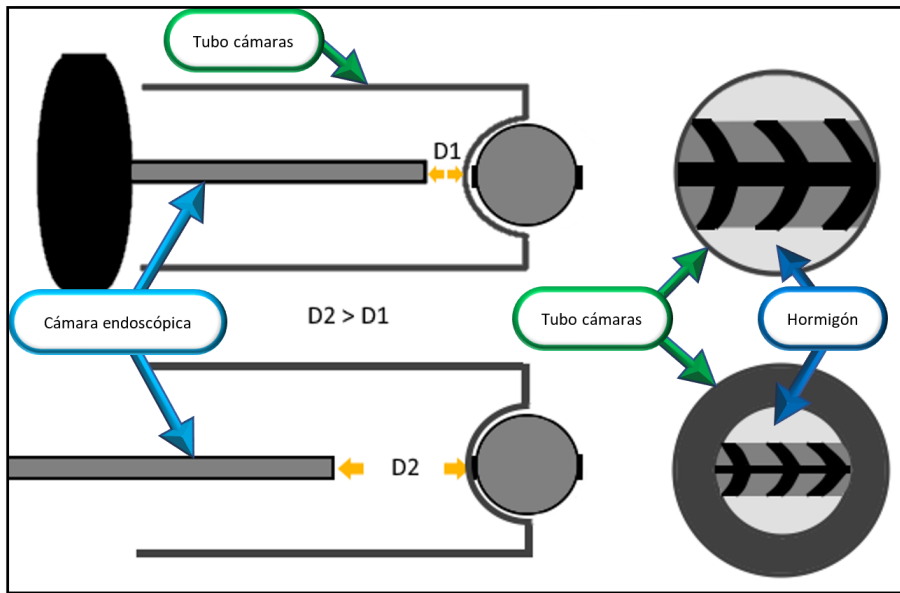
El segundo paso consiste en obtener la relación píxel con [mm]. Esto es importante debido a que cada cámara pudo quedar a una distancia diferente respecto al refuerzo longitudinal. Es por esto, que se hizo cuidadosamente una medición con un pie de metro a los resaltes y nervios a una barra igual a las utilizadas en la armadura. Obteniendo con dichos valores la equivalencia entre un píxel y un milímetro de la **Tabla 8**.

**Tabla 8** Equivalencia píxel a milímetros para cada cámara de las probetas RM4 y RM6

RM4				RM6			
Medida base Cámara 1				Medida base Cámara 1			
px	64	1,31	mm	px	200	3,04	mm
px	1	0,020	mm	px	1	0,015	mm
Medida base Cámara 2				Medida base Cámara 2			
px	55	1,31	mm	px	64,56	1,31	mm
px	1	0,024	mm	px	1	0,020	mm

### 5.3.3. Análisis de distancias medidas

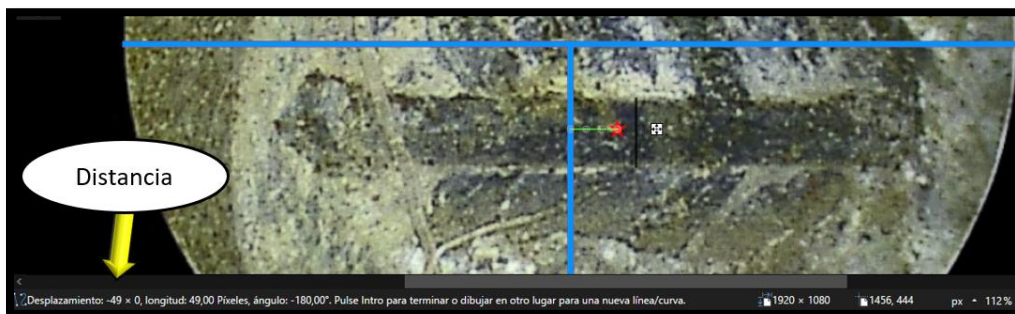
Se eligió un punto característico que representa el mismo lugar, el cual se logra mantener visible en cada fotografía de las barras. Aun así, en caso de que no se pudiera seguir el mismo punto, siempre es posible cambiar la ubicación de este durante el estudio, si la distancia relativa entre cámaras y la de estas a la barra estudiada se mantiene constante. En la **Figura 74** se muestra un esquema explicativo.



**Figura 74** Distancia relativa entre cámara endoscópica y barra longitudinal

Posterior a esto, se debe obtener la **distancia inicial entre los puntos de medición**. Dato necesario para obtener la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) de las barras.

- I. Se señaló el punto de medición por cámara, mediante una estrella roja en cada fotografía como se ve en la **Figura 75**.
- II. Se obtuvo la separación entre puntos y el eje de cada cámara por medio del software de "Paint.net" como indica la **Figura 75**.



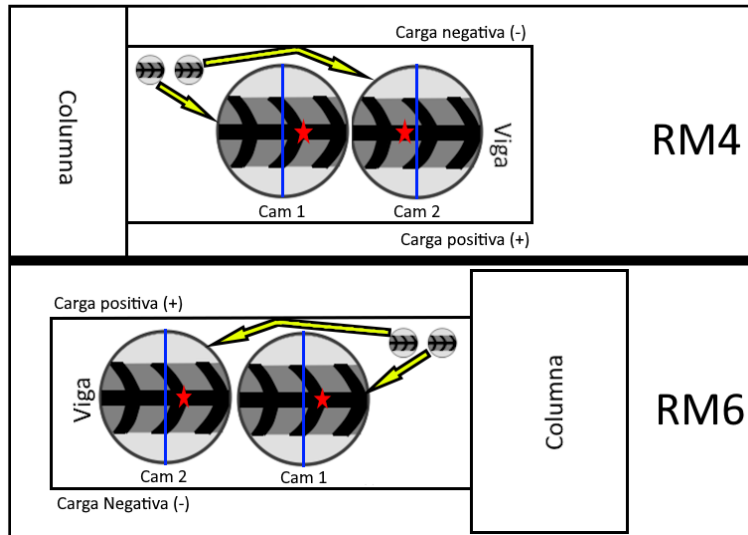
**Figura 75** Distancia entre punto para medición y centro de la cámara por medio de software "Paint.net"

III. Se transformaron los valores de esta separación a la cual se denominó “SEP”, a milímetros con la **Tabla 8** de equivalencias y se obtuvo la **Tabla 9**.

**Tabla 9** Separación entre puntos de medición y eje cámara (SEP) para probeta RM4 y RM6

RM4			RM6		
Cámara	SEP [píxeles]	SEP [mm]	Cámara	SEP [píxeles]	SEP [mm]
Cam 1	49	0,89	Cam 1	197	2,99
Cam 2	156	3,58	Cam 2	55	1,12

IV. Dependiendo de la ubicación del punto de medición respecto al eje de la cámara, se agregó o se restó “SEP” a la distancia entre cámaras endoscópicas de la **Tabla 7**, para obtener la distancia inicial entre puntos de medición. Esto se observa en la **Figura 76**, donde se indica que para RM4 y RM6 la posición de los tubos no fue hacia el mismo sentido, por ende, el valor de la distancia entre cámaras se obtuvo según la **Tabla 10**.

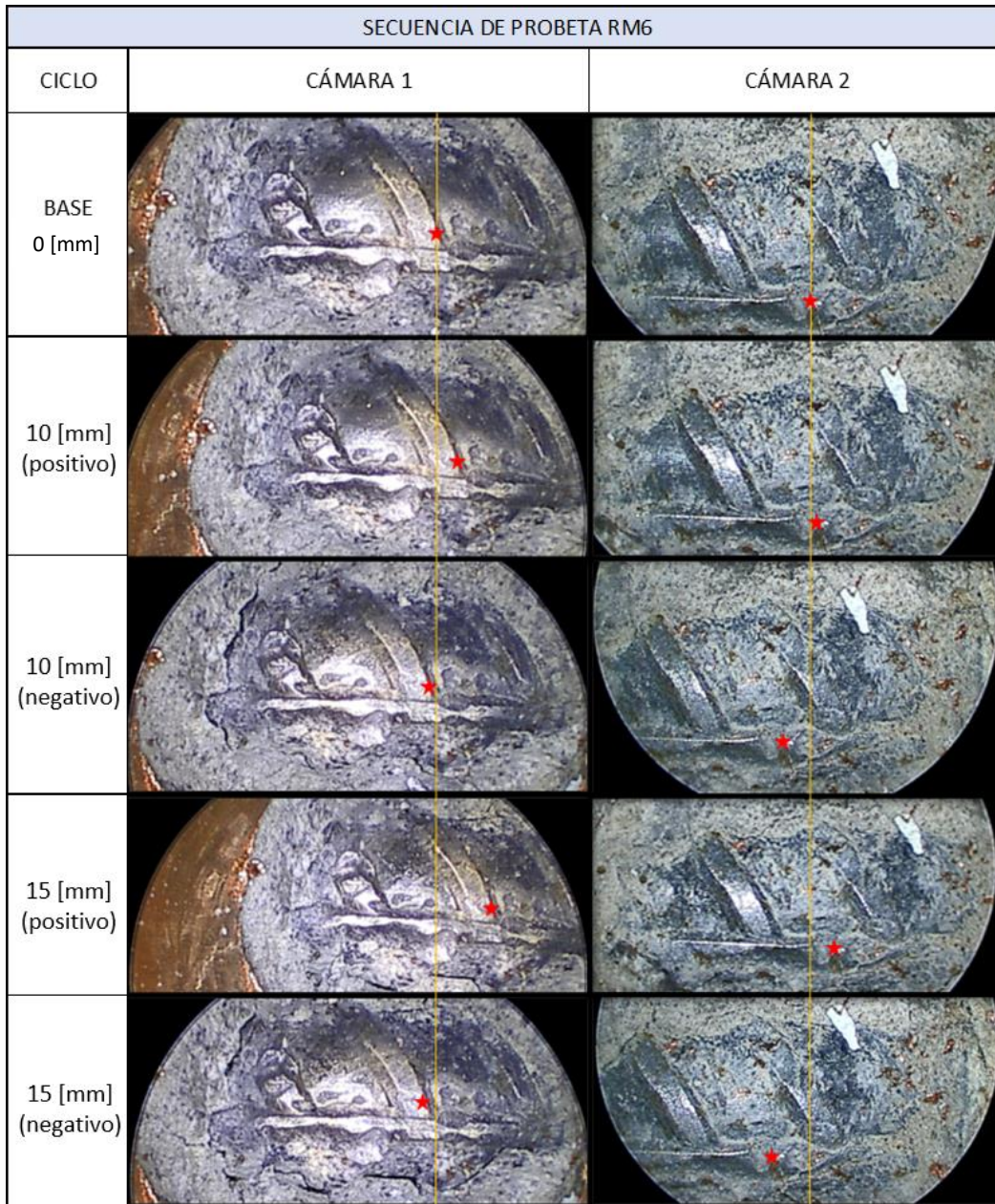


**Figura 76** Posición de puntos estudio para valor SEP para obtener distancia inicial entre puntos (DIEP)

**Tabla 10** Distancia inicial entre los puntos (DIEP) para probeta RM4 y RM6

RM4				
DECE [mm]	Cámara	SEP [mm]	Suma (+) o Resta (-)	DIEP [mm]
60	Cam1	0,89	(-)	55,53
	Cam 2	3,58	(-)	
RM6				
DECE [mm]	Cámara	SEP [mm]	Suma (+) o Resta (-)	DIEP [mm]
39	Cam1	2,99	(+)	40,88
	Cam 2	1,12	(-)	

Con lo anterior, se ubicó el punto para la medición en cada cámara para la cargas positiva y negativa de cada ciclo. Esto se puede observar en la secuencia de la **Figura 77**, donde se omitió los ciclos de 5 [mm].



**Figura 77** Secuencia de imágenes de la barra, ubicando puntos de medición

Una vez obtenidas las ubicaciones del punto de medición en cada ciclo, fue necesario calcular la deformación de la barra para obtener la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) de cada probeta.

Las ecuaciones utilizadas para determinar la deformación fueron las siguientes:

$$\text{Deformación [mm]} = (\text{Cam1C} - \text{Cam1O}) * EP1 - (\text{Cam2C} - \text{Cam2O}) * EP2 \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

Donde:

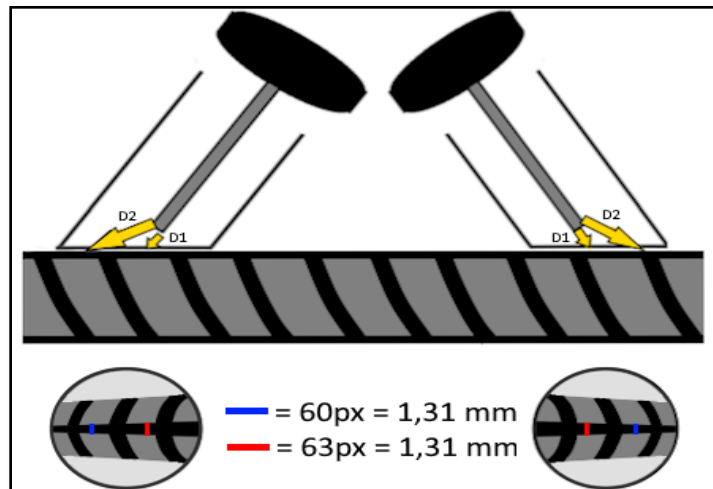
- *Cam1C*: Ubicación del punto en la cámara 1 bajo carga (positiva o negativa). Medida en píxeles.
- *Cam1O*: Ubicación del punto en la cámara 1 en el origen (previo al ensayo). Medida en píxeles.
- *Cam2C*: Ubicación del punto en la cámara 2 bajo carga (positiva o negativa). Medida en píxeles.
- *Cam2O*: Ubicación del punto en la cámara 2 en el origen (previo al ensayo). Medida en píxeles.
- *EP1*: Equivalencia de 1 píxel para la cámara 1, según **Tabla 8**.
- *EP2*: Equivalencia de 1 píxel para la cámara 2, según **Tabla 8**.

$$\text{Deformación unitaria } (\epsilon) \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right] = \frac{Def [\text{mm}]}{DIEP [\text{mm}]} \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

Donde:

- *Def*: Deformación por ciclo de carga para cada cámara.
- *DIEP*: Distancia inicial entre los puntos, según **Tabla 10**.

Siguiendo este proceso hasta el final de cada ensayo, se logra completar la **Tabla 11 y 12**. Aun así, como los tubos en RM4 quedaron inclinados y no perpendiculares a la barra como en RM6, fue necesario obtener la equivalencia de cada píxel en milímetros por la variación de distancia entre la barra y la cámara endoscópica como lo explica la **Figura 78**, por lo tanto fue necesario utilizar la **Ecuación 5.3**.



**Figura 78** Explicación sobre variación en la equivalencia de píxeles a lo largo de la barra para cada cámara

$$\text{Deformación RM4 [mm]} = (\text{Cam1C} * \text{EP1} - \text{Cam1O} * \text{EP01}) - (\text{Cam2C} * \text{EP2} - \text{Cam2O} * \text{EP02}) \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

Donde:

- *Cam1C*: Ubicación del punto en la cámara 1 bajo carga (positiva o negativa). Medida en píxeles.
- *Cam1O*: Ubicación del punto en la cámara 1 en el origen (previo al ensayo). Medida en píxeles.
- *Cam2C*: Ubicación del punto en la cámara 2 bajo carga (positiva o negativa). Medida en píxeles.
- *Cam2O*: Ubicación del punto en la cámara 2 en el origen (previo al ensayo). Medida en píxeles.
- *EP1*: Equivalencia de 1 píxel para la cámara 1.
- *EP01*: Equivalencia de 1 píxel para la cámara 1 en el origen (previo al ensayo).
- *EP2*: Equivalencia de 1 píxel para la cámara 2.
- *EP02*: Equivalencia de 1 píxel para la cámara 2 en el origen (previo al ensayo).

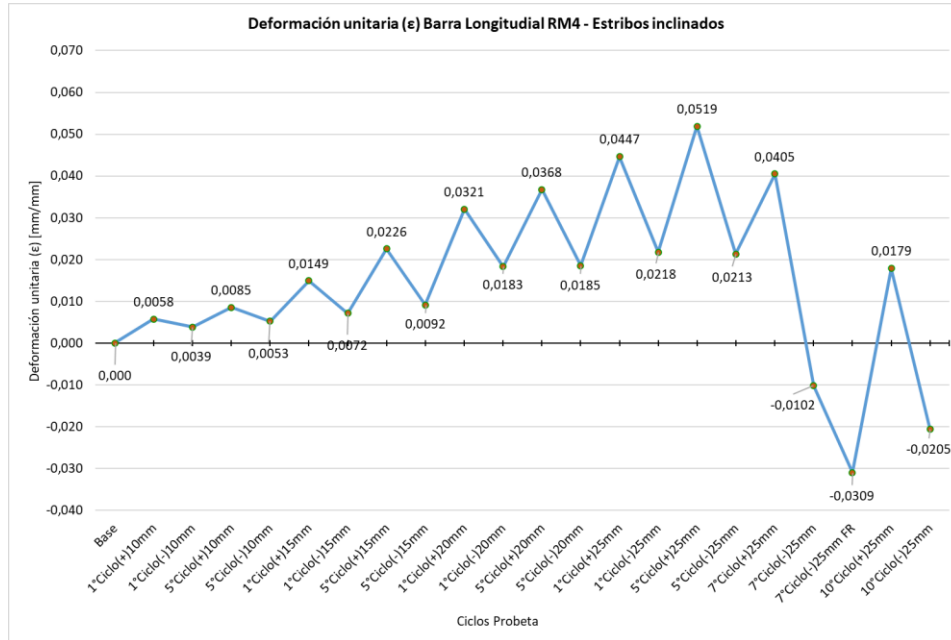
**Tabla 11** Obtención de deformación unitaria ( $\epsilon$ ), espécimen RM6 con estribos ortogonales

RM6 puntos medición en píxeles							
Nivel de Ciclo	N° de Ciclo	Carga	Cámara	Ubicación punto de medición (píxeles)	Diferencia respecto a punto origen (píxeles)	Deformación [mm]	Deformación unitaria ( $\epsilon$ )
0mm	Base	Origen (0)	Cam1	1163,409	0	0	0,0000
			Cam2	996,853	0		
10mm	1 ciclo 10mm	Positiva	Cam1	1199,413	36,004	-0,24	-0,0060
			Cam2	1035,82	38,967		
	1 ciclo 10mm	Negativa	Cam1	1119,403	-44,006	1,20	0,0293
			Cam2	904,865	-91,988		
	5 ciclo 10mm	Positiva	Cam1	1215,383	51,974	0,04	0,0010
			Cam2	1033,764	36,911		
	5 ciclo 10mm	Negativa	Cam1	1125,38	-38,029	1,27	0,0310
			Cam2	905,839	-91,014		
15mm	1 ciclo 15mm	Positiva	Cam1	1271,388	107,979	-0,37	-0,0089
			Cam2	1095,74	98,887		
	1 ciclo 15mm	Negativa	Cam1	1114,37	-49,039	1,69	0,0413
			Cam2	876,834	-120,019		
	5 ciclo 15mm	Positiva	Cam1	1305,382	141,973	-0,27	-0,0067
			Cam2	1116,691	119,838		
	5 ciclo 15mm	Negativa	Cam1	1141,367	-22,042	1,67	0,0410
			Cam2	897,827	-99,026		
20mm	1 ciclo 20mm	Positiva	Cam1	1357,382	193,973	-0,64	-0,0156
			Cam2	1173,667	176,814		
	1 ciclo 20mm	Negativa	Cam1	1133,357	-30,052	2,20	0,0539
			Cam2	865,825	-131,028		
	5 ciclo 20mm	Positiva	Cam1	1372,386	208,977	-0,39	-0,0095
			Cam2	1172,607	175,754		
	5 ciclo 20mm	Negativa	Cam1	1182,358	18,949	2,03	0,0497
			Cam2	910,833	-86,02		
25mm	1 ciclo 25mm	Positiva	Cam1	1426,421	263,012	-0,85	-0,0207
			Cam2	1235,614	238,761		
	1 ciclo 25mm	Negativa	Cam1	1174,341	10,932	2,68	0,0656
			Cam2	872,794	-124,059		
	4 ciclo 25mm	Positiva	Cam1	1392,409	229	-0,59	-0,0145
			Cam2	1197,525	200,672		
	4 ciclo 25mm	Negativa	Cam1	1155,225	-8,184	2,68	0,0656
			Cam2	858,617	-138,236		
	5 ciclo 25mm	Positiva	Cam1	1355,401	191,992	-0,38	-0,0093
			Cam2	1159,506	162,653		
	5 ciclo 25mm	Negativa	Cam1	1194,195	30,786	2,36	0,0578
			Cam2	903,547	-93,306		
	10 ciclo 25mm	Positiva	Cam1	1114,673	-48,736	0,07	0,0017
			Cam2	956,862	-39,991		
10 ciclo 25mm	Negativa	Cam1	1170,234	6,825	2,68	0,0655	
		Cam2	870,1	-126,753			
30 mm	3 ciclo 30mm	Positiva	Cam1	1188,821	25,412	-0,39	-0,0095
			Cam2	1034,946	38,093		
	3 ciclo 30mm	Negativa	Cam1	1101,387	-62,022	Impedimento visual	Impedido
			Cam2	-	-		

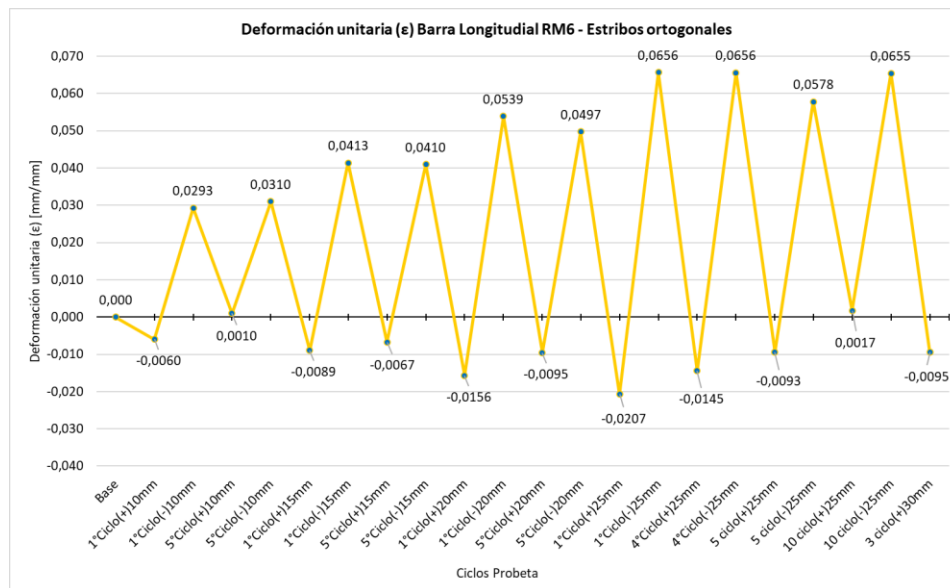
**Tabla 12** Obtención de deformación unitaria ( $\epsilon$ ), espécimen RM4 con estribos inclinados en dos planos, considerando equivalencia en cada ciclo de medición para los niveles de carga

RM4 puntos medición en píxeles								
Nivel de Ciclo	N° de Ciclo	Carga	Cámara	Ubicación punto de medición (píxeles)	Equivalencia [px] a [mm]	Diferencia respecto a punto origen [mm]	Deformación [mm]	Deformación unitaria ( $\epsilon$ )
0mm	Base	Origen (0)	Cam1	1046,655	0,020	0	0	0,0000
			Cam2	862,529	0,024	0		
10mm	1 ciclo 10mm	Positivo	C1	994,668	0,020	-1,064	0,32	0,0058
			C2	804,500	0,024	-1,382		
	1 ciclo 10mm	Negativo	C1	1145,628	0,020	2,026	0,21	0,0039
			C2	938,560	0,024	1,811		
	5 ciclo 10mm	Positivo	C1	1005,671	0,020	-0,839	0,47	0,0085
			C2	807,500	0,024	-1,311		
5 ciclo 10mm	Negativo	C1	1151,624	0,020	2,149	0,29	0,0053	
		C2	940,500	0,024	1,857			
15mm	1 ciclo 15mm	Positivo	C1	991,680	0,020	-1,438	0,83	0,0149
			C2	767,490	0,024	-2,264		
	1 ciclo 15mm	Negativo	C1	1204,605	0,020	3,233	0,40	0,0072
			C2	981,570	0,024	2,835		
	5 ciclo 15mm	Positivo	C1	998,682	0,020	-1,296	1,25	0,0226
			C2	769,500	0,023	-2,543		
5 ciclo 15mm	Negativo	C1	1207,592	0,020	3,294	0,51	0,0092	
		C2	979,570	0,024	2,788			
20mm	1 ciclo 20mm	Positivo	C1	1001,689	0,020	-0,920	1,77	0,0321
			C2	749,480	0,024	-2,693		
	1 ciclo 20mm	Negativo	C1	1256,569	0,021	4,705	1,01	0,0183
			C2	1017,570	0,024	3,693		
	5 ciclo 20mm	Positivo	C1	1007,682	0,021	-0,470	2,03	0,0368
			C2	757,470	0,024	-2,502		
5 ciclo 20mm	Negativo	C1	1268,527	0,021	4,954	1,02	0,0185	
		C2	1027,500	0,024	3,929			
25mm	1 ciclo 25mm	Positivo	C1	1016,681	0,020	-0,614	2,47	0,0447
			C2	746,460	0,023	-3,082		
	1 ciclo 25mm	Negativo	C1	1290,502	0,021	6,290	1,20	0,0218
			C2	1056,547	0,024	5,087		
	5 ciclo 25mm	Positivo	C1	1017,644	0,022	0,795	2,87	0,0519
			C2	761,432	0,024	-2,072		
	5 ciclo 25mm	Negativo	C1	1281,426	0,021	6,095	1,18	0,0213
			C2	1049,514	0,024	4,917		
	7 ciclo 25mm	Positivo	C1	986,641	0,022	0,118	2,24	0,0405
			C2	759,427	0,024	-2,121		
	7 ciclo 25mm	Negativo pfrac	C1	1266,378	0,021	5,772	-0,56	-0,0102
			C2	1046,490	0,026	6,337		
	7 ciclo 25mm	Negativo FRAC	C1	1256,366	0,021	5,557	-1,71	-0,0309
			C2	1061,505	0,026	7,268		
10 ciclo 25mm	Positivo	C1	990,789	0,022	0,209	0,99	0,0179	
		C2	799,527	0,025	-0,782			
10 ciclo 25mm	Negativo pfrac	C1	1219,613	0,021	4,768	-1,13	-0,0205	
		C2	1029,564	0,026	5,902			
10 ciclo 25mm	Negativo FRAC	C1	0,000	0,021	-	Impedimento visual	Impedido	
		C2	1036,566	0,026	6,082			

Una vez completadas las tablas, se hicieron los gráficos que muestran la deformación unitaria en cada ciclo para ambas probetas en la **Figura 79** y **Figura 80**:



**Figura 79** Gráfica de deformación unitaria ( $\epsilon$ ), espécimen RM4 con estribos inclinados en dos planos

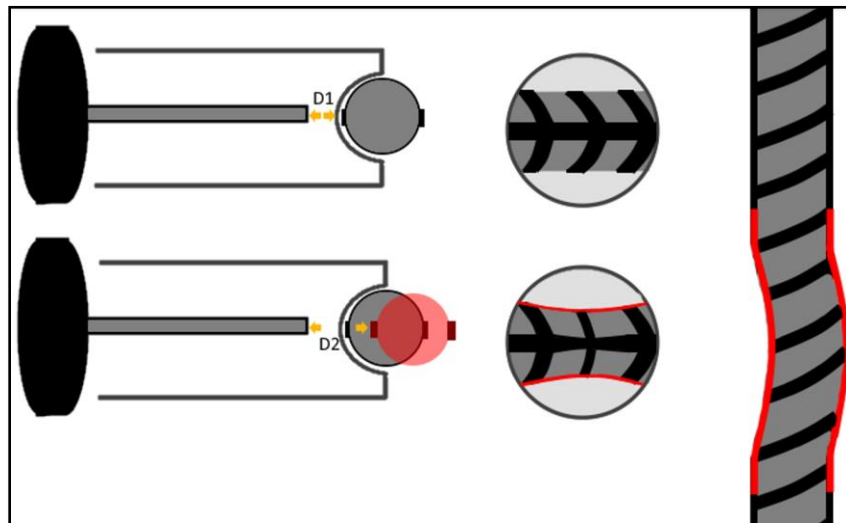


**Figura 80** Gráfica de deformación unitaria ( $\epsilon$ ), espécimen RM6 con estribos ortogonales

#### 5.4. Análisis de los resultados

Lamentablemente, debido a la alta densidad de la armadura con estribos inclinados en dos planos, no se pudo enfocar las cámaras endoscópicas en los mismos puntos de cada viga (**Figura 26**), ni a la misma distancia (**Tabla 7**). Por lo que algunas comparaciones de resultados no pudieron hacerse, sin embargo, respecto a los datos de la **Tabla 13** sorprende que la probeta RM4 (estribos inclinados) a pesar de estar resistiendo una mayor carga que la probeta RM6 (estribos ortogonales), presenta menores deformaciones en los primeros ciclos del ensayo como indica la **Figura 79**. La razón se debe a que los estribos inclinados en 45° fluyen y toman parte del esfuerzo de tracción que de otra manera solo distribuiría la armadura longitudinal.

No obstante, aunque se logró obtener la deformación unitaria ( $\epsilon$ ), se considera que desde el comienzo del pandeo visible de las barras, la medición se puede ver afectada por el aumento de la distancia entre la cámara y la barra, así como indica la **Figura 81**. En consecuencia, solo se pueden considerar viables los resultados de RM6 hasta 3° ciclo de 25 [mm] y para RM4 hasta el 4° ciclo de 25 [mm], porque posterior a esto la barra se deforma hacia fuera de la viga. Además, el solo disponer de dos cámaras endoscópicas, limitó a que el estudio se pudiera hacer solo hasta el inicio del pandeo.



**Figura 81** Consecuencia del pandeo para medición de deformación de las barras

Comentarios generales respecto a los resultados del comportamiento de las probetas y de las curvas de histéresis se pueden realizar con el apoyo de las **Tablas 13 a la 15**:

**Tabla 13** Carga máxima resistida y desplazamiento máximo generado por cada nivel de carga

Ciclo	Carga y Desplazamiento Máximo en Probetas por Niveles de Carga											
	RM1		RM2		RM3		RM4		RM5		RM6	
	Desp. Max. [mm]	Carga Máx. [Ton]	Desp. Max. [mm]	Carga Máx. [Ton]	Desp. Max. [mm]	Carga Máx. [Ton]	Desp. Max. [mm]	Carga Máx. [Ton]	Desp. Max. [mm]	Carga Máx. [Ton]	Desp. Max. [mm]	Carga Máx. [Ton]
5 [mm]	0,4927	1,2149	0,4406	1,3375	0,4875	1,297	0,4755	1,3258	0,4104	1,3983	0,4824	1,3139
10 [mm]	0,9962	1,6069	0,9472	1,7071	1,0009	1,55	0,9813	1,7539	0,859	1,5569	1,0042	1,4396
15 [mm]	1,4975	1,6714	1,4492	1,8092	1,5022	1,6133	1,4818	1,8131	1,3145	1,5874	1,4986	1,5368
20 [mm]	2,0025	1,7245	1,9611	1,8634	2,008	1,6504	1,99	1,8815	1,8234	1,6053	2,0037	1,608
25 [mm]	2,5053	1,7299	2,4594	1,8991	2,5162	1,641	2,4912	1,9034	2,327	1,6141	2,5057	1,6128
30 [mm]	3,0081	1,1741	0	0	3,0571	0,7756	0	0	2,3224	0,5156	3,0085	0,7088

Se destaca lo siguiente:

- I. Las probetas con estribos ortogonales RM5 y RM6 resistieron una carga máxima menor que las demás, debido a que el recubrimiento y el núcleo de hormigón comenzó a dañarse antes según la **Tabla 13**.
- II. No hubo fractura de las barras longitudinales en RM5 y RM6 coincidiendo con lo observado por otros memoristas en especímenes con estribos tradicionales.
- III. Se observó que las barras longitudinales de la probeta RM2 sin tubos para las cámaras endoscópicas se fracturaron antes que las probetas con tubos. Esto fue por el menor deterioro del hormigón, el cual forzó la falla del acero.

**Tabla 14** Resumen de cada probeta con detalles observados, destacando los más desfavorables

Detalle	Resumen Información Ciclos por Probeta					
	Estribos inclinados				Estribos ortogonales	
	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
Tubos endoscópicos	SI	NO	SI	SI	SI	SI
Inicio pandeo visible	5° ciclo, 25 [mm]	2° ciclo, 25 [mm]	3° ciclo, 25 [mm]	5° ciclo, 25 [mm]	4° ciclo, 25 [mm]	4° ciclo, 25 [mm]
Desplazamiento máximo previo al pandeo visible	2,503 [mm]	2,4594 [mm]	2,5078 [mm]	2,4905 [mm]	2,325 [mm]	2,5042 [mm]
	4° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]
Desplazamiento máximo posterior al pandeo visible	3,008 [mm]	2,4594 [mm]	3,0571 [mm]	2,4912 [mm]	2,327 [mm]	3,0085 [mm]
	1° ciclo, 30 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 30 [mm]	6° ciclo, 25 [mm]	8° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 30 [mm]
Carga máxima resistida	1,729 Ton	1,899 Ton	1,65 Ton	1,903 Ton	1,614 Ton	1,612 Ton
	1° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 20 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 25 [mm]
Caida recubrimiento	8° ciclo, 25 [mm]	5° ciclo, 25 [mm]	5° ciclo, 25 [mm]	5° ciclo, 25 [mm]	4° ciclo, 25 [mm]	5° ciclo, 20 [mm]
Fractura barras longitudinales	FR N°1	FR N°1	FR N°1	FR N°1	-	-
	3° ciclo, 30 [mm]	6° ciclo, 25 [mm]	11° ciclo, 25 [mm]	7° ciclo, 25 [mm]	-	-
	FR N°2	FR N°2	FR N°2	FR N°2	-	-
	3° ciclo, 30 [mm]	8° ciclo, 25 [mm]	1° ciclo, 30 [mm]	10° ciclo, 25 [mm]	-	-

**Tabla 15 Resumen de detalles**

Resumen de resultados	
Primera probeta en pandear	RM2
Menor resistencia de carga	RM6
Primera probeta en perder recubrimiento	RM6
Primera probeta en fracturarse	RM2

Con el uso de estribos inclinados en dos planos, se observó una mayor capacidad de disipar energía en niveles de desplazamientos mayores a 20 [mm], lo cual se demuestra en las curvas de histéresis de la **Figura 72** al ser más anchas y estables.

Según los resultados, la disposición de la armadura inclinada en dos planos logra ser más efectiva en situaciones extremas en comparación a los estribos ortogonales. Así también, las deformaciones previas al pandeo indicaron que estas aún son muy pequeñas para pensar que la barra podría fallar por fatiga en los ciclos siguientes, si es que éstas están impedidas de pandear.

### **5.5. Recomendaciones para la instalación y uso de cámaras endoscópicas**

En esta sección se presentan algunos detalles a tener en cuenta en estos estudios con cámaras endoscópicas para la obtención de la deformación unitaria:

- Los tubos de las cámaras endoscópicas deben ser de acero y de espesor no menor a 1,3 [mm].
- Verificar que la silicona del tapón sea una sola pieza y que no se le agregue más una vez enfriado el material, evitando que queden trozos dentro del tubo como se vio en la **Figura 40**.
- Medir las dimensiones de la barra a ensayar previo al hormigonado, así como la obtención de la relación entre píxeles y milímetros.
- Los tubos para las cámaras deben instalarse junto con el armado de la enfierradura y no posterior a esta, cuidando que estos queden ubicados en los mismos puntos de interés.
- Se debe tener especial cuidado en el posicionamiento de los tubos en el extremo que toca la barra, esto porque el proceso de vibrado al ser muy enérgico podría impulsar la lechada al interior del tubo y contaminar la zona a estudiar (**Figura 40**).
- Se recomienda utilizar una página del software OBS para cada cámara.
- Se recomienda utilizar cuatro cámaras endoscópicas dispuestas en pares y de manera perpendicular entre ellas, con tal de determinar el movimiento tridimensional de la barra durante los ciclos de 25 [mm] en adelante.

# Capítulo VI

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Respecto al desarrollo y término de este proyecto, se puede decir que se fabricaron y ensayaron de forma exitosa las vigas de las probetas con el diseño de estribos inclinados en dos planos y, además, se exploró técnicas para el análisis de imágenes mediante el uso de cámaras endoscópicas al interior de la viga, permitiendo la obtención de la deformación unitaria del refuerzo longitudinal.

Se desarrolló un procedimiento adecuado para medir las deformaciones en el rango anelástico de las barras longitudinales durante deformaciones cíclicas con las cámaras endoscópicas, algo que está fuera del nivel de deformaciones que las estampillas extensiométricas (strain gauges) pueden soportar. Debido a que en esa instancia solo se disponía dos cámaras, la medición fue viable únicamente hasta el inicio del pandeo, pero utilizando cuatro cámaras como las que estuvieron disponibles después, sería posible medir las deformaciones con el pandeo ya comenzado.

Respecto a mejoras en el diseño, se recomienda lo siguiente:

- Para mantener el equilibrio mecánico de fuerzas en la viga, se recomienda disminuir la resistencia del hormigón o aumentar el área del acero de refuerzo longitudinal con el diseño de estribos propuesto en esta memoria y disminuir el alto de la sección de la viga.
- Se recomienda ubicar e instalar en la zona donde se produce el pandeo de la barra cuatro cámaras endoscópicas de manera de poder determinar las deformaciones durante el pandeo.

Se ve que es conveniente insistir en la eliminación o retardo del pandeo de las barras longitudinales, ya que las deformaciones medidas por las cámaras endoscópicas, tomadas inmediatamente antes de que ocurra el pandeo, indican que las deformaciones de las barras son muy pequeñas para pensar en que en los ciclos siguientes podrían crecer y ocasionar la fractura por fatiga de bajo ciclaje, si el pandeo no ocurriera.

Las cámaras endoscópicas permitieron aclarar algunos conceptos equivocados que se tenían sobre el comportamiento de los especímenes. Por lo tanto, se aconseja el uso de estas para las futuras investigaciones de este tópico.

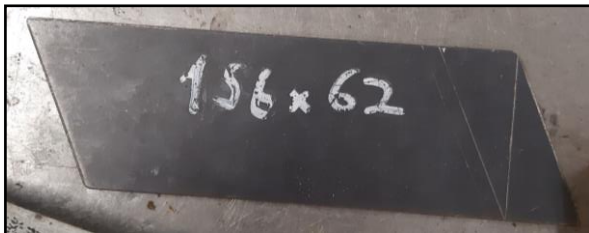
## 7. Referencias

- American Concrete Institute Committee 318. (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 318. (2019). *Building Code Requirements or Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 374. (2013). *Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads. 374.2R-13*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- 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. <https://doi.org/10.1590/1679-78251387>
- Barclay, L., & Kowalsky, M. (2019). Critical bending strain of reinforcing steel and buckled bar tension test. *ACI Materials Journal*, 116(3), 53–61. <https://doi.org/10.14359/51715583>
- Bermúdez, A. (2024). *Estribos inclinados en dos planos para optimizar el comportamiento de elementos de hormigón armado sometidos a sollicitación sísmica. Análisis experimental*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/73628>
- Figueroa, G. (2019). *Aceros soldables en elementos de hormigón armado sometidos a sollicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/6912>
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). *Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*. (NCh 1037 of. 2009).
- Instituto Nacional de Normalización. (2006). *Acero – Barras laminadas en caliente para hormigón armado*. (NCh 204 of. 2006).
- Lobera, R. (2016). *Respuesta sísmica de marcos de hormigón armado con detalles innovadores para las vigas en las zonas próximas a los nudos*. [Tesis de postgrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/7609>

- Maldonado, J. (2023). *Estudio experimental de armadura suplementaria para prevenir la fractura del refuerzo longitudinal en elementos de hormigón armado sometidos a sollicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. [Documento no disponible en línea]
- Pino, C. (2017). *Vigas de hormigón armado con refuerzo transversal y anclajes*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/71615>
- Reyes, G. (2023). *Análisis de los resultados de ensayos en elementos de hormigón armado sometidos a sollicitación sísmica con armadura adicional para prevenir fracturas del refuerzo longitudinal*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/6912>
- Rojas, H. S. (2022). *Ensayos de barras de acero para hormigón armado sometidas a fatiga de bajo ciclaje con pandeo impedido*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. [Documento no disponible en línea]
- Rojas, R. S. (2022). *Fractura de barras de acero para hormigón armado debidas a la deformación crítica por pandeo y a la fatiga de bajo ciclaje*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/8351>
- Schnaidt, C. (2005). *Estudio en mesa de simulación de terremotos de dos soluciones para el soporte de una plataforma de hormigón armado*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/71949>
- Silva, B. B. (2014). *Vigas de hormigón armado con refuerzo al corte en 45° sometidas a cargas cíclicas*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/58841>
- 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 sollicitación sísmica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/6064>

## 8. Anexos

En esta sección, se adjuntan las figuras correspondientes a materiales, herramientas y soportes utilizados para las cámaras endoscópicas en los ensayos de esta memoria. Las placas, pernos y fijaciones correspondientes al montaje de las probetas se encuentran descritos en la memoria de Bermúdez, A. (2024) y Maldonado, J. (2023).



**Figura 82** Placa guía para doblado de estribos inclinados en 2 planos internos y externos, con dimensiones



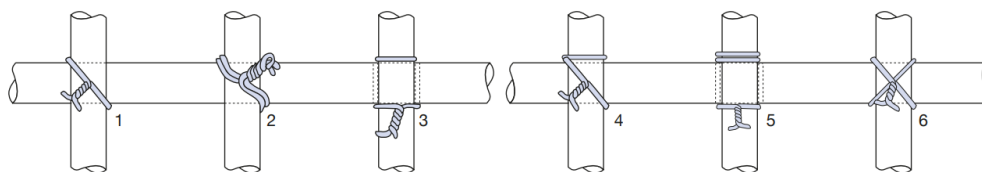
**Figura 83** Electrodo para acero inoxidable empleados para la soldadura de estribos inclinados en 2 planos, marca Indura



**Figura 84** Bases para doblado del acero, correspondientes a estribos ortogonales de viga, de columna y estribos inclinados en dos planos para viga, de arriba hacia abajo



**Figura 85** Herramientas utilizadas para limpieza de barras longitudinales

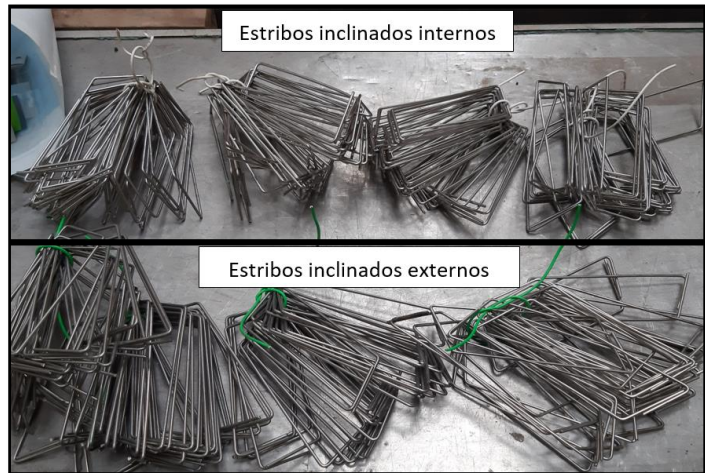


**Figura 86** Tipos de amarras con alambre para barras de acero, las empleadas consistieron en la tipo 1, 2, 3 y 6

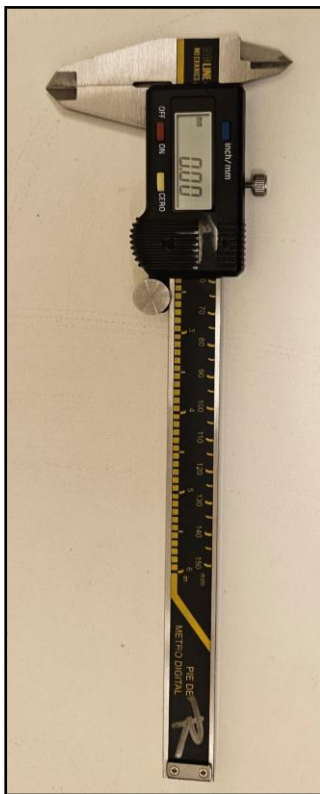
Fuente: Gerdau AZA (2004).



**Figura 87** Placas con cavidades para encaje de cámaras endoscópicas



**Figura 88** Estribos inclinados en dos planos internos y externos para viga



**Figura 89** Pie de metro digital



**Figura 90** Soporte en voladizo para cámaras endoscópicas