

ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON BARRAS DE REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO
SOMETIDOS A SOLICITACIÓN SÍSMICA. ESTUDIO EXPERIMENTAL.

Memoria de titulación presentada por

MANUEL JESUS JORQUERA BAHAMONDEZ

Como requisito para optar al título de
Constructor Civil

Profesor Guía
René Tobar Ramos



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Elementos de hormigón armado con barras de refuerzo de fibra de vidrio sometidos a sollicitación sísmica. Estudio experimental.

Nombre del candidato(a): Manuel Jesús Jorquera Bahamondez

Carrera / Grado: Construcción Civil

Campus: Campus Casa Central Valparaíso Departamento: Departamento de obras civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, RENE ENRIQUE TOBAR RAMOS, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 16/ marzo/ 2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 13/03/2026

Firma:

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

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me acompañaron durante este camino de aprendizaje y formación personal. Mi familia, mis amigos, compañeros de trabajo y mis profesores. También dar las gracias a las personas que estuvieron antes que mí y quizá sin darse cuenta, ni ellos ni yo, fueron formándome como persona.

RESUMEN

En la presente memoria se estudia el comportamiento estructural de elementos de hormigón armado con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio (FRP), sometidos a solicitud sísmica. Se construyeron y ensayaron cuatro probetas que representaban uniones viga-columna externa de un marco dúctil de hormigón armado. Una de las probetas tenía armadura de acero tradicional, mientras que en las otras tres las barras longitudinales de la viga eran de FRP, dos de ellas con superficie con arenado para aumentar la adherencia con el hormigón, mientras que la otra tenía superficie lisa.

Las probetas fueron construidas próximas al tamaño real, a una escala que puede interpretarse como $1/3$ o $1/4$, y fueron instrumentadas con cámaras endoscópicas para observar el comportamiento interno de las barras y los mecanismos de adherencia con el hormigón. Los ensayos permitieron obtener curvas fuerza–desplazamiento, registros de desplazamientos internos, además de evidencia visual del daño y formas de falla.

Los resultados muestran que las barras de FRP presentan alta resistencia, pero una menor ductilidad en comparación con el acero, lo que se traduce en elementos estructurales con una menor capacidad de disipación de energía bajo cargas sísmicas. Asimismo, se comprobó que las barras de FRP con superficie rugosa mejoran apreciablemente el comportamiento de las probetas respecto de las mismas barras lisas. Finalmente, se concluye que el uso de barras de FRP es adecuado en elementos donde la ductilidad no sea un requisito crítico, mientras que para zonas de alta demanda sísmica el acero sigue siendo la alternativa más confiable.

Palabras clave: Hormigón armado, Barras FRP, Solicitud sísmica, Uniones viga–columna, Ensayos cíclicos, Cámaras endoscópicas.

ABSTRACT

This thesis investigates the structural behavior of reinforced concrete elements using glass fiber–reinforced polymer (GFRP) bars subjected to seismic loading. Four specimens representing exterior beam–column joints of a ductile reinforced concrete frame were constructed and tested. One specimen was reinforced with conventional steel reinforcement, while the remaining three used FRP bars as longitudinal reinforcement in the beam. Two of these specimens incorporated sand-coated FRP bars to enhance bond with the concrete, whereas the other used smooth-surface bars.

The specimens were constructed near full-scale size, corresponding to an approximate scale of one-third to one-fourth, and were instrumented with endoscopic cameras to observe the internal behavior of the reinforcement and the bond mechanisms with the concrete. The experimental program enabled the acquisition of force–displacement curves, internal displacement records, as well as visual evidence of damage and failure modes.

The results indicate that FRP bars exhibit high strength, but lower ductility compared to steel reinforcement, leading to structural elements with reduced energy dissipation capacity under seismic loading. Furthermore, it was confirmed that sand-coated GFRP bars significantly improve the structural performance of the specimens compared to smooth-surface bars. Finally, it is concluded that the use of GFRP bars is suitable for elements where ductility is not a critical requirement, whereas steel reinforcement remains the most reliable alternative in regions with high seismic demand.

Keywords: Reinforced concrete, GFRP bars, Seismic loading, Beam–column joints, Cyclic testing, Bond behavior.

INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	9
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 <i>Objetivos</i>	10
1.1.1 Objetivos generales	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
1.2 <i>Programa experimental</i>	11
1.3 <i>Organización de esta memoria</i>	11
CAPÍTULO II.....	12
2. ESTADO DEL ARTE	12
2.1 <i>Barras de FRP</i>	12
2.2 <i>Comportamiento mecánico y aplicaciones estructurales</i>	13
CAPÍTULO III.....	15
3. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS	15
3.1 <i>Materiales</i>	15
3.1.1 Moldajes	15
3.1.2 Hormigón	16
3.1.3 Armadura	18
3.1.4 Tubos de observación	21
3.1.5 Barras roscadas	22
3.2 <i>Hormigonado de las probetas</i>	22
CAPÍTULO IV.....	23
4. MONTAJE DE LOS ENSAYOS	23
4.1 <i>Preparación de la probeta</i>	23
4.2 <i>Equipos</i>	24
4.2.1 Actuador hidráulico	24
4.2.2 Cámaras de alta velocidad	24
4.2.3 Soporte	25
4.2.4 Riel de soporte	25
4.3 <i>Instalación de las probetas para el ensayo</i>	26
4.4 <i>Característica de las probetas y programa de aplicación de carga</i>	26
CAPÍTULO V.....	28
5. RESULTADOS.....	28
5.1 <i>Consideraciones previas</i>	28
5.2 <i>Análisis de imágenes</i>	28
5.2.1 Programa Tracker	28
5.2.2 Programa DIC	29
5.3 <i>PROBETA MJ-1 ARMADURA CONVENCIONAL</i>	30
5.3.1 Comentarios MJ-1	33
5.4 <i>PROBETA MJ-2 ARMADURA FRP LISA</i>	34
5.4.1 Comentarios MJ-2	37
5.5 <i>PROBETA MJ-3 ARMADURA FRP RUGOSA</i>	38
5.5.1 Comentarios MJ-3	41
5.6 <i>PROBETA MJ-4 ARMADURA FRP RUGOSA 2</i>	42
5.6.1 Comentarios MJ-4	45
5.7 <i>Ensayos extras</i>	46
5.8 <i>Efecto de aplicar diferentes programas de carga</i>	46
CAPÍTULO VI.....	47
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	47
7. REFERENCIAS	49

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 1 PUENTE MD-5 FABRICADO CON FRP, ST. MARY'S COUNTY (FUENTE: FISHER, 2023)	9
FIGURA 2 MÉTODO DE ENTRELAZADO DE HEBRAS PARA LA FABRICACIÓN DE BARRAS FRP (FUENTE: <i>COMPOSITE TECH</i> , 2023)	12
FIGURA 3 BARRAS CON RECUBRIMIENTO DE ARENA JUNTO A BARRAS SIN RECUBRIMIENTO	13
FIGURA 4 COMPARACIÓN DE DEFORMACIONES REALES (BG2A) Y MODELOS DE PREDICCIÓN (AL-SUNNA ET AL. 2012)	13
FIGURA 5 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL ESTANQUE DE AGUA EN THETFORD MINES (GALVEZ, 2022).....	14
FIGURA 6 REPRESENTACIÓN DE LA SECCIÓN QUE SERÁ ESTUDIADA	15
FIGURA 7 ARMADURA LISTA EN MOLDAJE PARA SER HORMIGONADA	15
FIGURA 8 DIMENSIONES DE LA PROBETA (<i>SILVA, 2022</i>).....	16
FIGURA 9 PROCESO DE ENSAYO DE PROBETA CILÍNDRICA EN EL LABORATORIO DEL LEMCO	17
FIGURA 10 ESQUEMA DE LA ARMADURA COMPLETA	18
FIGURA 11 PREPARACIÓN DE BARRAS PARA EL ENSAYO A TRACCIÓN	19
FIGURA 12 PROMEDIO A RESISTENCIA TRACCIÓN DE BARRAS LONGITUDINALES	19
FIGURA 13 DIMENSIONES DEL ESTRIBO DE LA COLUMNA	20
FIGURA 14 DIMENSIONES DEL ESTRIBO DE LA VIGA	20
FIGURA 15 ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE TUBOS DE COBRE, VISTA LATERAL	21
FIGURA 16 TUBO DE COBRE INSTALADO RELLENO DE MASA EPÓXICA	21
FIGURA 17 PROBETA LISTA PARA SER HORMIGONADA	22
FIGURA 18 PROBETAS REPOSANDO EN LA CÁMARA DE HUMEDAD.....	22
FIGURA 19 PROBETA PINTADA Y CON LA ARMADURA MARCADA.....	23
FIGURA 20 BARRA FRP LIMPIA Y CON TARGETS INSTALADOS	23
FIGURA 21 DIAGRAMA UNILINEAL DEL SISTEMA DE ENSAYO.	24
FIGURA 22 CÁMARA ENT1080P UTILIZADA	24
FIGURA 23 SOPORTE PARA CÁMARAS DE ALTA VELOCIDAD	25
FIGURA 24 RIEL DE SOPORTE DE VIGA	25
FIGURA 25 PROBETA INSTALADA EN MESA SÍSMICA	26
FIGURA 26 TRACKER ANALIZANDO EL MOVIMIENTO DE LOS TARGETS	28
FIGURA 27 ESQUEMA QUE MUESTRA CÓMO FUNCIONA EL DIC	29
FIGURA 28 ESPÉCIMEN MJ-1, DISTRIBUCIÓN DE ESTRIBOS	30
FIGURA 29 CURVAS FUERZA-DESPLAZAMIENTO PARA MJ-1	30
FIGURA 30 QUINTO CICLO, AMPLITUD 10[MM]	31
FIGURA 31 QUINTO CICLO, AMPLITUD 15[MM]	31
FIGURA 32 QUINTO CICLO, AMPLITUD 20[MM]	31
FIGURA 33 QUINTO CICLO, AMPLITUD 25[MM]	31
FIGURA 34 DECIMO CICLO, AMPLITUD 25[MM]	31
FIGURA 35 QUINTO CICLO, AMPLITUD 30[MM].	31
FIGURA 36 CURVA FUERZA-DESPLAZAMIENTO MJ-1, AMPLITUD 25[MM]	32
FIGURA 37 DESPLAZAMIENTO DE LA BARRA EN LOS PUNTOS ENFOCADOS POR LAS CÁMARAS EN MJ-1 A MEDIDA QUE TRANSCURRE EL ENSAYO PARA CICLOS DE ± 15 , ± 20 , ± 25 Y ± 30 [MM] DE IZQUIERDA A DERECHA RESPECTIVAMENTE	32
FIGURA 38 IMAGEN DIC, MJ-1 ARMADURA CONVENCIONAL.....	33
FIGURA 39 ESPÉCIMEN MJ-2, DISTRIBUCIÓN DE ESTRIBOS	34
FIGURA 40 CURVAS FUERZA-DESPLAZAMIENTO PARA MJ-2	34
FIGURA 41 QUINTO CICLO, AMPLITUD 25[MM]	35
FIGURA 42 DECIMO CICLO, AMPLITUD 25[MM]	35
FIGURA 43 QUINTO CICLO, AMPLITUD 30[MM]	35
FIGURA 44 PRIMER CICLO, AMPLITUD 35[MM]	35
FIGURA 45 CURVA FUERZA-DESPLAZAMIENTO MJ-2, AMPLITUD 25[MM]	36
FIGURA 46 DESPLAZAMIENTO DE LA BARRA EN LOS PUNTOS ENFOCADOS POR LAS CÁMARAS EN MJ-2 A MEDIDA QUE TRANSCURRE EL ENSAYO PARA CICLOS DE ± 25 Y ± 30 [MM] DE IZQUIERDA A DERECHA RESPECTIVAMENTE	36
FIGURA 47 ESTADO DE LA SECCIÓN DE LA BARRA OBSERVADA AL INICIO DEL ENSAYO Y UNA VEZ TERMINADOS LOS CICLOS DE ± 25 [MM]	37
FIGURA 48 ESPÉCIMEN MJ-3, DISTRIBUCIÓN DE ESTRIBOS	38
FIGURA 49 CURVAS FUERZA-DESPLAZAMIENTO PARA MJ-3	38
FIGURA 50 QUINTO CICLO, AMPLITUD 10[MM]	39
FIGURA 51 QUINTO CICLO, AMPLITUD 15[MM]	39

FIGURA 52 QUINTO CICLO, AMPLITUD 20[MM]	39
FIGURA 53 QUINTO CICLO, AMPLITUD 25[MM]	39
FIGURA 54 DECIMO CICLO, AMPLITUD 30[MM]	39
FIGURA 55 QUINTO CICLO, AMPLITUD 35[MM]	39
FIGURA 56 CURVA FUERZA-DESPLAZAMIENTO MJ-3, AMPLITUD 25[MM]	40
FIGURA 57 DESPLAZAMIENTO DE LA BARRA EN LOS PUNTOS ENFOCADOS POR LAS CÁMARAS EN MJ-3 A MEDIDA QUE TRANSCURRE EL ENSAYO PARA CICLOS DE ± 15 , ± 20 , ± 25 Y ± 30 [MM] DE IZQUIERDA A DERECHA RESPECTIVAMENTE	40
FIGURA 58 ESTADO DE LA SECCIÓN DE LA BARRA OBSERVADA AL INICIO DEL ENSAYO Y UNA VEZ TERMINADOS LOS CICLOS DE ± 25 [MM]	41
FIGURA 59 ESPÉCIMEN MJ-4, DISTRIBUCIÓN DE ESTRIBOS	42
FIGURA 60 CURVAS FUERZA-DESPLAZAMIENTO PARA MJ-4	42
FIGURA 61 QUINTO CICLO, AMPLITUD 25[MM]	43
FIGURA 62 DECIMO CICLO, AMPLITUD 25[MM]	43
FIGURA 63 ULTIMO CICLO, AMPLITUD 30[MM]	43
FIGURA 64 ULTIMO CICLO, AMPLITUD 35[MM]	43
FIGURA 65 CURVA FUERZA-DESPLAZAMIENTO MJ-4, AMPLITUD 25[MM]	44
FIGURA 66 DESPLAZAMIENTO DE LA BARRA EN LOS PUNTOS ENFOCADOS POR LAS CÁMARAS EN MJ-4 A MEDIDA QUE TRANSCURRE EL ENSAYO PARA CICLOS DE ± 25 Y ± 30 [MM] DE IZQUIERDA A DERECHA RESPECTIVAMENTE	44
FIGURA 67 ESTADO DE LA SECCIÓN DE LA BARRA OBSERVADA AL INICIO DEL ENSAYO Y UNA VEZ TERMINADOS LOS CICLOS DE ± 25 [MM]	45
FIGURA 68 DESPLAZAMIENTO DE BARRA MJ-4 CON PROGRAMA DE CARGA EXTRA	46

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN	16
TABLA 2 RESISTENCIAS DE PROBETAS CILÍNDRICAS	17
TABLA 3 DETALLE DE COLUMNA	18
TABLA 4 DETALLE DE LA VIGA	18
TABLA 5 DESCRIPCIÓN DE PROBETAS A ANALIZAR	26
TABLA 6 PROGRAMA DE CARGA.....	27

Capítulo I

1. Introducción

En los laboratorios del Departamento de Obras Civiles de la UTFSM se ensayan frecuentemente probetas de hormigón armado, tanto para experiencias docentes como para investigar nuevos tipos de hormigones y aceros, así como nuevas configuraciones de armaduras. Los resultados verifican generalmente un buen desempeño gracias a la ductilidad que la armadura de acero le proporciona al conjunto, lo cual favorece la disipación de energía bajo cargas cíclicas severas, como es la sollicitación sísmica. Sin embargo, el uso del acero también presenta algunas desventajas, tales como su susceptibilidad a la corrosión en ambientes agresivos, su alto costo, su elevado peso propio y dificultades que conlleva en procesos de demolición y reciclaje. Esto último ha sido notorio en el ámbito minero e industrial (Olea, 2015). Conviene entonces explorar otras alternativas de refuerzo adaptadas a distintos contextos, entre las cuales destacan las barras de polímero reforzado con fibras (FRP).

El FRP está compuesto por fibras (vidrio, carbono o aramida) embebidas en una matriz polimérica. Este material presenta propiedades atractivas como alta resistencia a la tracción, bajo peso específico y resistencia a la corrosión. Por estas razones, ha sido utilizado en obras expuestas a ambientes agresivos, como plantas de tratamiento de agua, puentes y muelles (**Figura 1**), aunque su respuesta estructural bajo sollicitación sísmica es limitada, debido a su menor ductilidad y adherencia con el hormigón, en el caso de usarse en forma de barras de refuerzo para hormigón armado.



Figura 1 Vaciado de concreto en el tablero del puente reforzado con FRP (Fuente: Nanni, 2018)

En este marco, el presente trabajo se centra en evaluar el comportamiento de barras de FRP en uniones viga–columna, poniendo especial atención en sus mecanismos de falla y condiciones de adherencia, con el fin de aportar información que permita valorar su efectividad en zonas sísmicamente activas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos generales

Analizar el comportamiento estructural de las barras FRP en estructuras de hormigón armado, evaluando su viabilidad estructural como reemplazo de las barras tradicionales de acero.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar ensayos de tracción de barras FRP para determinar la curva esfuerzo-deformación del material, solucionando los detalles de implementación correspondientes
- Verificar el mecanismo de falla de la barra dentro de un elemento de hormigón armado, para lo cual se construyó un conjunto de probetas tipo unión viga columna, las que fueron ensayadas sometidas a una carga cíclica transversal equivalente a la sollicitación sísmica.
- Verificar condiciones de adherencia de barra de FRP y compararla con la barra de acero tradicional mediante la observación con cámaras endoscópicas.
- Obtener curvas experimentales fuerza-desplazamiento de las probetas para observar su capacidad de disipación de energía.
- Examinar los resultados para verificar si la baja ductilidad de las barras FRP afecta la capacidad de disipación de energía de la estructura como para prohibir su uso en estructuras de hormigón armado en zonas sísmicas.

1.2 Programa experimental

Se elaboraron tres tipos de probeta que representaron la zona próxima a una columna exterior de una viga perteneciente a un marco de hormigón armado. Las dimensiones de las probetas fueron cercanas al tamaño natural y todas fueron sometidas a cargas alternadas y cíclicas, simulando sollicitación sísmica.

Las cuatro probetas construidas y ensayadas se describen en forma detallada en el capítulo 3, y tenían armadura longitudinal compuesta por dos barras de 8 mm en su cara superior y dos barras de 8 mm en su cara inferior, siendo estas:

MJ-1: barras convencionales de acero A630-420H

- MJ-2: barras FRP estriadas con superficie lisa
- MJ3 Y MJ4: barras GFRP estriadas con revestimiento de arena de cuarzo

Todas las probetas compartieron la configuración de armadura transversal y longitudinal que se detalla en el capítulo 3, la cual ha sido previamente estudiada y validada en investigaciones anteriores realizadas en el laboratorio por Palacios (2025). Esta disposición permitió establecer una comparación del comportamiento sísmico entre elementos reforzados con barras de acero y los reforzados con barras FRP.

Como una parte importante del estudio se implementó un sistema de cámaras endoscópicas de video de alta velocidad que permitió medir el deslizamiento de la armadura longitudinal al interior de la columna en tiempo real con el fin de obtener más información de lo ocurrido durante el ensayo y poder comparar los resultados.

1.3 Organización de esta memoria

A continuación, se indica el temario por capítulos de esta memoria:

En el **Capítulo II** se desarrolla el estado del arte sobre el uso de barras de FRP en hormigón armado.

En el **Capítulo III** se describe la elaboración de las probetas y los materiales utilizados.

En el **Capítulo IV** se detalla el montaje del ensayo y los equipos de medición empleados.

En el **Capítulo V** se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos.

Finalmente, en el **Capítulo VI** se exponen las conclusiones y recomendaciones del estudio.

Capítulo II

2. Estado del arte

2.1 Barras de FRP

Las barras de polímero reforzado con fibras (FRP) se producen a partir de fibras continuas de refuerzo y una matriz polimérica que las une y protege. Las fibras más comunes son vidrio (GFRP), carbono (CFRP) y aramida (AFRP), siendo las de vidrio las más utilizadas por su bajo costo y buena resistencia mecánica. La matriz corresponde principalmente a resinas epóxicas o poliéster, que proporcionan cohesión, transferencia de esfuerzos y durabilidad frente a la corrosión. La combinación fibra–matriz determina la rigidez, resistencia y comportamiento global de las barras.

El proceso de fabricación más empleado es la pultrusión (**Figura 2**), un método continuo que garantiza calidad uniforme. En este proceso, los hilos de fibra se introducen en un baño de resina donde quedan impregnados, para luego pasar a un sistema de alineamiento que regula la proporción fibra/resina y define la forma inicial del compuesto. Posteriormente, el material atraviesa un molde calefaccionado, donde la resina se endurece y se obtiene la sección definitiva de la barra. Una vez curada, la barra es cortada en la longitud requerida y sometida a controles de calidad que verifican propiedades mecánicas, acabado superficial y ausencia de defectos internos.



Figura 2 Método de entrelazado de hebras para la fabricación de barras FRP
(Fuente: *Composite Tech*, 2023)

Para mejorar la adherencia con el hormigón se aplican tratamientos superficiales específicos. Entre los más comunes se encuentran el arenado, el recubrimiento helicoidal, la aplicación de hilos enrollados y el grabado superficial (**Figura 3**). Estos métodos incrementan la fricción y la resistencia química entre la barra y el hormigón, favoreciendo una transferencia más eficiente de esfuerzos.



Figura 3 barras con recubrimiento de arena junto a barras sin recubrimiento

2.2 Comportamiento mecánico y aplicaciones estructurales

El empleo de barras FRP en estructuras de hormigón armado ha sido ampliamente estudiado en las últimas décadas, principalmente la relación con su desempeño mecánico bajo cargas estáticas. Por ejemplo, Al-Sunna et al. (2012) ensayaron vigas y losas reforzadas con FRP y observaron que las deflexiones experimentales tuvieron diferencias consistentes a las previstas por los modelos de predicción disponibles (ACI 440.1R-06 – *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*, Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Benmokrane). Dichas discrepancias (**Figura 4**) se atribuyeron a mecanismos como el deslizamiento y la fisuración localizada, resaltando que la adherencia de las barras funciona de manera diferente a las barras de acero utilizadas comúnmente.

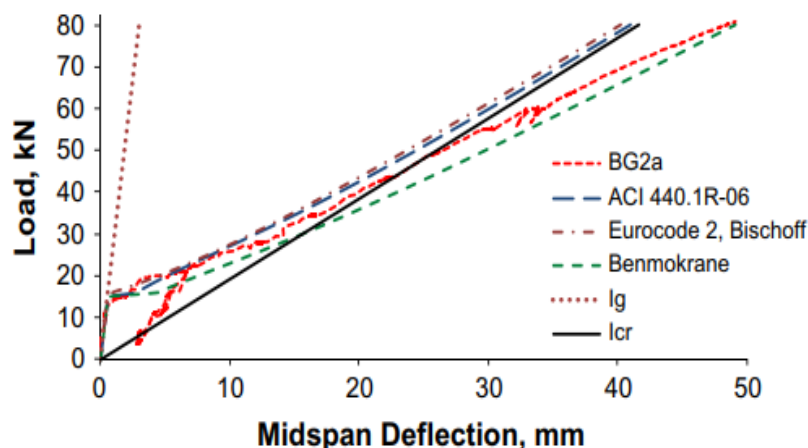


Figura 4 Comparación de deformaciones reales (BG2a) y modelos de predicción (Al-Sunna et al. 2012)

Un ejemplo de la aplicación real del FRP en estructuras de hormigón armado corresponde al primer tanque de cloración de agua totalmente reforzado con barras de FRP (**Figura 5**), construido en 2003 en Thetford Mines, Canadá. Tanto la cimentación como los muros verticales y la losa de cubierta fueron reforzados íntegramente con barras de FRP. El diseño se realizó bajo los criterios de servicio y resistencia de normas internacionales como ACI 440 y ACI 350, incorporando sensores de fibra óptica para monitorear deformaciones en tiempo real. Las pruebas de servicio confirmaron que el tanque presentó un excelente rendimiento estructural, sin fugas ni fallas prematuras, y con capacidad de soportar cargas aplicadas de manera eficiente. Este caso evidencia que el uso de FRP no se limita al ámbito experimental, sino que ha alcanzado aplicaciones reales a gran escala, motivadas principalmente por la necesidad de mejorar la durabilidad y resistencia a la corrosión en ambientes agresivos.



Figura 5 Proceso de construcción del estanque de agua en Thetford Mines (Galvez, 2022).

Capítulo III

3. Elaboración de las probetas

Con el propósito de evaluar el comportamiento de diferentes tipos de armaduras longitudinales, se elaboraron tres tipos de probeta que representarían la zona próxima a la columna de un marco de hormigón armado (**Figura 6**). Las dimensiones de las probetas corresponden a una escala 1:3 del tamaño real y fueron sometidas a cargas alternadas y cíclicas, simulando sollicitación sísmica.

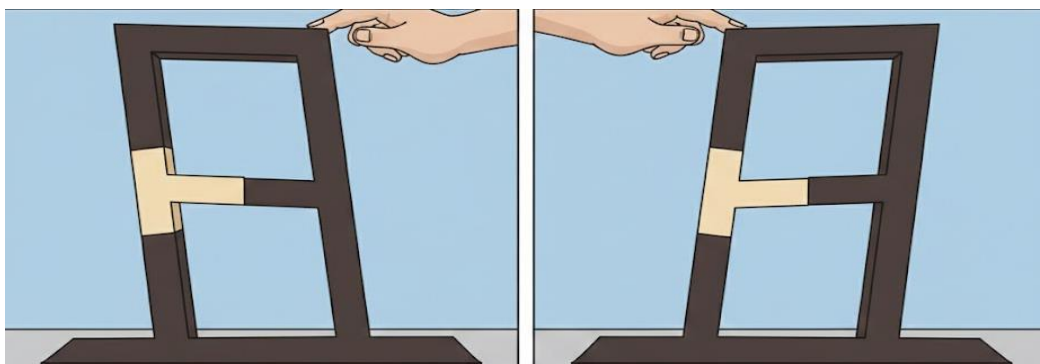


Figura 6 Representación de la sección que será estudiada

3.1 Materiales

3.1.1 Moldajes

El material utilizado para la confección del moldaje fue terciado de 15 [mm] y 18 [mm]. La **figura 7** muestra el moldaje terminado para una probeta y con la armadura lista para ser hormigonada.

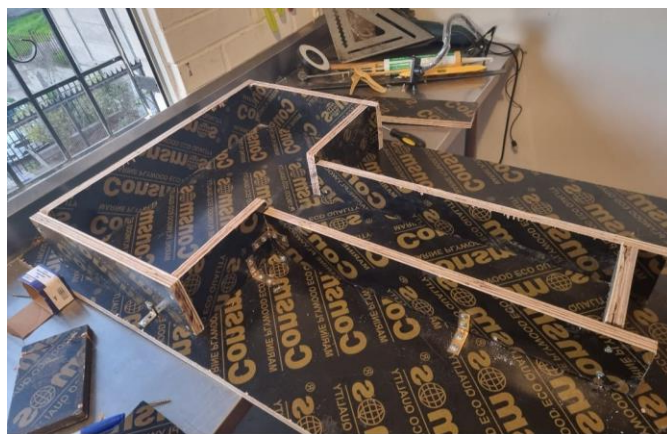


Figura 7. Armadura lista en moldaje para ser hormigonada

Las dimensiones de las probetas y la distribución de estribos se representan en la **Figura 8**

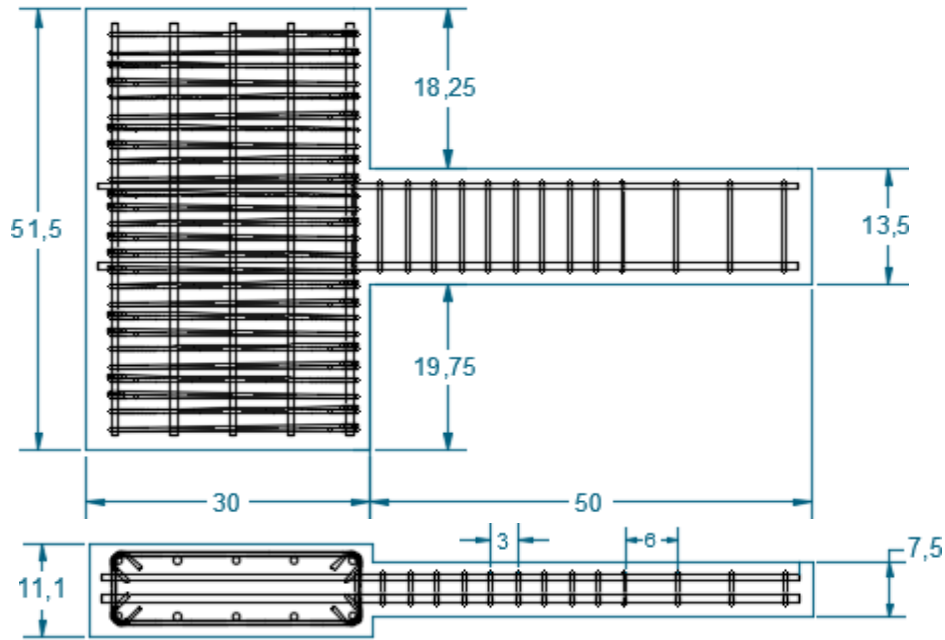


Figura 8 Dimensiones de la probeta (Silva, 2022)

3.1.2 Hormigón

3.1.2.1 Dosificación de materiales para la mezcla

Se presenta en la **Tabla 1** los materiales y dosificaciones empleados para la confección de una probeta con hormigón preparado. La resistencia especificada por el fabricante para la dosificación establecida corresponde a 20 [Mpa]. Al considerarse esta resistencia menor a la necesaria para fabricar las probetas, se incorporó 2,5 [kg] de cemento melón especial por cada 17[lt] de hormigón H-20, agregando aditivo plastificante para facilitar el hormigonado de estas, siguiendo las indicaciones de la memoria de Silva (2022).

Tabla 1 Dosificación del hormigón

Material	Cantidad	Unidad
Hormigón preparado (H-20)	2,5	Saco (25 kg)
Cemento Melón especial	5	KG
Agua	7	L
Plastificante complast-500	438	ml

3.1.2.2 Resistencias de probetas cilíndricas

Se determinó la resistencia cilíndrica a los 7 días y justo antes de realizar los ensayos de solicitación sísmica acorde a la norma NCh 1037-2009 (**Figura 9**). En la **Tabla 2** se muestran las resistencias alcanzadas por cada probeta.

Se realizaron dos tandas de hormigonado: en la primera se fabricaron las probetas cilíndricas MC-1 y MC-3, junto con MJ-1 y MJ-2; en la segunda, se elaboraron las probetas MC-2 y MC-4, junto con MJ-3 Y MJ-4

Tabla 2 Resistencias de probetas *cilíndricas*

Nombre espécimen	Resistencia [Mpa]
MC-1 (7 días)	37.49
MC-2 (7 días)	35,30
MC-3 (55 días)	46.54
MC-4 (55 días)	43.10



Figura 9 Ensayo de una probeta cilíndrica *en el laboratorio*

3.1.3 Armadura

Las armaduras de la columna se fabricaron con los aceros cuyas denominaciones se indican de la **tabla 3**.

Tabla 3 Detalle de columna

Refuerzo longitudinal	Estribos de refuerzo
A630-420H de 8 [mm]	AT56-50H de 4,2 [mm]

Para la viga se utilizaron varios materiales: FRP, FRP arenado y acero, según se presenta en la **Tabla 4** . Las barras FRP fueron proporcionadas por un importador nacional. Las barras AT56-50H se usaron porque dieron buenos resultados a memoristas anteriores (Palacios, 2025)

Tabla 4 Detalle de la viga

Refuerzo longitudinal	Estribos de refuerzo
A630-420H de 8 [mm]	AT56-50H de 4,2 [mm]
FRP LISO ESTRIADO DE 8 [mm]	AT56-50H de 4,2 [mm]
FRP ARENADO de [8mm]	AT56-50H de 4,2 [mm]

Finalmente se presenta un esquema de la armadura completa (**Figura 10**).

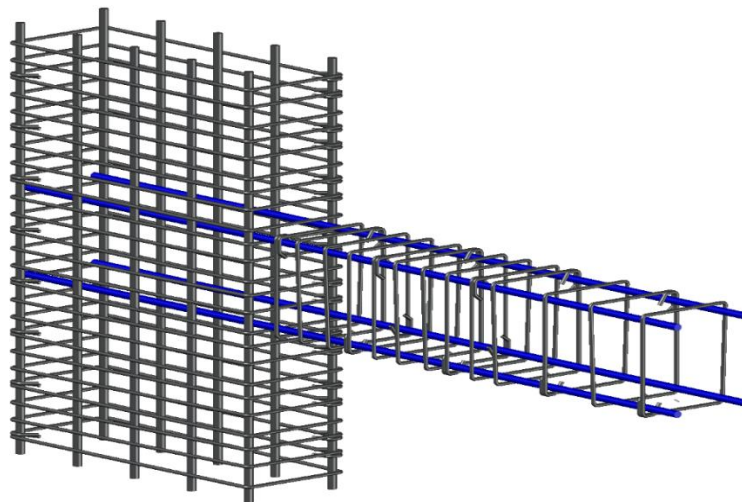


Figura 10 Esquema de la armadura completa

1.1.3.1 Ensayo a tracción de las barras

A continuación, se presentan los resultados del ensayo a tracción de dos barras longitudinales como las indicadas en la **Tabla 4**. Para la realización del ensayo de tracción, los extremos de las barras de FRP fueron encapsulados en tubos de acero con rugosidad interior, generada mediante golpes controlados. Posteriormente, se vertió acero líquido en el interior de los tubos y la barra fue introducida de forma inmediata, logrando una unión solidaria que permitió una adecuada transmisión de esfuerzos durante el ensayo (**Figura 11**).



Figura 11 preparación de barras para el ensayo a tracción

El acero se ensayó de acuerdo con la norma NCh204 y presentó un comportamiento coherente con lo reportado en memorias y estudios anteriores, Las barras de FRP alcanzaron una resistencia a tracción mayor, aunque con elongaciones considerablemente menores antes de la rotura (**Figura 12**).

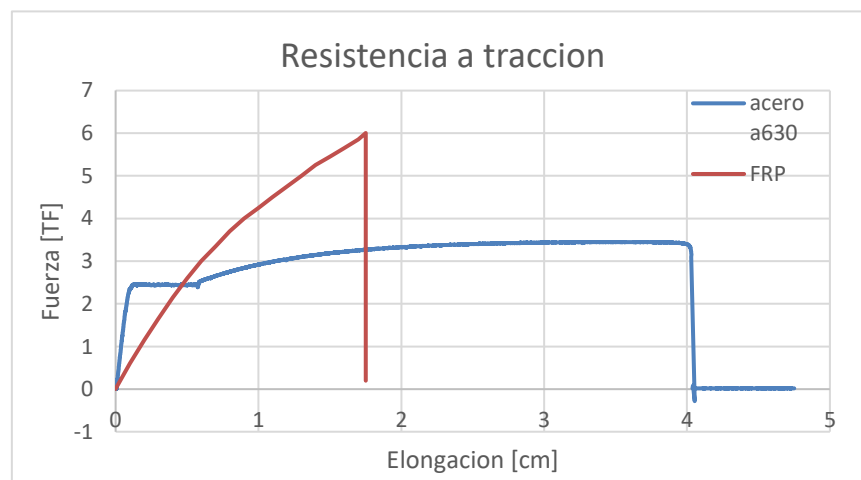


Figura 12 Resistencia tracción de barras longitudinales

Las dimensiones de estribos se presentan en **Figura 13 y Figura 14**

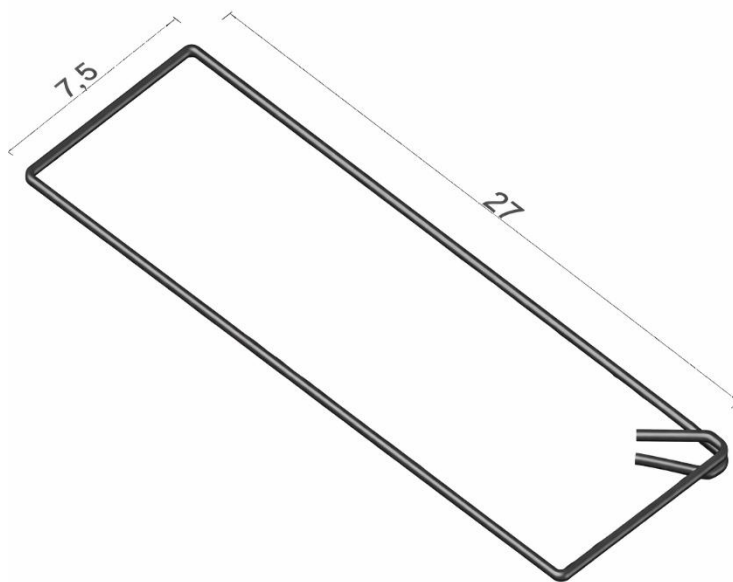


Figura 13 Dimensiones del estribo de la columna

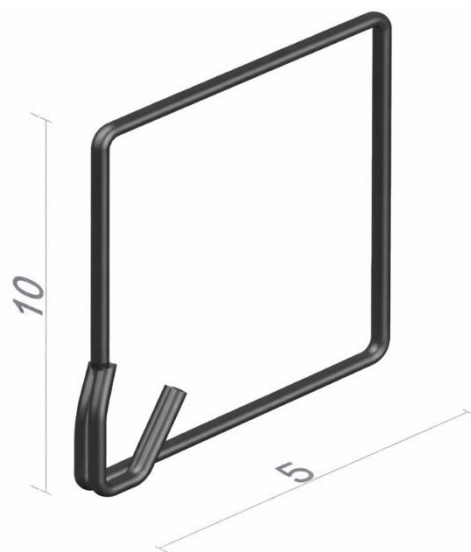


Figura 14 dimensiones del estribo de la viga

1.1.4 Tubos de observación

Las cámaras endoscópicas se enfocaron a las barras a través de tubos de cobre de media pulgada (Figura 15). Para evitar la entrada de hormigón fresco, estos fueron rellenos con masa epóxica en su extremo (Figura 16), la que fue retirada una vez que el hormigón hubo endurecido.

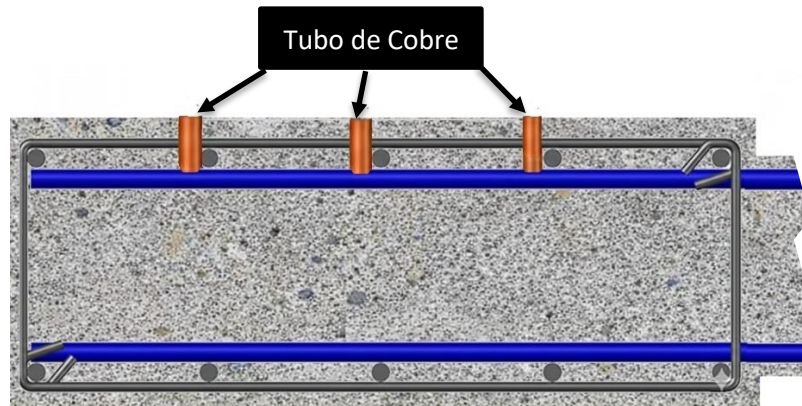


Figura 15 Esquema de distribución de tubos de cobre



Figura 16 Tubos de cobre instalados rellenos de masa epóxica

3.1.5 Barras roscadas

Una vez montada la armadura en el molde se perforaron los agujeros en las paredes para hacer pasar barras roscadas de 5/8" sujetas con tuercas al interior y al exterior de la probeta, sobresaliendo unos 7 cm al exterior (**Figura 17**). Mediante estas barras se sujeta la probeta al bloque de fundación.



Figura 17 Probeta lista para ser hormigonada

3.2 Hormigonado de las probetas

El hormigonado se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio con ayuda del personal y se realizó sobre una pequeña mesa vibradora que se usa para la fabricación de cilindros y viguetas de prueba. Una vez terminado el hormigonado se cubrió la probeta con polietileno para conservar la humedad, y posteriormente fue llevada a curar a la cámara de humedad del laboratorio (**Figura 18**).



Figura 18 Probetas reposando en la cámara de humedad

Capítulo IV

4. Montaje de los ensayos

4.1 Preparación de la probeta

Una vez terminado el tiempo de curado de la probeta, se procedió a su pintado completo y rayado de armadura para tener referencia de su ubicación (**Figura 19**).



Figura 19 Probeta pintada y con la armadura marcada

También se realizó una limpieza interna de los tubos de cobre para tener visión de clara de las barras longitudinales durante el ensayo. Esto se hizo con escobilla, descartando el uso de puntas abrasivas de taladro empleadas por Palacios (2025) ya que las barras FRP podrían verse afectadas. Posteriormente se instalaron targets de lectura (**Figura 20**) para posibilitar la medición de los desplazamientos de las barras durante los ensayos mediante un software de análisis de imágenes.



Figura 20 Barra FRP limpia y con targets instalados

4.2 Equipos

4.2.1 Actuador hidráulico

Los ensayos se ejecutaron usando el actuador hidráulico MTS-244 de la mesa sísmica del Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente del Departamento de Obras Civiles, 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 21**.

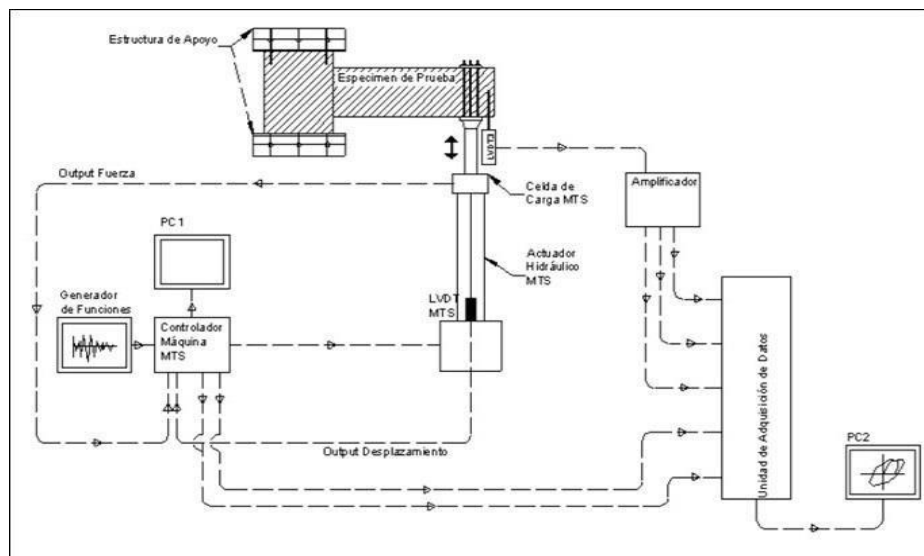


Figura 21 Diagrama unilineal del sistema de ensayo.

4.2.2 Cámaras de alta velocidad

Las cámaras endoscópicas ENT1080p (**Figura 22**) que fueron utilizadas en esta investigación se usan principalmente para procedimientos médicos mínimamente invasivos. Poseen una velocidad de 60 cuadros por segundo, capaces de captar videos en alta definición y cuentan con un tubo de fibra óptica el cual provee iluminación, proveniente de una linterna ubicada en la batería lateral. Estas son compatibles con monitores y cuentan con salida USB que se pueden conectar a cualquier computador. La grabación del video se hizo por medio del Software “OBS Studio”.



Figura 22 Cámara ENT1080p utilizada

4.2.3 Soporte

Las cámaras se instalaron en posición mediante un soporte estructural fabricado con perfiles de aluminio (**Figura 23**), el cual fue fijado a la columna mediante anclajes (tarugos).



Figura 23 Soporte para cámaras de alta velocidad

4.2.4 Riel de soporte

Para evitar eventual torsión de la viga durante el ensayo, se dispuso en el extremo libre un riel de guía como se muestra en la **figura 24**.



Figura 24 Riel de soporte de viga

4.3 Instalación de las probetas para el ensayo

Las probetas fueron colocadas sobre el bloque de fundación de la mesa sísmica del laboratorio, y apernadas a este por las barras roscadas. Posteriormente se instalaron los distintos equipos de medición y de video. Como muestra la **Figura 25**.



Figura 25 Probeta instalada en mesa sísmica

4.4 Característica de las probetas y programa de aplicación de carga

Se presenta en la **Tabla 5** la descripción detallada de las armaduras de cada probeta

Tabla 5 Descripción de probetas a analizar

Nombre	Barra longitudinal	Armadura transversal	Tipo De refuerzo	Estribo
MJ-1	A630-420H	Estribo AT56-50H	Ortogonal	Gancho sísmico
MJ-2	Fibra de vidrio estriada lisa	Estribo AT56-50H	Ortogonal	Gancho sísmico
MJ-3	Fibra de vidrio estriada arenada	Estribo AT56-50H	Ortogonal	Gancho sísmico
MJ-4	Fibra de vidrio estriada arenada	Estribo AT56-50H	Ortogonal	Gancho sísmico

La carga aplicada a las probetas fue en términos de ciclos con desplazamiento controlado y con el programa de ciclos que se presenta en las **Tabla 6**

Tabla 6 Programa de carga

	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
MJ-1	5	5	5	5	10	10
MJ-2	0	0	0	0	10	10
MJ-3	5	5	5	5	10	10
MJ-4	0	0	0	0	10	10

Para las probetas MJ-1 Y MJ3, se agregaron algunos ciclos intermedios de menor amplitud para deterioro o degradación. El objetivo de usar esta variación fue el de comprobar qué tan incidente es el programa de carga en los resultados de los ensayos.

Capítulo V

5. Resultados.

5.1 Consideraciones previas.

Este capítulo presenta los resultados experimentales, incluyendo esquemas de las probetas, curvas de histéresis y fotografías de cada fase de desplazamiento. Se destaca el ciclo de 25 mm para permitir la comparación directa del daño y agrietamiento entre distintas probetas. Los deslizamientos de las barras dentro del hormigón se midieron con un programa de análisis de las imágenes utilizando los videos grabados por las cámaras, definiendo el movimiento hacia el exterior de la columna como positivo y hacia el interior como negativo.

5.2 Análisis de imágenes

5.2.1 Programa Tracker

Con los videos obtenidos en los ensayos se generó un rastreo digital de los puntos de las barras enfocados por las cámaras. El programa Tracker permite, usando como referencia las medidas del target, obtener los desplazamientos con una exactitud de $\pm 0,01$ [mm] en los ejes X e Y (**Figura 26**).

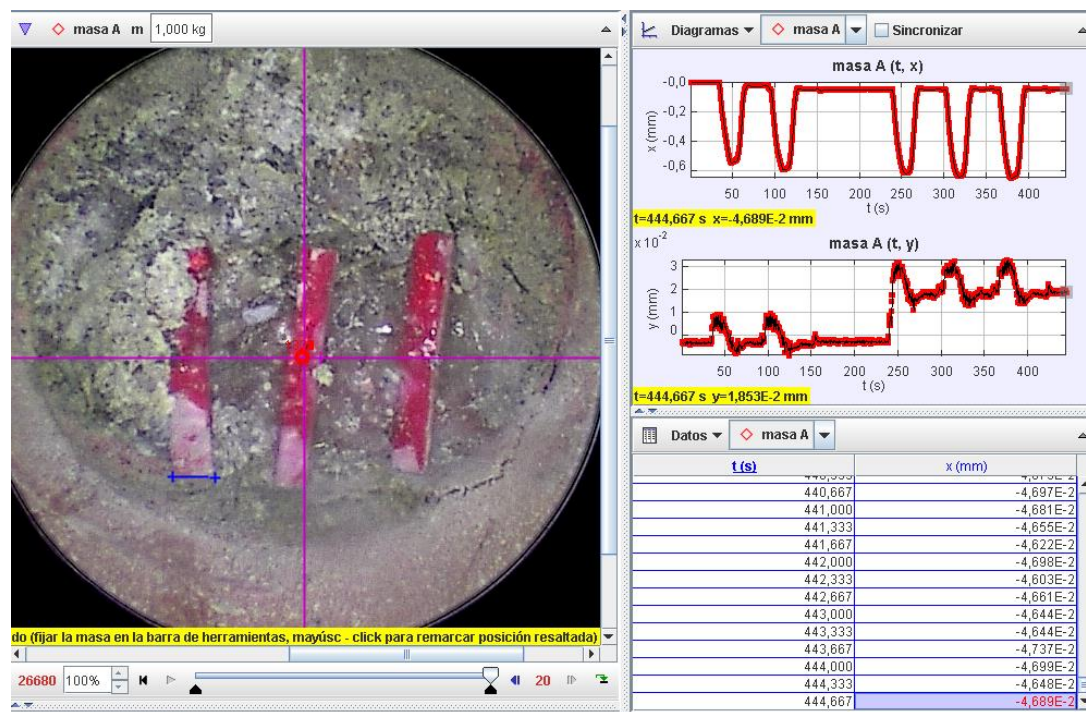


Figura 26 TRACKER analizando el movimiento de los targets

5.2.2 Programa DIC

La técnica DIC (Digital Image Correlation) consiste en comparar imágenes digitales tomadas en diferentes etapas de carga para detectar desplazamientos y deformaciones en la superficie del material (**Figura 27**). Utiliza algoritmos que rastrean patrones de textura en las imágenes, permitiendo obtener mediciones con una exactitud de $\pm 0,01$ [mm]. Este procedimiento se utiliza ya que, al ser los desplazamientos de las barras muy pequeños, los desplazamientos serían muy difíciles de medir directamente.

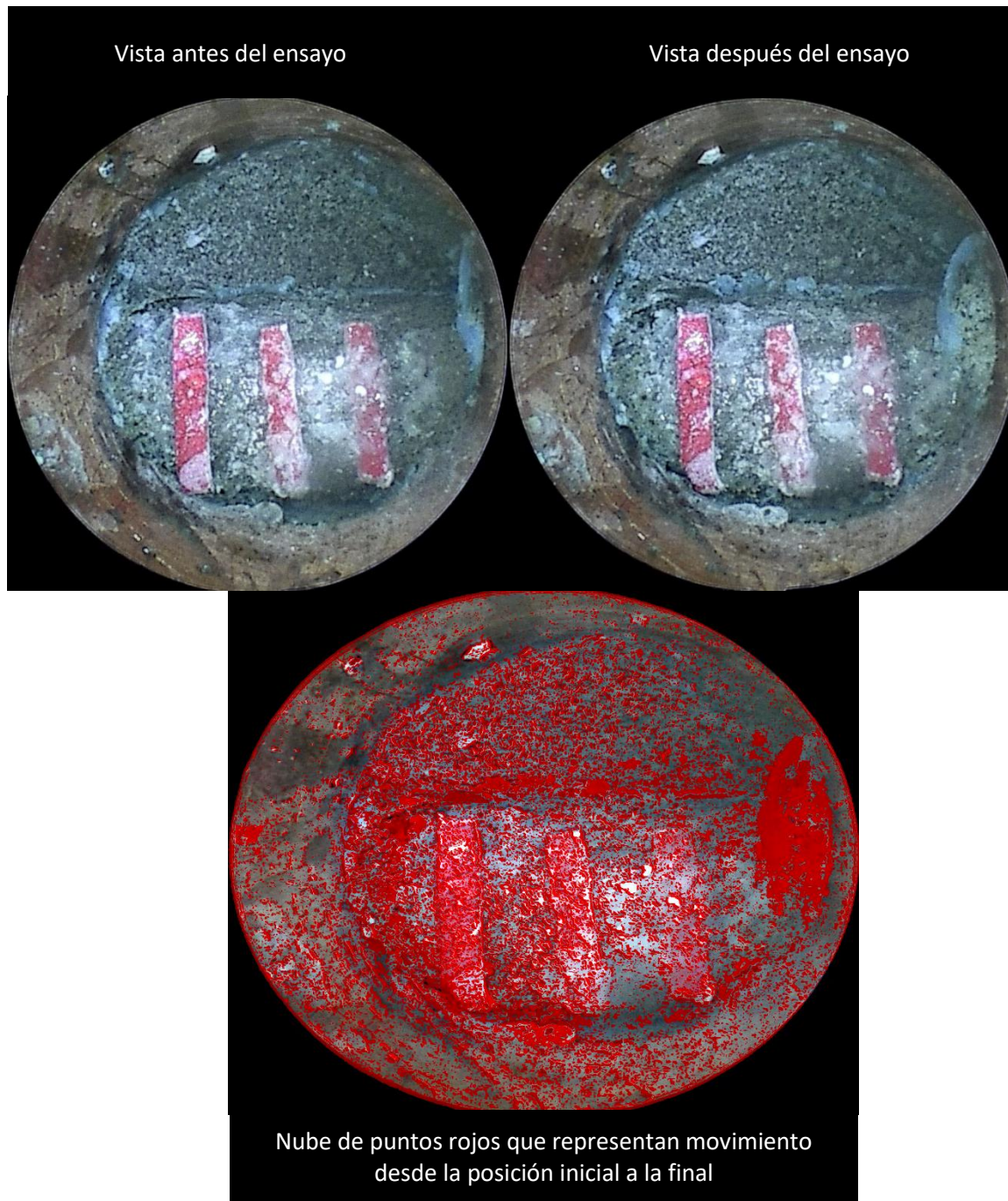


Figura 27 Esquema que muestra cómo funciona el DIC

5.3 PROBETA MJ-1 ARMADURA CONVENCIONAL.

En la **Figura 28** se presenta un esquema de cómo es la distribución de armadura de la probeta MJ-1.

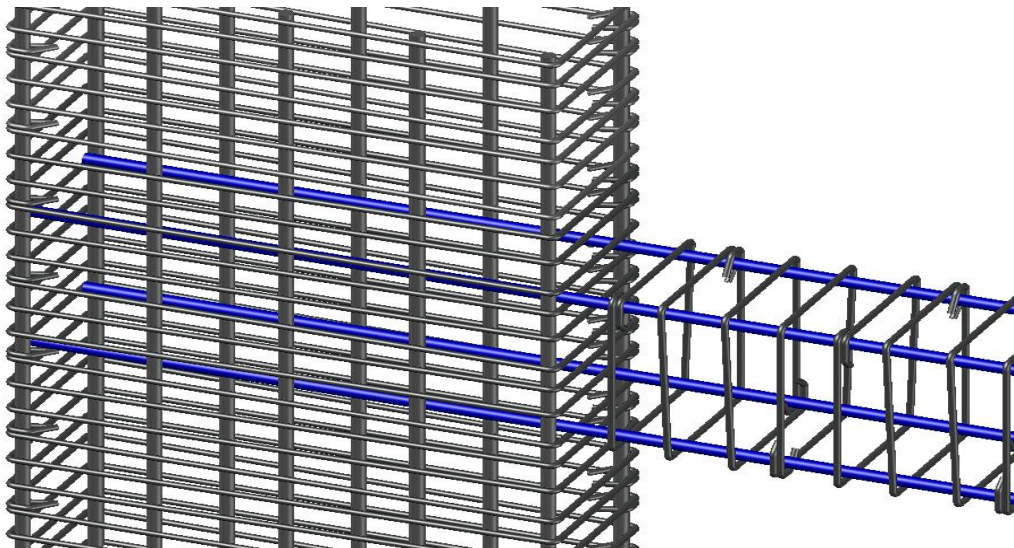


Figura 28 Espécimen MJ-1, distribución de estribos

En la **Figura 29** se presentan las curvas de histéresis obtenidas del ensayo en MJ-1.

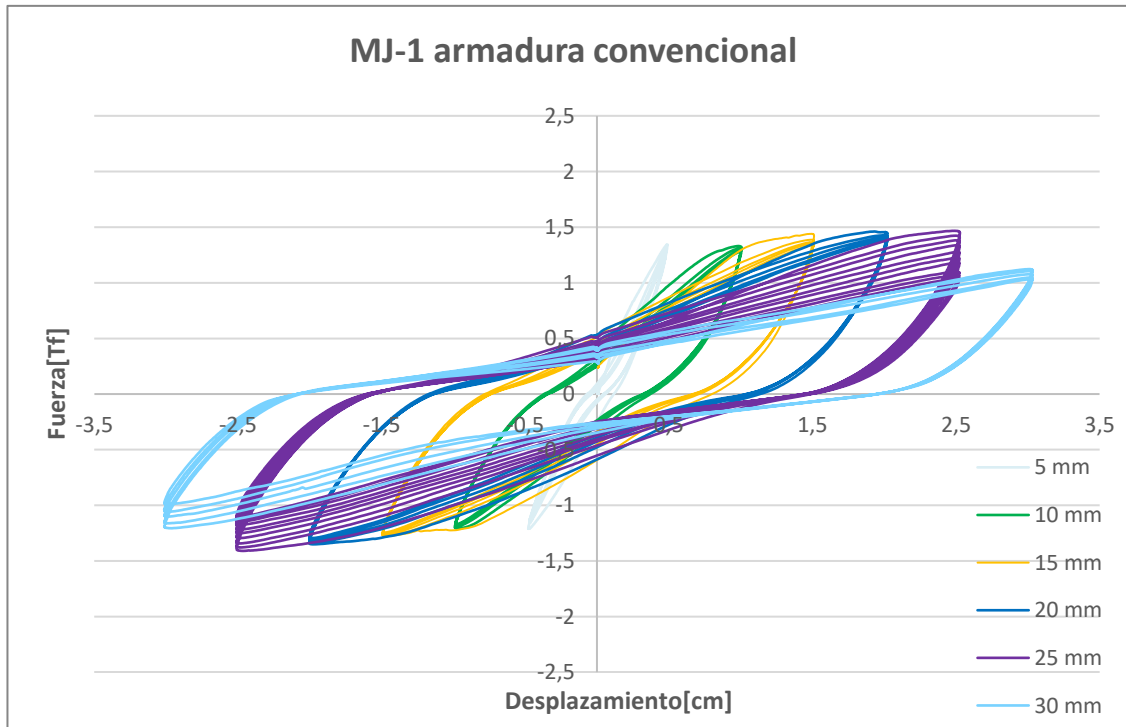


Figura 29 Curvas Fuerza-Desplazamiento para MJ-1

Se presenta el registro fotográfico de la integridad de la probeta desde los 10 [mm] a los 30[mm] de amplitud (**Figura 30 a Figura 35**).



Figura 30 Quinto ciclo, amplitud 10[mm]



Figura 31 Quinto ciclo, amplitud 15[mm]



Figura 32 Quinto ciclo, amplitud 20[mm]



Figura 33 Quinto ciclo, amplitud 25[mm]



Figura 34 Décimo ciclo, amplitud 25[mm]



Figura 35 Quinto ciclo, amplitud 30[mm]

En la **Figura 36** se presentan las curvas de histéresis de amplitud 25[mm] obtenidas del ensayo en MJ-1.

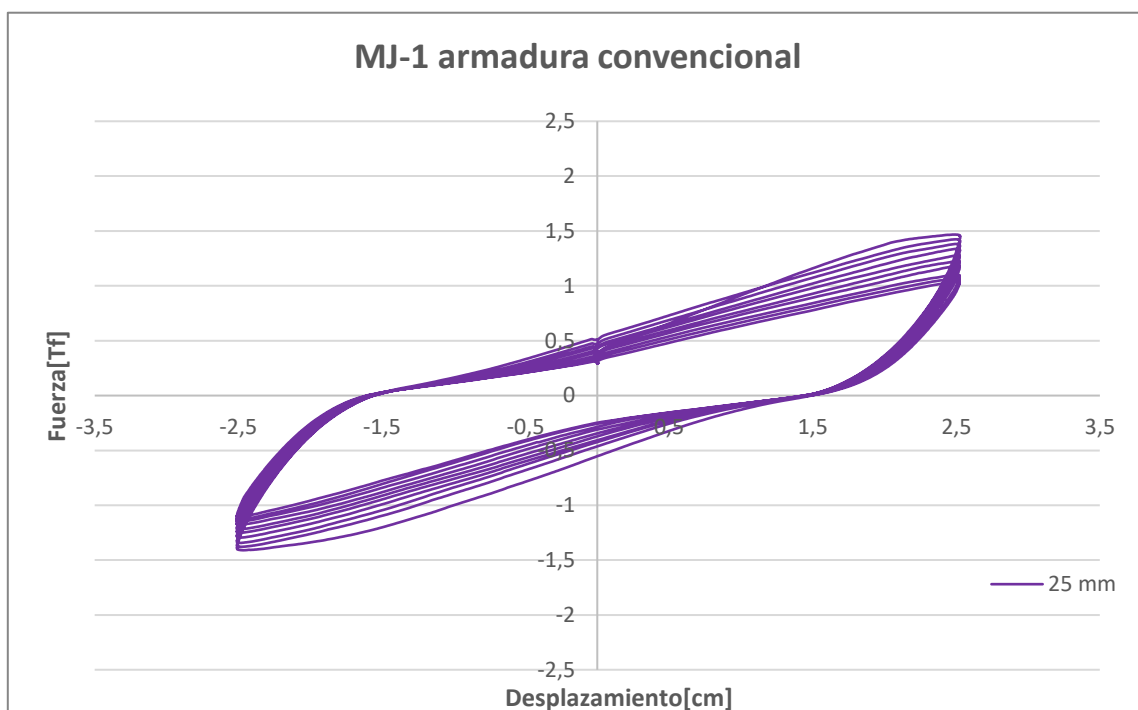


Figura 36 Curva fuerza-desplazamiento MJ-1, amplitud 25[mm].

En la **Figura 37** se presentan las curvas de desplazamientos medidas por la cámara endoscópica en las zonas estudiadas, siendo el “movimiento exterior” el desplazamiento en la zona más cercana a la viga y el “movimiento interior” el desplazamiento en la zona mas lejana a la viga.

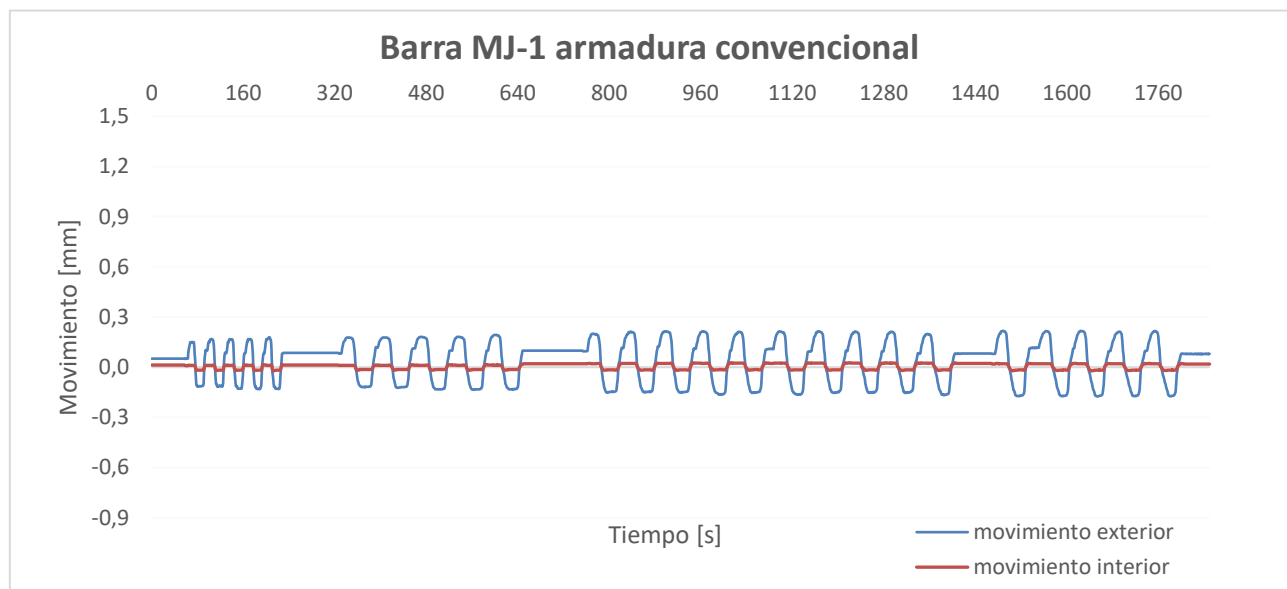


Figura 37 Desplazamiento de la barra en los puntos enfocados por las cámaras en MJ-1 a medida que transcurre el ensayo. Se muestran las etapas ciclos de ± 15 , ± 20 , ± 25 y ± 30 [mm] de izquierda a derecha respectivamente.

En la **Figura 38** se presenta la imagen DIC obtenida de la zona exterior estudiada de la probeta MJ-1.

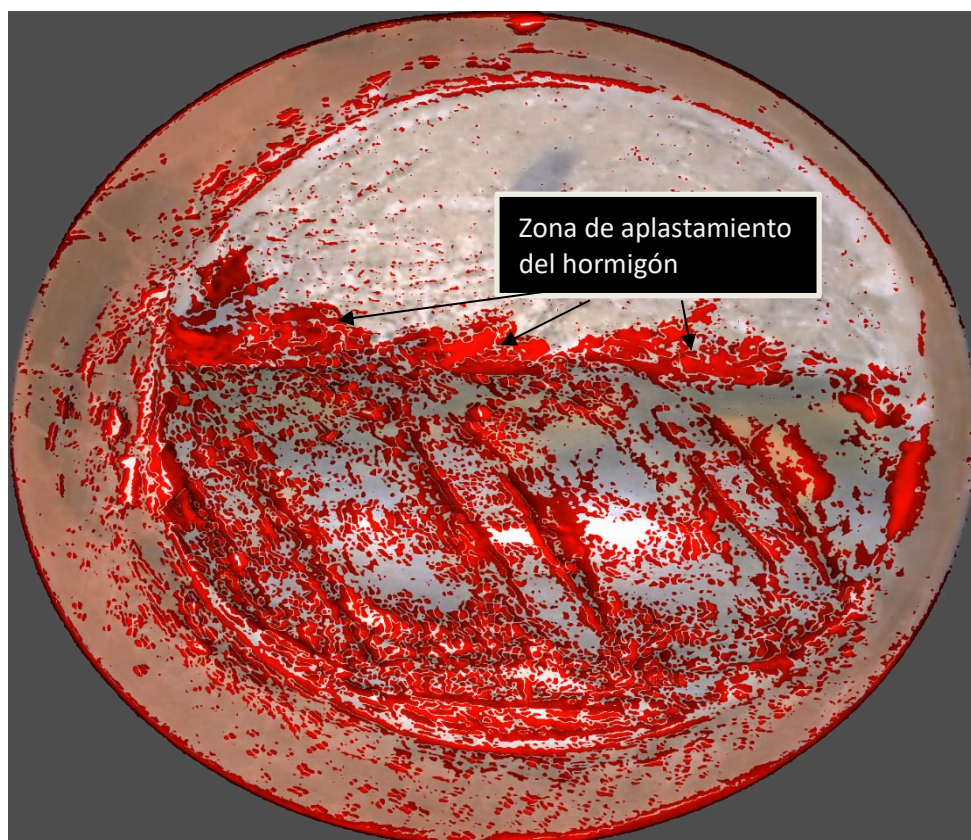


Figura 38 Imagen DIC, MJ-1 ARMADURA CONVENCIONAL

5.3.1 Comentarios MJ-1

- Se observa que las curvas de histéresis de 25 [mm] empezaron con una resistencia de 1.5 [Ton] pero deteriorándose en cada iteración de manera constante hasta llegar a 1.0 [Ton].
- En la **Figura 37** se observa poca variación del deslizamiento entre ciclos mediante el sistema de cámaras, esto quiere decir que el movimiento plástico de la barra de acero se manifestó en el tramo más próximo al exterior (cercano a los 5 cm de la viga).
- Debido al poco movimiento de la barra y a la dificultad para poder ver diferencias en imágenes estáticas se decidió utilizar DIC.
- En la **Figura 38** no se observa fisuración, sino aplastamiento debido a las estrías de las barras.
- Se terminó el ensayo en la etapa de ciclos de 30 [mm] por severo vaciamiento de hormigón en la zona de arranque de la viga y disminución de la resistencia.

5.4 PROBETA MJ-2 ARMADURA FRP LISA

En la **Figura 39** se presenta un esquema de cómo es la distribución de armadura de la probeta MJ-2.

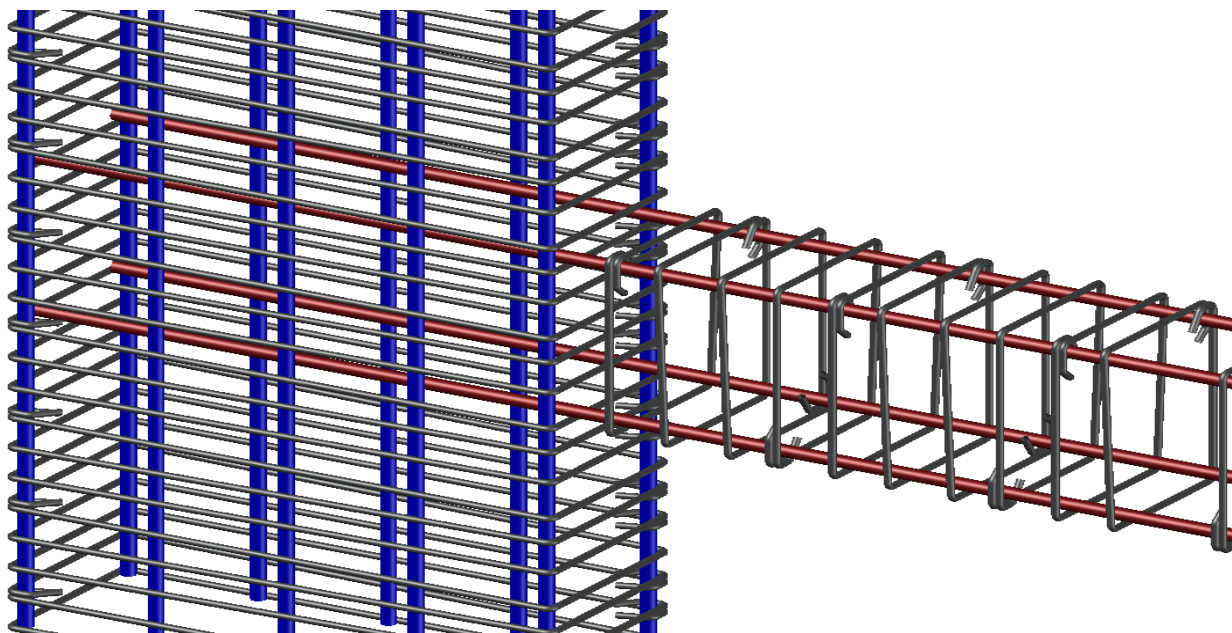


Figura 39 Espécimen MJ-2, distribución de estribos

En la **Figura 40** se presenta las curvas de histéresis obtenidas del ensayo en MJ-2.

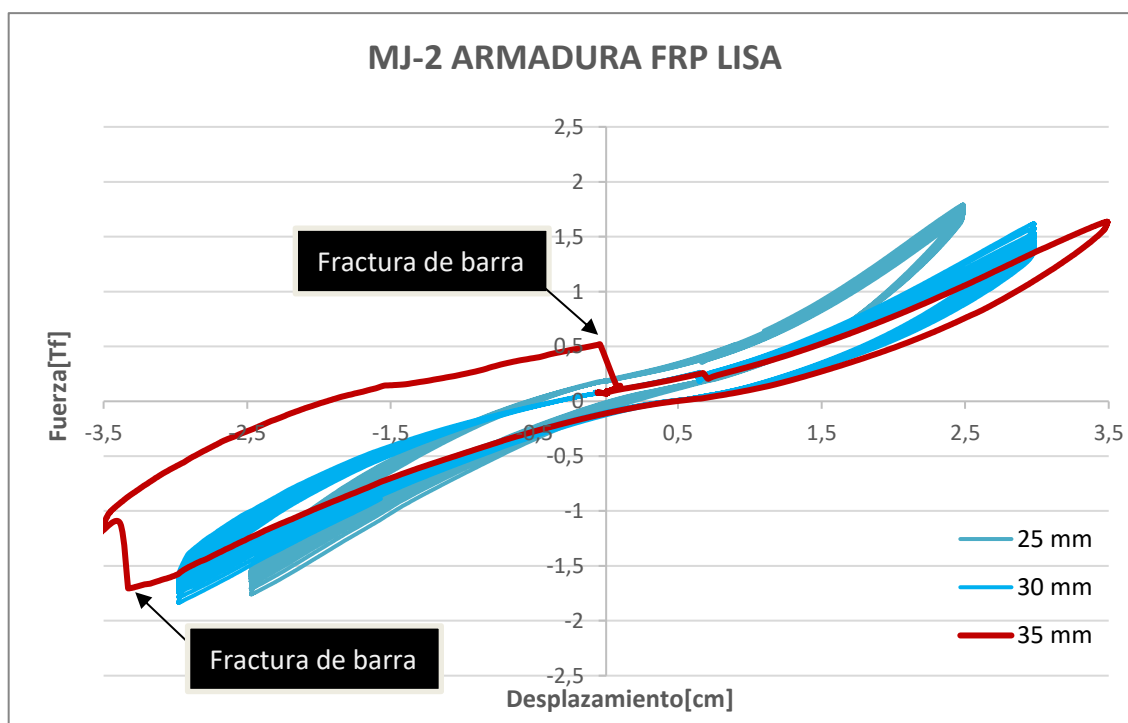


Figura 40 Curvas Fuerza-Desplazamiento para MJ-2

Se presenta el registro fotográfico de la integridad de la probeta desde los 10 [mm] a los 30[mm] de amplitud (**Figura 41 a Figura 44**).

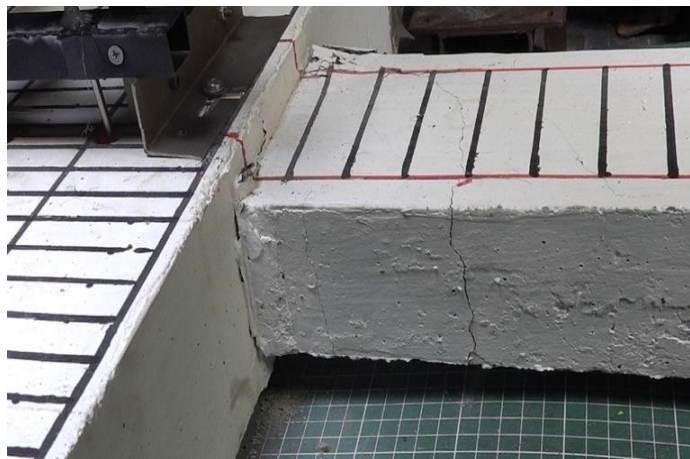


Figura 41 Quinto ciclo, amplitud 25[mm]



Figura 42 Decimo ciclo, amplitud 25[mm]



Figura 43 Quinto ciclo, amplitud 30[mm]



Figura 44 Primer ciclo, amplitud 35[mm]

En la **Figura 45** se presentan las curvas de histéresis de amplitud 25[mm] obtenidas del ensayo en MJ-2.

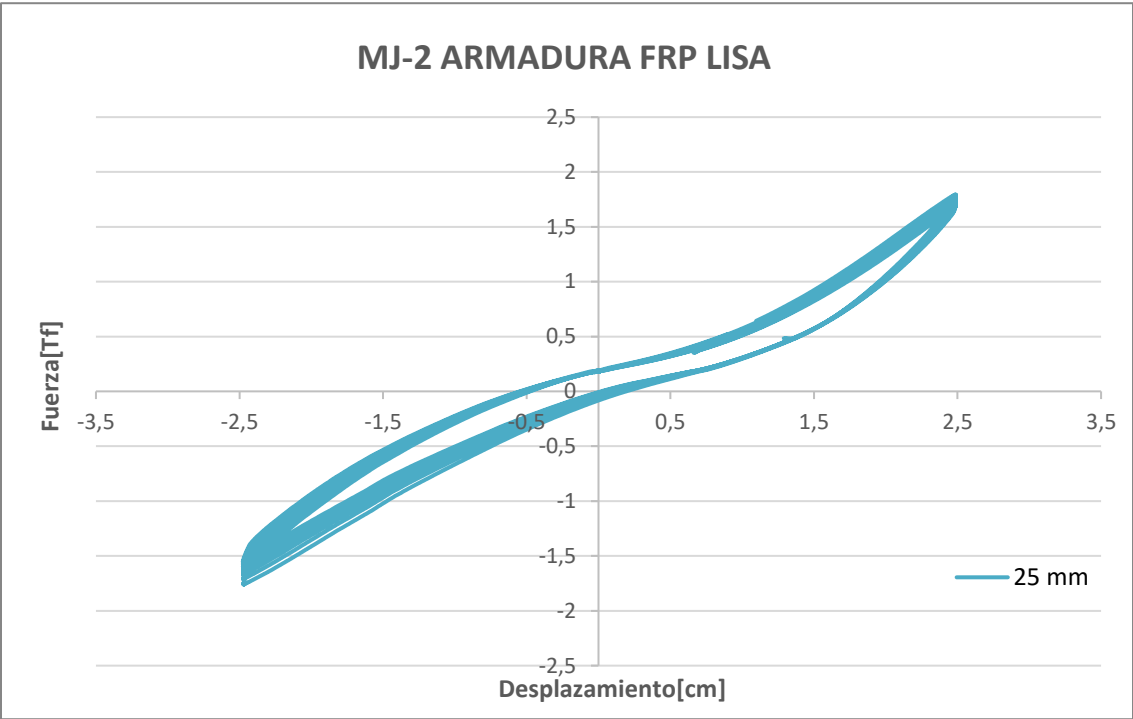


Figura 45 Curva fuerza-desplazamiento MJ-2, amplitud 25[mm]

En la **Figura 46** se presentan las curvas de desplazamientos medidas por la cámara endoscópica en las zonas estudiadas, siendo el “movimiento exterior” el desplazamiento en la zona más cercana a la viga y el “movimiento interior” el desplazamiento en la zona más lejana a la viga.

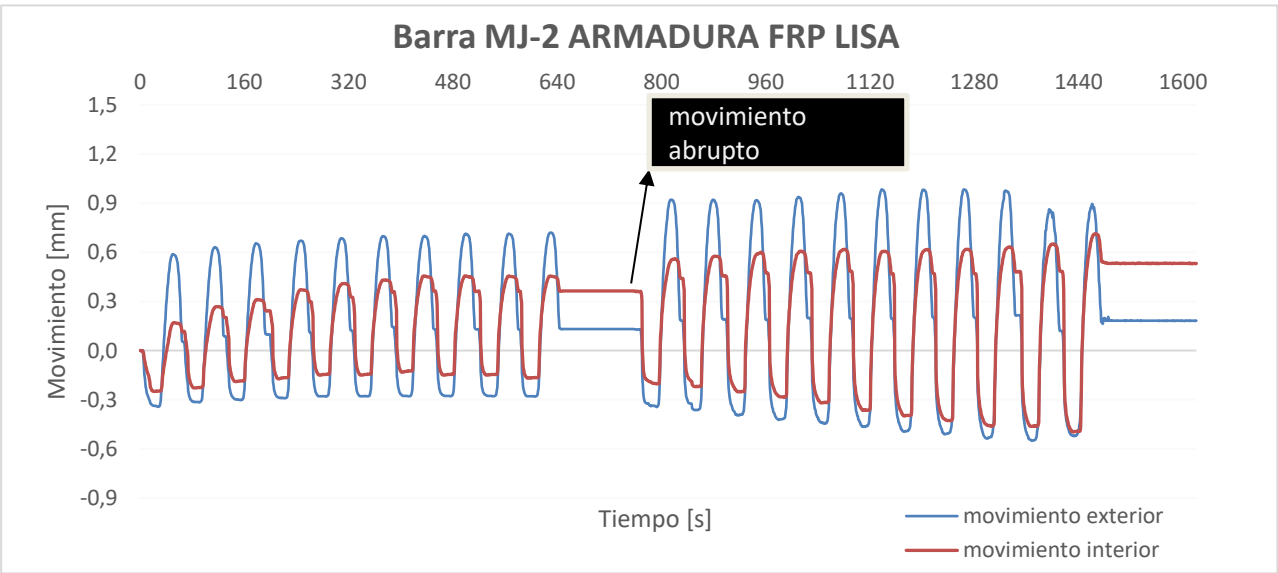


Figura 46 Desplazamiento de la barra en los puntos enfocados por las cámaras en MJ-2 a medida que transcurre el ensayo para ciclos de ± 25 y ± 30 [mm] de izquierda a derecha respectivamente.

En la **Figura 47** se presentan las imágenes obtenidas por la cámara endoscópica antes y después del ensayo a estudiar.

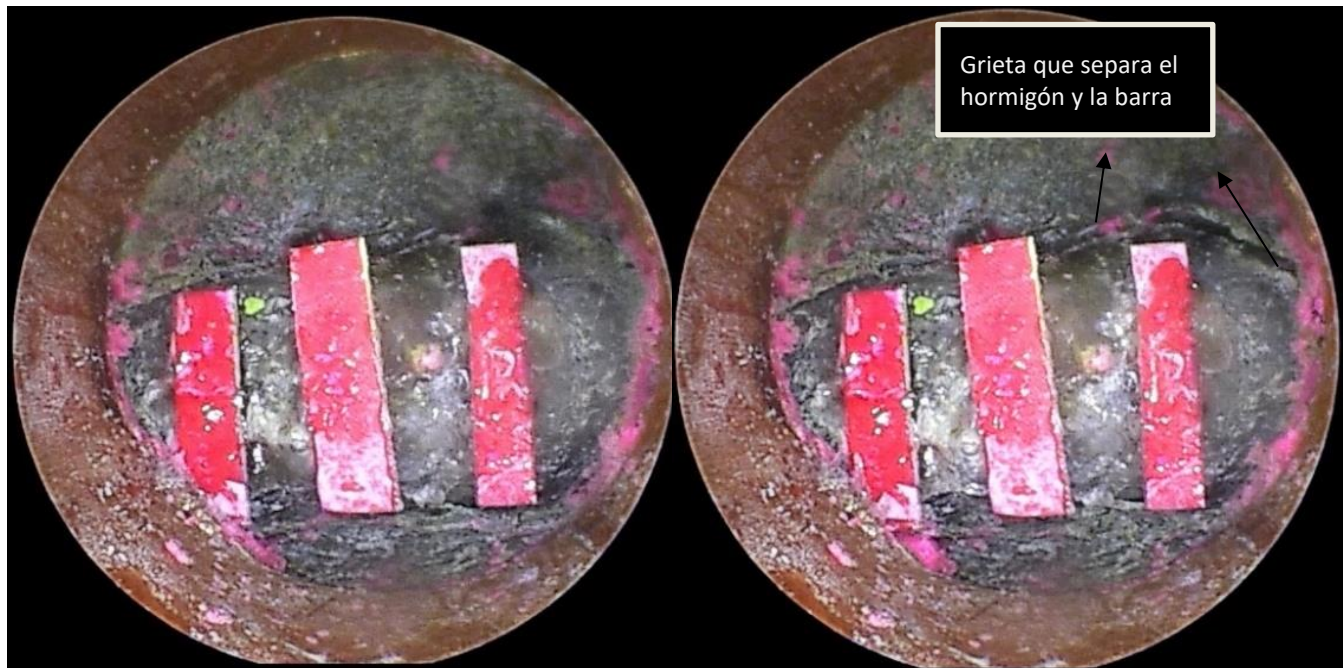


Figura 47 Estado de la sección de la barra observada al inicio del ensayo y una vez terminados los ciclos de ± 25 [mm].

5.4.1 Comentarios MJ-2

- Al contrario que en el caso anterior, se observan curvas de histéresis estables en los ciclos de 25 [mm], manteniéndose la resistencia de la probeta alrededor de 1,6 [TF].
- La degradación de la resistencia solo es severa en los ciclos de 35 [mm] donde finalmente la barra se corta.
- Es notorio el angostamiento de las curvas de histéresis en la **Figura 45**.
- El considerable desplazamiento en los puntos observados explica la escasa adherencia que existe entre la barra y el hormigón circundante que se da en este caso. Esto se evidencia en la grieta que aparece en la **Figura 47**.
- Quedan desplazamientos residuales después de finalizar cada grupo de ciclos. Esto ocurre porque en la barra, pese a quedar en reposo, sus fibras permanecen pandeadas y trabadas al interior de la columna. Este fenómeno provoca que se observe movimientos abruptos en la **Figura 46**.

5.5 PROBETA MJ-3 ARMADURA FRP RUGOSA

En la **Figura 48** se presenta un esquema de cómo es la distribución de armadura de la probeta MJ-3.

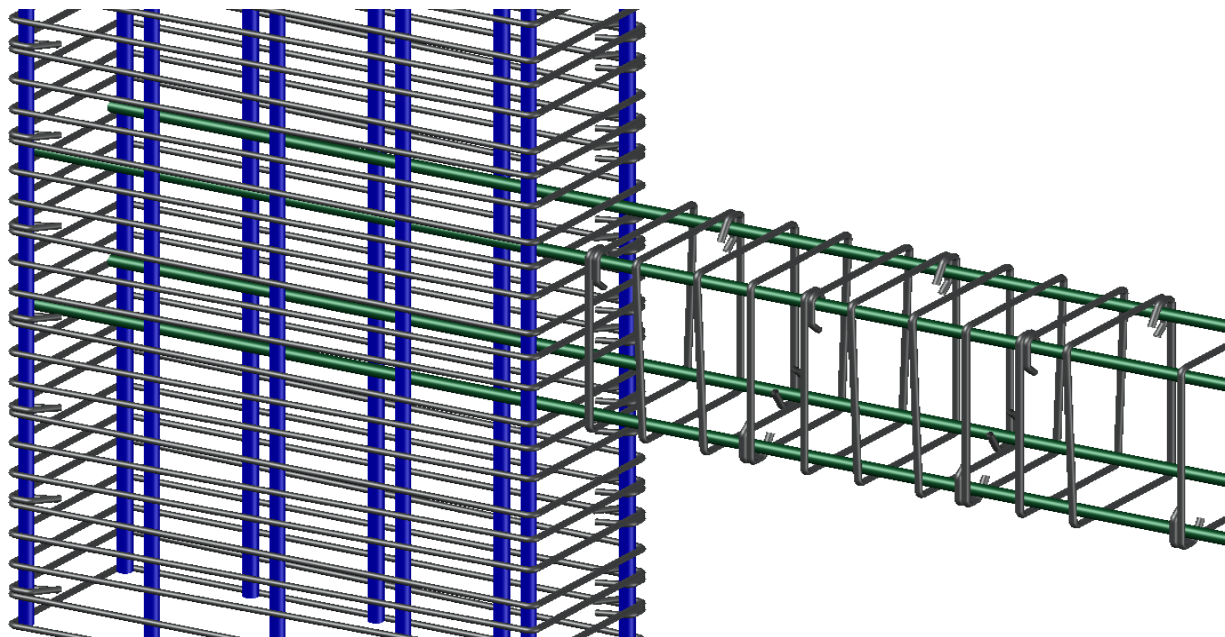


Figura 48 Espécimen MJ-3, distribución de estribos

En la **Figura 49** se presenta las curvas de histéresis obtenidas del ensayo en MJ-3.

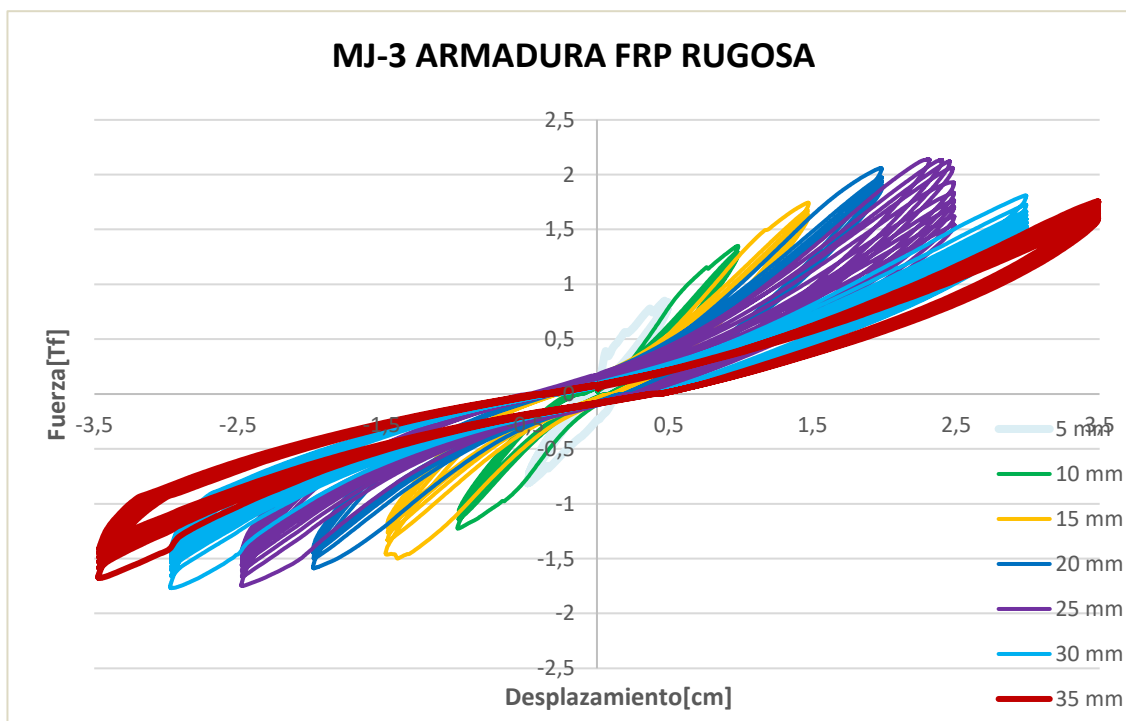


Figura 49 Curvas Fuerza-Desplazamiento para MJ-3

Se presenta el registro fotográfico de la integridad de la probeta desde los 10 [mm] a los 30[mm] de amplitud (Figura 50 a Figura 55).

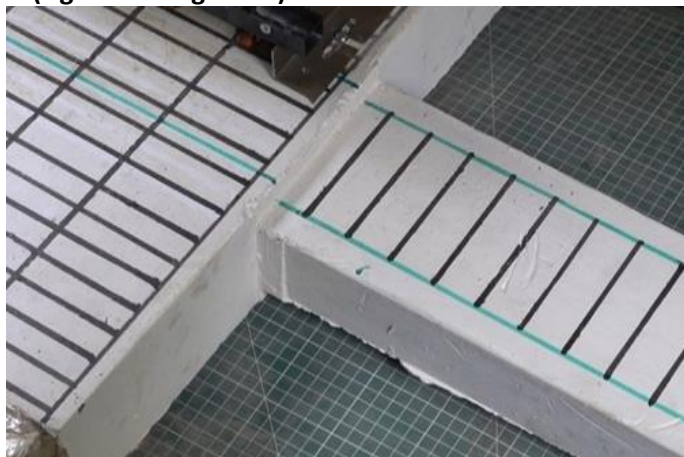


Figura 50 Quinto ciclo, amplitud 10[mm]

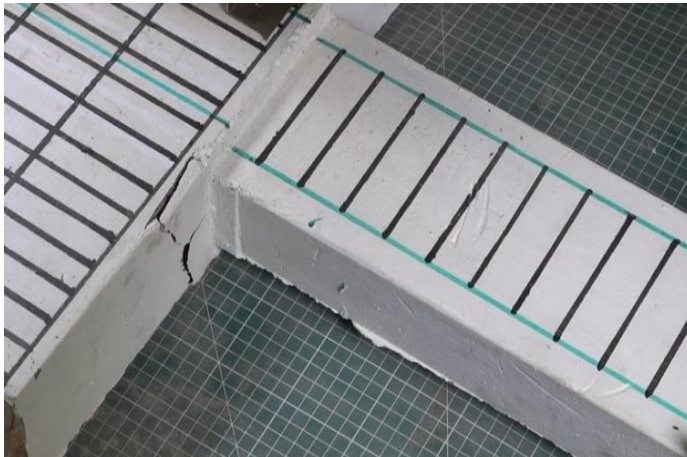


Figura 51 Quinto ciclo, amplitud 15[mm]



Figura 52 Quinto ciclo, amplitud 20[mm]



Figura 53 Quinto ciclo, amplitud 25[mm]



Figura 54 Décimo ciclo, amplitud 30[mm]



Figura 55 Quinto ciclo, amplitud 35[mm]

En la **Figura 56** se presentan las curvas de histéresis de amplitud 25[mm] obtenidas del ensayo en MJ-3

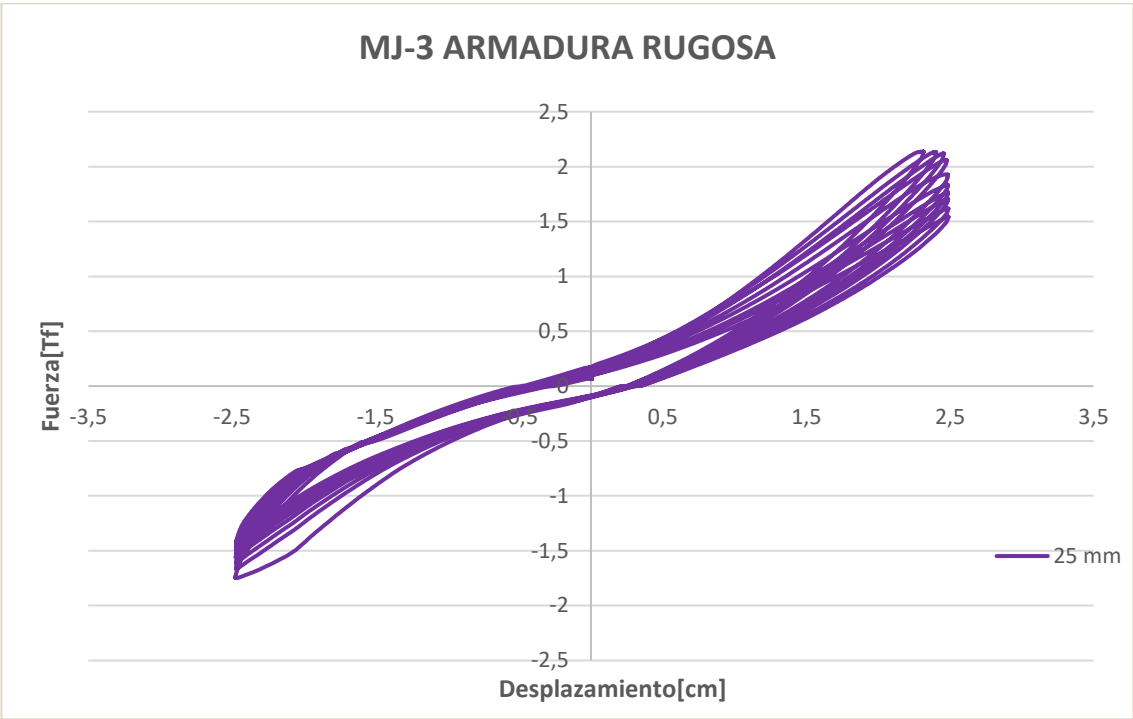


Figura 56 Curva fuerza-desplazamiento MJ-3, amplitud 25[mm]

En la **Figura 57** se presentan las curvas de desplazamientos medidas por la cámara endoscópica en las zonas estudiadas, siendo el “movimiento exterior” el desplazamiento en la zona más cercana a la viga y el “movimiento interior” el desplazamiento en la zona más lejana a la viga.

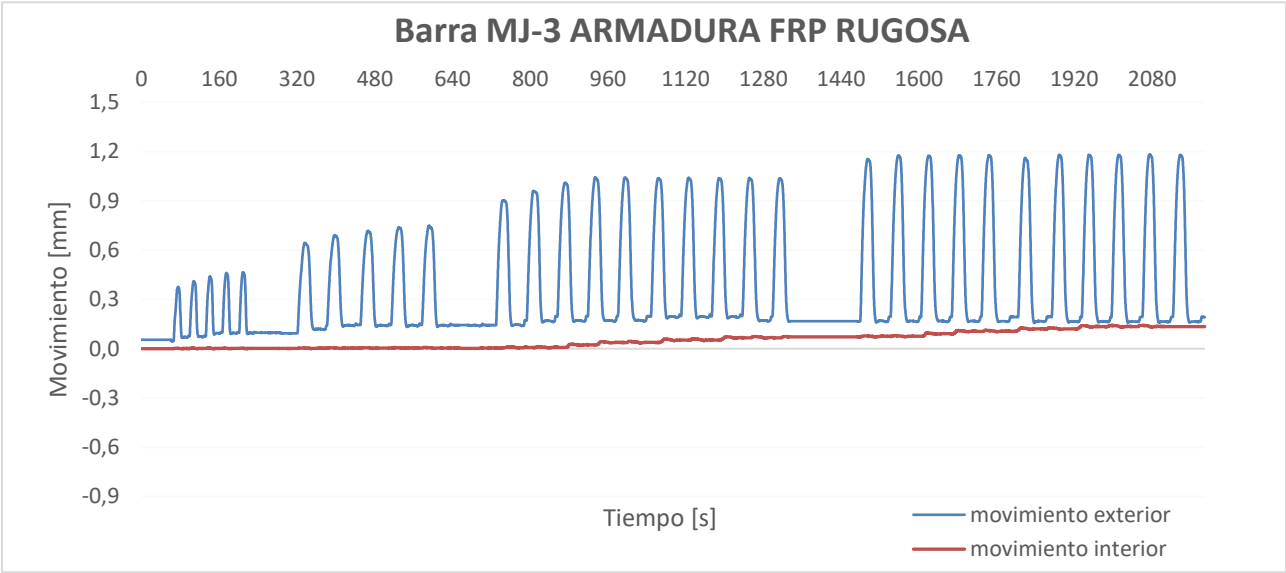


Figura 57 Desplazamiento de la barra en los puntos enfocados por las cámaras en MJ-3 a medida que transcurre el ensayo para ciclos de ± 15 , ± 20 , ± 25 y ± 30 [mm] de izquierda a derecha respectivamente

En la **Figura 58** se presentan las imágenes obtenidas por la cámara endoscópica antes y después del ensayo a estudiar.

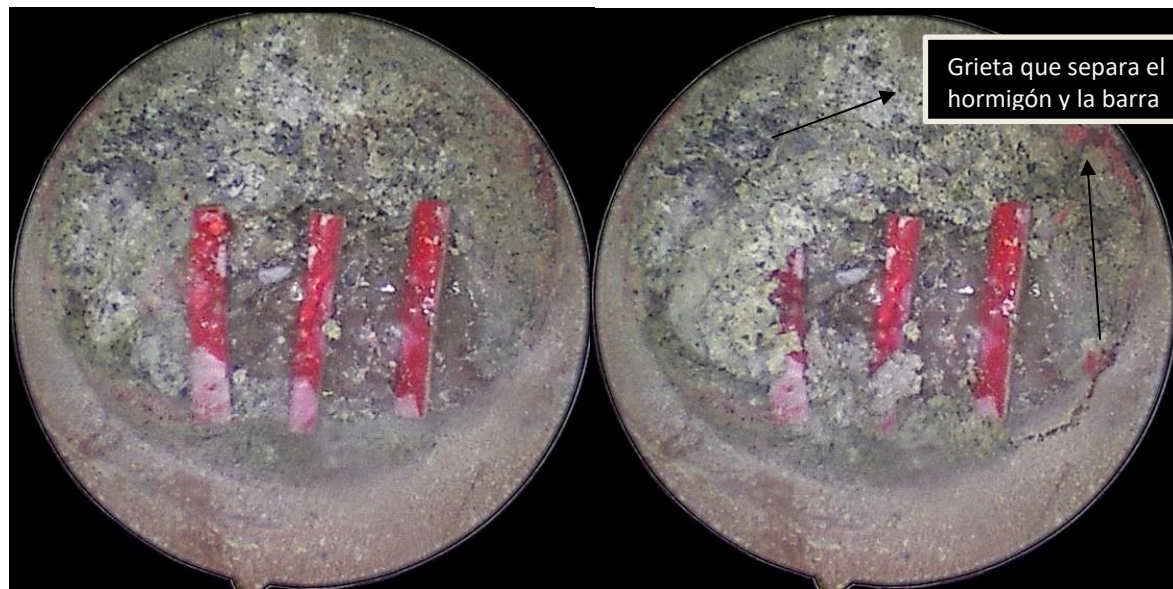


Figura 58 Estado de la sección de la barra observada al inicio del ensayo y una vez terminados los ciclos de ± 25 [mm]

5.5.1 Comentarios MJ-3

- Se observan que las curvas de histéresis del lado derecho en la **Figura 56** tienen más resistencia que va disminuyendo hasta mantenerse estable después de los primeros ciclos. Se tomará como referencia una resistencia promedio de 1.5 [TON].
- Se presenta una primera grieta inclinada muy fina desde los ciclos de 15 [mm].
- El movimiento del punto interior en la **Figura 57** es poco porque la adherencia hasta este punto aún se mantiene estable.
- En la **Figura 58** se aprecia el deslizamiento del hormigón a lo largo de una grieta, fenómeno que resulta más evidente en los videos del ensayo.

5.6 PROBETA MJ-4 ARMADURA FRP RUGOSA 2

En la **Figura 59** se presenta un esquema de cómo es la distribución de armadura de la probeta MJ-4

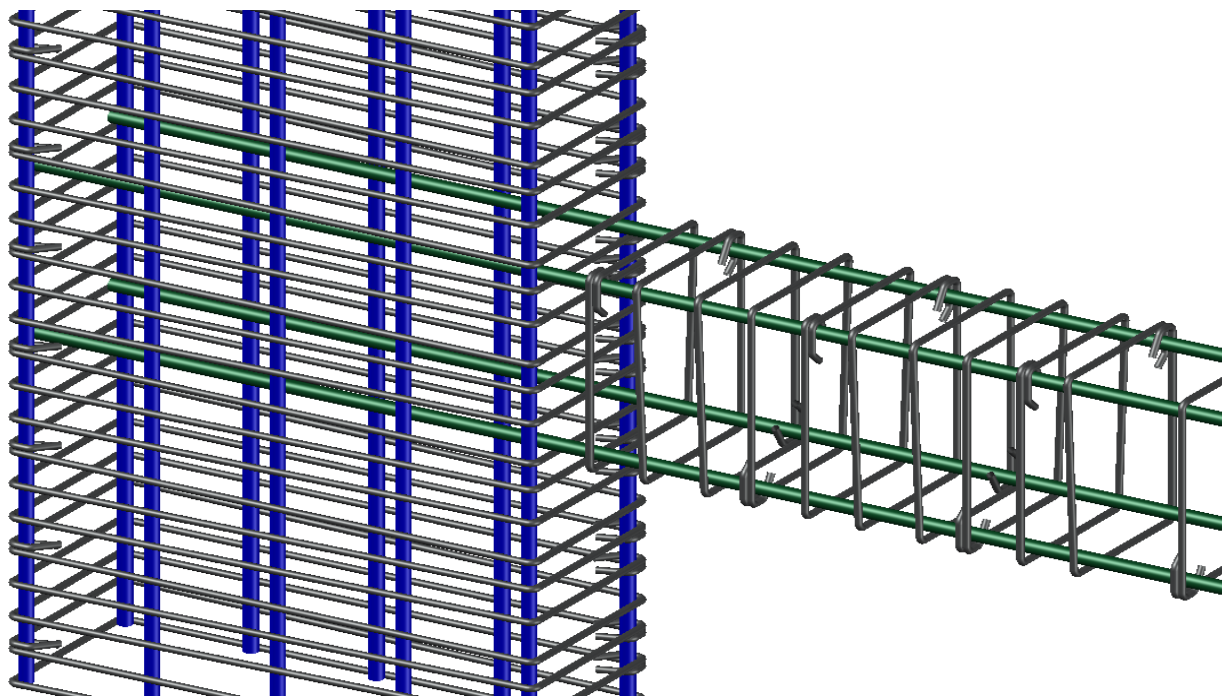


Figura 59 Espécimen MJ-4, distribución de estribos

En la **Figura 60** se presenta las curvas de histéresis obtenidas del ensayo en MJ-4.

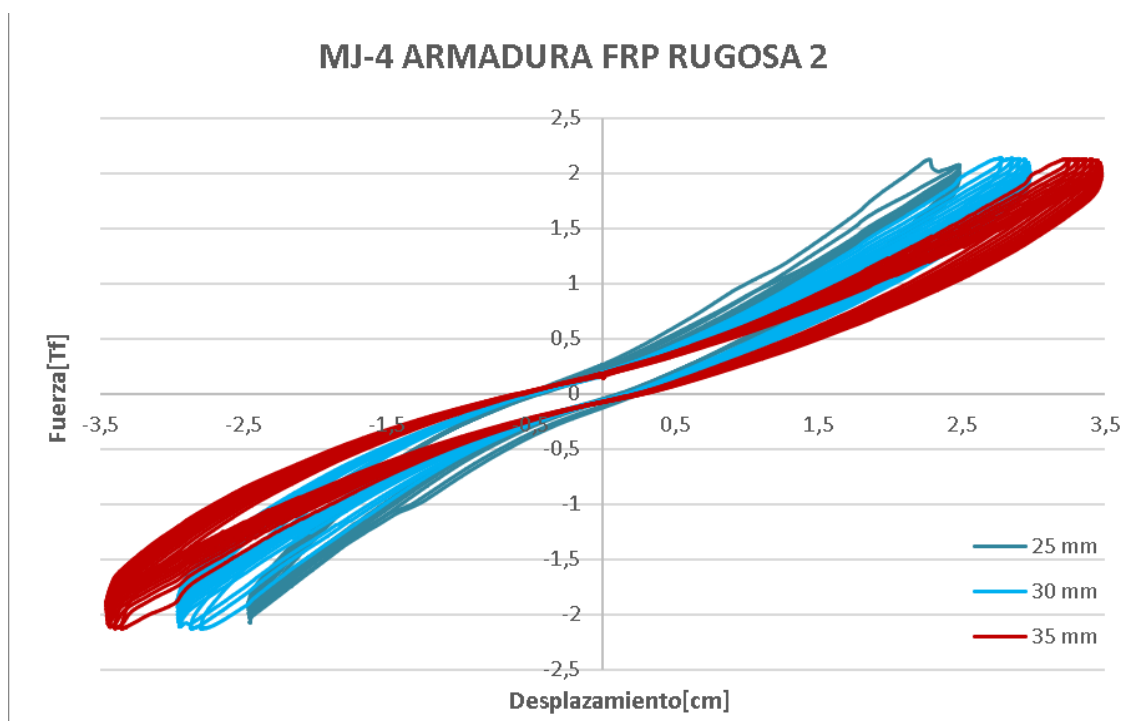


Figura 60 Curvas Fuerza-Desplazamiento para MJ-4

Se presenta el registro fotográfico de la integridad de la probeta desde los 10 [mm] a los 30[mm] de amplitud (**Figura 61 a Figura 64**).



Figura 61 Quinto ciclo, amplitud 25[mm]

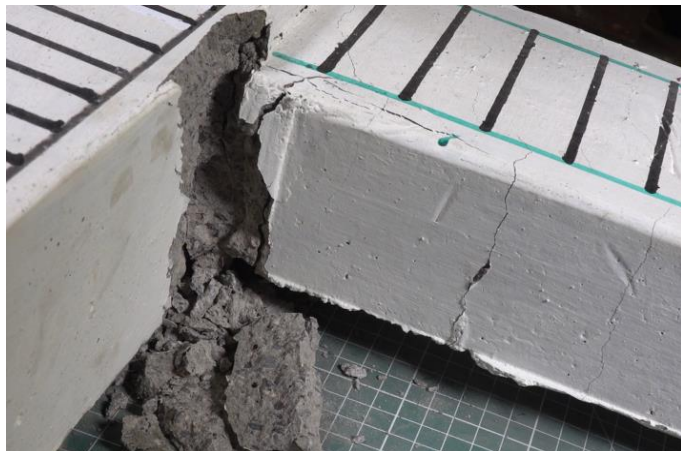


Figura 62 Decimo ciclo, amplitud 25 [mm]



Figura 63 Ultimo ciclo, amplitud 30[mm]



Figura 64 Ultimo ciclo, amplitud 35[mm]

En la **Figura 65** se presentan las curvas de histéresis de amplitud 25[mm] obtenidas del ensayo en MJ-1

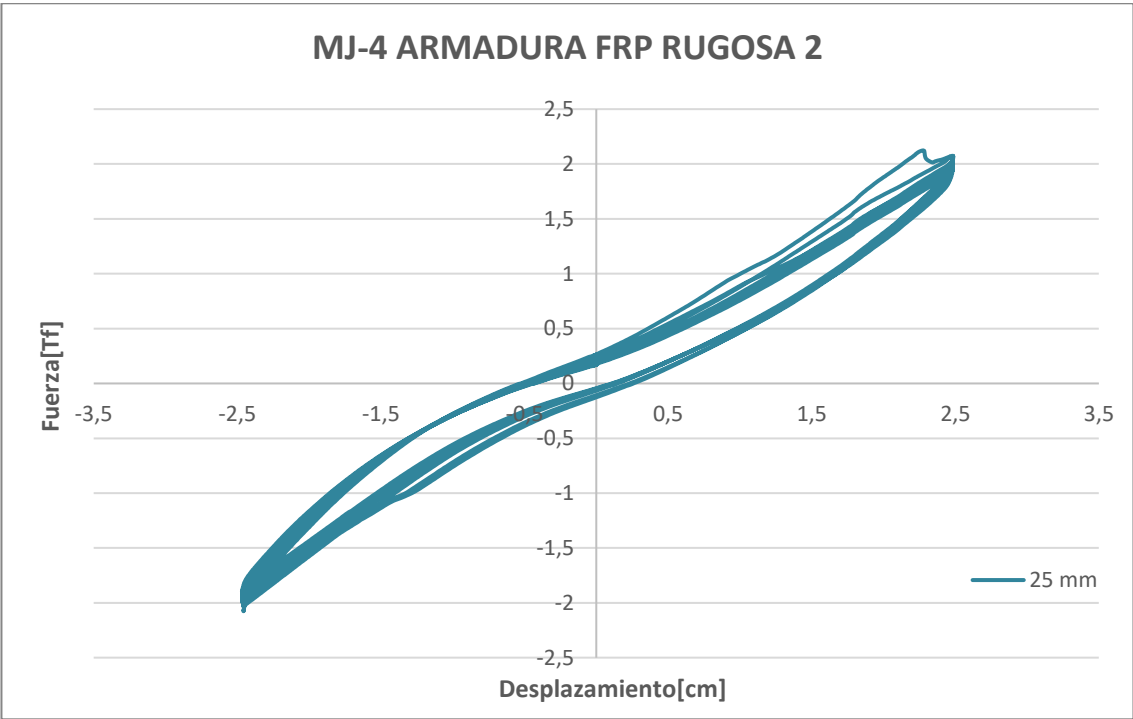


Figura 65 Curva fuerza-desplazamiento MJ-4, amplitud 25[mm]

En la **Figura 66** se presentan las curvas de desplazamientos medidas por la cámara endoscópica en las zonas estudiadas, siendo el “movimiento exterior” el desplazamiento en la zona más cercana a la viga y el “movimiento interior” el desplazamiento en la zona más lejana a la viga.

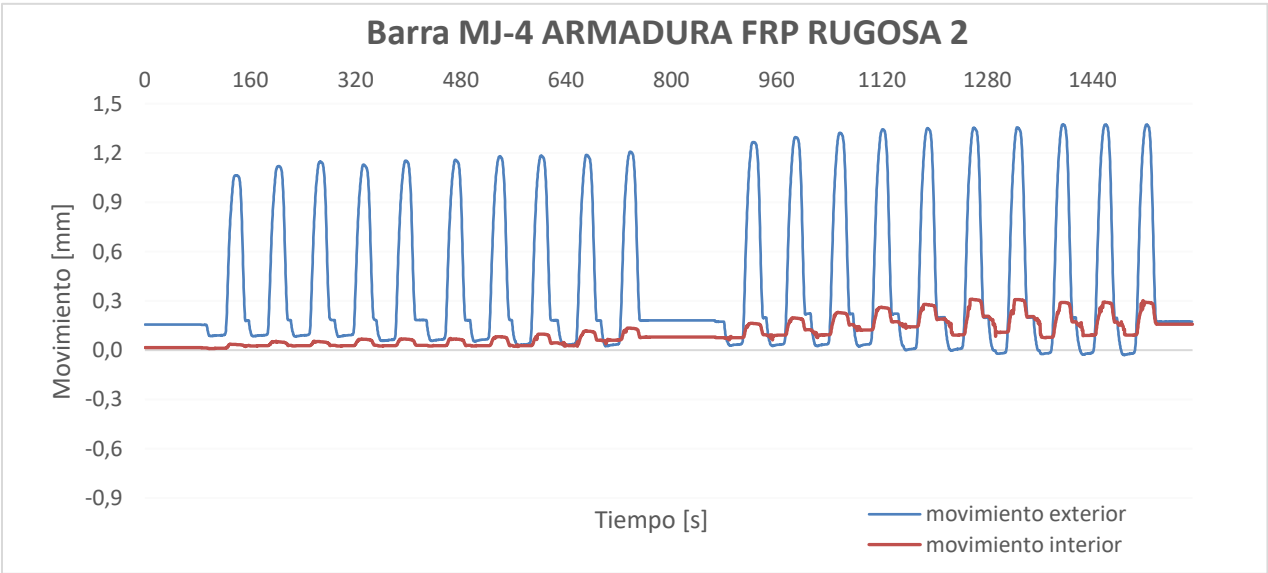


Figura 66 Desplazamiento de la barra en los puntos enfocados por las cámaras en MJ-4 a medida que transcurre el ensayo para ciclos de ± 25 y ± 30 [mm] de izquierda a derecha respectivamente

En la **Figura 67** se presentan las imágenes obtenidas por la cámara endoscópica antes y después del ensayo a estudiar.

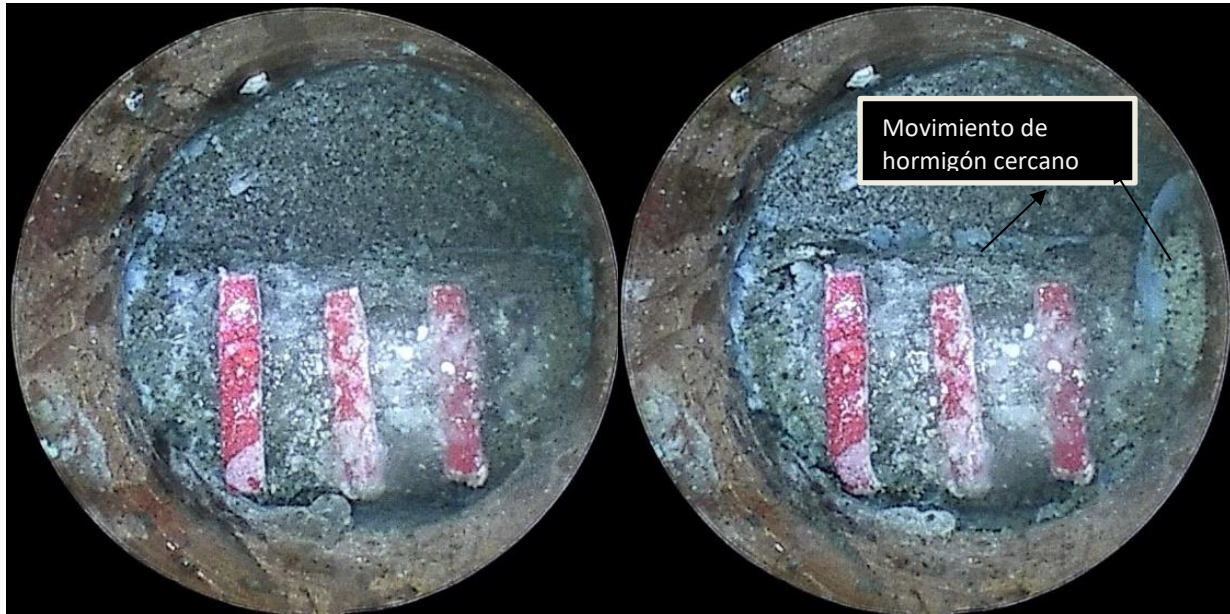


Figura 67 Estado de la sección de la barra observada al inicio del ensayo y una vez terminados los ciclos de ± 25 [mm]

5.6.1 Comentarios MJ-4

- La viga se presentan primeras grietas de inmediato, a partir de los 25 [mm].
- En comparación con las demás probetas, en la **Figura 65** se presenta poca degradación, llegando a una resistencia de 2 [ton].
- Después de las pruebas la probeta estuvo realizando ciclos indefinidos entre los 25 y 35 mm para lograr degradación, sin embargo, se observó un cambio mínimo en la resistencia en estos ensayos extras
- En la **Figura 66** se aprecia la presencia de escalones entre de ciclos, lo que sugiere cierta reacomodación de la barra durante las solicitaciones, esto vinculado al roce que tiene la barra al interior del hormigón.
- En la **Figura 67** se observa una cantidad moderada de movimiento en el hormigón cercano, también se observa deterioro en la barra debido al desgaste por el roce, pero de menor manera en comparación con MJ-3

5.7 Ensayos extras.

Al concluir los ensayos iniciales, la probeta MJ-4 fue sometida a ciclos adicionales continuos, variando su amplitud y velocidad, con el fin de evaluar un posible deterioro progresivo bajo solicitaciones repetitivas prolongadas (**Figura 68**). Los resultados mostraron que, a pesar del elevado número de ciclos aplicados y la deformación cada vez mayor, el movimiento registrado en la zona interior de la barra permaneció constante y casi nulo, lo que indica que el anclaje interno mantuvo su efectividad a lo largo del ensayo. las mediciones de resistencia evidenciaron que la probeta conservó su capacidad estructural global, mientras que las deformaciones adicionales se concentraron principalmente en el desplazamiento externo de la barra.

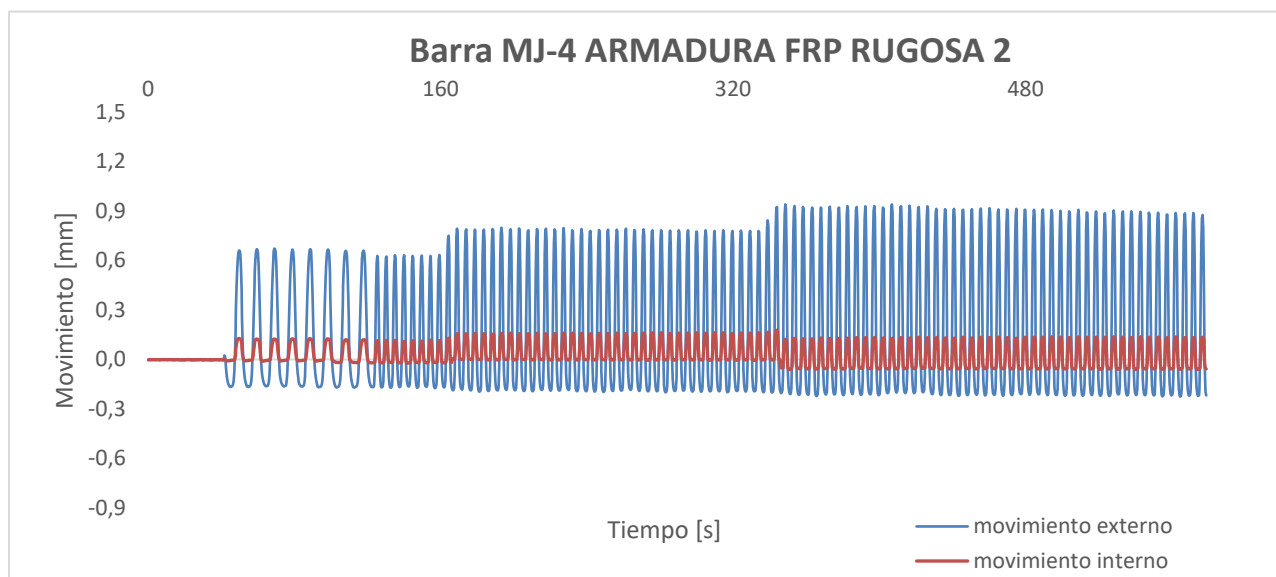


Figura 68 Desplazamiento de barra MJ-4 con programa de carga extra

5.8 Efecto de aplicar diferentes programas de carga.

La probeta MJ-3, al iniciar con desplazamientos desde 10 [mm], presentó una evolución más progresiva del daño, manteniendo bajo el movimiento interno y retrasando la pérdida de adherencia en la zona confinada. En contraste, MJ-4 comenzó directamente con amplitudes de 25 [mm], lo que generó desplazamientos externos más elevados desde las primeras etapas (0,8–1,2 mm) y la aparición de escalones entre ciclos, asociados a reacomodaciones bruscas de la barra movimiento en el hormigón circundante.

Capítulo VI

6. Conclusiones y recomendaciones.

Se realizó en forma exitosa la construcción y ensayo de las probetas consideradas en los objetivos de este trabajo, las cuales representaron uniones exteriores viga-columna de un marco dúctil sometido a sollicitación sísmica, donde las vigas estaban armadas con barras de refuerzo de FRP y de acero tradicional. El programa se ideó para aclarar algunos aspectos del comportamiento sísmico de los elementos de hormigón armado, cuando el acero de refuerzo se sustituye por las barras FRP.

Los ensayos permitieron obtener, mediante cámaras endoscópicas, imágenes y videos de las barras trabajando al interior de un elemento de hormigón armado. Esto logro constatar diferencias en el comportamiento de las barras de FRP con respecto a las tradicionales barras de acero con resaltes. Se comprobó que, en el caso de las barras de acero, la transferencia de esfuerzos entre estas y el hormigón circundante se produce principalmente por carga directa a través de los resaltes. En cambio, en las barras de FRP esto ocurre a través de la fricción y rugosidad superficial. Así, con respecto a adherencia y anclajes, se esperaba un mejor comportamiento de las barras que tienen superficie arenada con respecto a las que sólo tienen superficie lisa, lo cual efectivamente ocurrió.

Por otra parte, las barras de acero tradicionales tienen igual rigidez en tracción y compresión, mientras que las barras de FRP, al estar compuestas por muchas pequeñas fibras de menor diámetro, se encontró que no trabajan prácticamente en compresión, como se vio al observar los desplazamientos determinados por las cámaras endoscópicas.

El programa de carga tuvo cierto efecto en los resultados. Se observó que, al someterse una probeta (MJ-3) a un incremento progresivo en la amplitud de los ciclos de desplazamiento, se produjo también un deterioro progresivo, aunque retrasándose la pérdida de adherencia interna. Por su parte, el aumento repentino a los niveles finales de la sollicitación (MJ-4), produjo menos deterioro visible.

Finalmente, se comprobó que la probeta de acero evidenció un comportamiento dúctil y consistente con resultados previos, mostrando mayores deterioros y desplazamientos residuales, pero manteniendo una capacidad estable de disipar energía a lo largo de todo el proceso de carga. En contraste, las probetas con barras de FRP tuvieron menor deterioro y alcanzaron resistencias y desplazamientos mayores, demostrando que el material puede soportar grandes niveles de esfuerzo y deformación antes de la falla, pero con una ductilidad baja. Esto conlleva una menor capacidad de absorción de energía, característica que en el caso de sollicitaciones dinámicas cíclicas puede significar un aumento descontrolado de los esfuerzos y deformaciones en los distintos elementos de la estructura.

En base a los resultados obtenidos, se puede decir que conviene emplear barras de FRP en elementos donde la ductilidad y la capacidad de disipación de energía no sean factores determinantes, lo cual resulta crítico para el caso de la sollicitación sísmica. Así, en nuestro país, el sistema no podría usarse en armaduras longitudinales de elementos en prácticamente ninguna parte del país, aunque sí podría permitirse en el caso de armaduras transversales, por su menor demanda de ductilidad, o bien, para elementos poco exigidos durante un sismo, como la mayoría de las losas, o los pertenecientes a estructuras aisladas sísmicamente o

con amortiguadores y cuando características de ductilidad y disipación de energía no sean relevantes.

Finalmente, conviene recordar que su costo conveniente, alta resistencia a la corrosión y bajo peso específico hacen al FRP especialmente adecuado para ambientes agresivos o de difícil mantenimiento. No obstante, para el caso de elementos cuyo comportamiento sísmico resulte relevante o donde se requiera redistribución plástica de esfuerzos, el acero continúa siendo la opción más confiable y segura.

7. Referencias

Composite Tech. (2023). *Video sobre instalación de barras FRP* [Video]. TikTok.
<https://vm.tiktok.com/ZMD67VP5G/>

Nanni, A. (2018). *Vaciado de concreto en el tablero del puente reforzado con GFRP*.
<https://360enconcreto.com/blog/detalle/polimeros-reforzados-con-fibra-vidrio/>

Olea Sepúlveda, S. A. (2015). *Ensayo de adherencia de barras de anclaje compuestas por fibra de vidrio reforzado* (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Repositorio Universidad de Chile.
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133395>

Palacios Erazo, M. N. I. (2025). *Deformación de barras de refuerzo en elementos de hormigón armado con estribos inclinados, sometidos a solicitaciones sísmicas* (Memoria de titulación para optar al título de Constructor Civil). Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, Valparaíso, Chile.]. Repositorio USM <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/76015>

Silva, P. B. (2022). Longitud de anclaje reducida para mitigar tendencia a la fractura de las barras de refuerzo en elementos de hormigón armado sometidos a intensa solicitación sísmica. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/6064>