

Respuesta cíclica de unión viga-columna de concreto reforzada externamente con tejido de fique modificado superficialmente

Esteban Felipe Ruiz García

Juan Manuel García Rondón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingenieros Civiles

Director

José Miguel Benjumea Royero

Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo y cada hora de la educación que recibí a mis padres, Luis Ruiz y Blanca García, estandartes de mi sabiduría y mi ejemplo a seguir, por darme el privilegio de educarme en la mejor universidad de todas: la Pública. A mis hermanos, Enrique, Carlos, Camilo y David, por sus llamados de aliento cuando el lápiz pesaba y su apoyo incondicional a la distancia; a mis compañeros de la universidad y en especial a Juan Manuel, con quien hoy hago equipo en esta pasantía, que me brindó desde el día uno el mejor compañero de estudio y hermano para un foráneo que tenía su casa más que lejos. A mi gato, Coco, por recibirme y hacerme sentir en mi hogar luego de un semestre entero a cientos de kilómetros de sus ronroneos. A mis amigos en Paipa, mi segunda familia. Y finalmente, a Dios, por permitir que, hasta este punto final, pueda acabar de escribir este capítulo de mi vida.

Esteban Felipe Ruiz García.

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía, darme fortaleza y permitirme alcanzar este importante logro. A mi madre, Elizabeth, por ser mi mayor apoyo, mi inspiración y el motor que me impulsó a seguir adelante; gracias por cada sacrificio, por creer siempre en mí y por enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo hacen posible alcanzar los sueños. Este logro también es tuyo. A mi familia, especialmente a mi padre, Albeiro; a mi hermano, Camilo; a mi abuela, Ana; y a mi tía, Damaris, por su amor, confianza y apoyo incondicional. A mis amigos de la universidad, por acompañarme en los desafíos de estudiar lejos del hogar y hacer de esta etapa una experiencia llena de aprendizaje y grandes recuerdos. A mis amigos de infancia, Johan, Sebastián y Sergio, gracias por su amistad sincera y por estar siempre presentes. Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este proceso, gracias por cada palabra de aliento, cada consejo y cada gesto de apoyo. Este logro también les pertenece.

Juan Manuel García Rondón.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a Dios, por concedernos la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta importante etapa de nuestra formación profesional. A nuestros padres, por apoyarnos incondicionalmente en este camino imposible de andarlo sin ellos.

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, mi alma mater, por brindarnos una formación integral, de excelencia y comprometida con el desarrollo científico y profesional. De igual manera, agradecemos a la Escuela de Ingeniería Civil, por proporcionar los espacios académicos y el acompañamiento que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación. A José Miguel Benjumea Royero, director de esta pasantía, por su orientación, exigencia y acompañamiento permanente. Sus conocimientos, observaciones y compromiso fueron fundamentales para superar los retos propios del proceso investigativo y convertirlos en una experiencia de aprendizaje altamente enriquecedora y satisfactoria. Al técnico del Laboratorio de Estructuras, Jaime Cadena, por su invaluable apoyo durante la preparación y ejecución de los ensayos experimentales, así como por su disposición para colaborar en cada una de las actividades desarrolladas. A la División de Planta Física de la Universidad Industrial de Santander, en especial a los técnicos Henry Jiménez Cediél y Luis Carlos Sepúlveda, por su apoyo en el acondicionamiento del montaje experimental, por las adecuaciones realizadas para garantizar la correcta ejecución del ensayo.

Expresamos nuestro profundo agradecimiento a la empresa García Vega S.A.S. por su valioso respaldo al proyecto, mediante la fabricación del nuevo sistema de acople utilizado en el montaje experimental, financiando parte del costo de producción.

A los estudiantes del pregrado de Ingeniería Civil y del Semillero de Investigación SURE que aportaron su apoyo durante la ejecución de los ensayos experimentales. Su colaboración fue

fundamental para el adecuado desarrollo de las actividades de laboratorio. A Mauricio Bautista, estudiante de la escuela de E3T por su colaboración en la instalación, configuración y verificación de los sensores empleados durante la instrumentación del ensayo. A la profesora Tatiana Guarín, por su constante disposición para ayudar y apoyar las actividades que surgieron durante el desarrollo de la investigación, así como por sus valiosos aportes anímicos y las risas que nunca faltaron.

Finalmente, a nosotros mismos, por la dedicación, entrega y perseverancia, que hoy en día nos llevan a concluir con este gran capítulo de nuestras vidas.

Juan Manuel García Rondón & Esteban Felipe Ruiz Gracia

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Montaje experimental, instrumentación y protocolo de carga.....	18
2.1 Recursos y materiales empleados	18
2.2 Ajuste y disposición de elementos del ensayo y del montaje experimental	19
2.3 Puesta a punto del ensayo experimental para el ensayo cíclico.....	20
2.3.1 Montaje de la unión viga-columna	20
2.3.2 Aplicación del refuerzo externo	22
2.3.3 Instrumentación del espécimen.....	23
2.4. Protocolo de carga.....	24
3. Progresión de daño observado durante el ensayo	26
3.1 Viga.....	27
3.2 Columna.....	29
3.3 Nudo.....	30
4. Respuestas estructurales medidas durante el ensayo cíclico.....	32
4.3 Respuesta histerética global ($F - U$)	34
4.4 Respuesta histerética fuerza-distorsión angular 6.....	36
4.5 Respuesta histerética momento-rotación	39

5. Conclusiones	41
Referencias Bibliográficas	43
Apéndices.....	45

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Cartera de protocolo de carga del ensayo experimental	25
---	----

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Montaje experimental: (a) adecuaciones, (b) configuración final con instrumentación	21
Figura 2. Aplicación sistema de la malla de reforzamiento.....	23
Figura 3. <i>Daños localizados en la viga: (a) extremo del refuerzo externo e interfaz superior viga-columna $\Delta=2.07\%$, (b) progresión $\Delta=3.0\%$ (c) estado final</i>	28
Figura 4. Daños localizados en la columna: (a) Primera manifestación cara posterior $\Delta=2.89\%$, (b) progresión de daño $\Delta=3.0\%$, (c) Extensión fisuras columna al nudo $\Delta=5.7\%$, (d) Estado final	30
Figura 5. <i>Progresión del daño en el nudo $2.07\% \leq \Delta \leq 5.7\%$ y en las caras frontal, trasera y posterior</i>	32
Figura 6. Respuesta histerética global fuerza-desplazamiento de la unión viga-columna reforzada durante el protocolo de carga.....	36
Figura 7. Respuesta global fuerza-distorsión de la unión viga-columna reforzada.....	38
Figura 8. Respuesta global momento-rotación de la unión viga-columna reforzada	40

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice 1. Dimensiones y detalles de diseño de unión Viga-Columna.....	45
Apéndice 2. Componentes principales del montaje experimental	45
Apéndice 3. Recursos materiales empleados en el ensayo experimental.....	46
Apéndice 4. Adecuación del montaje.....	46
Apéndice 5. Propuesta solución montaje experimental	47
Apéndice 6. Observación de pliegues en el refuerzo externo de la viga.....	47
Apéndice 7. (a) Equipos LVDT instalados, (b) Distribución equipos en el nudo.....	48
Apéndice 8. Historial de carga con control de desplazamiento	48
Apéndice 9. Definición de las vistas del espécimen	49
Apéndice 10. Seguimiento progresión de daño.....	49
Apéndice 11. Respuesta histerética individual correspondiente a los quince ciclos de carga aplicados durante el ensayo	50
Apéndice 12. Valores máximos de fuerza-desplazamiento en el análisis de histéresis en cada uno de los ciclos.....	50
Apéndice 13. Evolución de la respuesta histerética agrupada por etapas: (a) ciclos 1-5, (b) ciclos 6-10 y (c) ciclos 11-15	51
Apéndice 14. Respuesta fuerza-distorsión individual correspondiente a cada ciclo.....	51
Apéndice 15. Evolución de la respuesta fuerza-distorsión agrupada por etapas del protocolo de carga: (a) ciclos 1-5, (b) ciclos 6-10 y (c) ciclos 11-15	52
Apéndice 16. Valores máximos de fuerza-distorsión en cada uno de los ciclos.....	52

Apéndice 17. Respuesta momento-rotación individual correspondiente a los quince ciclos de carga aplicados durante el ensayo	53
Apéndice 18. Evolución de la respuesta momento-rotación agrupada por etapas del protocolo de carga: (a) ciclos 1-5, (b) ciclos 6-10 y (c) ciclos 11-15	53
Apéndice 19. Valores máximos de momento-rotación en cada uno de los ciclos	54

Resumen

Título: Respuesta cíclica de unión viga-columna de concreto reforzada externamente con tejido de fique modificado superficialmente

Autores: Esteban Felipe Ruiz García, Juan Manuel García Rondón

Palabras Claves: ensayo cíclico; fibras vegetales; uniones viga-columna; óxido de grafeno; confinamiento del concreto; comportamiento histerético.

Descripción: Las uniones viga-columna constituyen una de las regiones más críticas de las estructuras de concreto reforzado sometidas a acciones sísmicas, especialmente cuando se diseñan sin criterios modernos de detallado sísmico. Aunque los sistemas de reforzamiento con materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas (FRP, *fiber reinforced polymer*) han demostrado mejorar el desempeño estructural de estos elementos, su fabricación conlleva un impacto ambiental significativo, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles basadas en fibras vegetales. En este contexto, la presente investigación, desarrollada en la modalidad de pasantía de investigación, evaluó experimentalmente la respuesta cíclica de un subensamblaje viga-columna de concreto reforzado externamente con tejido de fique modificado superficialmente con óxido de grafeno (FiqueGO). Para ello se realizaron el acondicionamiento del espécimen, el diseño y la adecuación del montaje experimental, la aplicación del sistema de reforzamiento, la instrumentación mediante transductores de desplazamiento lineal y la ejecución de un protocolo de carga cíclica controlado por desplazamiento basado en las recomendaciones del FEMA 461. Durante el ensayo se documentó la progresión del daño en la viga, la columna y el nudo, y posteriormente se analizaron las respuestas histeréticas fuerza-desplazamiento, y fuerza-distorsión angular y momento-rotación en el nudo no reforzado. Los resultados evidenciaron que las primeras manifestaciones importantes de daño aparecieron a partir de una deriva del 2.07 %, mientras que el nudo desarrolló un patrón progresivo de fisuración diagonal característico de fallas dominadas por cortante. La respuesta histerética mostró una degradación gradual de la rigidez y un incremento progresivo del efecto de *pinching* a medida que aumentaba la demanda de desplazamiento. El ensayo se mantuvo hasta que la unión presentó una degradación significativa de la resistencia, criterio de finalización previamente establecido debido al potencial compromiso de la estabilidad del espécimen. La prueba se detuvo antes de que ocurriera un colapso, con el fin de salvaguardar la seguridad del personal, del equipo de ensayo y de las instalaciones del laboratorio. En ese momento, el espécimen alcanzó una fuerza máxima cercana a 20 kN y una deriva del 5.7 %. En conjunto, los resultados sugieren que el sistema de reforzamiento FiqueGO contribuyó a mantener el confinamiento del concreto en la viga y la columna, y a favorecer un desarrollo progresivo del daño, constituyéndose como una alternativa con potencial para el reforzamiento sostenible de uniones viga-columna deficientes de concreto reforzado.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental.

Abstract

Title: Cyclic response of a reinforced concrete beam–column joint externally strengthened with surface-modified fique textile.

Authors: Esteban Felipe Ruiz García, Juan Manuel García Rondón.

Keywords: cyclic testing; natural fibers; beam–column joint; damage; Graphene oxide; confinement; hysteresis.

Description: Beam–column joints constitute one of the most critical regions of reinforced concrete structures subjected to seismic actions, especially when they are designed without modern seismic detailing criteria. Although strengthening systems using Fiber Reinforced Polymer (FRP) have demonstrated improvements in the structural performance of these elements, their manufacturing process entails a significant environmental impact, which has promoted the search for sustainable alternatives based on plant fibers. In this context, the present research, conducted under the research internship modality, experimentally evaluated the cyclic response of a reinforced concrete beam–column subassembly externally strengthened with graphene oxide-modified fique fabric (FiqueGO). To achieve this, specimen conditioning, design and adaptation of the experimental setup, application of the strengthening system, instrumentation using Linear Variable Differential Transformers (LVDTs), and the execution of a displacement-controlled cyclic loading protocol based on the recommendations of FEMA 461 were carried out. During the test, the damage progression in the beam, column, and joint was documented, and the force–displacement, force–angular distortion, and moment–rotation hysteretic responses of the strengthened joint were subsequently analyzed. The results showed that the first significant manifestations of damage appeared at a drift ratio of 2.07%, while the joint developed a progressive diagonal cracking pattern characteristic of shear-dominated failures. The hysteretic response exhibited gradual stiffness degradation and a progressive increase in the pinching effect as the displacement demand increased. The test was maintained until the joint exhibited significant strength degradation, which corresponded to the previously established termination criterion due to the potential compromise of the specimen stability. The test was stopped before collapse occurred in order to safeguard the safety of the personnel, the testing equipment, and the laboratory facilities. At that point, the specimen reached a maximum load of approximately 20 kN and a drift ratio of 5.7%. Overall, the results suggest that the FiqueGO strengthening system contributed to maintaining concrete confinement in the beam and column and to promoting a progressive damage evolution, constituting a potential sustainable alternative for strengthening deficient reinforced concrete beam–column joints.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: José Miguel Benjumea Royero. Ph.D. in Civil and Environmental Engineering.

Reconocimiento de uso de inteligencia artificial

En el desarrollo de la presente pasantía de investigación se emplearon herramientas de inteligencia artificial como apoyo en diferentes etapas del proceso investigativo y de elaboración del documento. En particular, se utilizaron NotebookLM (Google, 2025) y ChatGPT (OpenAI, 2025). Notebook fue utilizado como herramienta de apoyo para la revisión y consulta de la literatura científica, facilitando el análisis, la organización y la comprensión de la información contenida en los documentos bibliográficos empleados durante la investigación. Por su parte, ChatGPT se utilizó como herramienta de apoyo en la revisión, la mejora de la claridad, coherencia y estructura del texto, así como la edición de material gráfico e imágenes utilizadas para complementar la presentación de los resultados.

El uso de estas herramientas se realizó de manera responsable, ética y transparente, manteniendo en todo momento el análisis crítico, la interpretación de los resultados, la toma de decisiones metodológicas y la autoría intelectual bajo la responsabilidad exclusiva de los investigadores. En ningún caso las herramientas de inteligencia artificial sustituyeron el criterio técnico ni el aporte científico de los autores, sino que actuaron como un recurso de apoyo para fortalecer la calidad y presentación del trabajo.

Introducción

El diseño sísmico convencional de estructuras de concreto reforzado se fundamenta en la disipación de energía mediante el desarrollo controlado de daño en sus elementos principales. Sin embargo, cuando estos presentan un refuerzo subestándar, pueden mostrar un desempeño deficiente ante eventos sísmicos, lo que compromete su resistencia y ductilidad (López, 2018). Para mitigar esta problemática, tradicionalmente se han empleado materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas (FRP, *fiber reinforced polymer*), entre las que destacan las fibras de carbono (CFRP, *carbon fiber reinforced polymer*), vidrio (GFRP, *glass fiber reinforced polymer*), aramida (AFRP, *aramid fiber reinforced polymer*) y, en aplicaciones específicas, polipropileno (PP). Estos sistemas de reforzamiento han demostrado mejorar el desempeño sísmico de elementos estructurales. No obstante, su fabricación depende en gran medida de recursos no renovables y requiere procesos industriales de alto consumo energético, lo que genera un impacto ambiental considerable. En el caso del polipropileno, por ejemplo, se estiman emisiones cercanas a 2.06 kg eq. de CO₂ por cada kilogramo de fibra producido (De Moya Abril, 2021). En este contexto, las fibras vegetales han despertado un creciente interés debido a su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales de construcción y constituir una alternativa más sostenible y de menor impacto ambiental (Basu et al., 2023; Mosquera Perez, 2024; Sriram & Aswin Sidhaarth, 2022).

A pesar del creciente interés por estos materiales, la mayoría de las investigaciones relacionada con el empleo de fibras vegetales para el reforzamiento de elementos de concreto se ha concentrado en elementos estructurales simples sometidos a cargas estáticas (Laverde et al., 2025), mientras que el comportamiento de elementos o componentes de mayor escala reforzadas externamente con tejidos vegetales bajo cargas cíclicas continúa siendo un tema poco explorado.

Considerando la mejoría en el desempeño sísmico atribuido al reforzamiento con FRPs (Correa, 2017), surge la necesidad de ampliar el conocimiento sobre el desempeño de sistemas de reforzamiento elaborados con fibras vegetales que permitan alcanzar un comportamiento estructural adecuado con un menor impacto ambiental.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se vincula a las líneas de estudio del Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME), orientadas a la generación de conocimiento sobre materiales de construcción bajo principios de sostenibilidad. Este trabajo da continuidad a los proyectos de investigación VIEUIS 2702 y VIEUIS 3954, así como a la fase inicial desarrollados por Capataz & Villamizar (2024). Así, esta investigación busca analizar el comportamiento cíclico de una unión viga-columna reforzada externamente con tejido de fique modificado superficialmente con óxido de grafeno, mediante el estudio de la progresión del daño y la evaluación de la respuesta estructural registrada durante el ensayo experimental.

El documento se estructura en tres capítulos principales. En el primero se presenta el montaje experimental, la instrumentación empleada y el protocolo de carga planteado. En el segundo se analiza la progresión del daño observada durante el ensayo en la viga, la columna y el nudo. Finalmente, el tercer capítulo presenta las respuestas estructurales medidas durante el ensayo cíclico y su correspondiente análisis, con el fin de interpretar el comportamiento de la unión reforzada frente a las solicitaciones impuestas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar experimentalmente la respuesta cíclica de una unión viga-columna en concreto reforzada externamente con tejido de fique modificado superficialmente.

1.2 Objetivos Específicos

Establecer el montaje experimental, el protocolo de carga y la instrumentación de la unión viga-columna reforzada con malla de fique empleando dispositivos de registro óptico y equipos de medición dispuestos en el laboratorio de estructuras de la Escuela de Ingeniería Civil.

Describir la progresión de daño observado de la unión viga-columna reforzada con malla de fique, durante la ejecución de los ensayos cíclicos.

Definir la respuesta histerética fuerza-desplazamiento para la unión viga-columna reforzada.

2. Montaje experimental, instrumentación y protocolo de carga

Las actividades iniciaron con la recepción del subensamblaje viga-columna, previamente diseñado y construido por Capataz & Villamizar (2024) como parte de una investigación previa, posteriormente caracterizado por Gonzáles et al. (2026). Un resumen del diseño del subensamblaje se presenta en el Apéndice 1; la malla de fique recubierta con resina de óxido de grafeno (OG), desarrollada en el proyecto de investigación VIE-UIS 3954 (Influencia de la tasa de deformación en la respuesta mecánica en tensión de hilos y mallas de fibra de fique); y la adquisición de la resina epóxica Sikadur-301 de alto módulo y alta resistencia (*Sikadur®-301*, s. f.), necesaria para garantizar la adherencia entre el concreto y el reforzamiento. Todos los elementos fueron dispuestos en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingeniería Civil (Apéndice 2).

2.1 Recursos y materiales empleados

Durante el acondicionamiento de la unión viga-columna se emplearon diversos materiales y herramientas para garantizar la correcta ejecución de las actividades previas al ensayo. Se utilizaron lijas, cepillos de fibra metálica, cinces y trapos para remover la pintura del subensamblaje, limpiar el concreto y eliminar los residuos que pudieran afectar la adherencia del reforzamiento. Asimismo, se emplearon tijeras de alta resistencia para cortar la malla de fique. Para la instalación de los transductores de desplazamiento lineal (LVDT, *lineal variable differential transformer*) se utilizaron cinta de doble faz y elementos impresos en 3D diseñados para su montaje y estabilidad. Durante el confinamiento de la unión con la malla de fique y la resina, se empleó cuerda licrada, lo que permitió retirarla posteriormente sin alterar el sistema de reforzamiento. Finalmente, el registro audiovisual del ensayo se realizó con una cámara digital Sony Alpha 6400, cámaras de dispositivos móviles y trípodes (Apéndice 3).

2.2 Ajuste y disposición de elementos del ensayo y del montaje experimental

Inicialmente, se retiró la pintura existente del nudo, de la viga y de la columna mediante lijado y cepillos de cerdas metálicas. Este proceso tuvo como finalidad garantizar una adecuada adhesión entre el concreto y el sistema compuesto por la malla de fique y la resina epóxica (en adelante, FiqueGO), así como facilitar la identificación y el seguimiento de las fisuras generadas durante el ensayo. Posteriormente, se realizó la limpieza y adecuación del espécimen, que incluyó el repintado de las platinas con aerosol naranja, color característico del Laboratorio de Estructuras (LabEst) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

La malla de fique, con densidad de 8×8 hilos/dm y modificada superficialmente con resina basada en nanopartículas de óxido de grafeno (OG), fue recortada con tijeras de alta resistencia según las dimensiones establecidas. La configuración del refuerzo fue diseñada por Capataz & Villamizar (2024), y consiste en una longitud de 600 mm para la viga correspondiente a dos veces la altura del elemento y de 500 mm, para la columna, eligiendo el mayor valor entre un sexto de la altura ($h/6$), la mayor dimensión de la sección transversal de la columna (c_1) y 500 mm, medidos desde las caras del nudo. El ancho del tejido de fique se estableció considerando el desarrollo de las cuatro caras de la viga y la columna, al cual se adicionó un traslape de 150 mm para asegurar la continuidad del reforzamiento y favorecer la transferencia de esfuerzos mediante la resina Sikadur-301.

Durante esta etapa, y en conjunto con el técnico del laboratorio y el director de la pasantía, se diseñó un sistema de acople para el actuador debido a la pérdida de componentes del montaje originalmente propuesto. El sistema fue fabricado por la empresa García Vega de Bucaramanga (*García Vega - Soluciones integrales para la industria y la construcción*, s. f.) y consiste en un cajón de $302 \times 252 \text{ mm} \times 5/8"$ acero ASTM A36 (Cía. General de Aceros, 2024) cuya geometría

se ajustó a la sección de la viga con una tolerancia de ± 2 mm. Posteriormente, el cajón fue instalado en el extremo libre de la viga, realizando ajustes locales con cincel para eliminar irregularidades y garantizar un acoplamiento adecuado. Finalmente, mediante el puente grúa del laboratorio se transportó la unión viga-columna hasta los apoyos previamente instalados en el área destinada al ensayo (Apéndice 4).

2.3 Puesta a punto del ensayo experimental para el ensayo cíclico

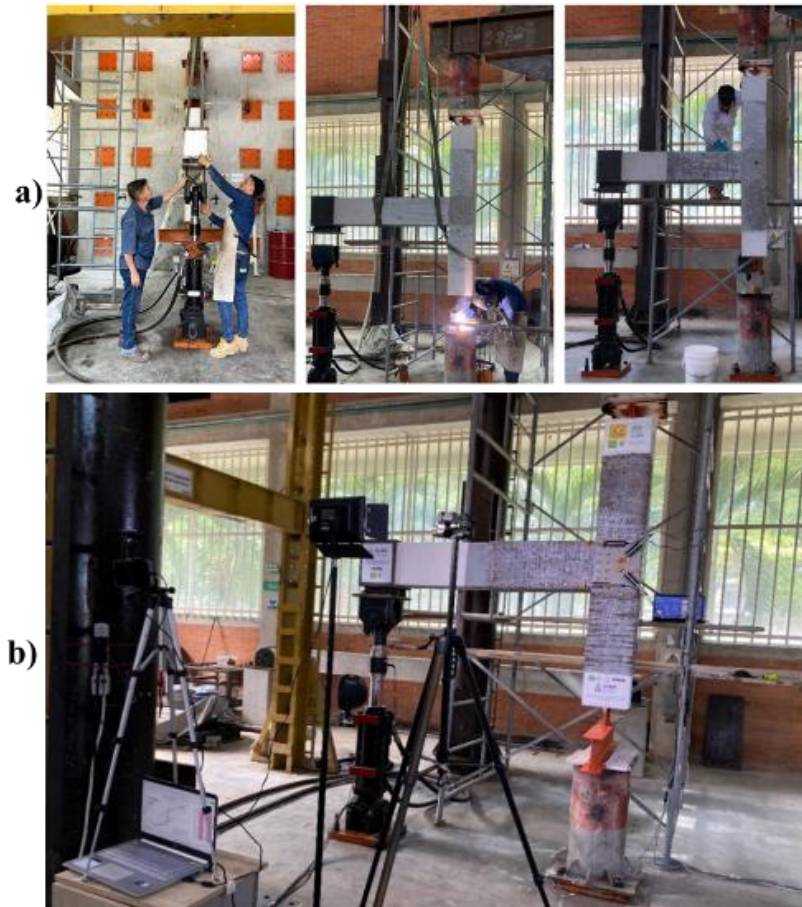
2.3.1 Montaje de la unión viga-columna

Una vez completada la adecuación de los elementos principales del ensayo, se procedió a montar el espécimen, teniendo en cuenta que el nuevo sistema de acople viga-actuador incrementó la altura del conjunto en 6 cm, lo que afectó la elevación requerida de los apoyos. En consecuencia, se realizó un nuevo levantamiento de medidas para adaptar el montaje.

En el apoyo superior se determinó la necesidad de recortar 8 cm (6 cm aportados por el sistema de acople y 2 cm para el correcto posicionamiento del subensamblaje). En el apoyo inferior, la altura necesaria se compensó mediante platinas de acero disponibles en el LabEst: una de 5 cm de espesor instalada debajo de la base del apoyo y fijada a la losa mediante pernos, y otra de $\frac{3}{4}$ " soldada en la parte superior de la platina ya existente en el apoyo inferior. El esquema de estas modificaciones fue elaborado en sitio y se presenta en el Apéndice 5.

Figura 1.

Montaje experimental: (a) adecuaciones, (b) configuración final con instrumentación



Posteriormente, se gestionó el apoyo de personal capacitado de la División de Planta Física de la Universidad Industrial de Santander para ejecutar las modificaciones del montaje, debido a que estas involucraban trabajos en altura, corte de elementos metálicos y soldadura (Fig.1). Durante esta etapa y en conjunto con el personal de Planta Física, el técnico del Laboratorio y el director de la pasantía fue necesario plantear soluciones a varias dificultades de montaje identificadas, logrando completar el montaje y dejar le espécimen listo para el ajuste de los pernos de conexión entre el cajón y el actuador, así como para la instrumentación.

2.3.2 Aplicación del refuerzo externo

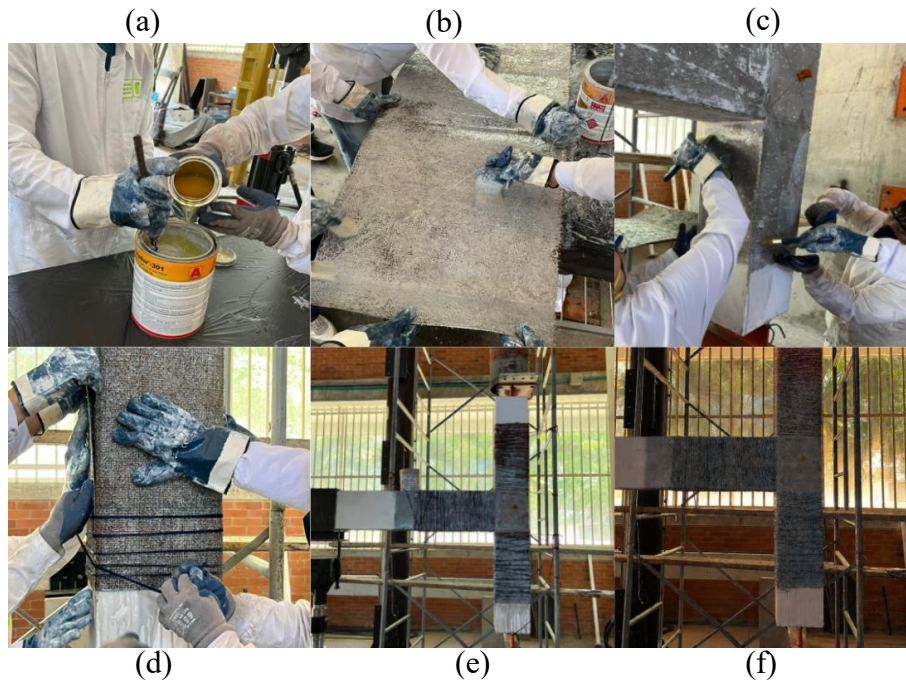
Previo a la aplicación del refuerzo externo, se prepararon los materiales y se verificaron los insumos requeridos para el confinamiento de la unión, a fin de garantizar la correcta ejecución del procedimiento. Concluida la revisión, se procedió a aplicar el refuerzo externo e instrumentar el espécimen. En primer lugar, se realizó el confinamiento mediante el FiqueGO y la resina Sikadur-301. Esta última se compone de dos componentes: A (resina epóxica) y B (agente de curado). La resina presenta una limitación de tiempo de trabajo cercano a 45 minutos que depende de varios factores, como la temperatura ambiente. Por lo anterior, fue necesario recurrir a la ayuda de integrantes del semillero SURE (Sustainable and Resilient Infrastructure & Structural Systems), quienes apoyaron el procedimiento bajo la coordinación del equipo investigador y el director de esta pasantía, también líder del semillero.

Se recibió e impartió la inducción en el laboratorio sobre el uso adecuado de los elementos de protección personal, las medidas de seguridad y las precauciones para tener en cuenta para la manipulación de los componentes, así como los riesgos relacionados con el contacto directo con la piel. Luego de esto se mezclaron los componentes. Aunque el fabricante sugiere usar una máquina agitadora a 400 rpm, al no contar con este equipo, un estudiante realizó este trabajo de manera continua y supervisada (Fig. 2). Posteriormente, se distribuyeron las actividades entre dos equipos de trabajo. Un equipo impregnó el tejido de fique con la resina, mientras que otro aplicó la resina sobre las superficies de concreto de las zonas de reforzamiento. La aplicación comenzó en las columnas y concluyó en la viga, con el propósito de optimizar el proceso. El refuerzo fue fijado firmemente con cuerda licrada para mejorar su adherencia al concreto y permanencia en el sitio. Finalmente, se dejó reposar 72 horas a temperatura ambiente, y posteriormente a cortar y retirar la cuerda. Se observaron pliegues en el refuerzo de la cara posterior e inferior de la viga que

no quedaron en contacto con el concreto (Apéndice 6), pero fueron ajenos al proceso de aplicación y provenían de su fabricación.

Figura 2.

Aplicación sistema de la malla de reforzamiento.



2.3.3 Instrumentación del espécimen

Como se observa en la Fig.1b la instrumentación de contacto se complementó con equipos de grabación montados en trípodes, destinados al registro audiovisual de la progresión del daño; computadores portátiles para el monitoreo en tiempo real de la respuesta histerética; y luces LED, que mejoraron la visibilidad del ensayo y facilitaron la toma de datos alrededor del montaje.

Para medir la distorsión (γ) en la cara frontal del nudo se tomaron datos de desplazamiento de los transductores de desplazamiento lineal (LVDT) ubicados según el Apéndice 7. El desplazamiento medido por cada dispositivo se calculó tomando como referencia (punto cero) el valor de ajuste inicial asignado a cada LVDT, el cual fue posicionado en el punto medio para

garantizar un rango de alargamiento y acortamiento de aproximadamente ± 25 mm. Posteriormente, se calculó la distorsión de acuerdo con:

$$\gamma = \frac{\Delta 1 + \Delta 2}{D \times \text{sen}(2\alpha)} \quad (1)$$

$$D = \sqrt{h^2 + b^2} \quad (2)$$

donde $\Delta 1$ y $\Delta 2$ son, respectivamente, el acortamiento y alargamiento de las diagonales registrados por los LVDT; D es la longitud de la diagonal antes de la deformación (igual en ambas direcciones); en este estudio, el panel de medición corresponde a un cuadrado de lados 250 mm, resultando en un ángulo α de la diagonal no distorsionada de 45 grados. Por lo tanto:

$$D = \sqrt{25^2 + 25^2} = 353.553 \text{ mm}$$

$$\gamma = \frac{\Delta 1 + \Delta 2}{353.553} \quad (3)$$

Para el análisis de la rotación (θ) en la interfaz viga-nudo se tomaron los datos de desplazamiento arrojados en los LVDT dispuestos horizontalmente en la parte inferior y superior de la viga (Apéndice 7a). El desplazamiento real de cada dispositivo se calculó siguiendo los pasos descritos anteriormente. Posteriormente, la rotación se calculó como:

$$\theta = \frac{\Delta 3 - \Delta 4}{L} \quad (4)$$

donde $\Delta 3$ y $\Delta 4$ son respectivamente el acortamiento y alargamiento registrados por los LVDT horizontales y L es la longitud vertical entre los dos LVDT (Apéndice 7b).

2.4. Protocolo de carga.

El protocolo de carga aplicado para el ensayo se fundamentó en las recomendaciones del FEMA 461 (FEMA, 2007), correspondiente al Protocolo I de ensayos cíclicos cuasi-estáticos controlados por desplazamiento y ampliamente usado en la literatura para la evaluación del comportamiento sísmico de componentes estructurales.

Tabla 1.*Cartera de protocolo de carga del ensayo experimental*

Deriva (Δ)	PASO	θ (mm)	Frecuencia [Hz]	Velocidad [mm/s]
0.10%	1	1.5	0.010	0.06
0.14%	2	2.1	0.010	0.08
0.20%	3	2.9	0.010	0.12
0.27%	4	4.1	0.010	0.16
0.38%	5	5.8	0.010	0.23
0.54%	6	8.1	0.010	0.32
0.75%	7	11.3	0.010	0.45
1.05%	8	15.8	0.010	0.63
1.48%	9	22.1	0.010	0.89
2.07%	10	31.0	0.010	1.24
2.89%	11	43.4	0.010	1.74
3.00%	12	45.0	0.010	1.80
3.90%	13	58.5	0.0077	1.80
4.80%	14	72.0	0.0063	1.80
5.70%	15	85.5	0.0053	1.80
6.60%	16	99.0	0.0045	1.80
7.50%	17	112.5	0.0040	1.80

Este protocolo establece un historial de carga incremental que permite caracterizar la respuesta histerética, la degradación de la rigidez, la disipación de energía y los mecanismos de daño de los elementos sometidos a acciones sísmicas simuladas. La amplitud de desplazamiento aplicado por el actuador (U) se definió a partir de la deriva (Δ) mediante la siguiente expresión, donde L corresponde a la longitud libre de la viga (1.5 m).

$$U = \Delta \times L \quad (5)$$

Como se muestra en el Apéndice 8, en cada nivel de amplitud se aplicaron dos ciclos completos de carga. Para garantizar al menos 10 niveles antes de alcanzar la deriva máxima esperada (Δ_M) correspondiente a 3 % según el FEMA 461 (FEMA, 2007), el protocolo inició con una deriva sugerida de 0.10 % (Δ_0). Para lograr una representación adecuada de la demanda sísmica y la caracterización detallada del comportamiento del espécimen en las etapas iniciales,

las amplitudes de desplazamiento desde la deriva inicial hasta la máxima fueron incrementadas mediante un factor de 1.4, así:

$$U_i = 1.4U_{i-1} \quad (6)$$

Una vez alcanzada la deriva máxima de 3%, las amplitudes se incrementaron mediante constantes equivalentes al $0.3(\Delta_M)$, permitiendo evaluar el comportamiento de la unión viga-columna bajo niveles elevados de deformación y documentar su respuesta posterior a su deriva máxima. El cálculo correspondiente a esta etapa fue:

$$\Delta_i = \Delta_{i-1} + 0.3\Delta_M \quad (7)$$

Durante la primera parte de los ensayos se mantuvo una frecuencia de 0.01 Hz, lo que garantizó una duración de 200 s por ciclo. En consecuencia, la velocidad del actuador aumentó progresivamente con la amplitud hasta alcanzar la deriva máxima y se mantuvo constante en los incrementos posteriores. El protocolo planteado se presenta en la Tabla 1.

3. Progresión de daño observado durante el ensayo

Durante el ensayo se realizaron pausas programadas luego de cada amplitud de deriva para inspeccionar la viga, la columna y el nudo mediante inspección visual (siguiendo la nomenclatura de las vistas mostradas en el Apéndice 9), medir los anchos máximos de fisuras y tomar registros fotográficos. Con fines de consistencia terminológica, en este trabajo se emplea el término fisura para describir todas las discontinuidades observadas en el concreto durante la progresión del daño. Esta información permitió documentar la evolución del daño y analizar su comportamiento durante la aplicación del protocolo de carga (Apéndice 8). Es importante anotar que, debido a la magnitud del daño observado en el nudo y a la pérdida rápida de resistencia, se decidió finalizar el ensayo

antes de completar el segundo ciclo del paso 15 ($\Delta = 5.70 \%$) y así evitar el posible colapso del espécimen.

3.1 Viga

Dado que la viga fue el elemento encargado de transmitir los desplazamientos y la fuerza ejercida por el actuador, se realizó un seguimiento detallado de su estado. Durante los pasos 1 al 5 ($0.10 \% \leq \Delta \leq 0.38 \%$, Tabla 1), no se evidenciaron daños visibles en la viga, afectaciones en el refuerzo externo ni formación de fisuras, cumpliendo el criterio de daño esperado por FEMA 461 (daños menores esperados en el espécimen durante los primeros seis niveles).

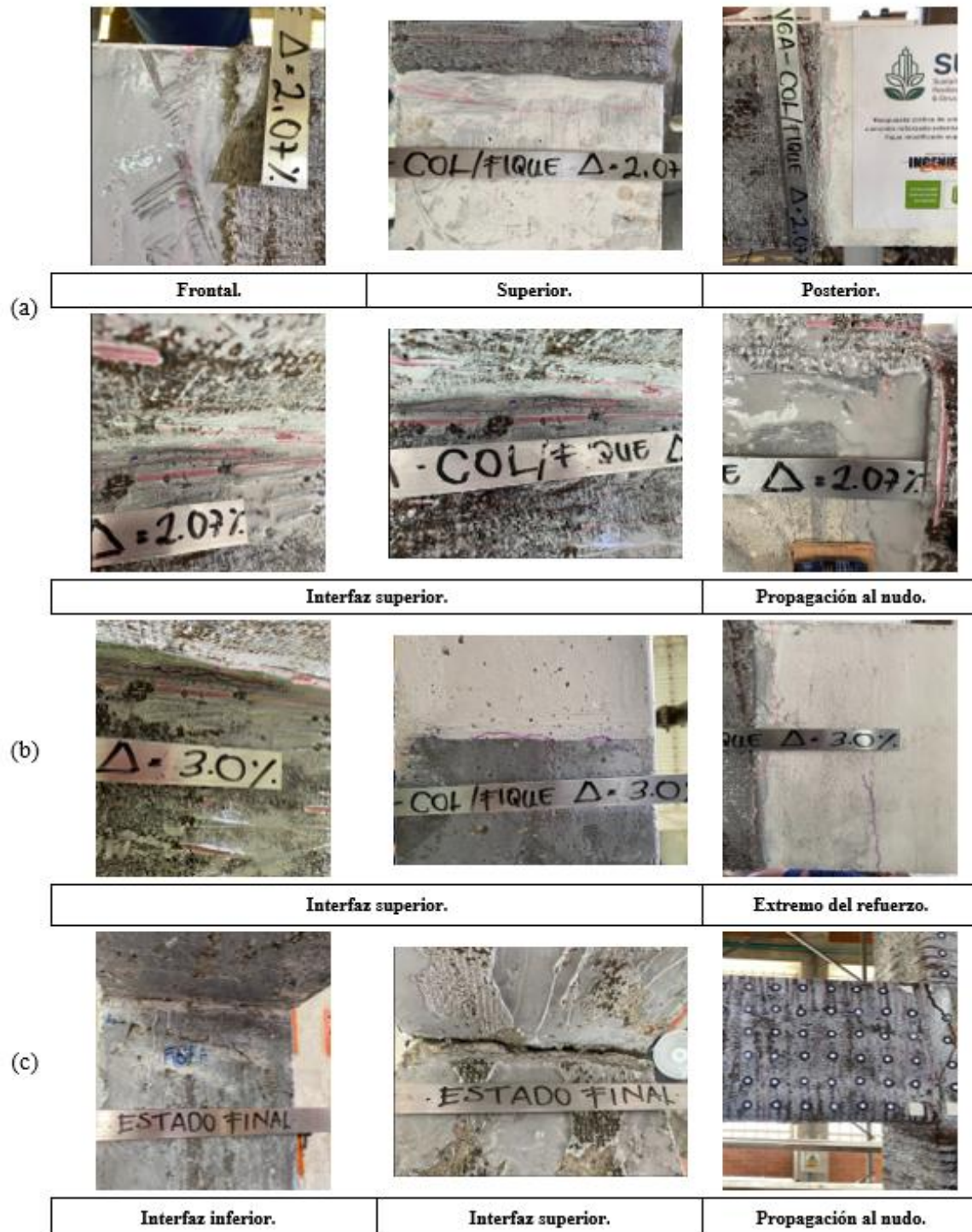
Entre los pasos 6 y 10 ($0.54 \% \leq \Delta \leq 2.07 \%$), la respuesta del espécimen no evidenció cambios significativos en el patrón de daño respecto a los ciclos anteriores. En el paso 10 apareció una fisura de ancho (w_{cr}) igual 0.25 mm, contigua al extremo del reforzamiento externo, localizada en las caras superior y laterales de la viga. Asimismo, se identificó una fisura de 0.35 mm en la interfaz viga-columna, con ligera propagación hacia las caras frontal y posterior del nudo (Fig. 3a).

Al alcanzar $\Delta = 3.0 \%$, en el concreto contiguo al extremo del reforzamiento ubicado hacia la longitud libre de la viga aparecieron nuevas fisuras en las caras inferior y posterior de la viga, con $w_{cr} = 0.05$ mm. Su ubicación sugiere una concentración de esfuerzos asociada a la transición de rigidez entre la zona reforzada y la no reforzada. Por su parte, la fisura de la interfaz aumentó su ancho hasta 1.2 mm y presentó una leve propagación hacia (o desde) el nudo, un comportamiento asociado al aumento de las demandas de cortante en la unión (Fig. 3b).

Finalmente, durante las derivas de 3.9 %, 4.8 % y 5.7 % se produjo el desprendimiento parcial de la interfaz viga-columna en las caras superior e inferior del elemento. El estado final del elemento se muestra en la Fig. 3c.

Figura 3.

Daños localizados en la viga: (a) extremo del refuerzo externo e interfaz superior viga-columna $\Delta=2.07\%$, (b) progresión $\Delta=3.0\%$ (c) estado final



3.2 Columna

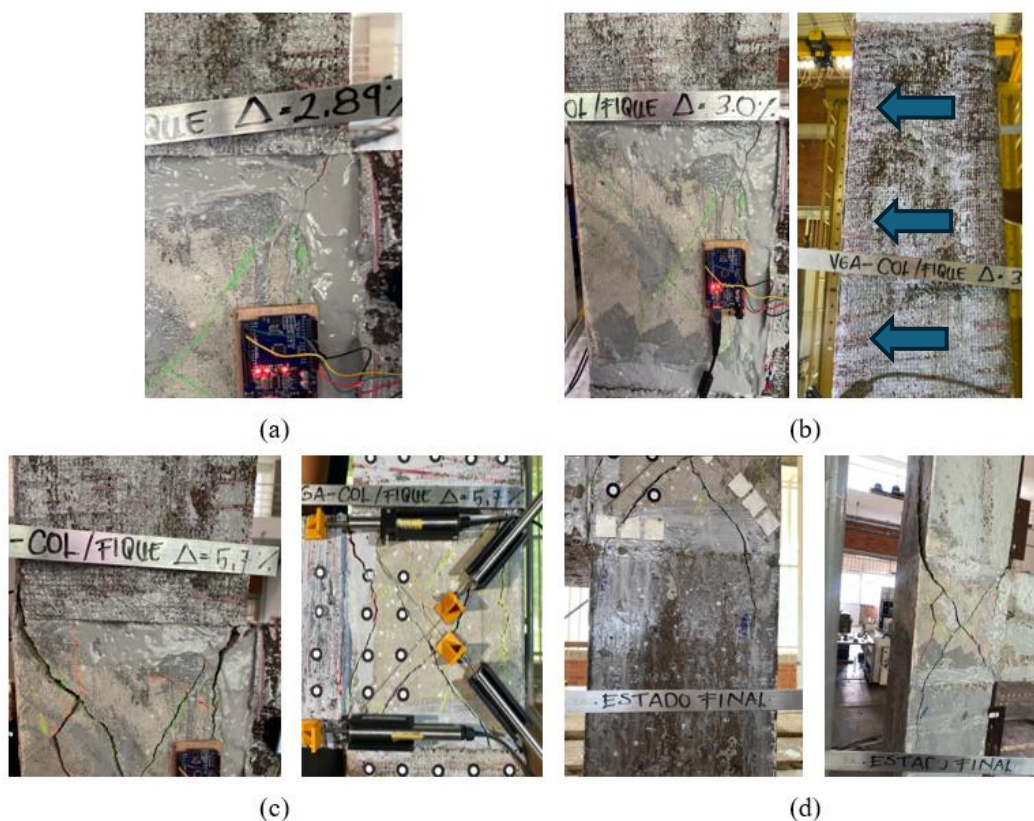
En la columna, durante los primeros 10 pasos del protocolo de carga, no se evidenciaron fisuras, desprendimientos del refuerzo externo ni otras manifestaciones de daño. Al alcanzar el paso 11 ($\Delta=2.89\%$), se identificó una fisura con $w_{cr}=0.5$ mm en la cara posterior de la unión, la cual se origina desde la columna superior y se propaga hacia el panel del nudo (Fig. 4a). En el paso 12 ($\Delta=3.00\%$), el ancho de dicha fisura aumentó considerablemente, alcanzando 1.5 mm. Asimismo, se notó un leve desprendimiento del traslape del refuerzo FiqueGO, sin comprometer su adherencia (Fig. 4b). Hasta este punto, la concentración del daño se observó en la columna superior, ya que en la inferior no se evidenciaron fisuras ni daños en el refuerzo externo.

En la última etapa del ensayo ($3.9\% \leq \Delta \leq 5.7\%$), la fisura proveniente de la columna superior en la cara posterior con $w_{cr}=10$ mm. Además, apareció una nueva fisura con $w_{cr}=0.4$ mm, proveniente de la rotura localizada del FiqueGO en una de las esquinas de la columna superior en la misma zona. En la cara frontal, también cerca del panel del nudo, se evidenciaron fisuras de la misma naturaleza con $w_{cr}=2$ mm, provenientes de la columna inferior (Fig. 4c).

Finalmente, al retirar la malla de fique se confirmó la continuidad de las fisuras ocultas por el sistema de reforzamiento, reflejando la magnitud considerable de estas al finalizar el ensayo. Esto sugiere que la malla contribuyó a mantener confinado el concreto, retardando la manifestación completa del patrón de fisuración (Fig. 4d).

Figura 4.

Daños localizados en la columna: (a) Primera manifestación cara posterior $\Delta=2.89\%$, (b) progresión de daño $\Delta=3.0\%$, (c) Extensión fisuras columna al nudo $\Delta=5.7\%$, (d) Estado final

**3.3 Nudo**

La Figura 5 presenta la evolución del daño observado en el nudo durante el ensayo cíclico, mostrando la progresión de las fisuras registradas en las caras frontal, trasera y posterior a partir del paso 10 del protocolo de carga, correspondiente al inicio de las manifestaciones significativas de daño, ya que durante los nueve primeros niveles de deriva ($0.10\% \leq \Delta \leq 1.48\%$) el nudo no presentó daños visibles. Las primeras manifestaciones de daño considerables aparecieron en el paso 10 (Fig. 5a) con fisuras diagonales que se propagaron levemente hacia la región central y de $w_{cr} = 0.1$ mm en el panel del nudo frontal. En el panel posterior, aparecieron fisuras de la misma

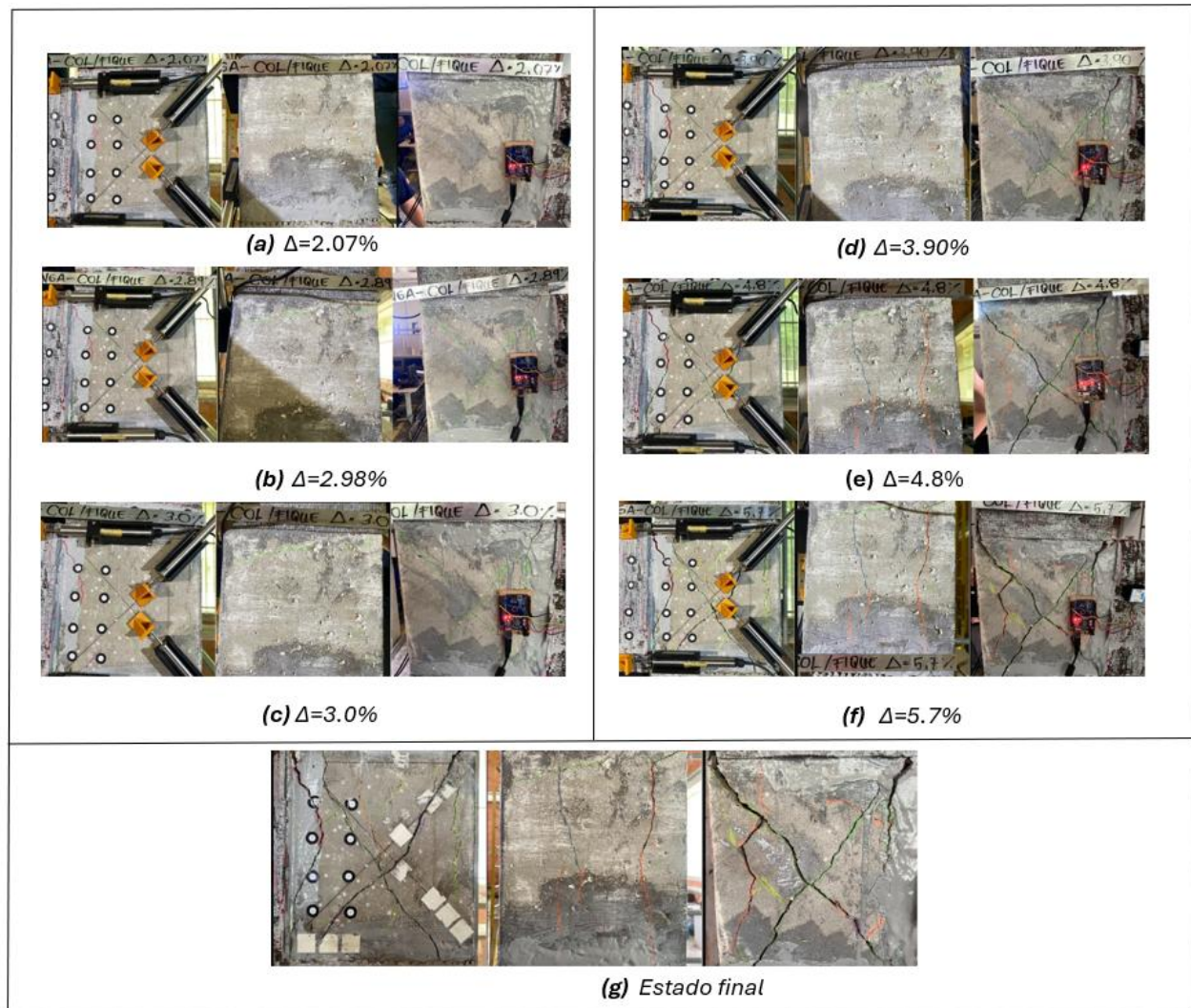
naturaleza, con $0.1\text{ mm} \leq w_{cr} \leq 0.35\text{ mm}$, y también apareció una fisura proveniente de la esquina superior izquierda del panel frontal, consecuencia de la propagación de la fisura presente en la interfaz viga-columna superior. Su trayectoria, predominantemente vertical, difiere con la naturaleza diagonal característica de las muestras de daño por cortante, como las fisuras a 45° que se empezaron a evidenciar en esta etapa. En el paso 12 (Fig. 5c) el w_{cr} máximo alcanzó 0.8 mm en el panel posterior, mientras que en el panel frontal se vio un engrosamiento de las fisuras existentes, con w_{cr} máximas de 0.35 mm.

Con el incremento de la demanda en las derivas de 3.9 %, 4.8 % y 5.7 % (Fig. 5d, 5e, 5f) el daño evolucionó principalmente mediante el ensanchamiento y la propagación de las fisuras existentes en el panel frontal, con aparición de nuevas fisuras, lo que sugiere la redistribución de esfuerzos. La cara trasera únicamente presentó leves fisuras superficiales, sin desarrollar fisuras de magnitud comparable. En la cara frontal del nudo, las fisuras alcanzaron su máxima expansión de $w_{cr}=5\text{ mm}$ y en la cara posterior de $w_{cr}=11\text{ mm}$, conformando un patrón continuo de fisuración diagonal característico de uniones sometidas a cargas cíclicas como la estudiada por Akguzel & Pampanin (2012).

Finalmente, tras retirar la malla de fique (Fig. 4d), se evidenció la continuidad y la propagación del daño desde el nudo hasta la columna y la viga, con fisuras ampliamente desarrolladas. Aunque el FiqueGO no impidió la formación de fisuras, el comportamiento de este sugiere que contribuyó a mantener confinado el concreto en las zonas de concentración de esfuerzo de la viga y la columna, y a retardar la apertura completa de las fisuras durante los niveles más elevados de deformación, permitiendo que la unión desarrollara un proceso gradual de degradación antes de alcanzar su estado final.

Figura 5.

Progresión del daño en el nudo $2.07 \% \leq \Delta \leq 5.7 \%$ y en las caras frontal, trasera y posterior.



4. Respuestas estructurales medidas durante el ensayo cíclico

Esta etapa buscó caracterizar la evolución del comportamiento mecánico del espécimen y del nudo bajo carga cíclica, a partir del procesamiento e interpretación de la información registrada durante el ensayo. Para ello se emplearon los datos obtenidos por el sistema de instrumentación instalado en el LabEst de la Escuela de Ingeniería Civil, con el cual se monitoreó de forma continua

el espécimen durante todo el protocolo de carga. Con base en estos registros se construyeron tres respuestas histeréticas de interés: (i) fuerza-desplazamiento del actuador ($F - U$), (ii) fuerza-distorsión angular (γ) del nudo y momento-rotación ($M - \theta$) en la interfaz viga-nudo.

Las variables principales fueron la fuerza (F) y el desplazamiento (U) aplicados por el actuador hidráulico en el extremo libre de la viga. Los LVDT instalados en la región nodal de la cara frontal del espécimen (Apéndice 7) aportaron, además, la información requerida para obtener la respuesta $F-\gamma$ y $M - \theta$. El análisis conjunto muestra cómo evolucionaron la rigidez, la resistencia y las deformaciones de la unión a lo largo del ensayo y en conjunto describen su desempeño estructural.

Los datos fueron recolectados con una frecuencia de 20 s^{-1} , y se exportaron desde el sistema de adquisición para su posprocesamiento. Este incluyó la revisión de continuidad de las señales, el descarte de registros inconsistentes y la verificación de la confiabilidad de la información antes de analizarla. Posteriormente, se desarrollaron scripts en Matlab (The MathWorks Inc.V-R2026a) para identificar los ciclos de carga, organizar las variables de interés y construir las gráficas de cada respuesta estructural evaluada a partir de los datos validados.

Para caracterizar el comportamiento estructural de la unión, el análisis se organizó en tres niveles de representación que permiten leer el espécimen desde una perspectiva individual, intermedia y acumulada, y así identificar los principales cambios ocurridos a lo largo del ensayo. En el primer nivel se determinó la respuesta de cada uno de los quince ciclos por separado, con el fin de identificar las características individuales. Después, los ciclos se agruparon en tres bloques [pasos 1 (0.10 %) a 5 (0.38 %), pasos 6 (0.54 %) a 10 (2.07 %), y pasos 11 (2.89 %) a 15 (5.70 %)] para observar la transición entre etapas y la evolución de la respuesta cíclica. Por último, se construyó una representación acumulada con la totalidad de los ciclos del ensayo.

4.3 Respuesta histerética global ($F - U$)

El Apéndice 11 presenta la respuesta histerética $F - U$ de cada uno de los 15 ciclos aplicados durante el protocolo de carga. Las curvas evidencian un incremento progresivo en la amplitud de los lazos de histéresis (*histeretic loops*) a medida que creció la demanda de desplazamiento, alcanzando los mayores niveles de fuerza y desplazamiento en los últimos ciclos (Apéndice 12). La transición entre ciclos es gradual, sin cambios abruptos en la forma de las curvas: los primeros ciclos presentan lazos de amplitud reducida, indicando respuesta elástica o cuasi-elástica, mientras que en los intermedios y finales la apertura aumenta conforme se acumulan mayores deformaciones. A partir del ciclo 10 ($\Delta = 2.07 \%$) se observa la clara presencia de *pinching* (constricción de la respuesta histerética), lo cual puede estar asociado a la apertura y cierre de fisuras en el nudo, el inicio de la fluencia significativa del acero de refuerzo y del fenómeno de adherencia y desplazamiento del refuerzo en la interfaz. Este efecto aumentó progresivamente en los ciclos siguientes.

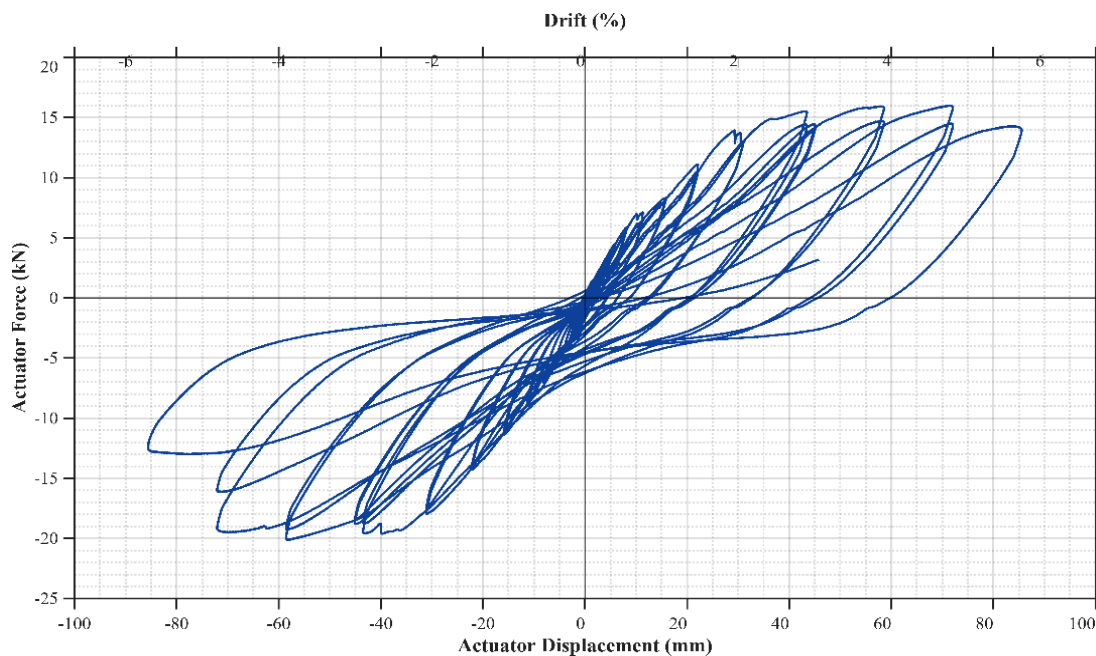
El Apéndice 13 muestra la respuesta histerética agrupada para los grupos de ciclos 1-5, 6-10 y 11-15. En la primera etapa (Apéndice 13a) la respuesta es estable: los lazos son de amplitud reducida y estos crecen de forma progresiva en cada ciclo, con curvas de forma similar entre sí, alcanzando valores máximos de 5.49 kN de fuerza y 5.83 mm de desplazamiento. En la segunda etapa (6-10) los lazos se abren más y tanto la fuerza como el desplazamiento aumentan de forma notable, hasta 17.96 kN y 31.08 mm respectivamente, empezando a notarse ligeros cambios en la forma de las curvas conforme sube la exigencia del ensayo. En la tercera etapa (11-15) se alcanzan las mayores amplitudes del ensayo, con una fuerza máxima de 20.13 kN y un desplazamiento máximo de 85.56 mm; la apertura de los lazos es la más pronunciada y el efecto de *pinching* es totalmente notorio, al igual que la caída de la rigidez a medida que avanzan los ensayos.

La rigidez secante, calculada como la relación entre la fuerza y el desplazamiento máximo de cada etapa (Apéndice 12), se redujo de 0.94 kN/mm en la etapa 1-5, a 0.58 kN/mm en la etapa 6-10, y a 0.24 kN/mm en la etapa 11-15, lo que representa una pérdida de rigidez cercana al 75 % entre el inicio y el final del ensayo. Esta reducción progresiva, indica que la unión reforzada desarrolló un comportamiento cíclico estable, con una degradación moderada y controlada de su rigidez a lo largo de los quince ciclos del protocolo de carga aplicado.

La Figura 6 muestra la respuesta histerética acumulada. Se observa un aumento progresivo de fuerza y desplazamiento en cada ciclo, junto con una apertura gradual de los lazos que refleja la acumulación de deformaciones inelásticas conforme avanza el ensayo. La unión alcanzó valores máximos de $F = 20.13$ kN de fuerza en el paso 13 ($\Delta = 3.90$ %) y un desplazamiento $U = 85.56$ mm en el paso 15 ($\Delta = 5.70$ %) durante el ensayo. Tal y como se mencionó antes, el ensayo se detuvo en el paso 15 ($\Delta = 5.70$ %) considerando la extensión de daño y la caída rápida de resistencia. Por ejemplo, la fuerza máxima del ciclo 13 cayó 3 % en el ciclo 14. Esta última se redujo en aproximadamente un 27% en el ciclo 15, lo que motivó detener el ensayo antes de terminar el segundo ciclo de dicha amplitud.

Figura 6.

Respuesta histerética global fuerza-desplazamiento de la unión viga-columna reforzada durante el protocolo de carga



4.4 Respuesta histerética fuerza-distorsión angular

La distorsión (γ) del nudo es uno de los parámetros más representativos para evaluar el comportamiento de las uniones viga-columna bajo carga cíclica, pues cuantifica las deformaciones desarrolladas en la región nodal, zona donde se concentran los principales mecanismos de transferencia de esfuerzos entre los elementos estructurales. Esta respuesta complementa la información de las curvas histeréticas y permite relacionar la deformación del nudo con el incremento progresivo observado durante el ensayo, teniendo en cuenta que el espécimen fue diseñado sin refuerzo transversal (estribos) en el nudo. Siguiendo el mismo criterio de análisis descrito en la sección 4.2, esta respuesta se presenta en tres niveles: individual, por etapas y global.

El Apéndice 14 muestra la respuesta $F - \gamma$ del nudo para cada uno de los quince ciclos del ensayo. Cada gráfica del Apéndice 14 presenta una escala de ejes ajustada al rango de distorsión

y fuerza correspondiente a cada ciclo, con el fin de facilitar la visualización detallada de la respuesta. Además, la mayor dispersión y ruido en las primeras gráficas obedece a la resolución de los instrumentos. La lectura individual permite rastrear el desarrollo de la distorsión angular del nudo en función del incremento de la carga aplicada, como se detalla en el Apéndice 15, así como los cambios de geometría de los lazos asociados a los mecanismos de daño propios de esta región, principalmente por el fisuramiento diagonal y el deslizamiento por adherencia.

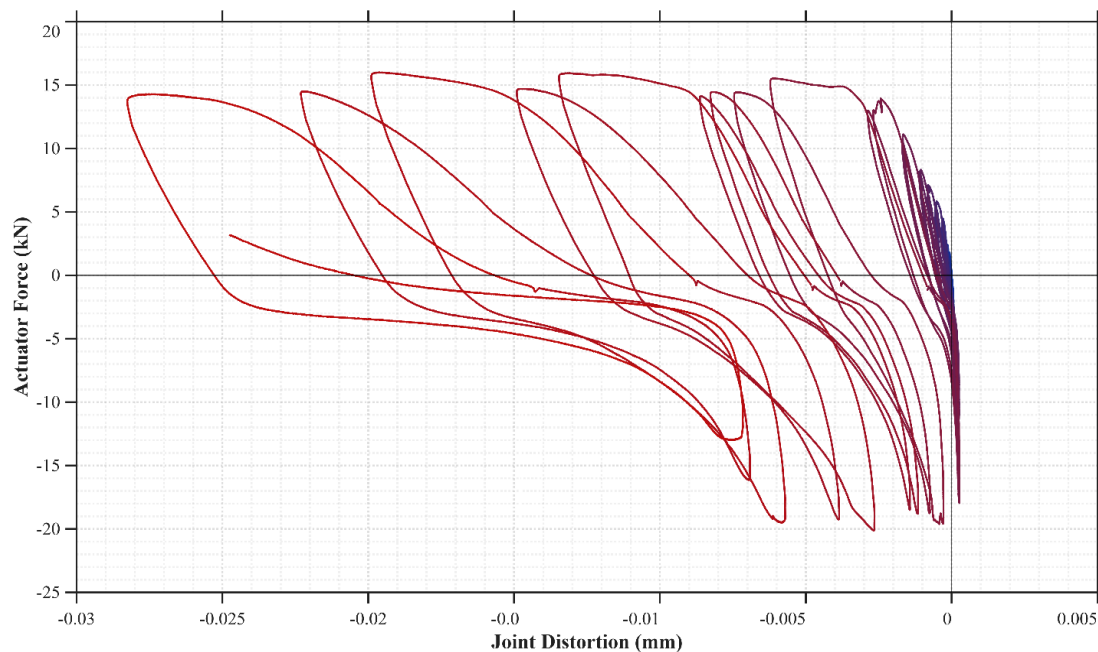
Para facilitar la lectura de la evolución de esta respuesta, los quince ciclos se agruparon en tres grupos (Apéndice 16). La comparación por etapas evidencia una degradación progresiva de la rigidez del panel nodal a medida que avanza el protocolo de carga. En la primera etapa, (ciclos 1–5, Apéndice 16a), la respuesta se caracteriza por lazos de reducida amplitud y una pendiente pronunciada con distorsión máxima de 0.00034 rad, indicativa de un nudo aún sin daño significativo. En la siguiente etapa (ciclos 6–10, Apéndice 16b), se observa un incremento tanto en la fuerza como en la distorsión, esta última alcanzando 0.00289 rad, lo que sugiere el inicio de un proceso de fisuración progresiva en el panel. Finalmente, en la última etapa (ciclos 11–15, Fig. Apéndice 16c), se registran los mayores niveles de distorsión (valor máximo de 0.02826 rad en el ciclo 15); si bien la rigidez continúa disminuyendo respecto a las etapas previas, la ausencia de caídas abruptas en la resistencia indica que la degradación del nudo se desarrolló de forma gradual y controlada, sin evidenciar una falla frágil de la región nodal.

La respuesta acumulada se presenta en la Fig. 7, evidenciando una transición gradual desde una etapa inicial de alta rigidez hasta niveles crecientes de deformación sin pérdidas abruptas de resistencia. En conjunto, los resultados evidencian que el refuerzo externo contribuyó a mantener la estabilidad de la respuesta del nudo a lo largo de todo el ensayo, permitiendo que la unión

alcanzara niveles crecientes de distorsión hasta 0.0283 rad de manera progresiva y sin comprometer su capacidad resistente global.

Figura 7.

Respuesta global fuerza-distorsión de la unión viga-columna reforzada



La rigidez del panel nodal, calculada como la relación entre la fuerza y la distorsión máxima en cada etapa, se redujo de 16147 kN/rad en la etapa 1-5 a 712 kN/rad en la etapa 11-15, es decir, una pérdida cercana al 96 %, mayor que la degradación de la rigidez global de la unión (75 %). Esto sugiere que buena parte del daño y la pérdida de rigidez del espécimen se concentraron en la región nodal, lo cual es consistente con el hecho de que el espécimen fue diseñado sin refuerzo transversal en el nudo. Asimismo, se observa un mayor incremento de la distorsión a partir del ciclo 10, momento en el que se identificaron fisuras que atravesaban los LVDT, lo que incrementó considerablemente las lecturas de elongación de estos.

4.5 Respuesta histerética momento-rotación

La respuesta momento-rotación evalúa la capacidad de rotación que desarrolla la unión viga-columna bajo carga cíclica y constituye un parámetro complementario para interpretar su comportamiento mecánico. A diferencia de la respuesta histerética fuerza-desplazamiento, aquí se relaciona el momento actuante con la rotación en la interfaz viga-nudo, lo que proporciona información sobre cómo evoluciona la rigidez rotacional del sistema conforme, Los valores de rotación fueron calculados según la sección 2.3.2, mientras que el momento se determinó multiplicando F por la longitud libre de la viga (1.5 metros).

El Apéndice 17, 18 y La Figura 8 presentan la respuesta momento-rotación individual, agrupada y acumulada durante los ensayos. En los primeros ciclos (1 a 5) las curvas conservan una forma relativamente simétrica respecto al origen, con incrementos moderados de momento y rotación entre un ciclo (Apéndice 19). A partir del ciclo 6 comienza a notarse una diferencia creciente entre las rotaciones desarrolladas en cada sentido de carga, tendencia que se acentúa de forma marcada hacia los últimos ciclos del protocolo, donde las curvas adoptan una configuración asimétrica característica, con rotaciones considerablemente mayores en un sentido que en el otro.

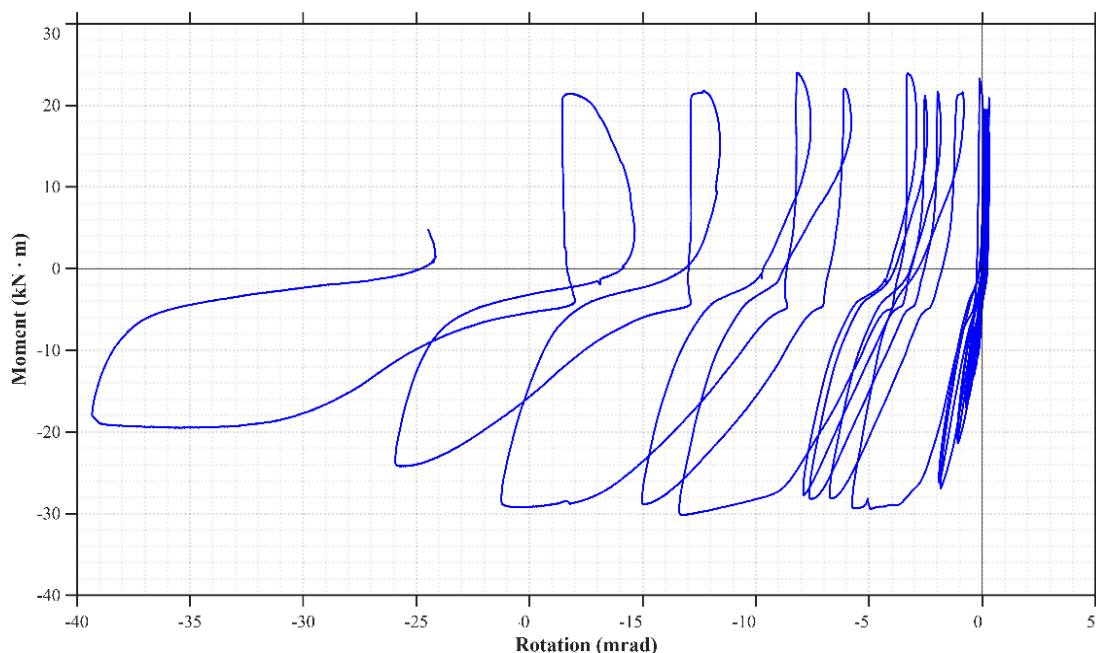
La respuesta agrupada (Apéndice 18) confirma el desarrollo de lazos de amplitud creciente, pero de geometría asimétrica, alcanzando sus máximos valores en el ciclo 5 con momento de 8.24 kN-m y $\theta = 0.12$ mrad; la pendiente de las ramas de carga y descarga se mantiene elevada, lo que refleja un comportamiento aún cercano al rango elástico. En el segundo grupo (Apéndice 18b, ciclos 6-10), el momento resistido aumenta hasta el valor de 26.94 kN-m, mientras que la rotación empieza a crecer de forma más pronunciada, siendo esta de 1.91 mrad en el sentido negativo, generando lazos progresivamente más alargados en esa dirección; adicionalmente, se aprecia una reducción de la pendiente inicial de las curvas, asociada a la pérdida de rigidez de la unión.

En la tercera etapa (Apéndice 18c, ciclos 11–15) se revela el acentuamiento de la asimetría, con rotaciones en sentido negativo que alcanzan 39.32 mrad (ciclo 15), superiores a los desarrollados en sentido positivo (del orden de 0.05 mrad). Además, a inicios del ciclo 11 se alcanza el momento de plastificación efectivo (~ 30 kN-m), el cual se mantiene constante hasta el primer ciclo del paso 14.

La superposición de los quince ciclos (Fig. 8) permite observar con claridad la transición desde un comportamiento inicial simétrico y de alta rigidez hacia una respuesta marcadamente asimétrica en las etapas finales del ensayo. La rigidez rotacional, calculada como la relación entre el momento y la rotación máxima en el sentido dominante, se redujo de 96894.2 kN-m/rad en el paso 1 a 768 kN-m/rad en la etapa 11-15, es decir, una pérdida cercana al 99%.

Figura 8.

Respuesta global momento-rotación de la unión viga-columna reforzada



5. Conclusiones

El ensayo cíclico realizado sobre la unión viga-columna reforzada externamente con tejido de fique modificado superficialmente con óxido de grafeno (FiqueGO) permitió caracterizar experimentalmente su respuesta ante demandas crecientes de desplazamiento, mediante un montaje instrumentado con transductores de desplazamiento lineal para el registro de distorsión y rotación y un protocolo de carga cuasi-estáticos basado en las recomendaciones del FEMA 461.

El espécimen alcanzó una deriva máxima de 5.70 %, con valores máximos de 20.13 kN en fuerza y 85.56 mm en desplazamiento, evidenciando que el sistema de reforzamiento permitió mantener la integridad de la unión hasta dicho nivel de deformación, antes de que la magnitud del daño observado en la unión hiciera necesario detener el ensayo para evitar el colapso del espécimen.

A partir del monitoreo visual realizado durante el ensayo cíclico fue posible establecer la evolución del daño y los mecanismos de falla predominantes en el espécimen. En este sentido, el seguimiento de la progresión del daño evidenció un comportamiento diferencial entre los elementos de la unión. La viga permaneció sin daño visible hasta el paso 10 ($\Delta=2.07\%$), cuando aparecieron las primeras fisuras en el extremo del reforzamiento y en la interfaz viga-columna. La columna y el nudo mostraron sus primeras manifestaciones de daño en el paso 11 ($\Delta=2.89\%$), con fisuras de orientación predominantemente diagonal en el nudo, característica del mecanismo de falla por cortante que gobernó el estado final del espécimen. Al retirar el FiqueGO se confirmó que el tejido no impidió la formación o propagación de fisuras en la vigas o columnas; sin embargo, contribuyó a mantener el concreto confinado y a retardar su apertura completa durante las etapas de mayor deformación, favoreciendo una evolución del daño gradual, sin mecanismos de falla súbita.

El análisis conjunto de las tres respuestas histeréticas caracterizadas (fuerza-desplazamiento, fuerza-distorsión angular del nudo y momento-rotación) permitió interpretar de manera integral la evolución mecánica de la unión. En particular, la respuesta global fuerza-desplazamiento evidenció un comportamiento cíclico estable, con una degradación progresiva de la rigidez cercana al 75 %, lo que indica una evolución gradual del daño sin pérdidas repentinas. Tanto la rigidez del panel nodal como la rigidez rotacional presentaron pérdidas considerablemente mayores, del 96 % y del 99 % respectivamente, lo que confirma que la mayor concentración de deformaciones y de daño ocurrió en la región nodal, consistente con la ausencia de refuerzo transversal en dicha zona. La respuesta momento-rotación reveló además una asimetría creciente en las etapas finales, con rotaciones considerablemente mayores en un sentido de carga que en el otro; no obstante, la unión mantuvo su capacidad de momento alrededor de 30 kN-m desde el inicio del ciclo 11 hasta el primer ciclo del paso 14, evidenciando una reserva de resistencia posterior a la plastificación.

En conjunto, los resultados confirman que el reforzamiento con FiqueGO, si bien no impide la fisuración del concreto, contribuye a controlar su progresión y a mantener un comportamiento dúctil y estable de la unión bajo carga cíclica, incluso en un espécimen con un detallado intencional deficiente en el nudo. Estos hallazgos aportan evidencia experimental sobre el desempeño cíclico de sistemas de reforzamiento con fibras vegetales en uniones viga-columna, un campo hasta ahora poco explorado frente a los sistemas FRP convencionales, y constituyen una base para futuras investigaciones orientadas a comparar su desempeño con otros materiales compuestos y a profundizar en su aplicación como alternativa sostenible para la rehabilitación sísmica de estructuras de concreto reforzado.

Referencias Bibliográficas

- Akguzel, U., & Pampanin, S. (2012). Assessment and Design Procedure for the Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Beam-Column Joints using FRP Composite Materials. *Journal of Composites for Construction*, 16(1), 21-34. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000242](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000242)
- Basu, P., Kumar, R., & Das, M. (2023). Natural and manmade fibers as sustainable building materials. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.222>
- Capataz, K., & Villamizar, S. (2024). *Protocolo de prueba para la evaluación sistemática de la respuesta ante esfuerzos y deformaciones de una conexión viga-columna reforzada con malla de fibra de fique con oxido de grafito*. Universidad Industrial de Santander.
- Cía. General de Aceros. (2024). *Acero Grado Estructural: Lámina A36* (FTC-CGA-A36 Rev. 1).
- Correa, N. (2017). *COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS CÍCLICAS DEL REFORZAMIENTO DE UNIONES VIGA COLUMNA DE CONCRETO REFORZADO CONSTRUIDAS ANTES DEL CÓDIGO DE 1984 UTILIZANDO CFRP*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- De Moya Abril, L. S. (2021). *Exploración de la viabilidad para uso de la fibra de fique como material sostenible en el reforzamiento del concreto. Un enfoque eco-amigable como alternativa de la fibra de polipropileno*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80955>
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. (2007). *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*.
- García Vega—*Soluciones integrales para la industria y la construcción*. (s. f.). Recuperado 25 de julio de 2026, de <https://garciavega.co/>

Gonzáles, F., Sichacá, S., & Tibaduiza, C. (2026). *Predicción numérica del comportamiento no lineal de una unión viga-columna reforzada con malla de fibra de fique modificada con óxido de grafeno*. Universidad Industrial de Santander.

Laverde, V., Benjumea, J., & Rincón, M. (2025). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review | Request PDF. *ResearchGate*.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>

López, A. (2018). *EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO CON PISO BLANDO INCORPORANDO DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO CAJA METALICA*. Universidad Catolica «Andres Bello».

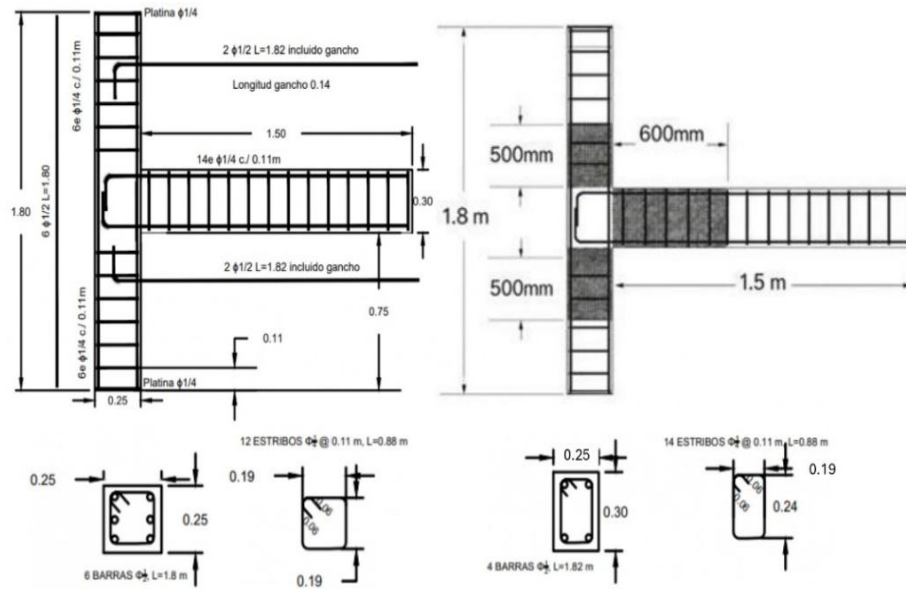
Mosquera Perez, A. M. (2024). *Fibras naturales de mayor uso y potencial en la industria de la construcción*. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/57778>

Sikadur®-301. (s. f.). Recuperado 25 de julio de 2026, de
<https://dom.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/adhesivo-pegas-estructural/sikadur-301.html>

Sriram, M., & Aswin Sidhaarth, K. R. (2022). Various properties of natural and artificial fibers with cementitious composites in hybrid form – A review. *Materials Today: Proceedings, International Conference on Latest Developments in Materials & Manufacturing*, 60, 2018-2025. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.266>

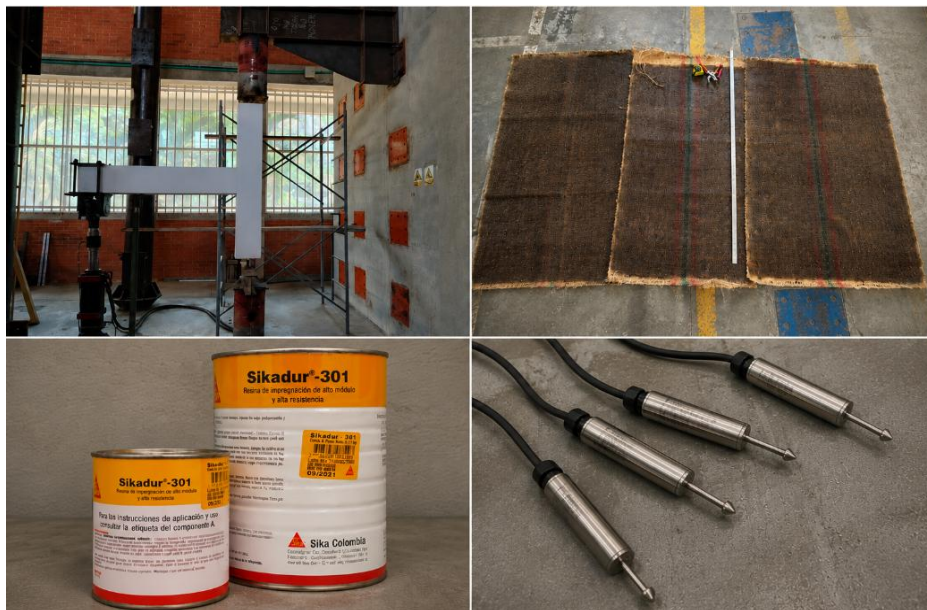
Apéndices

Apéndice 1. Dimensiones y detalles de diseño de unión Viga-Columna

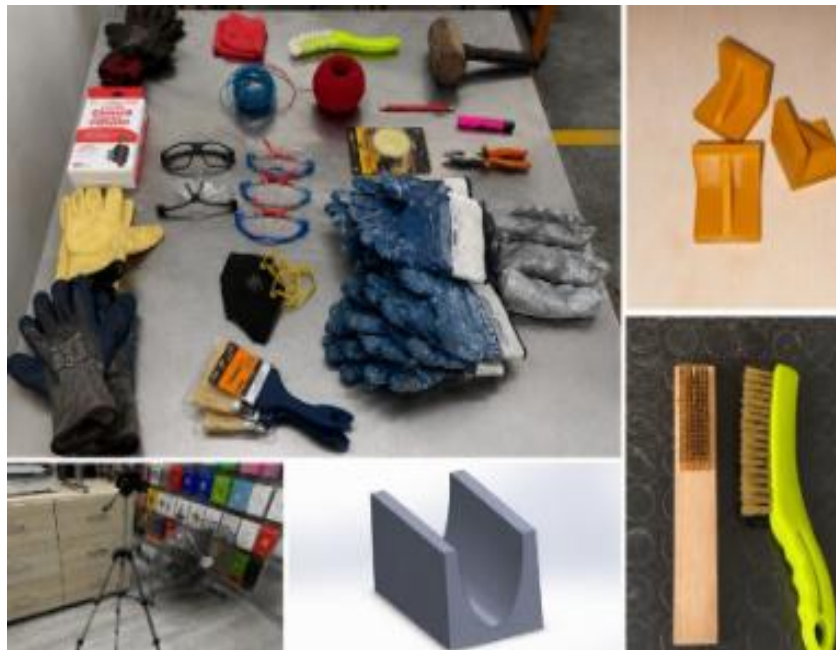


Nota: Tomado de Villamizar & Capataz, 2022

Apéndice 2. Componentes principales del montaje experimental



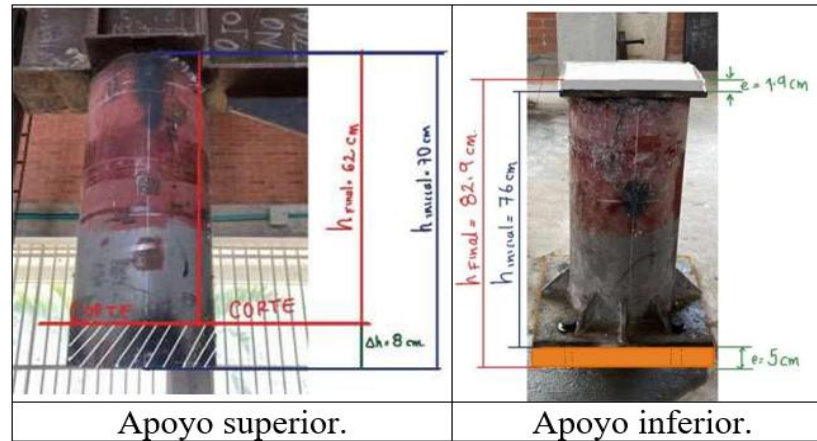
Apéndice 3. Recursos materiales empleados en el ensayo experimental



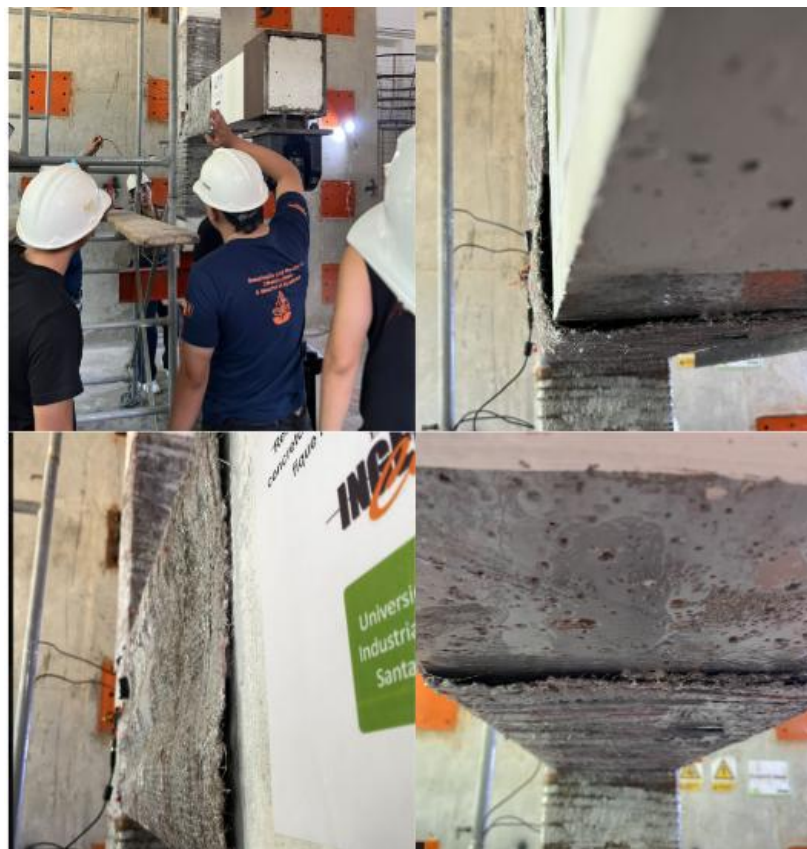
Apéndice 4. Adecuación del montaje

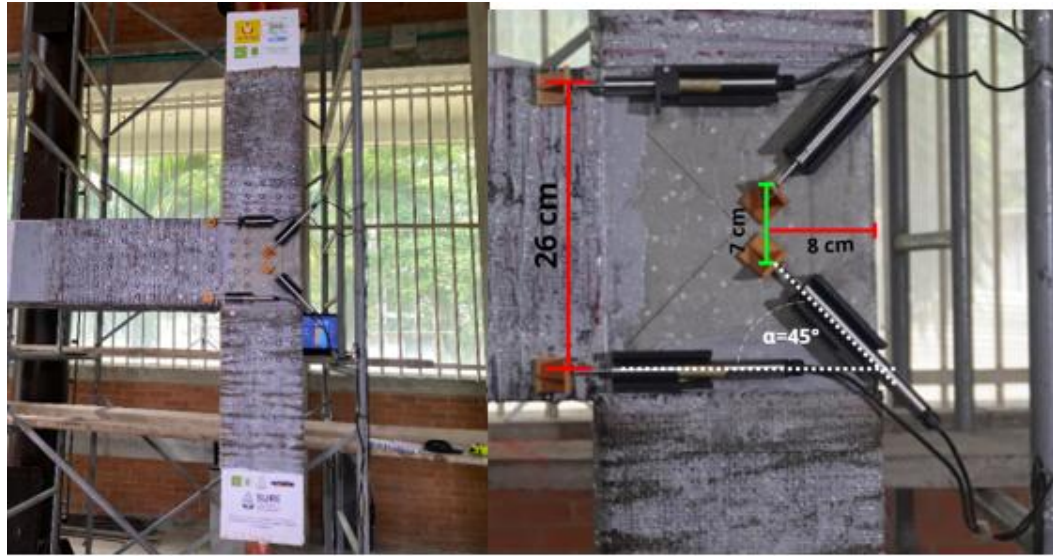


Apéndice 5. Propuesta solución montaje experimental



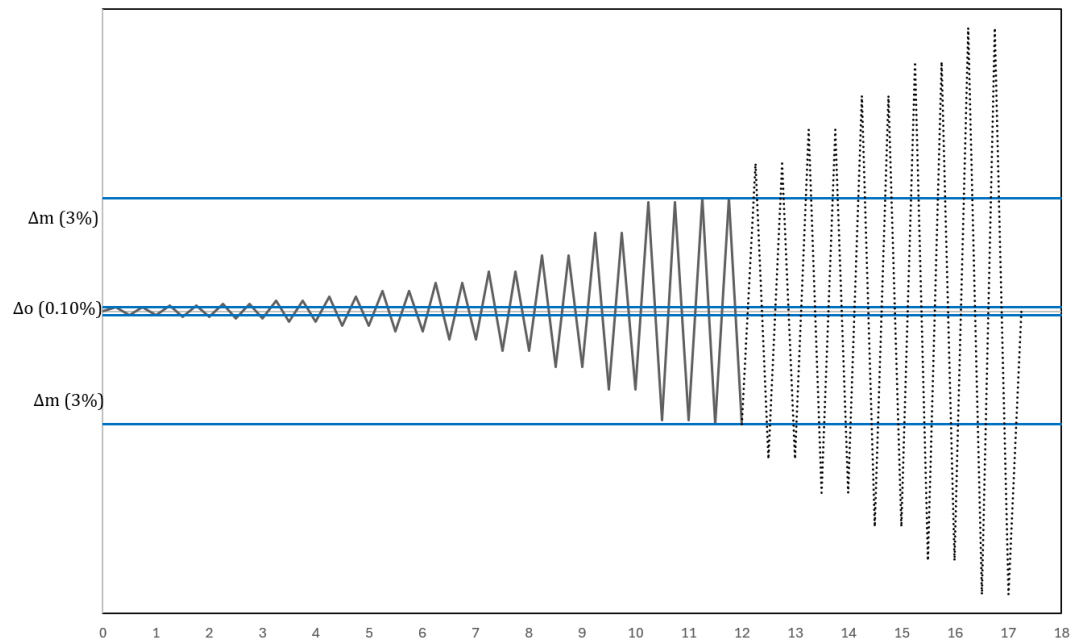
Apéndice 6. Observación de pliegues en el refuerzo externo de la viga



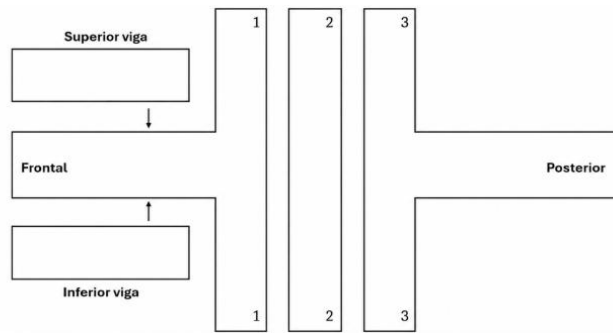
Apéndice 7. (a) Equipos LVDT instalados, (b) Distribución equipos en el nudo

(a)

(b)

Apéndice 8. Historial de carga con control de desplazamiento

Apéndice 9. Definición de las vistas del espécimen



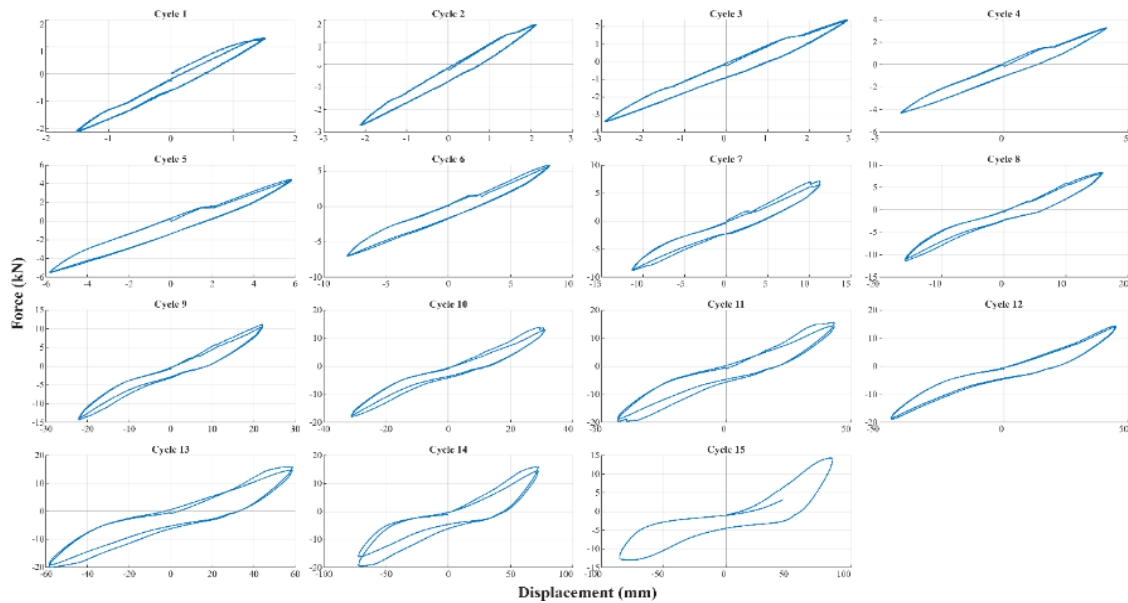
1. Vista frontal. 2. Vista trasera 3. Vista posterior.



Apéndice 10. Seguimiento progresión de daño



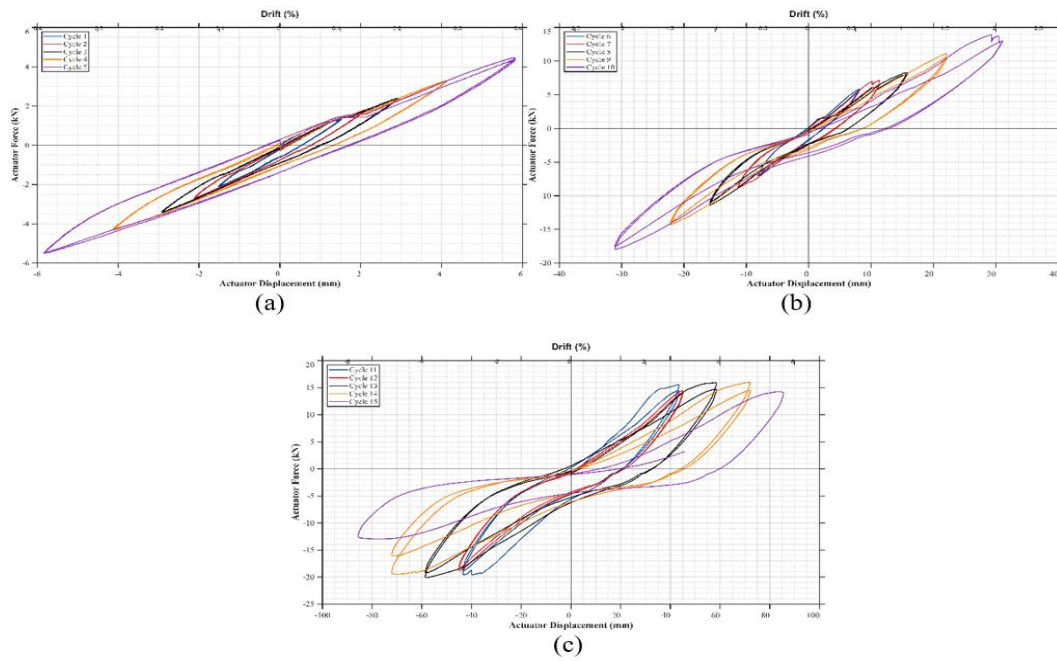
Apéndice 11. Respuesta histerética individual correspondiente a los quince ciclos de carga aplicados durante el ensayo



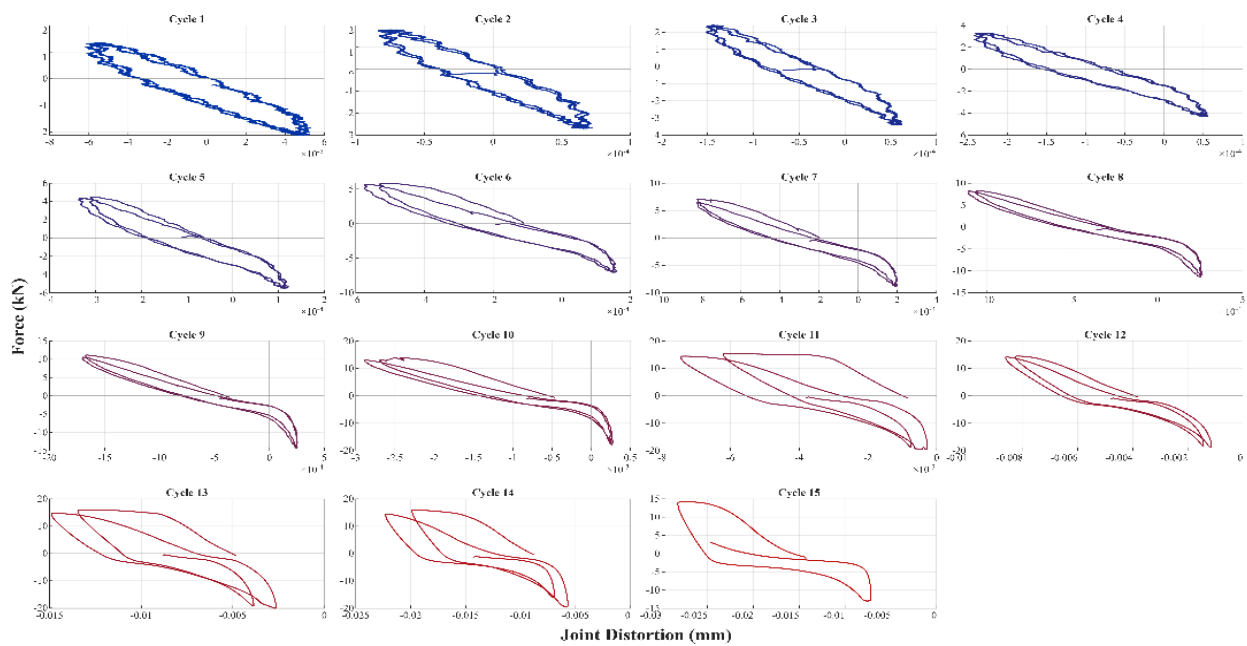
Apéndice 12. Valores máximos de fuerza-desplazamiento en el análisis de histéresis en cada uno de los ciclos

Ciclo	U (mm)	F (kN)	Rigidez Histerética (kN/mm)
1	1.52	2.12	1.39
2	2.12	2.70	1.27
3	2.93	3.42	1.17
4	4.13	4.32	1.05
5	5.83	5.49	0.94
6	8.13	7.04	0.87
7	11.34	8.81	0.78
8	15.85	11.36	0.72
9	22.16	14.27	0.64
10	31.08	17.96	0.58
11	43.50	19.61	0.45
12	45.10	18.80	0.42
13	58.59	20.13	0.34
14	72.08	19.50	0.27
15	85.56	14.29	0.17

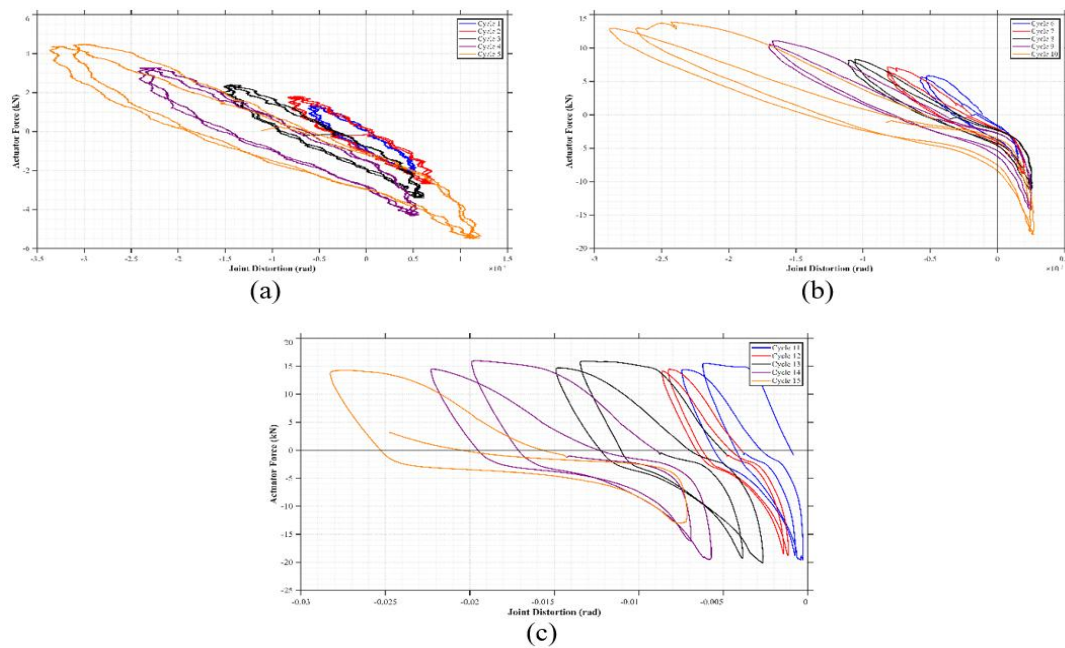
Apéndice 13. Evolución de la respuesta histerética agrupada por etapas: (a) ciclos 1-5, (b) ciclos 6-10 y (c) ciclos 11-15



Apéndice 14. Respuesta fuerza-distorsión individual correspondiente a cada ciclo



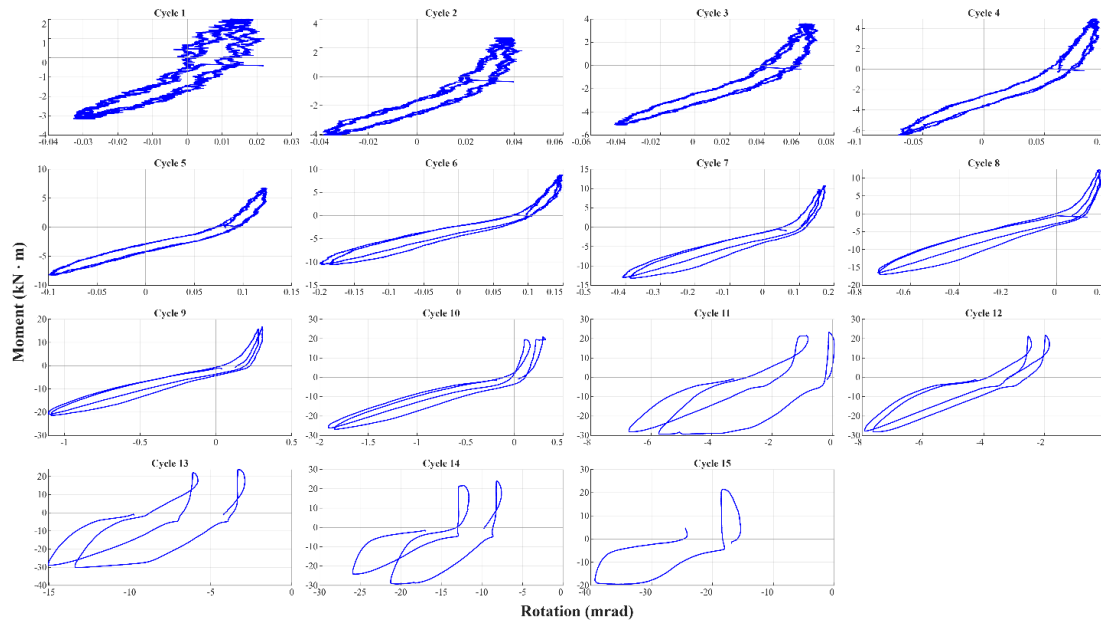
Apéndice 15. Evolución de la respuesta fuerza-distorsión agrupada por etapas del protocolo de carga: (a) ciclos 1-5, (b) ciclos 6-10 y (c) ciclos 11-15



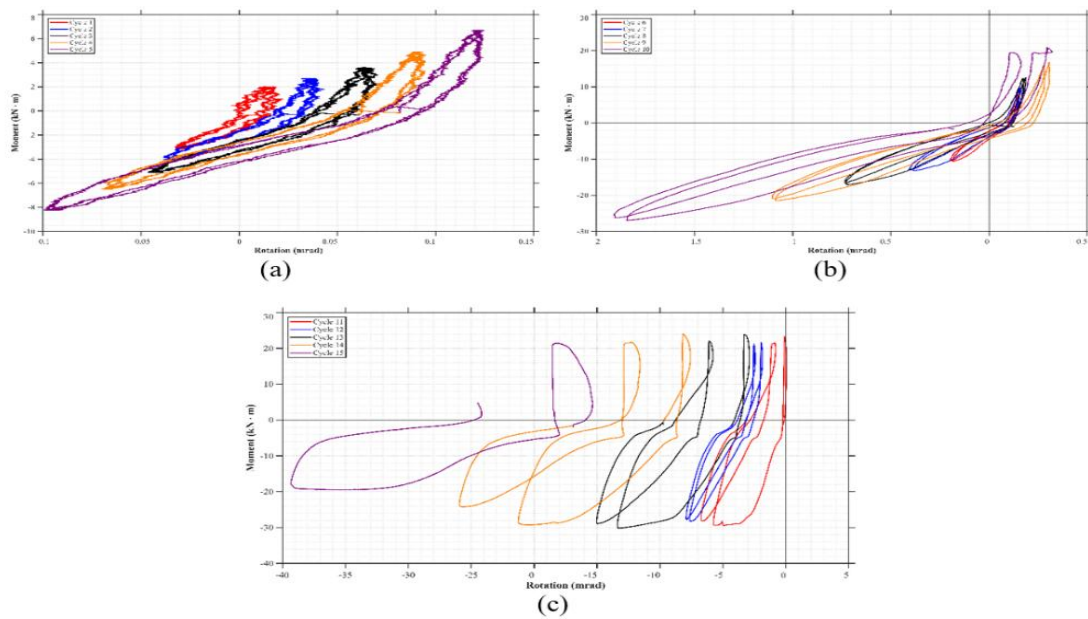
Apéndice 16. Valores máximos de fuerza-distorsión en cada uno de los ciclos

Ciclo	Distorsión (mrad)	F (kN)	Rigidez (kN/mrad)
1	0.06	2.12	34.27
2	0.08	2.70	32.39
3	0.15	3.42	22.55
4	0.24	4.32	17.79
5	0.34	5.49	16.30
6	0.58	7.04	12.24
7	0.82	8.81	10.69
8	1.11	11.36	10.21
9	1.70	14.27	8.38
10	2.89	17.96	6.22
11	7.46	19.61	2.63
12	8.63	18.80	2.18
13	14.91	20.13	1.35
14	22.31	19.50	0.87
15	28.26	14.29	0.51

Apéndice 17. Respuesta momento-rotación individual correspondiente a los quince ciclos de carga aplicados durante el ensayo



Apéndice 18. Evolución de la respuesta momento-rotación agrupada por etapas del protocolo de carga: (a) ciclos 1-5, (b) ciclos 6-10 y (c) ciclos 11-15



Apéndice 19. Valores máximos de momento-rotación en cada uno de los ciclos

Ciclo	Rotación (mrad)	M (kN-m)	Rigidez (kN/mrad)
1	0.03	3.18	96.89
2	0.04	4.06	93.92
3	0.07	5.13	72.66
4	0.10	6.48	68.16
5	0.12	8.24	66.19
6	0.20	10.56	52.90
7	0.41	13.21	32.29
8	0.74	17.04	23.17
9	1.11	21.40	19.37
10	1.91	26.94	14.10
11	6.74	29.42	4.37
12	7.92	28.20	3.56
13	15.03	30.20	2.01
14	25.93	29.25	1.13
15	39.32	21.43	0.55