

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 óxido de grafito

Karen Julieth Capataz Castillo y Luis Santiago Villamizar Rojas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

PhD en ciencias técnicas

Codirector

German Adolfo Diaz Ramirez

PhD en ingeniería de materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, por habernos brindado la oportunidad de completarlo con éxito; y a nuestras familias por su constante apoyo y motivación a lo largo de este proceso. Su aliento nos ha impulsado a seguir adelante y a alcanzar nuestras metas.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestra universidad por brindarnos de conocimiento y habilidades para poder consumir este logro.

A nuestro director y codirector de proyecto por guiarnos en la realización del proyecto y a todos nuestros amigos quienes nos apoyaron moral y académicamente frente a los diferentes obstáculos presentados.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco Teorico.....	18
2.1 Respuesta estructural de la conexión	18
2.1.1 Fuerzas internas en la conexion	18
2.1.1 Resistencia a flexion	19
2.1.3 Resistencia a cortante de la Viga	20
2.1.4 Diagrama de interacción de la columna.....	21
2.1.5 Diagrama Momento-Curvatura.....	22
2.1.6 Diagrama Momento-Curvatura.....	23
2.2 Material de refuerzo externo.....	24
3. Protocolo de prueba	24
3.1 Dimensionamiento y diseño de la viga, columna y conexión.....	24
3.2 Fabricación de la probeta.....	25
3.3 Cálculo de la respuesta estructural teórica de la probeta	25
3.4 Instrumentos de medición	26
3.5 Diseño de montaje en el laboratorio	26
3.6 Determinación del protocolo de carga.....	27
3.7 Selección del sistema de medición de respuestas	28

3.8	Ejecución del ensayo en la probeta sin refuerzo externo	29
3.9	Definición del material de refuerzo externo	30
3.10	Proceso de reforzamiento externo.....	30
3.11	Ejecución del ensayo en la probeta con refuerzo externo.....	31
3.12	Tratamiento de datos y cálculos de la respuesta experimental de la conexión viga-columna sin y con reforzamiento exterior.	31
3.12.1	Rotación del nodo	31
3.12.1	Distorsión del nodo.....	32
3.12.4	Curvatura en la viga.....	33
3.12.5	Momento curvatura en la viga	34
4.	Aplicación del protocolo en un caso real.....	35
4.1	Dimensionamiento y diseño de la viga, columna y conexión.....	35
4.2	Fabricación de la probeta.....	36
4.3	Calculo de la respuesta estructural teórica de la probeta	37
4.3.1	Fuerzas internas en la conexión	37
4.3.2	Resistencia a Flexión	38
4.3.3	Resistencia a Cortante de la Viga	39
4.3.4	Diagramas de interacción Columna	40
4.3.5	Diagrama Momento curvatura	40
4.3.6	Condición columna Fuerte-Viga débil.....	41
4.3.7	Distribución de esfuerzos.....	42
4.4	Instrumentos de medición	42
4.5	Diseño de montaje en el laboratorio	42

4.6	Determinación del protocolo de carga	43
4.7	Selección del sistema de medición de respuestas	43
4.8	Definición del material de refuerzo externo	43
4.9	Proceso de reforzamiento externo.....	44
5.	Conclusiones	45
6.	Recomendaciones	46
	Referencias bibliográficas.....	47
	Apéndices.....	48
	49

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Cantidad de concreto	36
Tabla 2 Cantidad de acero.....	37
Tabla 3 Propiedades geométricas y mecánicas de la probeta	38
Tabla 4 Sumatoria de fuerzas y momentos	39
Tabla 4 Valores de puntos del diagrama de momento curvatura.....	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Diagrama de cuerpo libre en el interior de una conexión viga columna	18
Figura 2 Distribución de deformaciones unitarias y esfuerzos para una sección rectangular a flexión	20
Figura 3 Diagrama de interacción de columna	21
Figura 4 Diagrama de momento curvatura	23
Figura 5 Esquema de montaje.....	27
Figura 6 Protocolo de carga cicica en porcentaje de deriva.....	28
Figura 7 Disposición de transductores lineales para medición de la rotación del nodo	28
Figura 8 Disposición de transductores lineales para medición de distorsión del nodo	29
Figura 9 Disposición de transductores lineales para medición de la rotación de la viga.....	29
Figura 10 Esquema de reforzamiento exterior.....	30
Figura 11 Rotación del nodo.....	31
Figura 12 Distorsión del nodo.....	32
Figura 13 Rotación y distorsión del nodo	33
Figura 14 Curvatura de la viga.....	33
Figura 15 Esquema de diagramas momento curvatura	34
Figura 16 Elemento fundido	36
Figura 17 Diagrama de fuerzas y deformaciones unitarias.....	38
Figura 18 Diagrama de interacción en la (a) dirección x y (b) dirección y	40
Figura 19 Diagrama de momento curvatura de la viga.....	41

Figura 20 Distribución de esfuerzos en la viga modelado en SAP2000..... 42

Figura 21 Historial de carga cíclica incremental con desplazamientos en mm 43

Figura 22 Esquema de refuerzo exterior con malla de hilo de fique impregnada con oxido de grafito..... 44

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Plano conexión viga columna y detalle de refuerzo	48
Apéndice B. Plano montaje en laboratorio	49

Glosario

Conexión: punto donde dos o más elementos estructurales se unen y convergen fuerzas de compresión, tensión y cortante.

Resistencia: es la capacidad que tiene un material o estructura para resistir o soportar fuerzas externas sin deformarse excesivamente, romperse o ceder.

Protocolo: es un conjunto de reglas, pasos y estándares que establecen la forma en que se lleva a cabo un experimento.

Diagrama momento curvatura: es un diagrama utilizado para visualizar la respuesta de una viga, columna u otro elemento estructural sometido a cargas. Este diagrama representa la relación entre el momento flector y la curvatura a lo largo del elemento estructural.

Fatiga: es una forma en que un material experimenta daño o falla debido a la aplicación repetida de cargas o tensiones.

Corrosión: es un proceso natural en el que un material (especialmente los metales) se degrada gradualmente debido a reacciones químicas presentes en su entorno.

Probeta: muestra de material o elemento con el propósito de analizar y medir sus propiedades.

LVDT: es un tipo de transductor electromecánico utilizado para medir desplazamientos lineales

Esfuerzo: fuerzas internas que actúan dentro de un material en respuesta a las cargas aplicadas, se representan en unidades de fuerza por unidad de área

Resumen

Título: 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 óxido de grafito*

Autor: Karen Julieth Capataz Castillo y Luis Santiago Villamizar Rojas **

Palabras Clave: Conexión viga-columna, desempeño estructural, fibra de fique, mejora de resistencia, método de reparación, óxido de grafito, protocolo de prueba.

Descripción: Este artículo presenta un protocolo de prueba diseñado para comparar la respuesta estructural de conexiones viga-columna en condiciones óptimas y deterioradas. El enfoque principal se centra en la determinación de la respuesta estructural de la conexión viga-columna, el desarrollo de un método de reparación externo y la implementación de un procedimiento de laboratorio que permite evaluar la deformación completa en el nodo y la curvatura de la viga bajo un protocolo de carga específico. El método de reparación externo propuesto utiliza malla de fibra de fique impregnada con óxido de grafito para rehabilitar conexiones viga-columna afectadas. Este protocolo busca proporcionar una evaluación exhaustiva del desempeño estructural, resaltando las mejoras resultantes del refuerzo externo con materiales específicos mediante diagramas de momento-curvatura.

**Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director. Ricardo Alfredo Cruz Hernandez. Doctor of technical sciences. Co-director: Germán Adolfo Díaz Ramírez. Doctor in Materials Engineering.

Abstract

Title: Test protocol for the systematic evaluation of the response to loads and deformations of a beam-column connection reinforced with fique fiber mesh with graphite oxide.*

Author(s): Karen Julieth Capataz Castillo y Luis Santiago Villamizar Rojas ††

Key Words: Beam-column connection, fique fiber mesh, graphite oxide, structural response, testing protocol, strength improvement, repair method.

Description: This article presents a testing protocol designed to compare the structural response of beam-column connections under optimal and deteriorated conditions. The main focus is on determining the structural response of the beam-column connection, developing an external repair method, and implementing a laboratory procedure to evaluate the complete deformation at the node and the curvature of the beam under a specific loading protocol. The proposed external repair method uses a jute fiber mesh impregnated with graphite oxide to rehabilitate affected beam-column connections. This protocol aims to provide a comprehensive assessment of structural performance, highlighting the improvements resulting from external reinforcement with specific materials through a moment-curvature diagram.

* Degree Work

†† Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director. Ricardo Alfredo Cruz Hernandez. Doctor of technical sciences. Co-director: Germán Adolfo Díaz Ramírez. Doctor in Materials Engineering.

Introducción

Las conexiones viga-columna en estructuras de concreto reforzado constituyen puntos críticos donde convergen fuerzas de compresión, tensión y cortante. La capacidad de estas conexiones para resistir cargas y deformaciones puede verse comprometida debido a la acción del tiempo, la corrosión, la fatiga o el sobrecargamiento. En este contexto, la necesidad de reforzar las uniones viga-columna deterioradas adquiere una relevancia significativa en la prevención de posibles colapsos estructurales.

Una estrategia emergente para abordar el deterioro en estas conexiones es el refuerzo exterior. A lo largo de las últimas décadas, diversos estudios de investigación se han llevado a cabo con el objetivo de mejorar las deficiencias en las uniones viga-columna de concreto reforzado mediante esta técnica. En el año 2002, se realizaron prototipos de pórticos de hormigón diseñados para representar las conexiones viga-columna en pórticos planos. (Li et al., 2002) Los ensayos investigaron el impacto del refuerzo de fibra de polímero reforzado (FRP) en las superficies externas adyacentes a la conexión viga-columna bajo carga estática, revelando un fortalecimiento y rigidez mejorados de los pórticos de concreto.

En el año 2000, se llevó a cabo una investigación sobre la aplicación de compuestos de polímeros reforzados con fibra a uniones exteriores de vigas y columnas, evidenciando un aumento significativo en la capacidad de momento cuando se emplearon laminados de FRP en comparación con muestras de control sin refuerzo. (Parvin & Granata, 2000)

En el año 2002, se presentaron técnicas para mejorar las uniones viga-columna de hormigón armado mediante el uso de láminas de polímero reforzadas con fibra de vidrio, evidenciando un cambio de la falla frágil a un modo de falla dúctil en las probetas rehabilitadas. (El-Amoury & Ghobarah, 2002)

En el año 2005, se evaluó el rendimiento de compuestos de polímero reforzado con fibra de carbono para la reparación sísmica de estructuras de hormigón armado. (Balsamo et al., 2005) Esta investigación proporcionó principios de diseño para la reparación sísmica, comparando estructuras originales y reparadas en términos de desempeño global y local.

Más recientemente, en el año 2020, se llevó a cabo una investigación experimental que comparó el rendimiento de uniones viga-columna reforzadas exteriormente mediante una técnica de confinamiento con láminas de polímero reforzado con fibra. (Gunaselvi et al., 2020) Los resultados demostraron la resistencia de las uniones ante múltiples cargas cíclicas sin presentar fallas frágiles.

En 2022, en la Universidad Industrial de Santander, se realizó un ensayo de tracción en cuatro tipos de probetas de malla de fique. (Mosquera, 2022) Se evaluaron diferentes configuraciones de hilos y densidades. Se concluyó que la configuración de hilo doble incrementa significativamente la resistencia a tracción de la malla de fique cruda. Además, se observó un aumento considerable en la resistencia a tracción de tejidos modificados con PU-OG (poliuretano en óxido de grafito) en comparación con los no modificados. La mejor configuración identificada

fue el Tipo 4: TR02: densidad 8 x 8 hilos por decímetro, hilo doble 1.14 Nm con 1.5 vueltas x pulgada, Recubierto con PU-OG.

En este artículo, se propone el uso de mallas de fibra de fique impregnadas con óxido de grafito como material innovador de refuerzo. La elección de la malla de fibra de fique como no solo se basa en sus propiedades mecánicas, sino también en sus beneficios ambientales y económicos para la región de Santander. La fibra de fique es reconocida por su sostenibilidad y baja huella ecológica. La incorporación de óxido de grafito en esta malla no solo mejora sus propiedades mecánicas, sino que también abre la puerta a innovadoras soluciones tecnológicas con nanomateriales en el ámbito de la ingeniería.

Sin embargo, hasta la fecha, la ausencia de protocolos de prueba estandarizados y apropiados para evaluar conexiones reforzadas con nuevos materiales ha sido una limitación significativa en la validación y adopción generalizada de estas soluciones. Este vacío en la investigación subraya la importancia de proponer un método riguroso y confiable de evaluación que contribuya al desarrollo de estándares para futuras aplicaciones en ingeniería estructural. En este sentido, el presente artículo busca llenar ese vacío proponiendo un protocolo sistematizado que pueda ser usado para evaluar conexiones reforzadas con nuevos materiales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un protocolo de prueba que permita la evaluación sistemática de la respuesta ante esfuerzos y deformaciones de una conexión viga-columna reforzada externamente con malla de fibra de fique impregnada con óxido de grafito.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los parámetros críticos que afectan la respuesta de la conexión viga-columna, como la carga máxima soportada y las deformaciones máximas permitidas.

Establecer un método de reparación que mejore la capacidad a flexión de una conexión viga-columna, dotando a los elementos de mayor capacidad de deformación a partir de la definición de la cantidad y orientación óptimas de la malla de fibra de fique con óxido de grafito.

Desarrollar una metodología de prueba que incluya la aplicación controlada de cargas para evaluar el comportamiento estructural de la conexión viga-columna reforzada, registrando distribución de esfuerzos y deformaciones bajo diferentes niveles de carga.

2. Marco Teórico

2.1 Respuesta estructural de la conexión

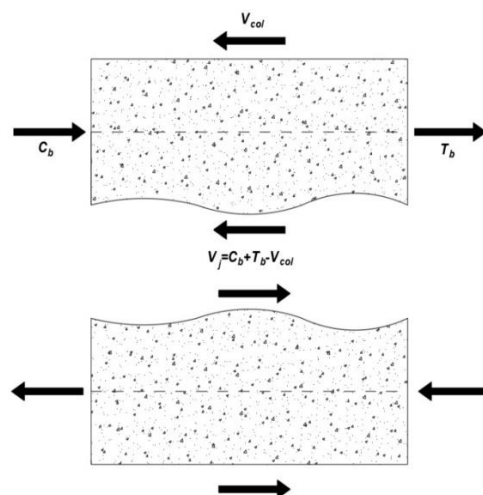
Comprender la respuesta estructural de una conexión viga-columna es de vital importancia para determinar su capacidad estructural y establecer las solicitaciones a las que puede someterse en un laboratorio.

2.1.1 Fuerzas internas en la conexión

Las fuerzas internas en una conexión viga-columna son esenciales para comprender el comportamiento estructural y garantizar la integridad de la edificación. En este contexto, la conexión viga-columna, que es fundamental en sistemas estructurales, experimenta diversas fuerzas internas debido a cargas externas, deformaciones y condiciones de carga. El análisis de estas fuerzas es crucial para diseñar conexiones optimas y prevenir posibles fallas estructurales. En la figura 1 se presenta el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas internas presentes en una conexión viga-columna.

Figura 1

Diagrama de cuerpo libre en el interior de una conexión viga columna



$$V_j = T_b + C_b - V_{col} \quad (1)$$

$$T_b = C_b \quad (2)$$

$$V_{col} = 2(1.25M_{nb})/L_c \quad (3)$$

Donde:

T_b : Fuerza de tensión interna en la viga

C_b : Fuerza de compresión interna en la viga

M_{nb} : Capacidad de momento en la viga

V_{col} : Fuerza de cortante en la columna

L_c : Longitud columna

Se debe tener en cuenta que el refuerzo longitudinal de las vigas se asume que alcanza una fuerza igual a $1.25A_s f_y$; la viga tiene una fuerza axial igual a cero y las fuerzas probables de compresión y tensión en la viga en un lado del nudo se consideran iguales

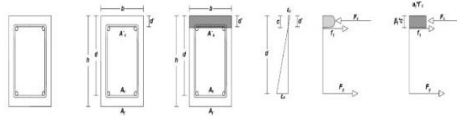
2.1.1 Resistencia a flexión

El cálculo del refuerzo a flexión se hace con las dimensiones de la estructura existente, teniendo en cuenta las propiedades de los materiales que la componen. Prevalecen los criterios de Bernoulli, es decir: las secciones planas permanecen planas después de la aplicación de las cargas, las deformaciones son linealmente proporcionales a su distancia al eje neutro, se desprecia la resistencia a la tensión del concreto, la deformación máxima del concreto es 0.003, se debe garantizar la perfecta adherencia entre el sistema reforzado con fibra y el sustrato de concreto.

En la figura 2 se muestra la distribución interna de la deformación unitaria y los esfuerzos en el concreto, en el acero y en la fibra de refuerzo, con este diagrama es posible realizar equilibrio de fuerzas y momentos para una sección rectangular sometida a flexión y obtener un momento flector que refleje la tendencia de la conexión a flexionarse bajo la aplicación de cargas.

Figura 2

Distribución de deformaciones unitarias y esfuerzos para una sección rectangular a flexión



2.1.3 Resistencia a cortante de la Viga

La resistencia a cortante en la conexión se refiere a la capacidad de la viga para resistir fuerzas que actúan en sentido horizontal y que intentan cortar la estructura. El reforzamiento externo a cortante es posible mediante la colocación de láminas de refuerzo con las fibras orientadas de forma perpendicular al eje longitudinal del elemento. Estas láminas pueden envolver en su totalidad al elemento o simplemente estar colocadas en ciertas caras. Las láminas pueden ubicarse continuas o con ciertos intervalos.

La resistencia a cortante de la viga es:

$$V_b = V_c + V_s + V_{FR} \quad (4)$$

Donde:

V_c : Cortante resistido por el concreto

V_s : Cortante resistido por el acero

V_{FR} : Cortante resistido por la fibra de refuerzo (Si aplica)

Según NSR-10 título C (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010)

$$V_c = 0.17\sqrt{f'_c} b_w d \quad (5)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (6)$$

Donde:

A_v : área de refuerzo para cortante

s : Espaciamiento

f_{yt} : Fluencia del acero

b_w : Ancho de la conexión

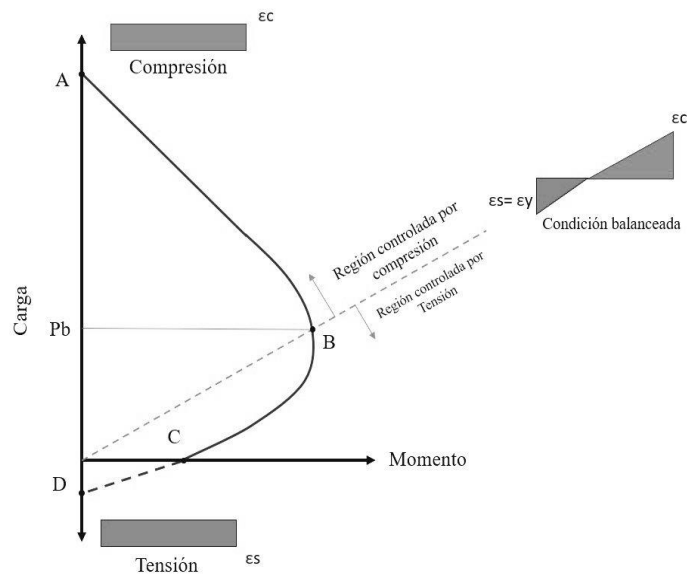
d : Largo de la conexión

2.1.4 Diagrama de interacción de la columna

El diagrama de interacción de una columna ilustra la correspondencia entre la carga axial y el momento flector que afectan a la columna. Esta representación gráfica se emplea para analizar el desempeño y la capacidad de carga de la columna. Un diagrama de interacción de columna se ilustra en la figura 3.

Figura 3

Diagrama de interacción de columna



En el diagrama se resaltan 4 puntos importantes: Compresión axial pura (punto A): Representa la máxima carga de compresión axial que la columna puede resistir. Condición balanceada (punto B): Se alcanza cuando la tensión de compresión en el concreto y el refuerzo de tracción alcanzan simultáneamente sus límites. La falla del concreto y el cedimiento del acero ocurren al mismo tiempo. Flexión pura (punto C): La sección está sometida a un momento flector M , mientras que la carga axial es $P = 0$. La falla ocurre de manera similar a una viga sujeta solo a un momento flector. Tensión axial pura (punto D): Representa la máxima carga de tensión axial que la columna puede soportar.

2.1.5 Diagrama Momento-Curvatura

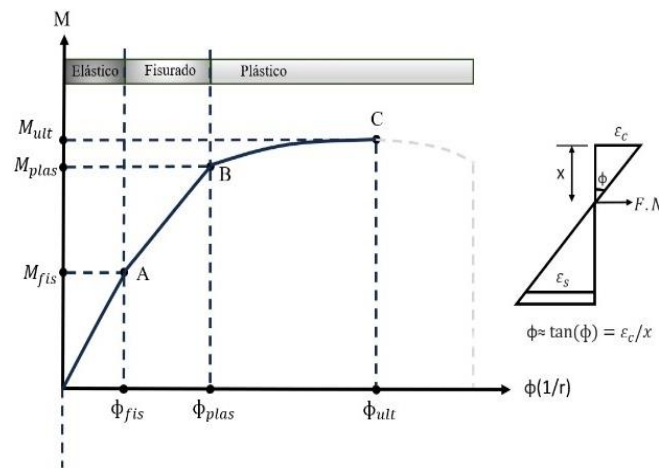
El diagrama momento-curvatura permite visualizar que tan dúctil y resistente es un miembro. Además, el área bajo la curva representa la energía interna, la parte bajo la región elástica es la energía de deformación acumulada en el miembro, mientras que el área bajo la región de post-fluencia corresponde a la energía disipada en las deformaciones plásticas del mismo. (Eliud Hernández, 2009)

De la relación momento-curvatura se obtiene la máxima capacidad a flexión del elemento M_u , la curvatura última ϕ_{ult} , así como también sus respectivos momento y curvatura de fluencia, de tal forma que estas cantidades pueden compararse con las demandas que se tienen en el diseño. Por lo que una de las principales aplicaciones de conocer estos valores es calcular la ductilidad de curvatura μ_ϕ de la sección del elemento estructural a diseñar, ya que, la ductilidad de curvatura permite conocer si el comportamiento de la sección es dúctil o no.

Los puntos fundamentales en el diagrama momento-curvatura son los siguientes: el punto A, que representa el agrietamiento de la sección; el punto B, indicativo de la fluencia de alguno de los dos materiales, ya sea acero o concreto; y el punto C, que denota la resistencia última.

Figura 4

Diagrama de momento curvatura



2.1.6 Diagrama Momento-Curvatura

El diagrama momento-curvatura permite visualizar que tan dúctil y resistente es un miembro. Además, el área bajo la curva representa la energía interna, la parte bajo la región elástica es la energía de deformación acumulada. El criterio de columna fuerte - viga débil tiene como finalidad evitar que las columnas entren al rango inelástico y que las vigas sean las que entren en este para que desarrollen rotulas plásticas y disipen energía. Para esto, la columna debe satisfacer la ecuación 7:

$$\sum M_{nc} \geq 1.2 \sum M_{nv} \quad (7)$$

Donde $\sum M_{nc}$ es la suma de los momentos nominales a flexión de las columnas que llegan al nudo, y $\sum M_{nv}$ es la suma de los momentos resistentes nominales a flexión de las vigas que llegan al nudo.

2.2 Material de refuerzo externo

El material de refuerzo corresponde a malla de hilo de fique recubierta con óxido de grafito. La adición de óxido de grafito a la malla de fique conlleva diversas ventajas en términos de propiedades mecánicas. (Mosquera, 2022) Entre estas ventajas se incluyen una mayor resistencia a la tracción y mejora en la capacidad para soportar cargas, así como el aumento de la rigidez de la malla, especialmente beneficioso en aplicaciones que requieren estabilidad estructural. La combinación de la fibra de fique y el óxido de grafito genera una malla más duradera, capaz de resistir mejor el desgaste y la fatiga, lo que contribuye a una vida útil prolongada.

3. Protocolo de prueba

A continuación, se presenta un protocolo de prueba diseñado para evaluar de manera sistemática la respuesta ante esfuerzos y deformaciones de una conexión viga-columna reforzada exteriormente, en comparación con una viga-columna sin refuerzo exterior. Este protocolo se ha desarrollado con el objetivo de analizar y comparar de manera exhaustiva el desempeño estructural de ambas configuraciones, proporcionando así una evaluación detallada de las mejoras resultantes del refuerzo externo con materiales específicos.

3.1 Dimensionamiento y diseño de la viga, columna y conexión

El dimensionamiento y diseño abarcan la definición detallada de las secciones transversales, teniendo en cuenta la posición y orientación de las barras de refuerzo. Este proceso implica determinar el número necesario de barras, configurar su configuración, y establecer la longitud y diámetro de las barras y ganchos en los extremos, incluyendo cualquier doblado necesario. Además, se especifica el recubrimiento de concreto sobre las barras de refuerzo para

prevenir la corrosión y asegurar resistencia al fuego. Asimismo, se incorporan detalles adicionales específicos del caso, asegurando así un diseño estructural completo y

3.2 Fabricación de la probeta

La fabricación de la probeta de concreto se lleva a cabo siguiendo el dimensionamiento y diseño previamente presentado. Para lograr esto, se deben establecer las propiedades de los materiales involucrados, tales como su módulo de elasticidad y la resistencia última. En el caso del concreto, se sigue un diseño de mezcla de acuerdo con las especificaciones del proyecto, considerando la proporción adecuada de cemento, agregados (árido grueso y fino), agua y, si es necesario, aditivos. Se presentan las cantidades de concreto y acero. Durante el proceso, se presta especial atención al moldeado y la compactación, asegurando una distribución uniforme y eliminando posibles bolsas de aire. Asimismo, se implementa un proceso de curado adecuado, esencial para el desarrollo óptimo de la resistencia y durabilidad en el concreto.

3.3 Cálculo de la respuesta estructural teórica de la probeta

Un análisis estructural exhaustivo sienta los cimientos para un protocolo de prueba específico, garantizando una alineación precisa de los procedimientos experimentales con el comportamiento anticipado de la conexión bajo condiciones específicas de carga y operación. Para lograr esto, es esencial comprender las fuerzas internas en la conexión, la resistencia a la flexión y al cortante de la viga, el diagrama de momento teórico de la viga, el diagrama de interacción de la columna, verificar el cumplimiento de la condición columna fuerte-viga débil y, finalmente, analizar la distribución de esfuerzos en la viga. Este enfoque analítico integral proporciona las bases necesarias para desarrollar un protocolo de prueba que aborde de manera precisa y detallada las características fundamentales de la conexión viga-columna en estudio.

3.4 Instrumentos de medición

Actuador pseudo-estático con rango de desplazamiento de 250 mm y una capacidad de carga de 250 kN. Este actuador desempeña un papel esencial al aplicar fuerzas o desplazamientos controlados y reproducibles sobre la probeta. Para registrar y cuantificar los desplazamientos durante el ensayo, se emplean seis transductores lineales de desplazamiento variable (LVDT). Estos transductores proporcionan mediciones de alta precisión, permitiendo un monitoreo detallado de las deformaciones y movimientos de las probetas bajo carga.

3.5 Diseño de montaje en el laboratorio

El montaje en el laboratorio se inicia con la posición vertical del espécimen viga-columna, el cual se encuentra ubicado entre dos estructuras rectangulares de acero.

La estructura rectangular de acero superior está hábilmente conectada a una aleta de acero, la cual se encuentra firmemente fijada al muro de reacción en el laboratorio, garantizando así la estabilidad y seguridad del ensayo.

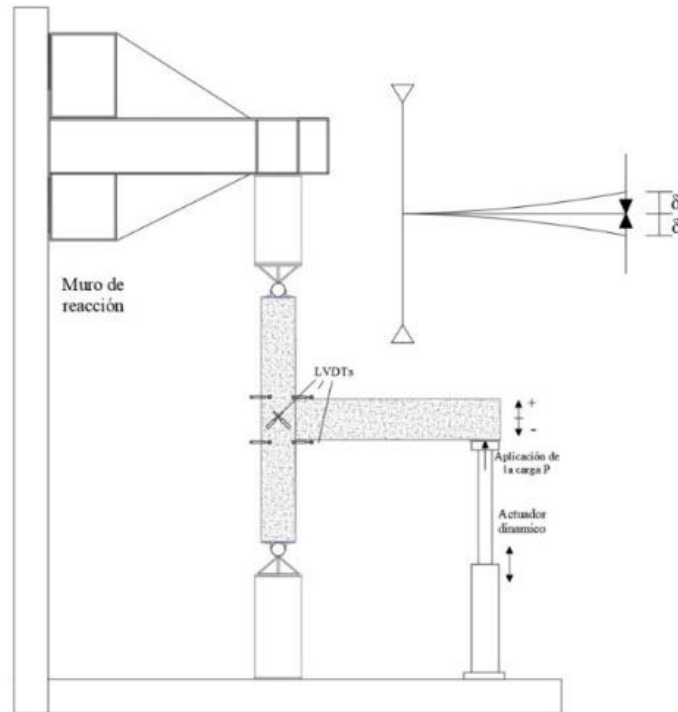
La columna en estudio se dispone sobre apoyos tipo articulación, representado por rodillos, permitiendo la rotación libre tanto en la parte superior como en la inferior. Este diseño se selecciona estratégicamente para replicar condiciones más cercanas a la realidad y facilitar el análisis de la respuesta estructural del espécimen.

Para la aplicación controlada de la carga cuasi estática P sobre el espécimen, se emplea un actuador. La carga P se aplica de manera específica en el borde de la viga a través de este actuador, permitiendo una distribución uniforme y reproducible de las fuerzas a lo largo de la viga-columna.

El esquema propuesto anteriormente se presenta en la figura 5.

Figura 5

Esquema de montaje



3.6 Determinación del protocolo de carga

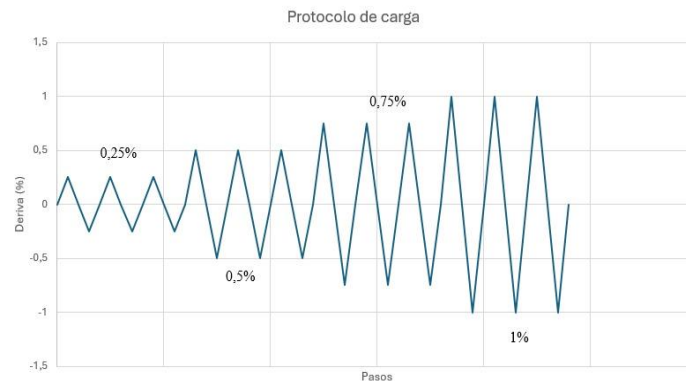
El método de ensayo corresponde al método de desplazamiento controlado, basado en relación de deriva (Δ) de la longitud libre de la viga (L) y el desplazamiento de la viga (δ) debido a la carga aplicada (P) en términos de porcentaje.

$$\Delta = \frac{\delta}{L}$$

El protocolo de carga utilizado corresponde a la aplicación de la carga vertical P en la viga mediante desplazamientos controlados con tres ciclos en cada deriva. Esta carga cíclica se continúa con una deriva igual al 0,25%, 0,5%, 0,75% y 1,0%.

Figura 6

Protocolo de carga cicica en porcentaje de deriva

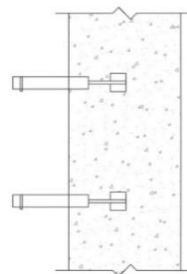


3.7 Selección del sistema de medición de respuestas

La medición de las respuestas implica la evaluación de varios aspectos tales como rotación del nodo, distorsión del nodo y rotación de la viga. La rotación del nodo se mide utilizando dos transductores lineales de desplazamiento variable (LVDT) dispuestos por dos puntos en el nodo, como se indica en la figura 7.

Figura 7

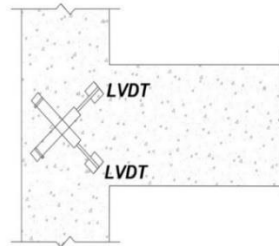
Disposición de transductores lineales para medición de la rotación del nodo



La distorsión del nodo se evalúa mediante otros dos LVDT configurados ortogonalmente entre sí y colocados en diagonal con respecto al eje de la viga, como se indica en la figura 8.

Figura 8

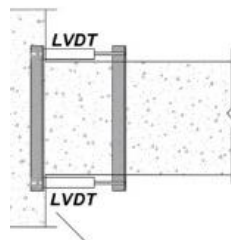
Disposición de transductores lineales para medición de distorsión del nodo



Por otro lado, la medición de la rotación de la viga se realiza mediante dos LVDT dispuestos horizontalmente y situados cerca de la junta entre la viga y la columna. Esta última medición se registra desde la cara de la columna. Un esquema de la ubicación de los LVDT se presenta en la Figura 9

Figura 9

Disposición de transductores lineales para medición de la rotación de la viga



3.8 Ejecución del ensayo en la probeta sin refuerzo externo

Se debe llevar a cabo el ensayo con la probeta sin refuerzo exterior, siguiendo el montaje y el protocolo de carga previamente indicados, para garantizar que el ensayo se realiza bajo esfuerzos y deformaciones controladas. Se anticipa la aparición de grietas de cizallamiento, ya que la tensión de tracción principal alcanza la resistencia a la tracción del concreto. Esto se debe a que el núcleo de la conexión carece de detalles sismorresistentes que posibiliten la liberación

controlada de energía. En este punto, se evalúa que la conexión ha sido comprometida, y se inicia el proceso de fortalecimiento externo.

3.9 Definición del material de refuerzo externo

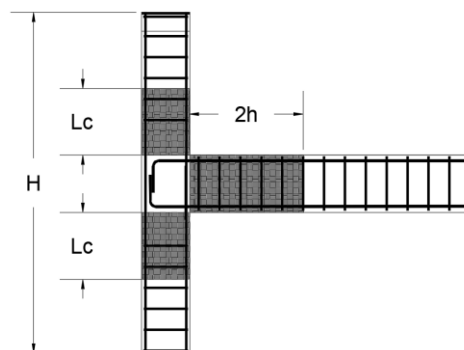
Para definir el material de refuerzo externo, es necesario detallar sus características y propiedades clave en términos de propiedades mecánicas. Esto incluye destacar una mayor resistencia a la tracción, mejora en la capacidad para soportar cargas y el impacto positivo que tendrá en la rigidez de la estructura. Es relevante mencionar que estos aspectos resultan beneficiosos, especialmente en aplicaciones que demandan estabilidad estructural.

3.10 Proceso de reforzamiento externo

La cantidad de refuerzo externo necesario depende de las zonas que se buscan cubrir para reparar los daños en la conexión. El objetivo es que estas zonas encierren el núcleo de concreto, evitando la propagación de fallas por corte diagonal. Por ende, las áreas a cubrir son las zonas de confinamiento de la viga y la columna. De acuerdo con NSR-10 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010), la zona de confinamiento en las vigas debe abarcar una longitud no menor a dos veces la altura de la viga, $2h$, mientras que en las columnas debe ser de una longitud no menor a L_c , como se evidencia en la figura 10.

Figura 10

Esquema de reforzamiento exterior



Donde L_c corresponde al mayor entre los siguientes valores:

- a) Una sexta parte de la luz libre de la columna, $H/6$
- b) La mayor dimensión de la sección transversal de la columna, c_1
- c) 500mm

3.11 Ejecución del ensayo en la probeta con refuerzo externo

Se procede a realizar el ensayo con la probeta que cuenta con refuerzo exterior, siguiendo rigurosamente el mismo montaje y protocolo de carga que se utilizaron en el primer ensayo con la probeta sin refuerzo. Este enfoque de consistencia en los procedimientos garantiza una comparación directa y objetiva entre los dos escenarios, permitiendo evaluar de manera precisa las diferencias en la respuesta estructural ante las mismas condiciones de carga.

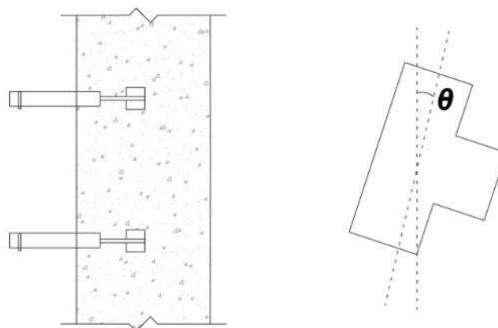
3.12 Tratamiento de datos y cálculos de la respuesta experimental de la conexión viga-columna sin y con reforzamiento exterior.

3.12.1 Rotación del nodo

La rotación del nodo se puede obtener midiendo la variación del ángulo de una línea recta, definida por dos puntos en el nodo. Para este propósito, se utilizan dos LVDT ubicados como se indica en la figura 11.

Figura 11

Rotación del nodo

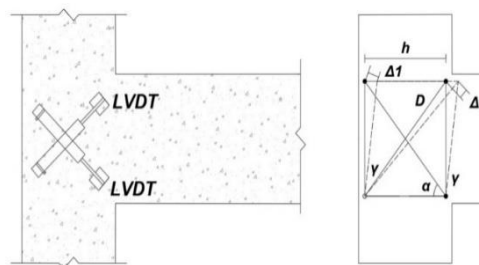


3.12.1 Distorsión del nodo

La distorsión del nodo o la deformación por cizallamiento se puede calcular a partir de la contracción y extensión de las líneas diagonales dentro del nodo. Los dos LVDT configurados ortogonalmente entre sí, y colocados en diagonal con respecto al eje de la viga se utilizan para registrar esos desplazamientos.

Figura 12

Distorsión del nodo



La distorsión del nodo se calcula midiendo la variación del ángulo en cada esquina del nodo γ . Se puede calcular la distorsión promedio utilizando la siguiente ecuación.

$$\gamma_{promedio} = \frac{\Delta 1 + \Delta 2}{D \cdot \sin(2\alpha)}$$

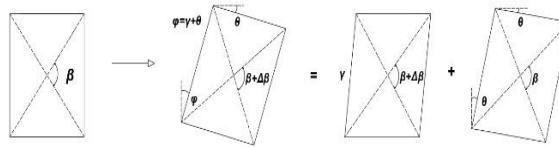
Donde $\Delta 1$ y $\Delta 2$ son el acortamiento y alargamiento de las diagonales registrados por los LVDT, respectivamente; D es la longitud de la diagonal (antes de la deformación) y debe ser la misma en ambas direcciones; y α es el ángulo de la diagonal sin distorsionar con el eje horizontal.

3.12.3 Deformación completa del nodo

La deformación total del nodo es la suma de los efectos de la distorsión y la rotación del nodo. En la figura 13 se presenta un esquema que ilustra la combinación de ambos efectos.

Figura 13

Rotación y distorsión del nodo

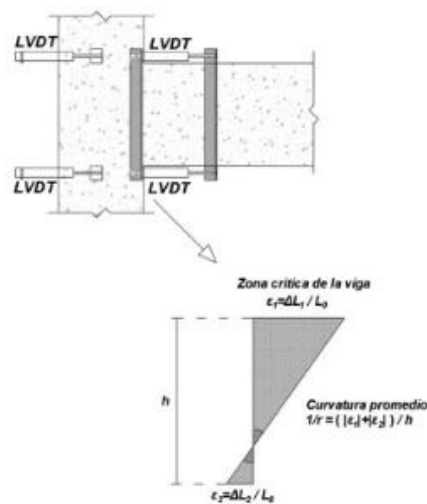


3.12.4 Curvatura en la viga

Para medir la curvatura en secciones críticas de la viga, dos LVDT se colocan horizontalmente cerca de la junta. Estas mediciones se registran desde la cara de la columna, a una distancia igual a la profundidad efectiva de la sección transversal, que es la longitud teórica de la rótula plástica, como se indica en la figura 14.

Figura 14

Curvatura de la viga



La curvatura media en esta región de la viga se calcula asumiendo una distribución lineal de deformación, comúnmente asumida en los modelos de diseño, utilizando la siguiente ecuación.

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{promedio} = \frac{(\Delta L1 + \Delta L2)/L_0}{h}$$

Donde $\Delta L1$ y $\Delta L2$ representan el acortamiento y elongación registrados por los LVDT, respectivamente; $L0$ es la longitud de la región; h es la distancia vertical entre los ejes de los LVDT.

3.12.5 Momento curvatura en la viga

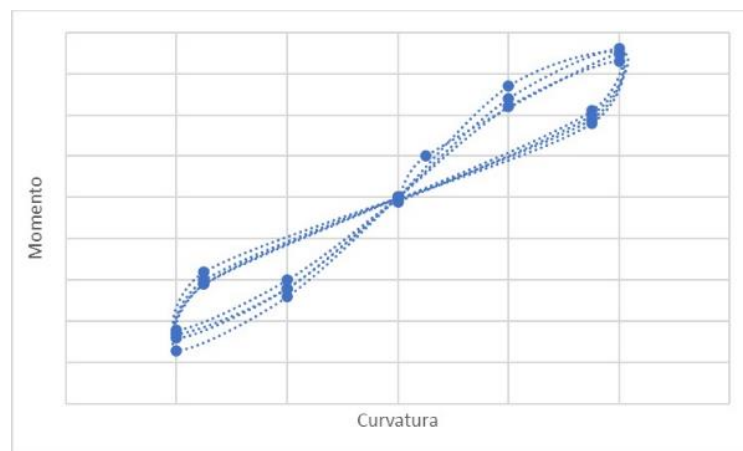
A partir de las deformaciones aplicadas, es posible calcular los momentos respectivos resistidos por la viga mediante el siguiente procedimiento.

$$P = \frac{3\delta EI}{L^3}$$

Donde P es la fuerza aplicada por el desplazamiento vertical en la viga δ , E corresponde al modulo elástico, I al momento de inercia y L a la longitud libre de la viga. A partir del valor calculado de P , es posible obtener el momento en la viga mediante la fórmula $M = P * L$. Una vez calculados los momentos y con las curvaturas ya determinadas, es posible confeccionar el diagrama momento-curvatura. Se sugiere representar gráficamente cada uno de los diagramas (con y sin refuerzo externo) para facilitar la comparación visual de los resultados.

Figura 15

Esquema de diagramas momento curvatura



4. Aplicación del protocolo en un caso real

A continuación, se presenta un caso de aplicación del protocolo de prueba diseñado para evaluar de manera sistemática la respuesta ante esfuerzos y deformaciones de una conexión viga-columna específica. Esta conexión ha sido reforzada exteriormente con malla de fibra de fique impregnada con óxido de grafito, y se compara con la misma conexión viga-columna pero sin refuerzo exterior. Es importante señalar que los procedimientos de laboratorio no se llevarán a cabo, ya que están fuera del alcance de este estudio. No obstante, se proporciona toda la información necesaria para que el ensayo pueda ser realizado, dado que el presente artículo expone un protocolo de prueba con un alcance teórico.

4.1 Dimensionamiento y diseño de la viga, columna y conexión

En el anexo 1 se exhiben las dimensiones, el diseño del refuerzo armado de la probeta de concreto y los detalles de las secciones transversales de la viga y la columna, detallando 12 estribos número dos para la columna cada 0.11 metros y 14 estribos número dos para la viga cada 0.11 metros. El primer estribo se sitúa a 0.05 metros del borde. Adicionalmente, se incluyen 6 barras N°4 de refuerzo longitudinal de 1.8 metros para la columna y 4 barras N°4 de refuerzo longitudinal de 1.68 metros para la viga, con un gancho a 90° de 0.14 metros, totalizando una longitud de 1.82 metros. Se añade una platina de 0.25m x 0.25 m en cada borde de la columna para su conexión con los respectivos apoyos destinados al montaje.

La conexión en la zona de unión entre la viga y la columna se ha diseñado sin estribos con el propósito de evitar una robustez excesiva y facilitar la degradación controlada de la probeta según lo deseado. Esta característica de una conexión sin estribos puede reflejar las condiciones reales

de algunas conexiones existentes. La prueba de una conexión con una zona de confinamiento robusta complicaría su análisis hasta el fallo en el laboratorio con los recursos actuales.

4.2 Fabricación de la probeta

El concreto fue diseñado para alcanzar una resistencia de 21 MPa. La fórmula de diseño es la siguiente: Concreto de 21 MPa con 300 kg de cemento por m³, 750 kg de arena por m³, 900 kg de triturado por m³ y una relación agua/cemento (A/C) de 0.5.

Tabla 1

Cantidad de concreto

Concreto				
Columna				
h [m]	b [m]	área [m2]	L [m]	Vol [m3]
0.25	0.25	0.06	1.80	0.11
Viga				
h [m]	b [m]	área [m2]	L [m]	Vol [m3]
0.30	0.20	0.06	1.50	0.09
Total 0.203 m3 de concreto				

En la Tabla 1 se especifica la cantidad de concreto necesaria, correspondiente a 0.203 m³ y en la Tabla 2 se indican las cantidades de acero necesarias para la realización del elemento viga-columna, correspondiente a 5.95Kg de acero No 2 y 18.13 Kg de acero No 4. El elemento fundido se presenta en la figura 16.

Figura 16

Elemento fundido



Tabla 2

Cantidad de acero

Acero para estribos (No 2)				
Columna				
L [m]	# Estribos	Total [m]	Masa [Kg/m]	Total [Kg]
0.85	16	13.6	0.25	3.40
Viga				
L [m]	# Estribos	Total [m]	Masa [Kg/m]	Total [Kg]
0.85	12	10.2	0.25	2.55
Total 5.95 Kg acero No 2				
Acero Longitudinal (No 4)				
Columna				
L [m]	# Barras	Total [m]	Masa [Kg/m]	Total [Kg]
1.8	6	10.8	0.99	10.74
Viga				
L [m]	# Barras	Total [m]	Masa [Kg/m]	Total [Kg]
1.86	4	7.44	0.99	7.40
Total 18.13 Kg acero No 4				

4.3 Cálculo de la respuesta estructural teórica de la probeta

4.3.1 Fuerzas internas en la conexión

En primer lugar, se calcula el cortante de la columna según la ecuación 3

$$V_{col} = \frac{2(1.25 * 27.60kN - m)}{1.80m} = 38.33kN$$

Una vez se conoce el cortante de la columna, el cortante horizontal en el nudo V_j se obtiene haciendo equilibrio de las fuerzas horizontales que actúan en el nudo, según la ecuación 1.

$$V_j = 1.25 * (97.74kN + 97.74kN) - 38.33kN$$

$$V_j = 157.15kN$$

4.3.2 Resistencia a Flexión

Tabla 3

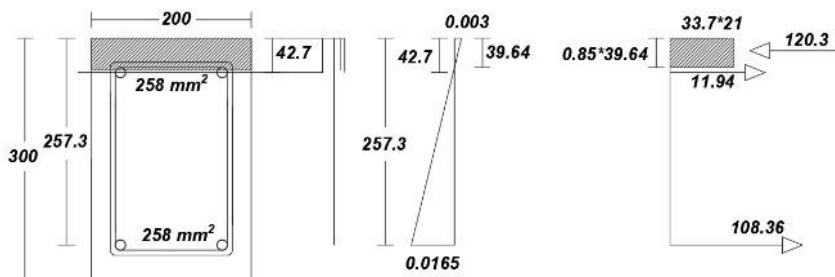
Propiedades geométricas y mecánicas de la probeta

Propiedades Geométricas y mecánicas de la viga			
Altura	h	300	mm
Ancho	bw	200	mm
Resistencia del concreto	f'c	21	Mpa
coeficiente beta	B 1	0,85	
Fluencia del acero	fy	420	Mpa
Modulo Elástico del acero	E	200	Gpa

El cálculo de la resistencia a flexión de la viga se desarrolla según la información de la Tabla 3 y siguiendo los criterios de Bernoulli.

Figura 17

Diagrama de fuerzas y deformaciones unitarias



En la figura 17 se presenta el diagrama de distribución de esfuerzos y deformaciones unitarias de la viga, teniendo esto en cuenta se realiza equilibrio de fuerzas y momentos. En la Tabla 4 se presentan los datos necesarios para el equilibrio de sumatoria de fuerzas y momentos. En la primera columna se enumeran las filas de acero, en este caso, 2, y "cc" corresponde al bloque de compresión. La segunda columna muestra el área que contribuye a los cálculos, la tercera columna indica el punto de aplicación de la fuerza, la cuarta columna especifica el esfuerzo al que

se encuentra sometido el material, la quinta columna muestra la contribución en fuerza, y la sexta columna representa la contribución al momento flector resistente.

Tabla 4

Sumatoria de fuerzas y momentos

Fila	Área i (mm ²)	di (mm)	f (Mpa)	Ti (kN)	Mi (kN-m)
1	258,00	42,70	46,27	11,94	0,51
2	258,00	257,30	420	108,36	27,88
Cc	6739,32	16,85	21,00	-120,30	-2,03

Al sumar la columna 5, se logra un equilibrio de fuerzas igual a cero, mientras que al sumar la columna 6 se obtiene un momento flector resistente de 26.36 kN-m.

4.3.3 Resistencia a Cortante de la Viga

En primer lugar, se calcula el aporte del concreto a la resistencia a cortante según la ecuación 5:

$$V_c = 0.17\sqrt{21\text{Mpa}}(200\text{mm})(270\text{mm})$$

$$V_c = 42.07\text{kN}$$

A continuación, se calcula el aporte del acero a la resistencia al cortante según la ecuación 6:

$$V_s = \frac{(2 * 32\text{mm}^2)(42\text{Mpa})(270\text{mm})}{110\text{mm}}$$

$$V_s = 65.98 \text{ kN}$$

Al sumar los ambos aportes, se obtiene la resistencia al cortante de la viga sin refuerzo exterior

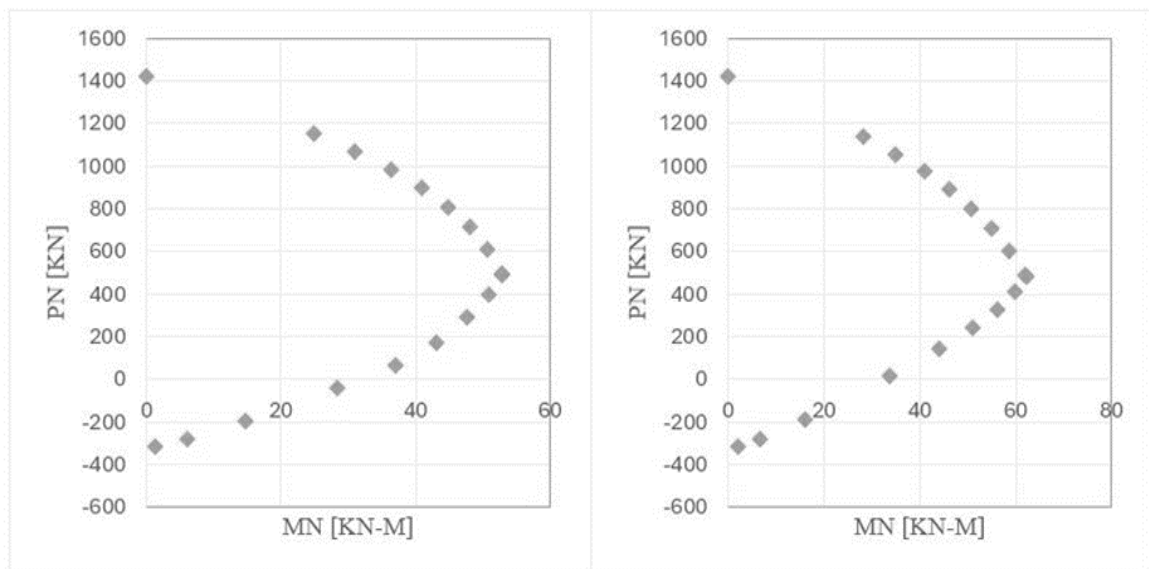
$$V_b = 42.07\text{kN} + 65.98\text{kN} = 108.05\text{kN}$$

4.3.4 Diagramas de interacción Columna

El diagrama de interacción de la columna en la dirección x se presenta en la Figura 18 (a). En dicho diagrama, el punto de compresión pura se sitúa en 1421.28 kN, la condición balanceada es caracterizada por 52.84 kN-m y 491.45 kN, el punto de flexión pura equivale a 31.58 kN-m, y la tensión pura se representa como 319.23 kN. El diagrama de interacción en la dirección y se presenta en la Figura 18 (b). En este diagrama, el punto de compresión pura se sitúa en 1421.28 kN, la condición balanceada es caracterizada por 62.08 kN-m y 483.96 kN, el punto de flexión pura equivale a 32.25 kN-m, y la tensión pura se representa como 319.23 kN.

Figura 18

Diagrama de interacción en la (a) dirección x y (b) dirección y



4.3.5 Diagrama Momento curvatura

La Figura 19 exhibe el diagrama momento-curvatura de la viga, y los valores de los puntos de agrietamiento (A), de fluencia (B) y de resistencia última (C) están detallados en la Tabla 5.

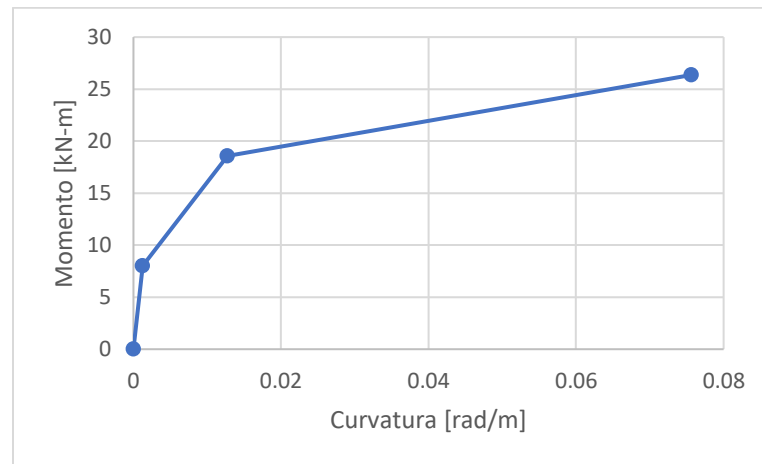
Tabla 5

Valores de puntos del diagrama de momento curvatura

Punto	Momento [kN-M]	Curvatura [Rad/m]
A	8.00	1.27E-03
B	18.59	1.28E-02
C	26.36	7.57E-02

Figura 19

Diagrama de momento curvatura de la viga



4.3.6 Condición columna Fuerte-Viga débil

En primer lugar, el momento nominal de la columna obtenido del diagrama curvatura es M_{nc} : 64.5 kN-m. Para el momento nominal de la viga se toman los valores de la tabla 4, los cuales son 28.39 kN-m para momento positivo y -2.03 kN-m para momento negativo generado por el bloque de compresión.

Reemplazando en la ecuación 7:

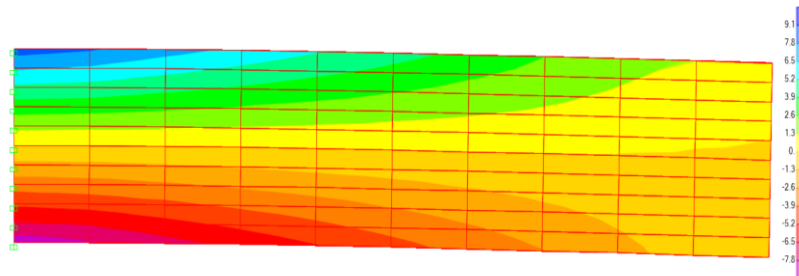
$$64.5 \geq 1.2 * 26.36$$

Por lo tanto, la conexión cumple el criterio de columna fuerte viga débil.

4.3.7 Distribución de esfuerzos

Figura 20

Distribución de esfuerzos en la viga modelado en SAP2000



Se crea el modelo de la viga idealizada en el programa SAP2000 y se le aplica una carga en el borde extremo de la viga de 17.6 kN. Esta carga induce un momento flector resistente de 26.36 kN-m y una deformación de 2.5 mm. La distribución de esfuerzos, expresados en unidades de MPa, en la viga después de la aplicación de esta carga, se presenta en la Figura 20.

4.4 Instrumentos de medición

Actuador pseudo-estático de la marca MTS modelo 661.229-01 con rango de desplazamiento de 250 mm y una capacidad de carga de 250 kN. La altura del actuador es de 174.5 cm. Seis transductores lineales de desplazamiento variable (LVDT) de la marca DIRIMPEX con un rango de recorrido de 2 pulgadas.

4.5 Diseño de montaje en el laboratorio

En el laboratorio de ensayos, se cuenta con un muro de reacción. Sobre este muro se sitúa una aleta de acero que limita la conexión viga-columna en la parte superior mediante un apoyo simple. En la parte inferior de esta conexión, se encuentra una estructura rectangular de acero que la restringe a través de otro apoyo simple. El actuador se ubica en el extremo de la viga. En el

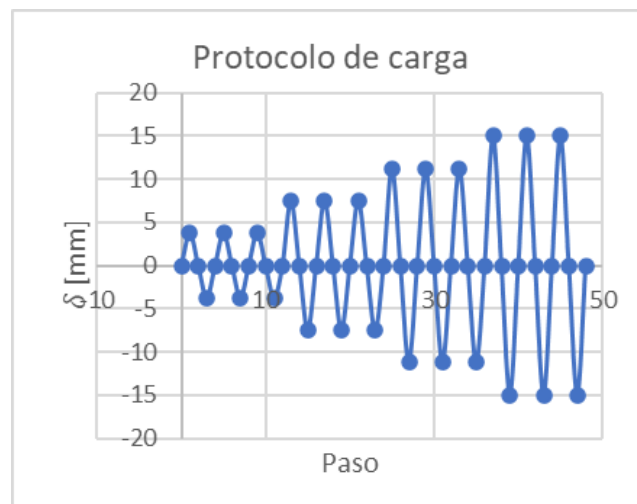
anexo 2 se presenta el montaje del modelo junto con los instrumentos de medición propuestos para la puesta en punto en el laboratorio.

4.6 Determinación del protocolo de carga

La carga cíclica corresponde a valores de deriva igual al 0,25%, 0,5%, 0.75% y 1,0% a una velocidad de 0.3mm/ s. El historial de carga cíclica incremental se muestra en la Fig. 21.

Figura 21

Historial de carga cíclica incremental con desplazamientos en mm



4.7 Selección del sistema de medición de respuestas

Se adopta el sistema propuesto en el protocolo.

4.8 Definición del material de refuerzo externo

Se propone emplear una malla de fibra de fique con una densidad de 8 x 8 hilos por decímetro, hilo doble de 1.14 Nm y 1.5 vueltas por pulgada, impregnada con oxido de grafito.

Una malla con densidad de 8 x 8 hilos por decímetro se refiere a una estructura de tejido que presenta ocho hilos en sentido horizontal y ocho en sentido vertical en cada decímetro cuadrado de la malla. Además, cada hilo es doble, lo que significa que se compone de dos hilos individuales entrelazados. La especificación "1.14 Nm" indica el número de metros de hilo necesario para

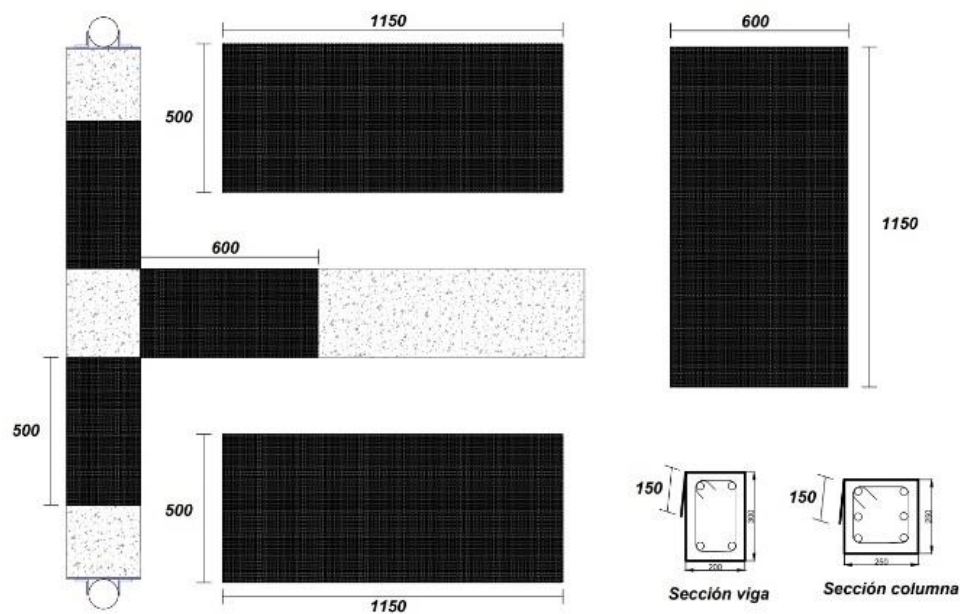
alcanzar un peso de 1 kilogramo. La información "1.5 vueltas x pulgada" indica la cantidad de vueltas que se dan al hilo alrededor de la malla por pulgada lineal.

Según estudio realizado en la en la Universidad Industrial de Santander (Mosquera, 2022) se encontró que la resistencia a tracción de este material es de 15.95 MPa y su deformación unitaria máxima es del 5.0 %.

4.9 Proceso de reforzamiento externo

Figura 22

Esquema de refuerzo exterior con malla de hilo de fique impregnada con oxido de grafito



El método de reparación implica cubrir las áreas de confinamiento de la viga y la columna tal como se indica en la Figura 22. Para la viga, la región de confinamiento corresponde a 2 veces la altura de la viga, en este caso, 600 mm. En cuanto a la columna, se determina el valor más grande entre $L_c/6$, c_1 y 500 mm; en este caso, se elige 500 mm. Tanto en la viga como en la columna, se lleva a cabo un traslape de 150 mm.

5. Conclusiones

Se logra desarrollar un protocolo de prueba integral para evaluar la respuesta estructural de conexiones viga-columna, destacándose por su enfoque sistemático en la determinación de la respuesta estructural, el desarrollo de un método de reparación externo y la implementación de un procedimiento de laboratorio.

Se determina la respuesta estructural de la conexión viga-columna mediante cálculos de la respuesta inicial sin refuerzo externo. Estos cálculos proporcionan información esencial sobre la resistencia y la integridad de la conexión. La carga máxima soportada (P) aplicada en el borde de la viga es de 17.6 kN, generando un momento de 26.36 kN-m, que representa el máximo soportado por la viga. Se espera que la viga falle primero, ya que cumple con la condición de columna fuerte-viga débil y tiene un cortante inferior al máximo soportado de 108.05 kN. Con esta carga, se calcula una deformación de 2.5 mm. Estos datos contribuyen significativamente a comprender el comportamiento de la conexión y establecer criterios para el diseño y fortalecimiento estructural. Se propone un método de reparación externo que utiliza malla de fibra de fique impregnada con óxido de grafito. Este método ofrece detalles óptimos para lograr un adecuado confinamiento de los elementos estructurales y una mayor capacidad de deformación, siendo para la viga una longitud de confinamiento de 600 mm y para la columna de 500mm.

El protocolo de prueba incluye los cálculos correspondientes para comprender la deformación total de la conexión, que es la suma de los efectos de la distorsión y la rotación. Estos efectos son consecuencia de los esfuerzos y deformaciones a los que se somete la probeta durante el ensayo. Además, se propone la utilización del método del diagrama momento-curvatura para comparar la

eficacia del refuerzo externo. Este diagrama proporciona información crucial sobre la resistencia de la viga y la ductilidad del elemento en flexión, permitiendo una evaluación detallada de la mejora estructural lograda mediante el refuerzo externo.

6. Recomendaciones

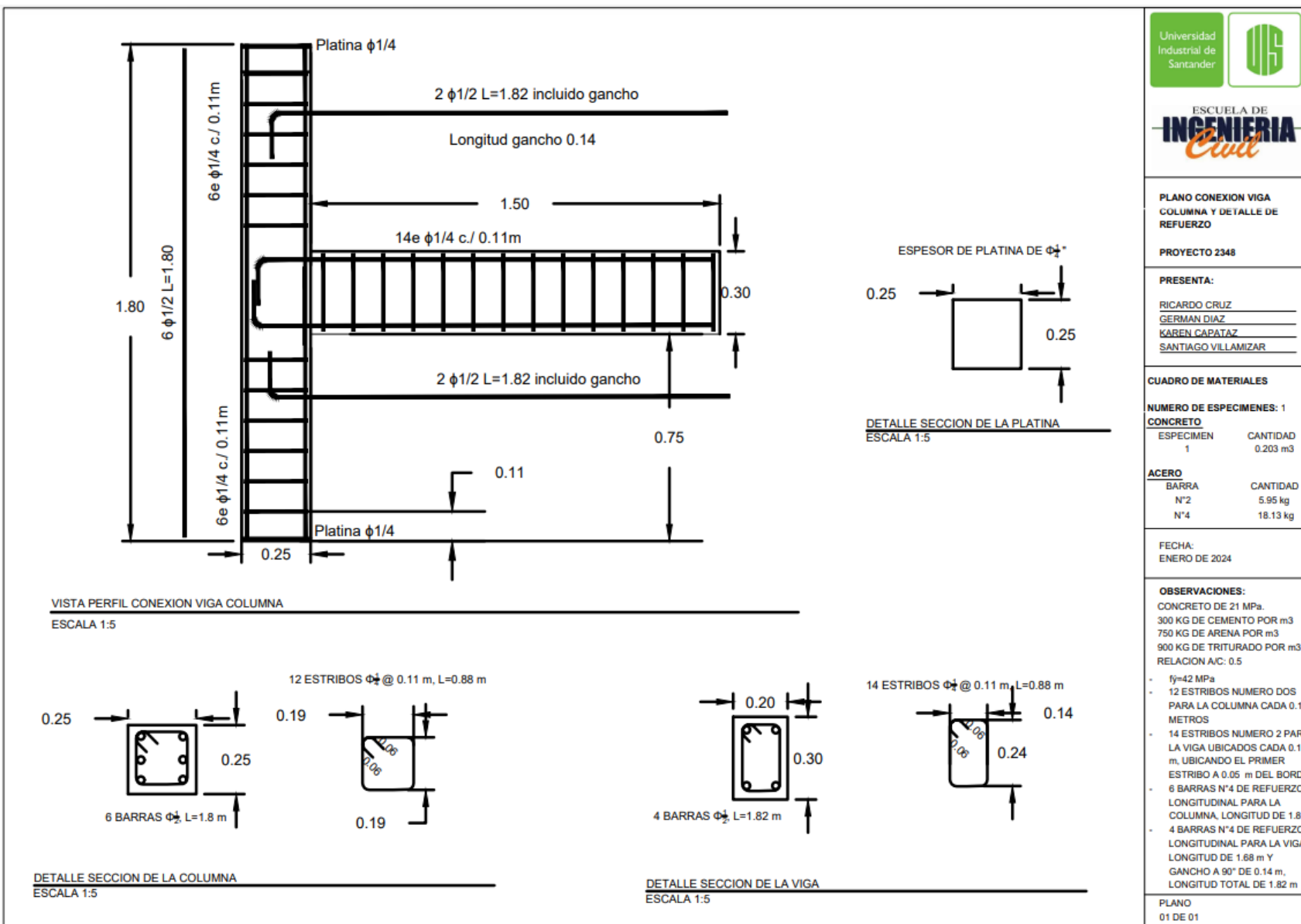
El artículo presenta un protocolo de prueba con un enfoque teórico, se subraya la importancia de validar este protocolo para garantizar la solidez y confiabilidad de los resultados. Se sugiere considerar la inclusión de carga axial a compresión en las columnas para obtener un modelo menos conservador y más cercano a condiciones del mundo real. Además, se recomienda la incorporación del método de correlación de imágenes y el uso de transductores lineales de desplazamiento variable (LVDT) para mejorar la precisión en las medidas de deformación, proporcionando una perspectiva integral y versátil en la evaluación de comportamientos estructurales.



Referencias bibliográficas

- Balsamo, A., Colombo, A., Manfredi, G., Negro, P., & Prota, A. (2005). Seismic behavior of a full-scale RC frame repaired using CFRP laminates. *Engineering Structures*, 27(5), 769–780. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2005.01.002>
- El-Amoury, T., & Ghobarah, A. (2002). Seismic rehabilitation of beam–column joint using GFRP sheets. *Engineering Structures*, 24(11), 1397–1407. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00081-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00081-0)
- Eliud Hernández. (2009). *Diplomado Internacional Ingeniería Estructural Análisis No Lineal - Pushover*.
- Gunaselvi, S., Indumathy, M., & Sivasankar, S. (2020). Experimental assessment of RC beam-column connections with internal and external strengthening techniques. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1210–1217. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.02.114>
- Li, J., Samali, B., Ye, L., & Bakoss, S. (2002). Behaviour of concrete beam–column connections reinforced with hybrid FRP sheet. *Composite Structures*, 57(1–4), 357–365. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00102-2)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). *Norma Colombiana de Diseño Sismorresistente NSR-10*.
- Mosquera, S. (2022). *Uso De Malla Tipo 8x8, Elaborada Con Fibras Naturales, Para Reforzamiento Interior De Elementos De Concreto*.
- Parvin, A., & Granata, P. (2000). Investigation on the effects of fiber composites at concrete joints. *Composites Part B: Engineering*, 31(6–7), 499–509. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00046-3)

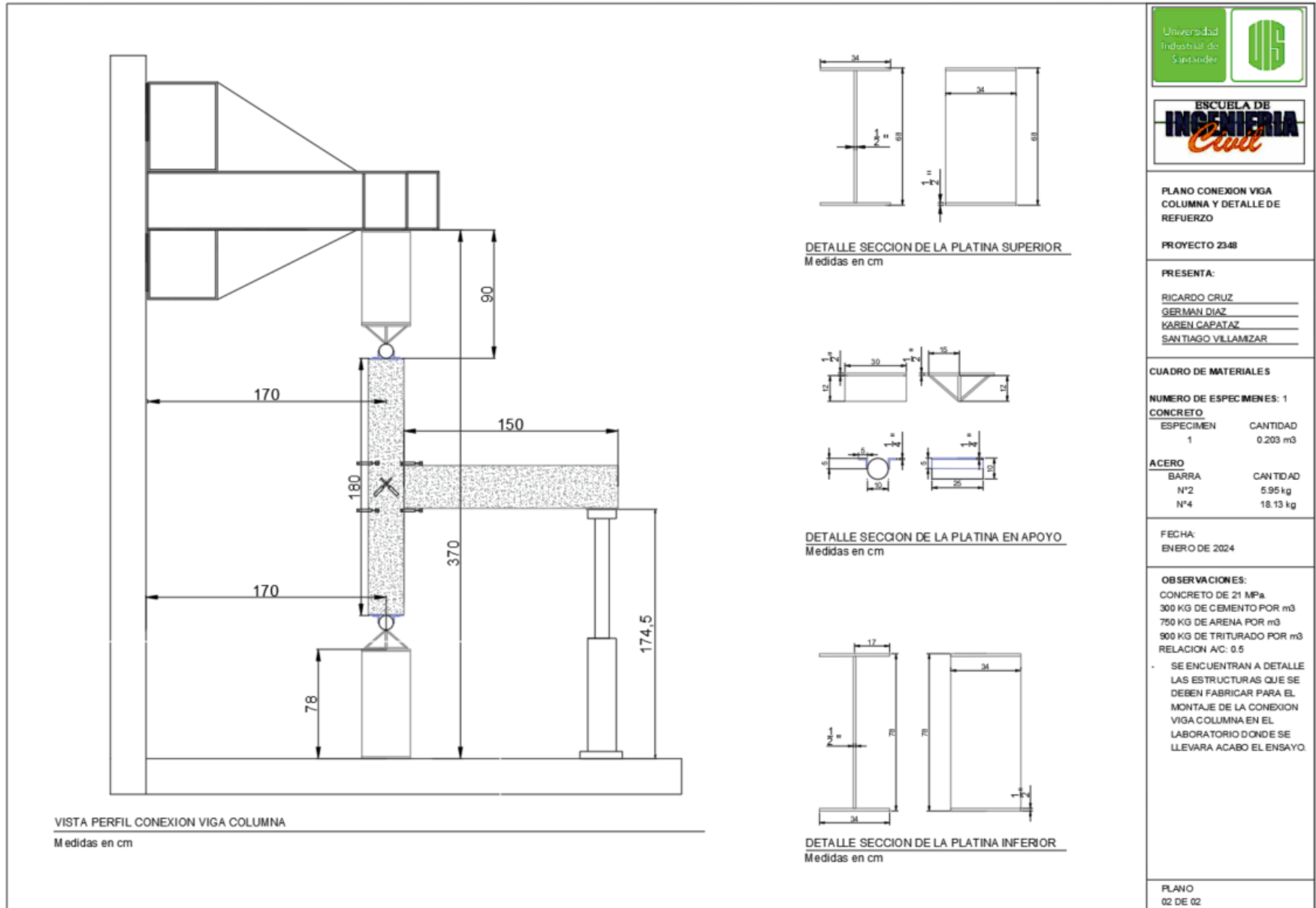
Apéndices

Apéndice A. Plano conexión viga columna y detalle de refuerzo



 								
<p>ESCUELA DE INGENIERIA Civil</p>								
<p>PLANO CONEXION VIGA COLUMNA Y DETALLE DE REFUERZO</p>								
<p>PROYECTO 2348</p>								
<p>PRESENTA:</p> <p>RICARDO CRUZ _____</p> <p>GERMAN DIAZ _____</p> <p>KAREN CAPATAZ _____</p> <p>SANTIAGO VILLAMIZAR _____</p>								
<p>CUADRO DE MATERIALES</p>								
<p>NUMERO DE ESPECIMENES: 1</p>								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">CONCRETO</th> </tr> <tr> <th>ESPECIMEN</th> <th>CANTIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.203 m³</td> </tr> </tbody> </table>	CONCRETO		ESPECIMEN	CANTIDAD	1	0.203 m ³		
CONCRETO								
ESPECIMEN	CANTIDAD							
1	0.203 m ³							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ACERO</th> </tr> <tr> <th>BARRA</th> <th>CANTIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N°2</td> <td>5.95 kg</td> </tr> <tr> <td>N°4</td> <td>18.13 kg</td> </tr> </tbody> </table>	ACERO		BARRA	CANTIDAD	N°2	5.95 kg	N°4	18.13 kg
ACERO								
BARRA	CANTIDAD							
N°2	5.95 kg							
N°4	18.13 kg							
<p>FECHA: ENERO DE 2024</p>								
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>CONCRETO DE 21 MPa. 300 KG DE CEMENTO POR m³ 750 KG DE ARENA POR m³ 900 KG DE TRITURADO POR m³ RELACION A/C: 0.5</p> <ul style="list-style-type: none"> - f_y=42 MPa - 12 ESTRIBOS NUMERO DOS PARA LA COLUMNA CADA 0.11 METROS - 14 ESTRIBOS NUMERO 2 PARA LA VIGA UBICADOS CADA 0.11 m, UBICANDO EL PRIMER ESTRIBO A 0.05 m DEL BORDE - 6 BARRAS N°4 DE REFUERZO LONGITUDINAL PARA LA COLUMNA, LONGITUD DE 1.8 m - 4 BARRAS N°4 DE REFUERZO LONGITUDINAL PARA LA VIGA, LONGITUD DE 1.88 m Y GANCHO A 90° DE 0.14 m, LONGITUD TOTAL DE 1.82 m 								
<p>PLANO 01 DE 01</p>								

Apéndice B. Plano montaje en laboratorio



ESCUELA DE INGENIERIA Civil

PLANO CONEXION VIGA COLUMNA Y DETALLE DE REFUERZO

PROYECTO 2348

PRESENTA:
 RICARDO CRUZ
 GERMAN DIAZ
 KAREN CAPATAZ
 SANTIAGO VILLAMIZAR

CUADRO DE MATERIALES

NUMERO DE ESPECIMENES: 1

CONCRETO	
ESPECIMEN	CANTIDAD
1	0.203 m3

ACERO	
BARRA	CANTIDAD
N°2	5.95 kg
N°4	18.13 kg

FECHA:
ENERO DE 2024

OBSERVACIONES:
 CONCRETO DE 21 MPa
 300 KG DE CEMENTO POR m3
 750 KG DE ARENA POR m3
 900 KG DE TRITURADO POR m3
 RELACION A/C: 0.5

SE ENCUENTRAN A DETALLE LAS ESTRUCTURAS QUE SE DEBEN FABRICAR PARA EL MONTAJE DE LA CONEXION VIGA COLUMNA EN EL LABORATORIO DONDE SE LLEVARA ACABO EL ENSAYO.

PLANO 02 DE 02