

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS METÁLICAS

Tema: "Comparación de diseños de vigas de alma abierta con conectores de corte de perfil angular y de varilla corrugada para determinar su grado de eficiencia."

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magíster en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Metálicas

Modalidad del Trabajo de Titulación: Artículos profesionales de alto nivel

Autor: Ing. Cristian Jair Oña Cifuentes

Director: Ing. Jorge Washington Cevallos Cabrera, Mtr.

Ambato – Ecuador

2025

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por: el Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, e integrado por los señores: Ing. Lourdes Gabriela Peñafiel Valla, e, Ing. María Belén Paredes Robalino, designados por la Unidad Académica de Titulación de Posgrado de la Facultade de Ingeniería Civil y Mecánica, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: "Comparación de diseños de vigas de alma abierta con conectores de corte de perfil angular y de varilla corrugada para determinar su grado de eficiencia" elaborado y presentado por el señor Ing. Cristian Jair Oña Cifuentes, para optar por el Titulo de cuarto nivel de Magíster en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Metálicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg.
Presidente y Miembro del Tribunal

Ing. Lourdes Gabriela Peñafiel Valla, Mg.
Miembro del Tribunal

Ing. María Belén Paredes Robalino, Mg
Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: "COMPARACIÓN DE DISEÑOS DE VIGAS DE ALMA ABIERTA CON CONECTORES DE CORTE DE PERFIL ANGULAR Y DE VARILLA CORRUGADA PARA DETERMINAR SU GRADO DE EFICIENCIA", le corresponde exclusivamente al Ing. Cristian Jair Oña Cifuentes, Autor bajo la Dirección del Ing. Jorge Washington Cevallos Cabrera, Director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Cristian Jair Oña Cifuentes

C.C.: 1500594393

AUTOR



Jorge Washington Cevallos Cabrera, Mtr.

C.C.: 1801854017

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Cristian Jair Oña Cifuentes

C.C.: 1500594393

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Pág.

Portada.....i
A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.... ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii
DERECHOS DE AUTOR iv
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS v
ABSTRACT vi
RESUMEN EJECUTIVO vii

ABSTRACT

The purpose of this article is to compare the strength and deflections at the yield limit and maximum capacity provided by the composite system of an open-web beam with a solid slab and shear connectors using corrugated rebar and angles. The specimens were fabricated using materials from Ambato y Quito, Ecuador, including ASTM A36 steel, ASTM A615 steel, and concrete with a compressive strength of f'c = 210 kg/cm². These comparisons were based on the results obtained from a four-point bending test conducted on two six-meter-long specimens with corrugated rebar connectors and two with angle connectors. This research analyzed the efficiency of the specimens in dissipating energy in the elastic and plastic regions, their ductility, stiffness, structural behavior regarding deformations, and failure modes during the interactive load versus deflection process. The average capacity for each type of connector was determined, and comparative calculations were performed, revealing a 16% variation in the yield limit and a 6% variation in the plastic limit, concluding that the two systems differ in structural strength. The results also validate the accuracy of the calculation methodologies for the beam's nominal moment resistance and the precision of the formulations adapted for shear connectors using rebar and angles, given that AISC and SJI do not provide a specific method for this type of connection.

KEYWORDS: OPEN-WEB BEAM, SHEAR CONNECTORS, DEFORMED BAR, STRUCTURAL ANGLES, COMPOSITE SECTIONS, BENDING STRENGTH.

RESUMEN EJECUTIVO

El propósito de este artículo es comparar las resistencias y deflexiones del límite de fluencia y capacidad máxima que proporcionan el sistema compuesto de viga de alma abierta con losa maciza y conectores de corte en varilla corrugada y ángulos. Las probetas fueron fabricadas con materiales de Ambato y Quito, Ecuador, incluyendo acero ASTM A36, acero ASTM A615 y hormigón con una resistencia a compresión de f'c = 210 kg/cm2. Estas comparaciones se realizaron a partir de los resultados obtenidos en un ensayo de flexión de cuatro puntos realizado a dos probetas de seis metros de longitud con conectores de varilla corrugada y dos con conectores de ángulo. En esta investigación se estudió el grado de eficiencia de las probetas para disipar energía en las regiones elástica y plástica, su grado de ductilidad, rigidez, comportamientos estructurales en cuanto a deformaciones y modos de falla durante el proceso interactuado de carga versus deflexión. Se determinó la capacidad promedio para cada tipo de conector y se aplicaron cálculos comparativos, obteniendo una variación del 16% en el límite elástico y un 6% en el límite plástico, lo que concluye que los dos sistemas son diferentes en resistencia estructural. Los resultados también validan la precisión de las metodologías de cálculo para el momento nominal resistente de la viga y la exactitud de las formulaciones adaptadas a los conectores de corte en varilla y ángulo, dado que el AISC y el SJI no cuentan con un método específico para este tipo de conexión.

DESCRIPTORES: VIGA DE ALMA ABIERTA, CONECTORES DE CORTE, VARILLA CORRUGADA, ÁNGULOS ESTRUCTURALES, SECCIONES COMPUESTAS, RESISTENCIA A FLEXIÓN.

Revista

COMPARACIÓN DE DISEÑOS DE VIGAS DE ALMA ABIERTA CON CONECTORES DE CORTE DE PERFIL ANGULAR Y DE VARILLA CORRUGADA PARA DETERMINAR SU GRADO DE EFICIENCIA

Comparison of Open-Web Beam Designs with Shear Connectors of Angle Profile and Deformed Bar to Determine Their Efficiency

Cristian Oña Cifuentes[1] - https://

Jorge Cevallos [2]- *https://*

Afiliación

[1]Universidad Técnica de Ambato-Ecuador. Carrera de Ingeniería Civil y Mecánica
@uta.edu.ec

Resumen

El propósito de este artículo es comparar las resistencias y deflexiones del límite de fluencia y capacidad máxima que proporcionan el sistema compuesto de viga de alma abierta con losa maciza y conectores de corte en varilla corrugada y ángulos. Las probetas fueron fabricadas con materiales de Ambato y Quito, Ecuador, incluyendo acero ASTM A36, acero ASTM A615 y hormigón con una resistencia a compresión de f'c = 210 kg/cm^2. Estas comparaciones se realizaron a partir de los resultados obtenidos en un ensayo de flexión de cuatro puntos realizado a dos probetas de seis metros de longitud con conectores de varilla corrugada y dos con conectores de ángulo. En esta investigación se estudió el grado de eficiencia de las probetas para disipar energía en las regiones elástica y plástica, su grado de ductilidad, rigidez, comportamientos estructurales en cuanto a deformaciones y modos de falla durante el proceso interactuado de carga versus deflexión. Se determinó la capacidad promedio para cada tipo de conector y se aplicaron cálculos comparativos, obteniendo una variación del 16% en el límite elástico y un 6% en el límite plástico, lo que concluye que los dos sistemas son diferentes en resistencia estructural. Los resultados también validan la precisión de las metodologías de cálculo para el momento nominal resistente de la viga y la exactitud de las formulaciones adaptadas a los conectores de corte en varilla y ángulo, dado que el AISC y el SJI no cuentan con un método específico para este tipo de conexión.

Palabras claves: Viga de alma abierta, conectores de corte, varilla corrugada, ángulos estructurales, secciones compuestas, Resistencia a flexión

Abstracto

The purpose of this article is to compare the strength and deflections at the yield limit and maximum capacity provided by the composite system of an open-web beam with a solid slab and shear connectors using corrugated rebar and angles. The specimens were fabricated using materials from Ambato y Quito, Ecuador, including ASTM A36 steel, ASTM A615 steel, and concrete with a compressive strength of f'c = 210 kg/cm². These comparisons were based on the results obtained from a four-point bending test conducted on two six-meter-long specimens with corrugated rebar connectors and two with angle connectors. This research analyzed the efficiency of the specimens in dissipating energy in the elastic and plastic regions, their ductility, stiffness, structural behavior regarding deformations, and failure modes during the interactive load versus deflection process. The average capacity for each type of connector was determined, and comparative calculations were performed, revealing a 16% variation in the yield limit and a 6% variation in the plastic limit, concluding that the two systems differ in structural strength. The results also validate the accuracy of the calculation methodologies for the beam's nominal moment resistance and the precision of the formulations adapted for shear connectors using rebar and angles, given that AISC and SJI do not provide a specific method for this type of connection.

.

Keywords: Open-web beam, shear connectors, deformed bar, structural angles, composite sections, bending strength

1. Introducción

La creciente popularidad del uso de vigas de alma abierta en Ecuador es generalmente utilizada en los sistemas estructurales en calidad de vigas secundarias [1] destacada en su diseño por su configuración de viga simplemente apoyada[2]. Sus propiedades de resistencia y ductilidad al conformar un sistema compuesto con losa maciza o losa Steel deck, el comportamiento estructural de estos elementos al diseñarlos y fabricarlos con materiales comunes de la localidad, el acero A36 para la viga, para conectores varilla corrugada y ángulos, la losa el hormigón f'c=210 kg/cm^2.

El uso de distintos tipos de conectores de corte en sistemas compuestos influye en su capacidad resistente, permitiendo aumentar su rango elástico y a la rotura. Esta capacidad está determinada por el tipo de conector utilizado y su disposición dentro del sistema estructural[3] [4]. La similitud entre prototipos de vigas de alma abierta usando conectores de corte en perfiles angulares y varilla corrugada radica en que el SJI y el AISC no cuentan con una metodología para su diseño, sin embargo han sido objeto de investigación experimental en los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional de Quito y la Universidad Técnica de Ambato, con resultados publicados en los artículos [3] [4] [5].

2. Antecedentes

Las pruebas de viguetas mixtas de acero de alma abierta fueron realizadas por HG. Lembeck en 1965 [7], el planteamiento del elemento estructural ensayado estaba conformado por barras redondas en forma de zigzag y los cordones por ángulos como riostras, para adquirir una sección compuesta una parte de las barras fue embebida en la loseta de hormigón, permitiendo que interactúe como conectores de corte.

El (SJI 2023) [8]. Este Instituto considera no tomar en cuenta esta la condición de alabeo, pero establece parámetros de control necesarios para cubrir estos efectos [7] [9] [10]. Yost Joseph Robert en el año 2004 [1] menciona que el uso de vigas de alma abierta en diseño de edificios es categorizada como viga secundaria, su modelado obedece a una cercha simplemente apoyada y cargada uniformemente, en la mayoría de las aplicaciones el cordón superior esta comprimido y apuntalado mediante conectores de corte por un entrepiso de hormigón o cubierta liviana para evitar el pandeo lateral.

El pandeo elástico de miembros sometidos a compresión incluye una combinación de pandeo global por flexión y torsión además de efectos de pandeo local. Las disposiciones típicas de diseño de acero utilizan este comportamiento elástico como base para calcular la capacidad de diseño de un miembro. Cuando se trabaja con secciones no doblemente simétricas, se aplican la Especificación para Edificios de Acero Estructural del Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC), AISC 360, el Euro código 3, la Norma Australiana para Estructuras de Acero, AS 4100, todos requieren que se considere el pandeo por flexión-torsión en el proceso de diseño, además del pandeo por flexión y los efectos de pandeo local. [11], [12] [5], [7], [13].

En el año 2024, el Ing. Luis Jaime Henao Rodríguez [14] experimento con conectores tipo canal laminados en caliente de diferentes longitudes en losas de altura 100mm y 150mm, el sistema de vigas compuestas usó celosía con lamina colaborante de 2” y 3”, Los conectores de corte de menor dimensión y menor altura de losa ubicados en la posición débil, presentaron mejores comportamientos ante la aplicación de carga de corte directo. Corroborando los estudios experimentales realizados por el Ing. Juan Carlos Huertas Muñoz en el 2024 [15] donde ensayo una viga tipo IPE 200 con conectores de cortante tipo canal con altura de losa de 100mm sobre lamina colaborante de 2” calibre 22.

En el año 2024 R. Mauricio Rodríguez [16] determinó que la variable de mayor longitud de canal y altura como conector de cortante 113mm y 3” respectivamente, mayor altura de losa 150mm tiene incidencia en incrementar la resistencia a del conector en sentido débil

En el año 2021 C. Chicaiza [3] realizo el estudio del comportamiento de conectores de corte tipo ángulo en losa maciza y concluyo que la posición del ángulo e=6mm que expone mayor área de contacto al hormigón y dispone de mayor espesor del material es

la que mejor se comporta ante cargas de corte directo, sin embargo, la mejor ductilidad del material correspondió al ángulo de menor espesor 4mm. Otra de las investigaciones realizadas por la universidad en este aspecto fue por L. Hernández en el año 2023 [4] Quien analizó la resistencia de los conectores soldados a una viga I200x100x5 con conectores de ángulo de e=3mm en posiciones de 90 y 45 grados en la posición fuerte, losa de hormigón con lamina deck, expuestas a ensayos de corte directo, definiendo los resultados más eficientes el conector tipo ángulo en la posición de 90 grados. Estudios realizados por J.-S. Lee en el año 2020 [17] enfatizan en la incidencia de la altura del conector tipo ángulo para resistir mayores cargas de corte.

Seguidamente Hurtado et al. en el año 2008 desarrolló un estudio en el cual analizaron los diversos efectos producidos en las secciones compuestas cuando se emplean pernos como conectores de cortante. Cada modelo fue ensayado usando pruebas de corte directo Push Out. El resultado fue que, según se incremente el diámetro de un conector de cortante, disminuirá la deformación y el desplazamiento generado. Cuando se tiene un diámetro pequeño, puede presentarse una rotura en la soldadura considerada como falla dúctil; por otra parte, cuando el diámetro disponible es amplio, se genera una fractura en el hormigón. Además, la cantidad de conectores existentes en cada probeta, afectan en su rigidez; es decir, a menor número de dispositivos cortantes, mayor ductilidad del elemento compuesto. (Hurtado, Molina, & Linero, 2008). [5], [18], [19],[20], [13], [9]

El uso de conectores de corte aumenta la capacidad a corte y momento de la viga, optimizando su desempeño frente a cargas gravitatorias. En este contexto, diversas investigaciones han analizado el comportamiento de distintos tipos de conectores, entre ellos: pernos stud, pernos de corte atornillados, canales, ángulos, charcos de soldadura, pernos hilting, varilla en forma de U, pernos de corte por disparo[5] [4] [21] [22] [17] [15] [9].

3. Metodología

En la presente investigación se realizó en 4 fases, se aplicaron los métodos investigativos, exploratorios, analíticas y experimental.

M. Díaz en el año 2021 [23] y [24] presentan una metodología de diseño de vigas de alma abierta basados en el AISC 360-16 y SJI donde el momento nominal de la sección compuesta está en función del tipo de loseta de compresión; losa maciza o lámina de acero (Steel Deck), la dirección de las nervaduras y la ubicación del eje neutro plástico, también presenta el análisis del estado límite de servicio y el diseño de los conectores.

La Escuela Politécnica Nacional de Quito los últimos cinco años ha realizado estudios de conectores de corte en ángulo de diferentes longitudes, alturas, espesores y posiciones, entre ellos la investigación de D. Ayala en el año 2021 [3] a conectores de corte angulares de 4 y 6 mm para la unión de una losa maciza, donde evalúa los códigos constructivos

actuales para su diseño y demuestra que la expresión de Kiyomiya es la que mejor se ajusta a los resultados experimentales en la posición 2 en forma de L invertida.

3.1 Probetas y materiales

Para su experimentación se diseñaron y construyeron cuatro vigas de alma abierta de longitudes L=6m, ancho=0.40m, altura h=0.45m y un camber de 6 mm, sobre esta una losa maciza de espesor 10cm armada con malla electrosoldada, como conectores en dos de las probetas de varilla corrugada de D=16mm y las otras dos con perfil angular L50x40x4 mm, las soldaduras con electrodo E60-11, mostradas en la figura 1a y 1b

a)  b) 

Figura 1 a) Fabricación de vigas de alma abierta con conectores de corte en ángulo b) Encofrados de vigas previo a instalarse la malla electrosoldada y hormigón.
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Para el diseño de la viga la resistencia del hormigón para todas las probetas fue f'c=210 kg/cm^2, el acero para los cordones, diagonales, silleta, conectores de corte angulares fue de fy=2530 kg/cm^2 y para los conectores de varilla corrugada fy=4200 kg/cm^2. La resistencia del hormigón para el diseño de viga de alma abierta con losa maciza fue de 210 kg/cm^2, previo al ensayo de flexión de la viga se ha procedido a tomar dos muestras cilíndricas de la mezcla vertida y ensayadas a los 28 días tal como se especifica en las normas NTE INEN 1573 [25] Y ASTM C39-C39M-20 [26], y se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de ensayos del hormigón

Identificación	Resistencia de diseño	Resistencia de ensayo
Cilindro 1 y 2	210kg/cm^2	235.5 kg/cm^2

Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Las resistencias del acero estructural fueron comprobadas experimentalmente y se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de ensayos del acero

Identificación	Propiedad mecánica	Resistencia de diseño	Resistencia de ensayo
Diagonales de viga			
M25.009.01	Fy	2530 kg/cm^2	3319 kg/cm^2
M25.009.01	Fu	4079 kg/cm^2	4354 kg/cm^2

Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

3.2 Diseño de las probetas

3.2.1 Diseño de la viga de alma abierta

La configuración geométrica se tomó en edificación de 4 pisos con vanos entre columnas de 6m, de donde se originan vigas principales y secundarias separadas a una distancia de 1.20m. El uso del edificio tiene a una carga viva L=200 kg/m^2 correspondiente a uso residencial, la carga muerta D=625.22 kg/m^2, el peso de viga 20.11 kg/m, el módulo de elasticidad del acero Es= 2039432.43 kg/cm^2, el módulo de elasticidad del concreto Ec= 219503.06 kg/cm^2 para una resistencia del hormigón a los 28 días f'c=210 kg/cm^2, el límite de fluencia del acero para ángulos, canales y varilla lisa de fy=2530 kg/cm^2, para la varilla corrugada fy_b=4200 kg/cm^2.

Una vez procesado los datos se definió el espesor de la losa maciza t_c=0.10 m armada con malla electrosoldada de resistencia fym=5000 kg/cm^2 configurada de 150x150x6mm tanto en las fibras superiores como inferiores.

Posteriormente se ajustó la carga de diseño factorizada aplicada de forma uniforme en una viga de longitud de 6m apoyadas en los extremos como viga simplemente apoyada para obtener el momento ultimo **Mu=5.89 Ton.m**. Después se procede a calcular el memento nominal que resiste la viga en sección compuesta con la losa maciza conforme la metodología expuesta por Marco Díaz [23] obteniéndose un ΦMn=9.64 Ton.m con la expresión:

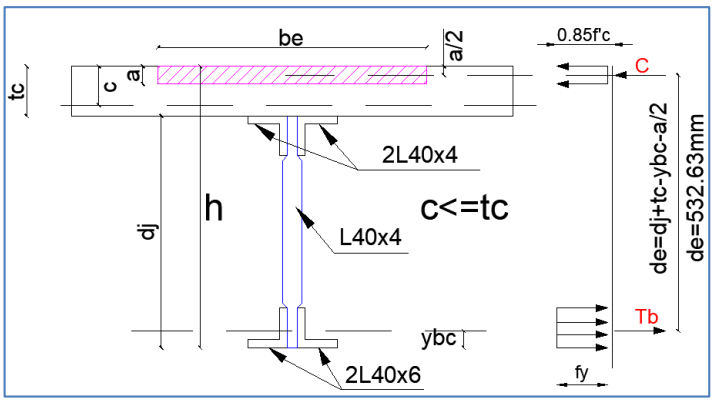


Fig. 2 Momento nominal caso I
Fuente: Marco Días[27]

Donde:

a=altura del bloque equivalente de esfuerzos de compresión
b_e=ancho tributario de viga 1.20m
d_e=distancia desde el centro de gravedad del cordón inferior hasta el eje neutro del bloque equivalente de esfuerzos de compresión
Φ= Factor de elementos sometidos a tención en diseño por resistencia (LRFD)

$$Mn=\Phi.Aci.fy.de=10.72 \text{ Ton.m} \quad (1)$$

$$\Phi Mn=0.9*Mn= 9.64 \text{ Ton.m} \quad (2)$$

Se procede a verificar si la capacidad resistente de la viga es mayor que la solicitada y se confirma que si cumple.

$$\Phi Mn > Mu \text{ ok}$$

$$9.64 \text{ Ton.m} > 5.89 \text{ Ton.m}$$

Una vez comprobado que la altura de viga h=0.45m con sección del cordón inferior L40x6mm cumple con el chequeo por capacidad a momento se configura la viga para el diseño de todos sus componentes, el cálculo de su deflexión y finalmente los conectores de corte.

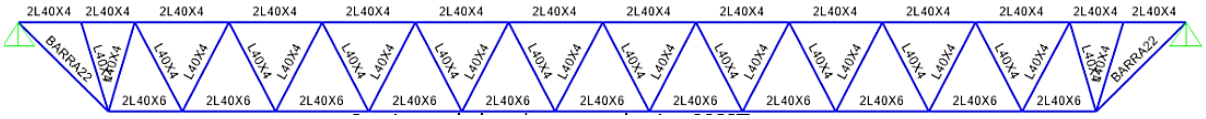


Fig. 3a Secciones de los elementos de viga de alma abierta
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

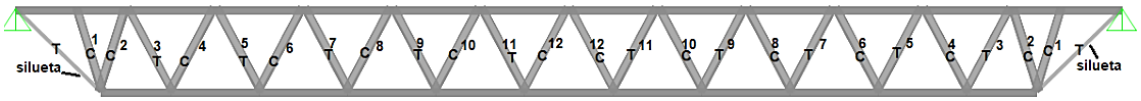


Fig. 3b Numeración de diagonales y el tipo de esfuerzo de cada miembro
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

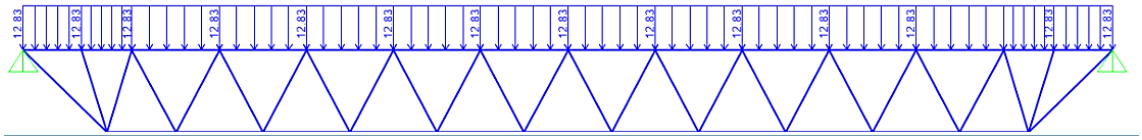


Fig. 3c Carga de diseño factorizada y distribuida en (kN/m)
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

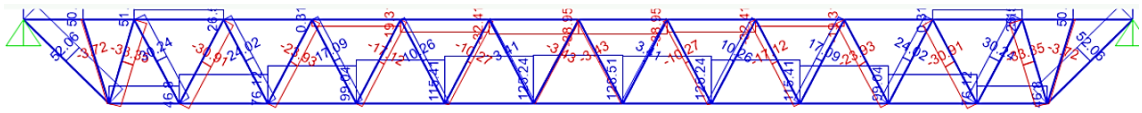


Fig. 4 Diagrama de fuerzas axiales por colores donde se observa las diagonales críticas a compresión en los extremos en (kN)
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Para el diseño de componentes de viga de alma abierta se aplicó la metodología normada por el SJI [28], respaldándose cada procedimiento con el AISC 360-22 [29] el AISC 341[30] y las normas ecuatorianas para estructuras de acero[31] y sismo resistente [32]. Partiendo de estas bibliografías se calculó el cordón superior 2L40x4 mm para resistir únicamente esfuerzos de cortante considerando la revisión de esfuerzos combinados la cual es muy importante hacerlo más que todo en los elementos a tención críticos del cordón superior que llegan a los apoyos. El diseño del cordón inferior y la silleta de los extremos se diseñó aplicando método de "Tensión de diseño" LRFD y para las diagonales se seleccionó la diagonal crítica que muestra el diagrama de fuerzas axiales que es característico de esta configuración de celosía la diagonal No. 2 mostrada en figura 3b y 4, contada desde los extremos después de la silleta mediante el método de compresión de diseño.

3.2.2 Diseño de conectores de corte con ángulos

En el diseño de conectores la metodología utilizada por Diego Ayala [3] la resistencia del conector con la expresión de Kiyomiya para un ángulo ASTM A36 L50x4 mm y longitud 80mm, embebida en una losa maciza de 0.10m.

Donde:
Φ= esta entre 0.75 y 0.90 depende del tipo de unión y geometría
α= esta entre 0.40 y 0.5 valor que depende de la resistencia del hormigón
β= 0.8 y 0.1 valor que depende de la resistencia del acero del conector y ductilidad del ángulo
Ac= área de concreto que está en contacto con el conector, longitud por altura
A_L= área del alma del conector que soporta a corte, altura por espesor
Th= Fuerza cortante en la interface de unión es calculada con el esfuerzo máximo que se produce en la viga compuesta, en este caso la flexión máxima en cordón inferior
Nc= número de conectores de corte

$$Qn_{=}\phi.(\alpha.A_c.f'c+\beta.A_L.fy)=5.74\ \frac{Ton}{cm^2} \quad (3)$$

$$Th_{=}A_{ci}.fy=22.64\ Ton \quad (4)$$

$$N_c=\left(\frac{Th}{Qn}+1\right).2=9.89 \quad (5)$$

$$esp=\frac{l_1}{N_c}=60cm \quad (6)$$

$$Si\ esp>8.altura\ de\ canal=40\ cm$$

3.2.3 Diseño de conectores con varilla corrugada

Para el cálculo de conectores de varilla corrugada se tomó la ecuación del esfuerzo de fluencia a corte G=E/2(1+u) fundamentada en la Teoría de la Elasticidad de Timoshenko & Goodier, desglosándose el proceso siguiente:

Donde:

G= esfuerzo de fluencia a corte
A_b= área de la sección transversal del conector para una varilla D=16mm
Fy_b= Limite de fluencia del acero en barra 4200Kg/cm^2
Aci= área del cordón inferior 2L40x6 mm 888mm^2
Th= Fuerza cortante en la interface de unión es calculada con el esfuerzo máximo que se produce en la viga compuesta, en este caso la flexión máxima en cordón inferior
Nc= número de conectores de corte
Qn= Resistencia del conector

$$G=\frac{fy_b}{2.(1+0.27)}=1.68\ \frac{Ton}{cm^2} \quad (7)$$

$$Qn = G.A_b = 3.39\,Ton \qquad (8)$$

$$Th_{=}A_{ci}.fy = 22.64\,Ton \qquad \text{Aplicando (4)}$$

$$N_c = \left(\frac{Th}{Qn} + 1\right).2 = 15.35 \qquad \text{Aplicando (5)}$$

$$N_c = 15u$$

$$esp = \frac{l_1}{N_c} = 40cm \qquad \text{Aplicando (6)}$$

$$Si\ esp > 8.espesor\ de\ losa = 40\ cm$$

Nota: El diseño de conectores de corte fue varilla corrugada D=16mm espaciados cada 40cm, sin embargo, para la construcción y experimentación de viguetas se tomó el espaciamiento de 32 cm siguiendo el espaciamiento típico de los valles del Steel deck.

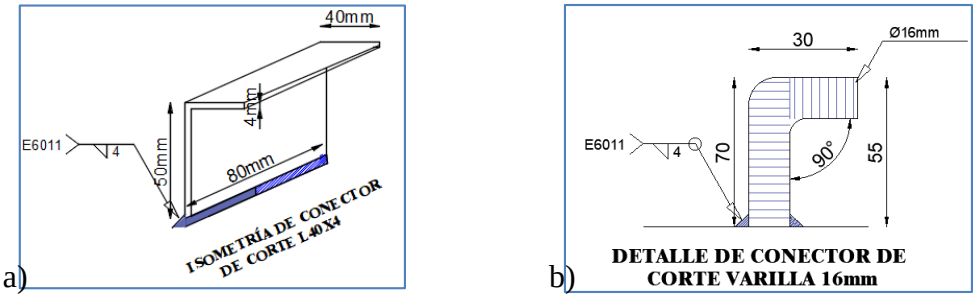


Fig. 5 a) Conector de corte en ángulo, b) Conector de corte en varilla corrugada
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

3.2.4 Cálculo de la deflexión máxima permisible

La deflexión máxima permisible es un aspecto crítico y normativo en el diseño de vigas, garantiza la seguridad estructural, la funcionalidad y el confort de la estructura, ignorar este aspecto puede llevar a reparaciones costosas y problemas estructurales a largo plazo, es así, que el **ACI 318** [33] **y el SJI** [2] establece límites de deflexión para garantizar un desempeño adecuado.

Según el ACI 318, propone comparar la **deflexión real** con la **deflexión admisible** según el uso de la estructura, para vigas en edificios:

L/240 → Para elementos con acabados propensos a agrietarse.

L/360 → Para elementos con acabados sensibles o pavimentos frágiles, en vigas de entrepisos se evaluará para carga de servicio como carga viva "L" o "L+D"

L/480 → Para estructuras con alta exigencia de confort y estabilidad.

El cálculo de la deflexión consiste en calcular primero la inercia de la viga de alma abierta, donde:

dj= Altura total de la viga de alma abierta sola

I_{chord}= Inercia en el sentido de las x-x de la viga de alma abierta sola
I_{xcs}= Inercia en el sentido de las x-x del cordón superior
I_{xci}= Inercia en el sentido de las x-x del cordón inferior
A_{cs}= Área de acero de sección transversal del cordón superior
A_{ci}= Área de acero de sección transversal del cordón inferior
y_{chord}= Ordenada en el eje y del centro de inercia x-x de la viga sola
y_{cs}= Ordenada en el eje y del centro de inercia x-x del cordón superior
y_{cs}= Ordenada en el eje y del centro de inercia x-x del cordón inferior

$$I_{chord} := I_{xcs} + A_{cs} \cdot (dj - y_{chord} - y_{cs})^2 + I_{xci} + A_{ci} \cdot (y_{chord} - y_{ci})^2 = 65820106.5\ mm^4 \quad (9)$$

Cálculo de la deflexión a corto plazo

Procedemos con la inercia compuesta mediante la relación de módulos y ancho de diseño transformada, donde:

n= relación de módulos de elasticidad
Es= Módulos de elasticidad del acero
Es= Módulos de elasticidad del hormigón
be'= Ancho de diseño tranformada

$$n := \frac{E_s}{E_c} = 9.29 \quad (10)$$

$$be' := \frac{b_e}{n} = 129.16\ mm \quad (11)$$

$$I_{comp} := \frac{be' \cdot a^3}{12} + be' \cdot a \cdot \left(h - y - \frac{a}{2}\right)^2 + I_{chord} + A_{st} \cdot (y - y_{chord})^2 = 157062161.84\ mm^4 \quad (12)$$

Continuamos con el cálculo de la inercia efectiva

$$I_{eff} := \frac{1}{\frac{y}{I_{chord}} + \frac{1}{I_{comp}}} = 95246044.94\ mm^4 \quad (13)$$

La carga viva de servicio aplicarse "P_L" en el ensayo de flexión de la viga en forma de carga puntual en dos puntos de la viga sin apoyos, nos direcciona a seleccionar la fórmula adecuada para determinar la flexión que se produce.

$P_{Laplicar}$ = q.L=1.44Ton (14)

Cálculo de la deflexión a corto plazo por aplicación de carga viva de servicio o deformación inmediata que experimenta una viga al ser sometida a una carga, la cual se debe principalmente a la flexión elástica del material y ocurre en el momento en que la carga es aplicada

$$\delta cortoplazo := \frac{P_{Laplicar} \cdot L^3}{48 \cdot E_s \cdot I_{eff}} = 3.34\ mm \qquad (15)$$

Cálculo de la deflexión a largo plazo

Para determinar esta deflexión calculamos la inercia compuesta con relación de módulos y el ancho de diseño transformada dividido para 3 relación de módulos.

$$be'' := \frac{b_e}{3\ n} = 43.05\ mm \qquad (16)$$

Cálculo de la inercia compuesta e inercia efectiva a largo plazo

$$I_{comp} := \frac{be'' \cdot a^3}{12} + be'' \cdot a \cdot \left(h - y - \frac{a}{2}\right)^2 + I_{chord} + A_{st} \cdot (y - y_{chord})^2 = 110206771.376\ mm^4 \qquad (17)$$

$$I_{eff} := \frac{1}{\frac{y}{I_{chord}} + \frac{1}{I_{comp}}} = 75722752.7\ mm^4 \qquad (18)$$

La carga permanente "P_D" de servicio aplicarse en el ensayo de flexión de la viga en forma de carga puntual en dos puntos de la viga sin apoyos, nos direcciona a seleccionar la fórmula adecuada para determinar la flexión que se produce.

D=625.22 kg/m^2

S= 1.20m

L=6m

W_{losa}= 244.73 kg/m^2 W_{viga}= 20.11 kg/m

q= D.S= 750.26 kg/m (19)

P_{loseta}= W_{losa}.L.0.40m= 587.36 kg (20)

P_{viga}= W_{viga}.L=120.66 kg (21)

$P_{Daplicar}$= q.L-P_{loset} - P_{viga}= 3.79 Ton (22)

$P_{Daplicar}$=3.79Ton **($P_{Daplicar}$= $P_{servicio}$)**

Cálculo de la deflexión a largo plazo por aplicación de carga permanente de servicio o deformación progresiva que experimenta la viga con el tiempo debido a cargas sostenidas

$$\delta_{largoplazo} := \frac{P_{Daplicar} \cdot L^3}{48 \cdot E_s \cdot I_{eff}} = 11.05\ mm \qquad (23)$$

Deformación calculada

La deformación calculada es la deformación a corto plazo sumada la deformación a largo plazo provocada por cargas aplicadas a lo largo de la viga ya sean distribuidas o de forma puntual en el centro, siendo esta última configuración la seleccionada para mi investigación por tener similitud al ensayo de flexión de 4 puntos.

$$\delta cal := \delta cortoplazo + \delta_{largoplazo} = 14.39\ mm \quad (24)$$

Deflexión permisible normada por el ACI-318-99

δ_{perm}= 6000mm/360=16.67mm $\delta_{perm} = \delta_{servicio}$

Una vez finalizado el cálculo de las deflexiones de la viga verificamos si se está cumpliendo con la deflexión permisible para dar por aceptado el diseño.

$\delta_{cal} < \delta_{perm}$ "OK"

14.39mm < 16.67mm "OK"

Con la finalidad de realizar comparaciones de deflexiones en el ensayo de la viga se procede a calcular las deflexiones que se producen a un estado de carga factorizado o carga de diseño Pdu=1.2D+1.6L, de esta manera evaluar el grado de eficiencia estructural entre estas dos alternativas.

$U_{diseño} = 1.2.(D.b_e) + 1.6.(L_{cv}.b_e) = 1.28 Ton/m$ (25)

$Pd_{iseño} = U_{diseño}.L = 7.71$ Ton (26)

$\delta_{diseño=}$ 22.45mm $\delta_{diseño} = \delta_{diseño\ ultimo}$

A continuación, se detalla un resumen del diseño:

Tabla 3. Resumen del Cálculo de Cargas, Momentos Nominales y Demanda de Momentos de Diseño de la Viga.

Tabla 1. Resumen de cargas de diseño de la viga en sección compuesta									
Probeta	**l (m)**	**h (m)**	**de (m)**	**Aci 2L40x6mm (cm^2)**	**q= (1.2D+1.6L)*be (Ton/m)**	**Pn=Φ.Aci*fy (Ton)**	**Mn=Pn*de (Ton.m)**	**Mu=$ql^2/8$ (Ton.m)**	**Radio de capacidad (%)**
V1/16/32	6.00	0.45	0.53	8.88	1.28	20.22	10.72	5.78	54%
V2/16/32	6.00	0.45	0.53	8.88	1.28	20.22	10.72	5.78	54%
L2/50/40	6.00	0.45	0.53	8.88	1.28	20.22	10.72	5.78	54%
L4/50/40	6.00	0.45	0.53	8.88	1.28	20.22	10.72	5.78	54%

Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Tabla 4. Resumen de cálculo de deflexiones

Probeta	l (m)	h (m)	de (m)	Ps= Carga Viva (Ton)	Deflexión Ps servicio (mm)	Deflexión permisible (mm)	Control deflexión por PS servicio
V1/16/32	6.00	0.45	0.53	1.44	3.34	16.67	OK
V2/16/32	6.00	0.45	0.53	1.44	3.34	16.67	OK
L2/50/40	6.00	0.45	0.53	1.44	3.34	16.67	OK
L4/50/40	6.00	0.45	0.53	1.44	3.34	16.67	OK

Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

3.3 Tratamiento estadístico de los datos

Para el procesamiento de datos se aplicaron métodos estadísticos como la media aritmética, el criterio conforme ASTM E8/ASTM 290 de la desviación estándar ≤10% es baja dispersión de datos los resultados son confiables, comparativos si un sistema es equivalente debe estar entre los rangos 0.95 y 1.05 donde se acepta un margen de error +- 5%, criterios estadísticos que nos permiten contar con resultados experimentales más confiables para trabajar con una probeta [9]

3.4 Método de ensayo a flexión

Las características del ensayo de flexión según la norma ISO 7438 [34] y ASTM 370 [35] es el esfuerzo máximo de flexión, las deformaciones que se producen, la resistencia a la rotura y el comportamiento de rotura del material. La realización de este ensayo permite al investigador contar con datos experimentales reflejadas en tablas y gráficas, entre estas la curva carga vs desplazamiento vertical para analizar las deflexiones de toda la viga, curva carga vs desplazamiento horizontal para analizar el comportamiento de los conectores, curva carga vs deformación unitaria para analizar el comportamiento de las diagonales y cuerdas. Toda esta información una vez procesada dará a conocer al lector la carga y rigidez característica, el grado de ductilidad, el deslizamiento característico y la energía disipada de todo el sistema.

El ensayo de flexión se realizó en el centro de investigaciones de la vivienda-CIV de la Escuela Politécnica Nacional, con una configuración de aplicación de cargas en 4 puntos la cual consiste en dos apoyos simples a los extremos y una carga estática puntual monótona aplicada en dos puntos de la Luz siendo esta configuración la que más se acercaba a una aplicación de carga distribuida.

El tipo de carga y su ubicación tenían el objetivo de lograr un cortante constante a lo largo de la viga para obtener resultados lo más similares posibles en ambos extremos sin generar excentricidades.

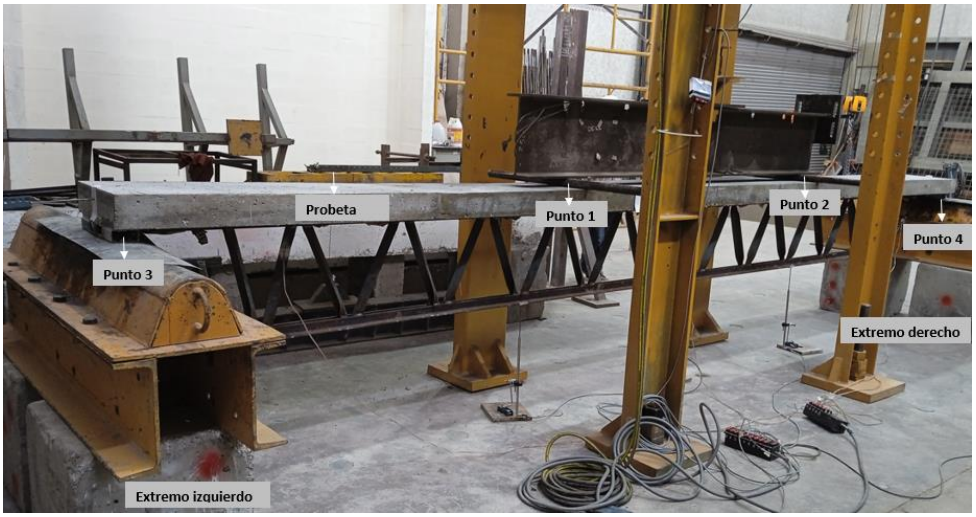


Figura 6. Ensayo de flexión de 4 puntos con cargas monótonas
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

3.5 Instrumentación

La instrumentación para el ensayo consiste en un cilindro hidráulico de 100Ton acoplada a una celda de carga que transmite la información a los transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) y las galgas extensométricas (Strain Gauge), siendo estas receptadas en el adquisidor de datos (Computadora). La carga fue concentrada mediante una placa de 240x560x15 mm y está a una viga I de dimensiones 354x170x8x12 mm, de donde fue repartida a través de dos rodillos de acero ubicados cada uno a un tercio de la longitud de la viga. La velocidad promedio de aplicación de carga fue de 6.75kN/min registrando sus valores cada dos segundo.

Las instrumentaciones se muestran en la figura 1 y 2 utilizándose para las lecturas de desplazamiento vertical en los tercios extremos de la viga el LVDT 2 y 3, para el centro de la viga el LVDT1, para medir los deslizamientos de la losa el LVDT 4 y 5. Los Strain Gauge han sido ubicados estratégicamente en los elementos más críticos que el diagrama de fuerzas axiales de una viga de alma abierta presenta, entre estos el Strain Gauge 1 y 3 en las diagonales de ángulo No. 2 que trabajan a compresión en los extremos, el Strain Gauge 2 en el cordón inferior que trabaja a tención y el Strain Gauge 4 en la silleta de varilla lisa que trabaja a mayor tención que el resto de diagonales.

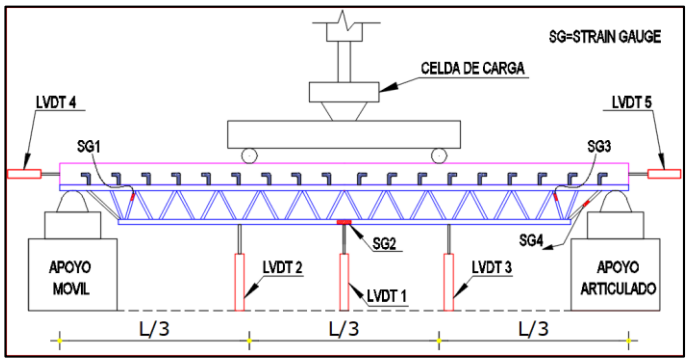


Figura 7. Esquema de los instrumentos utilizados en el ensayo de flexión
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

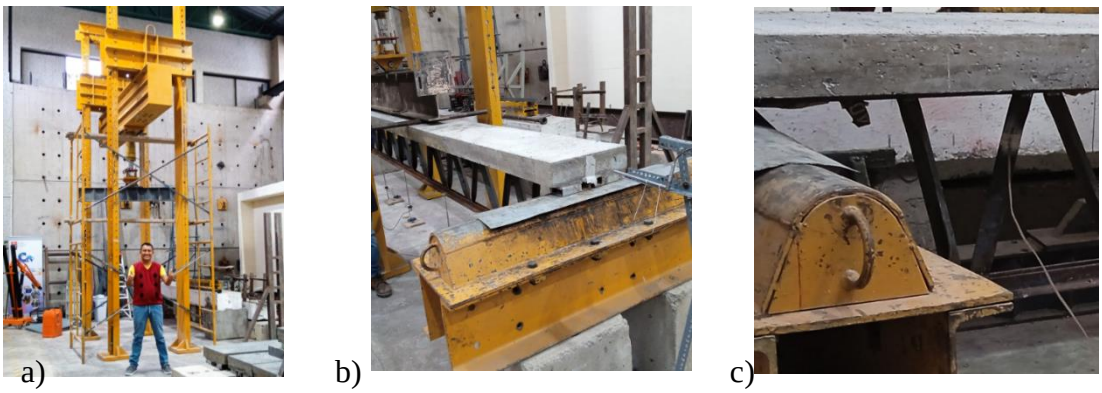


Figura 8. a) Sistema de aplicación de carga. b) Ubicación de LVDT c) Ubicación de Strain Gauge
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

4. Ensayos de flexión realizado en laboratorio

El procedimiento del ensayo a flexión de la viga de alma abierta con losa maciza realizada a 4 probetas enumeradas desde la No. 1 a la 4 se halla respaldado mediante tabulaciones de datos debidamente certificadas entregadas al Investigador mediante acta entrega recepción definitiva por el Centro de Investigaciones de la Vivienda-CIV de la Escuela Politécnica Nacional, además de contar con videos y fotografías de cada uno de los procedimientos llevados a efecto.

4.1 Denominaciones de variables

La investigación realizada planteo dos alternativas, la alternativa "A" consiste en una viga de alma abierta con losa maciza y conectores de varilla corrugada, la alternativa "B" una viga de alma abierta con losa maciza y conectores de ángulo.

La denominación de cada probeta estuvo en función del tipo de conector, su dimensión y espaciamiento. La probeta No. 1 con conectores de corte de varilla corrugada de D=16 mm espaciadas cada 32cm "V1/16/32", para la probeta No. 3 "V3/16/32", para la probeta No. 2 con conectores de corte en ángulo de 50x4 mm espaciadas cada 40cm "L2/50/40" y la probeta No. 4 "L4/50/40"

De los resultados experimentales las cargas representativas promedios en las gráficas son: la carga de diseño por cargas de servicio D+L que se representa "Ps", la carga de diseño última 1.2D+1.6L con "Pdu", la de fluencia en el límite elástico "Py", la de inicio característico de la deformación a flexocompresión "Pfc", la de inicio de deformación al alabeo "Pal", la de resistencia última "Pu" y la carga de inicio de deformación a la torsión "Ptor". En cuanto a las deflexiones verticales en el límite de servicio "δs", el límite de diseño ultimo "δdu", el límite elástico "δy" y el límite de resistencia última "δu". Las lecturas de los Strain Gauge en la zona elástica teórica "εy"

4.2 Descripción del ensayo

Figura 9. A partir de una carga de 14 toneladas se observan las primeras fisuras en la losa. Al alcanzar las 14,5 toneladas, se produce el colapso por flexo-compresión de las

diagonales N.º 2 y N.º 4 en el lado izquierdo. Conforme se incrementa la carga, se evidencia un alabeo generalizado en el sistema. Posteriormente, al iniciarse el descenso en la curva carga-deformación, se presenta un fenómeno de flexo-torsión que afecta a las diagonales N.º 2, N.º 4 y N.º 6 en el extremo izquierdo. Finalmente, en cuestión de segundos, se genera una falla por corte en el hormigón, localizada cerca de la zona de transmisión de carga en el extremo izquierdo.

a)  b) 

Figura 9. Probeta V1/16/32 a) Fractura a corte del hormigón, b) Falla a flexo-torsión de las 3 diagonales críticas
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Figura 10. A partir de las 13Ton con 36.55mm de deflexión se presenta el colapso a flexo compresión en la diagonal No. 2 del extremo derecho, posteriormente a 13.2Ton colapsa de la misma manera la diagonal No. 2 del extremo izquierdo, continua la deformación inelástica y se presenta la flexo-torsión en la diagonal No. 2, No. 4 y No. 6, determinándose que el efecto torsor en las diagonales se presenta al decaer la gráfica P vs δ una vez que experimenta la carga máxima de rotura. En esta probeta la losa se flexiono sin grietas y sin colapso al nivel de carga máxima de rotura

a) b)

Figura 10. Probeta V3/16/32 a) No se presentó fractura en el hormigón, b) Falla a flexo-torsión de las 3 diagonales críticas
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Figura 11. A partir de las 11.7 Ton se agrieta la losa en ambos extremos, a las 12.7Ton colapsa a flexocompresión la diagonal No. 2 en el extremo derecho, seguidamente falla a corte el hormigón cerca de la zona de transmisión de carga en el punto 2, quedando el extremo izquierdo de la viga con diagonales a leve deformación.

a)  b) 

Figura 11. Probeta L2/50/40 a) Fractura a corte del hormigón, b) Falla a flexo-compresión de la diagonal de perfil No. 2
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Figura 12. Las diagonales No. 2 y 4 extremo izquierdo a las 13.30 Ton con 41mm de deflexión presentan flexo-compresión y a los pocos segundos el alabeo, siendo la primera en presentar deformaciones la diagonal No. 2, un patrón de respuesta que se ha venido dando en todas las probetas.

A las 13.41Ton con 49.68mm inicia las flexo-torsión en las diagonales críticas No. 2 ubicadas al extremo izquierdo, decae la curva y la carga, a las 13.32 Ton la losa falla a corte en el extremo izquierdo a L/3 cerca de la zona de transmisión de carga y a la vez fallan a flexotorsión las diagonales No. 2 y 4. En este nivel de carga la deflexión las diagonales extremo derecha no llegaron al colapso, pero se produjo la deformación por flexo-compresión e inicio el alabeo sin llegar al colapso conforme figura 16 b).

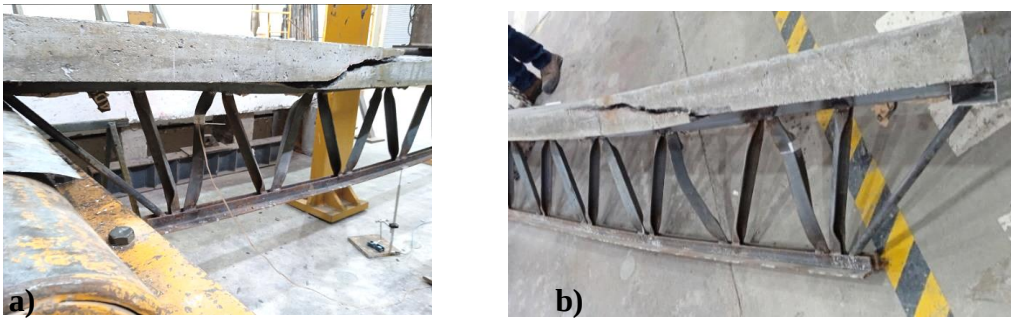
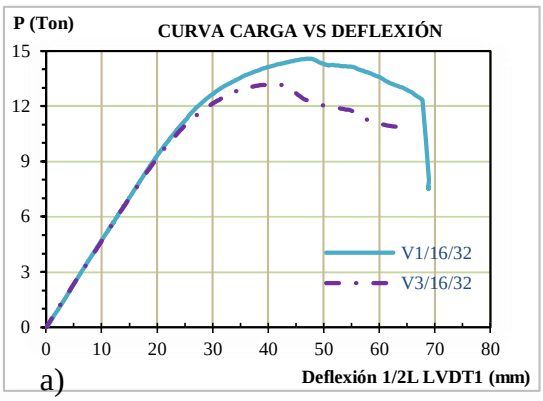


Figura 12. Probeta L4/50/40 a) Fractura a corte del hormigón, b) Falla a flexo-torsión de la diagonal de perfil No. 2 y 4
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

5. Resultados expresados en gráficas y tabulaciones

5.1 Ensayos en probetas con conectores de varilla corrugada y ángulos, usando lector LVDT para deflexiones verticales.



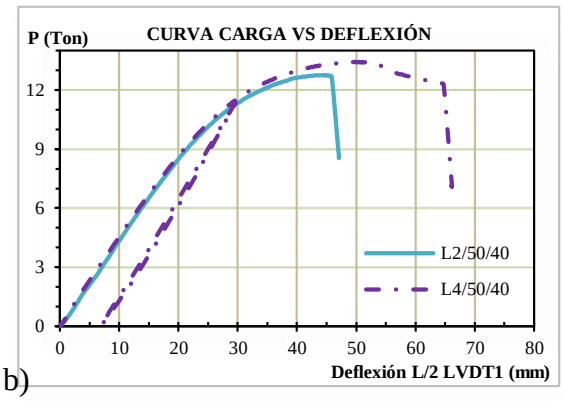


Figura 13. Cordón inferior central a) Curva carga vs deflexión de probeta con conector de varilla, b) Curva carga vs deflexión de probeta con conector de ángulo
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Tabla 5. Datos procesados de ensayos en viga de alma abierta con conectores de varilla corrugada

VIGA CON CONECTORES DE VARILLA CORRUGADA D=16mm									
Probeta	**δs (mm)**	**Ps (Ton)**	**Pdu (Ton)**	**δy (mm)**	**Py (Ton)**	**δu (mm)**	**Pu (Ton)**	**δrot (mm)**	**Purot (Ton)**
V1/16/32	3.1	1.44	7.71	19.1	9.60	47.75	14.56	67.82	12.32
V2/16/33	3.3	1.44	7.71	18.4	9.04	41.22	13.20	63.80	10.71
Promedio	**3.20**	**1.44**	**7.71**	**18.75**	**9.32**	**44.49**	**13.88**	**65.81**	**11.52**
Procesamiento de datos experimentales									
Desv. Estandar	0.14	0.00	0.00	0.49	0.40	4.62	0.96	2.84	1.14
% de dispersión datos	4.42%	0.00%	0.00%	2.64%	4.25%	10.38%	6.93%	4.32%	9.89%
Ke rigidez zona elástica	26.87°	grados							
Ke rigidez zona plástica	10.05°	grados							
Ductilidad	3.51								
Energia disipada Ue	87.38	Ton.m							
Energia disipada Uu	298.53	Ton.m							

Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Tabla 6. Datos procesados de ensayos en viga de alma abierta con conectores de ángulo

VIGA CON CONECTORES DE ANGULO 50X4mm									
Probetas	**δs (mm)**	**Ps (Ton)**	**Pdu (Ton)**	**δy (mm)**	**Py (Ton)**	**δu (mm)**	**Pu (Ton)**	**δrot (mm)**	**Purot (Ton)**
L2/50/40	3.5	1.44	7.71	18	8.30	45.84	12.70	45.83	12.70
L4/50/41	3.2	1.44	7.71	19	7.80	50.36	13.41	64.76	12.27
Promedio	**3.35**	**1.44**	**7.71**	**18.50**	**8.05**	**48.10**	**13.06**	**55.30**	**12.49**
Procesamiento de datos experimentales									
Desv. Estandar	0.21	0.00	0.00	0.71	0.35	3.20	0.50	13.39	0.30
% de dispersión datos	6.33%	0.00%	0.00%	3.82%	4.39%	6.64%	3.85%	24.21%	2.44%
Ke rigidez zona elástica	23.57°	grados							
Ke rigidez zona plástica	9.60°	grados							
Ductilidad	2.99								
Energia disipada Ue	74.46	Ton.m							
Energia disipada Uu	312.35	Ton.m							
Comparación de sistemas	4%			-1%	-16%	8%	-6%	-19%	8%

Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

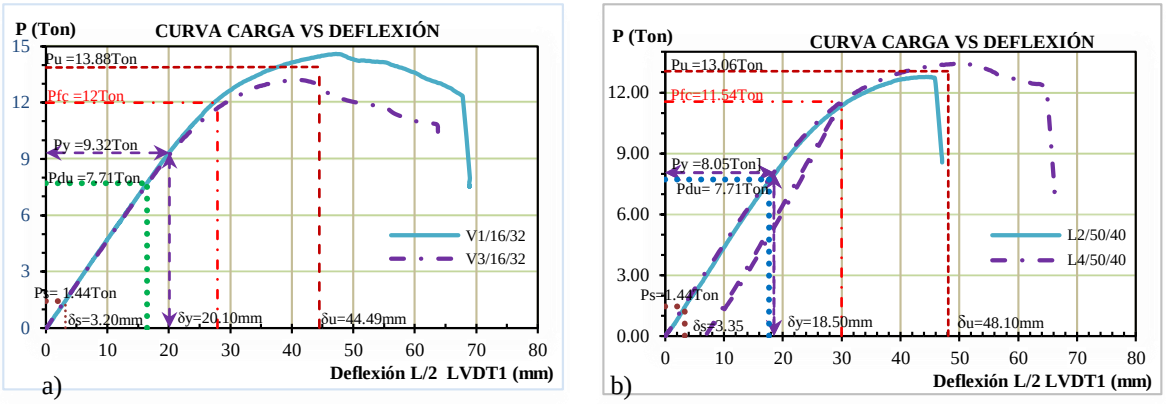


Figura 14. Cordón inferior central a) Curva carga vs deflexión descriptiva de probetas con conectores de varilla, b) Curva carga vs deflexión descriptiva de probetas con conectores de ángulo
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

5.2 Ensayos en probetas con conectores de varilla corrugada y ángulos, usando lector LVDT para deslizamientos laterales de losa.

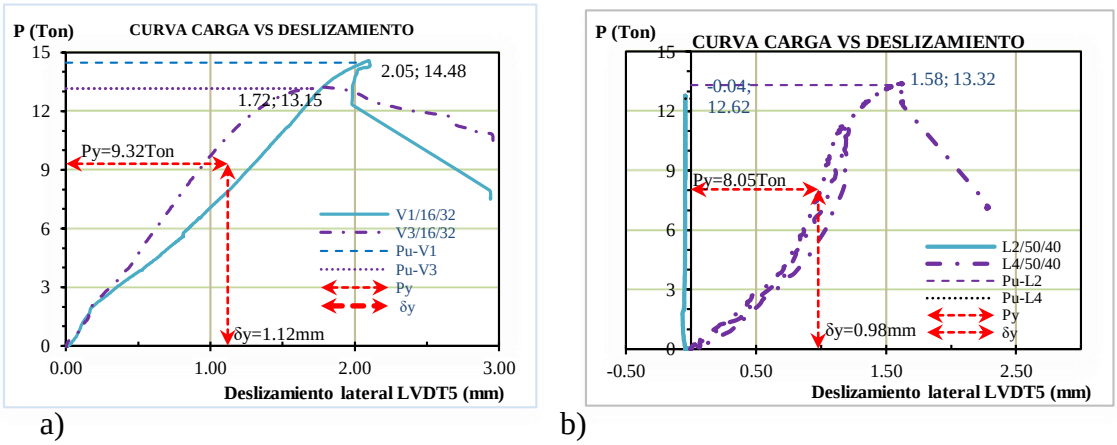


Figura 15. Deslizamientos laterales extremo derecho a) Curva carga vs deslizamiento de losa con conector de varilla, b) Curva carga vs deslizamiento de losa con conector de ángulo
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

5.3 Ensayos en probetas con conectores de ángulos, usando Strain Gauge.

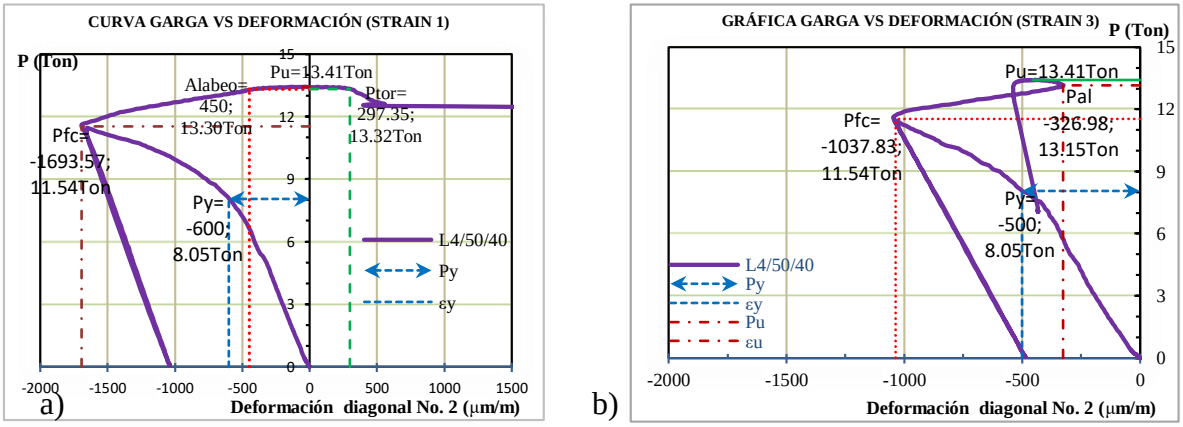
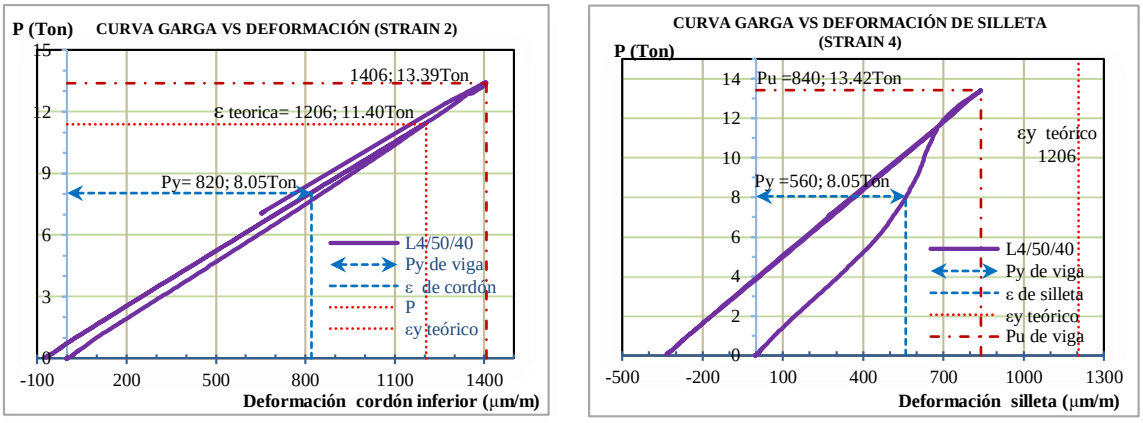


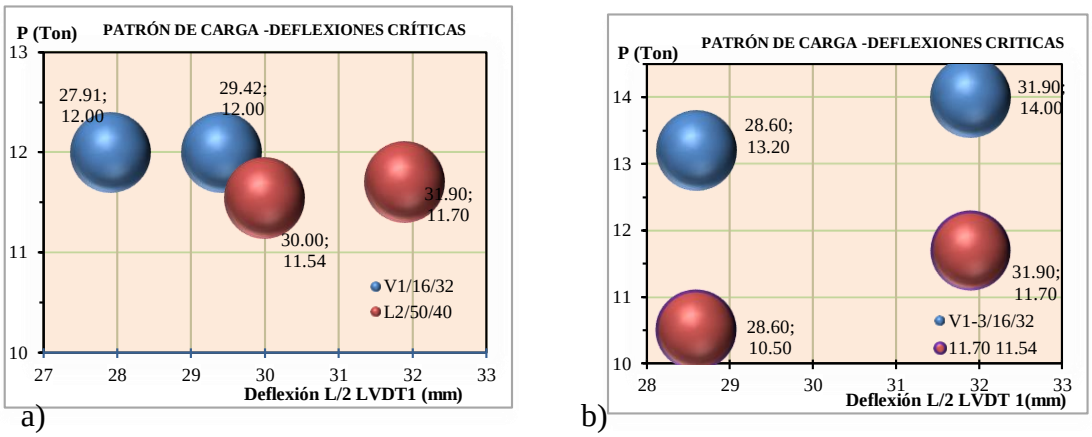
Figura 16. Probetas con conectores de ángulo a) Curva carga vs deformación de diagonal No. 2 extremo izquierda, b) Curva carga vs deformación de diagonal No. 2 extremo derecha

Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes



a) b)

Figura 17. Probetas con conectores de ángulo a) Curva carga vs deformación del cordón inferior 1/2L, b) Curva carga vs deformación de la silleta en varilla lisa extremo derecho
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes



a) b)

Figura 18. a) Patrón de carga -deflexiones críticas en diagonales, b) Patrón de carga -inicio de grietas en losa maciza (ductilidad y resistencia por conectores)
Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

6. Análisis de resultados

Tablas 5 y 6. Presentan los datos obtenidos a partir de las gráficas Carga vs deflexión de las Figuras 13(a) y 13(b), correspondientes a los ensayos de las alternativas A y B detallada en numeral 4.1. En estas tablas se incluyen valores representativos del ensayo, donde se observa que la desviación estándar es inferior al 10%, lo que indica una baja dispersión de los datos y, por consiguiente, una alta confiabilidad en los resultados.

En las tablas 5 y 6 se realiza una comparación de los promedios de cargas y deformaciones, presentándose como sistema equivalente únicamente el valor de la deflexión en el límite elástico para las alternativas A y B. Para los demás puntos de la curva, se observa un margen de error superior a ±5%, lo que evidencia que ambos sistemas presentan diferencias significativas en sus propiedades mecánicas y comportamientos estructurales.

Tablas 5 y 6. En las regiones elásticas, se observa que la rigidez de la alternativa A es mayor que la de la alternativa B, en un 14%. Esta tendencia se mantiene en la zona plástica, donde la alternativa A presenta un desempeño del 4.7% superior. Estos resultados se pueden visualizar conforme al área elástica de Figura 14 (a) y 14(b), donde se puede palpar que la primera alternativa exhibe un comportamiento estructural más favorable en la fase lineal.

Figura 14(a). Muestra una zona lineal de mayor gradiente y una curva plástica más extendida en comparación con la Figura 14(b), lo que proporciona información preliminar que sugiere que la alternativa A presenta una mejor ductilidad y una mayor capacidad para disipar energía en la región elástica. Por otro lado, la alternativa B muestra una mayor capacidad de disipación de energía en la zona plástica. Corroborando los resultados las Tablas 5 y 6 que indican que la alternativa A tiene un 17.43% más de ductilidad y un 17.34% mayor capacidad de disipar energía que la alternativa B en la región elástica. Sin embargo, en la zona plástica, la diferencia en la capacidad de disipar energía es de solo un 4.40%.

Figura 14 (a) y (b). En las curvas P vs. δ obtenidas del ensayo, se observa que, de acuerdo con los cálculos teóricos presentados en la Tabla 8, ambas alternativas A y B operan dentro de la región elástica cuando se someten a la carga de diseño Pu=7.71 Ton, cuando las cargas máximas de rotura de las vigas ensayadas llegaron a Pu=13.85 Ton y Pu=13.06 Ton, observándose datos de resistencia reales muy conservadoras.

Asimismo, se identifica el inicio del fenómeno de flexocompresión en las diagonales críticas No. 2 y 4 a una carga de Pfc=1.5Pdu, es decir, desde 11.54 Ton, Este fenómeno se intensifica en la región plástica, extendiéndose hasta que se genera el alabeo en la estructura, el cual ocurre al alcanzar el 98% de la capacidad máxima de carga, con un valor de Pal=0.98Pu =13.15 Ton. Posteriormente, con el descenso de la curva, se da inicio al proceso de flexotorsión, que culmina con la falla a flexotorsión a una carga de Ptor=0.99Pu=13.32 Ton. Finalmente, un segundo después, se produce la falla por corte del hormigón en la zona de corte que esta entre el apoyo y el punto de transmisión de carga, evidenciando el colapso del elemento.

Figura 14 (b) Durante el ensayo de flexión en la alternativa B probeta L4/50/40, al alcanzar una carga de 11.34 Ton, las lecturas del LVT 1 registradas en la pantalla de adquisición de datos indicaron que la probeta había ingresado a la zona plástica. En este punto, se decidió retirar la carga para observar el comportamiento de la estructura ante la descarga. Tras la remoción de la carga, tanto esta como las deflexiones retornaron próximos al eje de ordenadas (0,0), deteniéndose en P = 0.11 Ton con una deflexión permanente de δ = 7.15 mm. Dicha deformación resultó imperceptible a simple vista en la losa y en los elementos estructurales de la viga.

Figura 15 (a) y (b) se observa que la alternativa A presenta curvas más homogéneas, lo que permite identificar con mayor claridad las regiones elástica y plástica de la viga. Además, esta alternativa mostró un 14% más de deslizamiento en comparación con la alternativa B, lo que corrobora su mejor comportamiento dúctil. Asimismo, al nivel de

carga Py, los desplazamientos de la losa permanecen dentro de la región elástica, mientras que, al alcanzar la carga Pu, los deslizamientos se producen en la zona plástica. Esto evidencia el trabajo estructural de los conectores de corte al mantener toda la estructura unida como un solo sistema.

La Figura 17(a). En cuanto a la deformación teórica del acero A36, con un valor de 0.0012, los Strain Gauges calibrados registran este dato como 1200 μm/m para identificar el límite de deformación elástica a tracción. A partir de estos valores, se evidencia que, a una carga de P=13.39Ton se tenía una deformación de 1406 μm/m en el cordón inferior, lo que demuestra que este elemento a tracción tiene mucha más deformación por resistir en el rango elástico, a pesar que el sistema compuesto a flexión ya colapso.

Tabla 7. Resumen de cargas de ensayo adaptados al diseño

Probeta	l (m)	h (m)	de (m)	Aci 2L40x6mm (cm^2)	q= (1.2D+1.6L)*be (Ton/m)	Teórica Pu=q*l (Ton)	Ensayo Pu LVDT 1 (Ton)	Ensayo Eficiencia de viga (%)	Ensayo Promedio de Eficiencia de viga (%)
V1/16/32	6.00	0.45	0.53	8.88	1.28	7.71	14.56	189%	180%
V3/16/32	6.00	0.45	0.53	8.88	1.28	7.71	13.20	171%	
L2/50/40	6.00	0.45	0.53	8.88	1.28	7.71	12.70	165%	169%
L4/50/40	6.00	0.45	0.53	8.88	1.28	7.71	13.41	174%	

Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Tabla 7. A partir de las lecturas de P vs ε obtenidas en LVDT1 medidor de desplazamiento ubicado en el cordón inferior, se determinó del ensayo el nivel de carga ultima Pu y se procedió a realizar comparaciones con la carga última de diseño teórica, dando como resultado que la alternativa A es más eficiente en resistencia en un 180%, mientras que la alternativa B es más eficiente en un 169%. Como resultado de estos ensayos se corrobora la veracidad de la metodología de cálculo establecida por el SJI y el AISC360-16 para el diseño de vigas de alma abierta con sistemas compuestos.

Figura 17 (b) La deformación de la silleta de varilla lisa extremo derecho opuesto a la zona de falla de la viga, se observa que trabajo en la zona elásticas todo el proceso de carga hasta la falla de todo el sistema, además se puede ver que al nivel de Py estuvo trabajando al 60% de limite elástico y al nivel de Pu una deformación elástica de 840μm/m muy distante de la deformación teórica 12000μm/m.

Figura 17(a) y 17(b). Estas gráficas confirman que los elementos de acero son altamente eficientes para resistir esfuerzos de tracción, pero no presenta el mismo desempeño bajo compresión. Esta conclusión se respalda en la observación de los elementos que experimentaron fallas, siendo las diagonales a compresión las que fallaron en todos los ensayos, incluso llegaron a presentar fallas a flexotorsión, mientras que los elementos a tención de diagonales no sufrieron deformaciones visibles.

En las gráficas de la Figura 16 (a) y (b), se observa que, al alcanzar la carga Py = 8.05 Ton, ambas diagonales No. 2, ubicadas en los extremos y consideradas las más críticas frente a fuerzas axiales de compresión, se encuentran trabajando al límite de su rango elástico. La deformación promedio registrada en estos elementos es de 550 μm/m, valor

que representa el máximo a controlar mediante los Strain Gauges en condiciones de compresión. Este resultado demuestra que la deformación a compresión es aproximadamente el 46% de la deformación correspondiente al límite elástico en tracción.

Asimismo, se identifican los puntos claves en las curvas donde ocurren distintos fenómenos estructurales: Inicio de la flexocompresión Pfc, Inicio del alabeo Pal, Desarrollo del fenómeno de flexotorsión Ptor y Falla estructural final. Estos eventos son especialmente evidentes en la diagonal extrema izquierda de la Figura 16(a), donde se registró el colapso del elemento.

Tabla 8. Comparaciones de deflexiones entre las calculadas y las del ensayo

Probeta	l (m)	h (m)	de (m)	Ps= Carga Viva (Ton)	Cálculada Deflexión a Ps (mm)	Ensayo Deflexión a Ps (mm)	Deflexión permisible(mm)	Eficiencia viga por deflexión a Ps %	Promedio Eficiencia Viga %
V1/16/32	6.00	0.45	0.53	1.44	3.34	3.10	16.67	93%	96%
V3/16/32	6.00	0.45	0.53	1.44	3.34	3.30	16.67	99%	
L2/50/40	6.00	0.45	0.53	1.44	3.34	3.50	16.67	105%	100%
L4/50/40	6.00	0.45	0.53	1.44	3.34	3.20	16.67	96%	

Autor: Ing. Cristian Oña Cifuentes

Tabla 8. Se presentan los resultados de cálculo de deflexiones de una viga bajo un nivel de carga de servicio por carga viva de de 1.44 Ton, lo que se asume que ambas se encuentran dentro del rango elástico. A partir de esta lógica, se recopilan de la curva P vs δ de figura 14 (a) y (b) las deflexiones correspondientes a estos puntos de carga. Estas deflexiones se comparan con las deflexiones permisibles recomendadas por el ACI 318-99 [33] y se observa que las deflexiones de la alternativa A son un 96% de las deflexiones teóricas, en cuanto a la alternativa B sus deflexiones son un 100% iguales a la teóricas.

Figura 18 (a) y (b). El análisis del patrón de carga-deflexiones críticas en las diagonales indica que la alternativa B es la primera en presentar deformaciones significativas, ocurriendo a un nivel de carga de P = 11.54 Ton mientras que el sistema B los presento a P=12 Ton, dentro de la región plástica. De manera similar se evidencia que el sistema B presento grietas por corte en la losa maciza a un nivel de carga de P = 10.50 Ton en tanto que el sistema B presento grietas en Pu=13.20 Ton, lo que demuestra que el sistema A es más resistente que el sistema B.

En esta investigación, se observaron deformaciones características en todas las probetas, especialmente en las diagonales críticas. Primero, se identificó el inicio de la flexocompresión, lo que indica que el sistema disipa aproximadamente un 36 % de la energía dentro de la región plástica, a este nivel no se observaron grietas en el hormigón. Si este fenómeno continúa sin control, se produce la deformación por alabeo local, señalando que el sistema ha alcanzado el límite de su capacidad de disipación de energía en la zona plástica y a este nivel es muy notable la deflexión y grietas en la losa. En este punto, es crucial tomar medidas de emergencia, ya que el sistema compuesto comienza a perder su capacidad resistente. Posteriormente, se genera la flexotorsión en las diagonales afectadas, lo que, junto con el colapso del hormigón, conduce al fallo total del sistema.

7. Conclusiones

Del análisis de comparaciones entre deflexiones obtenidas en el ensayo y las teóricas calculadas, se determina que las deflexiones del sistema A fueron menores a las teóricas en un 4%, mientras que las del sistema B fueron idénticas, lo que da como conclusión que el sistema B es más eficiente en deflexiones que el sistema B, sin embargo, ambos sistemas se hallan cumpliendo la deformación permisible.

Las curvas P-δ obtenidas en el ensayo de ambas alternativas presentan un área reducida de disipación de energía en la región elástica y un área más amplia en la zona plástica. Su comportamiento sigue una tendencia definida por tres regiones: elástica, plástica e inelástica. Esto confirma que la geometría de estas curvas es característica de diseños dúctiles, lo que refuerza la validez de las metodologías de cálculo publicadas en el SJI, ya que estas permiten que los diseños operen dentro del rango elástico.

En esta investigación, se observaron deformaciones características en todas las probetas, especialmente en las diagonales críticas. Inicialmente, se identificó el inicio de la flexocompresión, lo que indica que el sistema disipa aproximadamente un 34 % de la energía dentro de la región plástica para que se origine esta característica. Si este fenómeno continúa sin control, se produce la deformación por alabeo local, señalando que el sistema ha alcanzado el límite de su capacidad de disipación de energía en la zona plástica y a este nivel es muy notable la deflexión en la losa. En este punto, es crucial tomar medidas de emergencia, ya que el sistema compuesto comienza a perder su capacidad resistente. Posteriormente, se genera la flexotorsión en las diagonales afectadas, lo que, junto con el colapso del hormigón, conduce al fallo total del sistema.

El grado de eficiencia de las vigas de alma abierta alternativa A en cargas de diseño ultimo Pu fue del 180% mientras que la alternativa B fue del 169% concluyéndose que el sistema de viga compuesto con conectores de corte de varillas corrugadas es mejor en un 11% que el sistema con conectores de ángulo.

Las fracturas características observadas en la losa durante este ensayo se produjeron por corte, entre el apoyo y el punto de transmisión de carga a L/3. Se concluye que, debido a la configuración de la viga apoyada con dos cargas puntuales, las zonas de corte máximo se ubicaron en el tramo donde ocurrieron las fracturas experimentales. Esto respalda las metodologías de cálculo basadas en la teoría de la resistencia de materiales. Sin embargo, en una viga sometida a cargas distribuidas típicas de una edificación, el diagrama de cortante presenta su valor máximo en los extremos, lo que provocará que la fractura por corte se localice en las cercanías de los apoyos.

El costo de los 18 conectores de varilla corrugada instalados en cada probeta fue de $14.28, mientras que el de los 14 conectores tipo ángulo fue de $8.72, siendo un 64% más costos los conectores de varilla por cada viga fabricada.

En esta investigación, se observaron patrones de deformaciones en todas las probetas, especialmente en las diagonales críticas, las cuales alertan al usuario a tomar medidas de remediación ante un evento de colapso por exceso de cargas fuera del diseño.

Las metodologías de cálculo adaptadas en esta investigación para conectores de corte en varilla corrugada y ángulos, demostraron ser experimentalmente eficientes, puesto, que durante el colapso del sistema compuesto no se observaron deformaciones ni daños estructurales, tanto en el material como en el cordón de soldadura

8. Recomendaciones

Es necesario realizar más ensayos experimentales utilizando medidores de deformación en el cordón inferior, así como en los extremos del cordón superior. Además, se deben incluir mediciones en las diagonales más críticas (No. 2, 4 y 6). Esto permitirá obtener un factor de ajuste promedio, que facilitará el prediseño de vigas de alma abierta de manera más eficiente, asegurando que trabajen dentro de la zona elástica y mejorando la precisión en futuros análisis estructurales.

Se recomienda al construir una probeta de viga de alma abierta soldar las diagonales saltando una para evitar el pandeo lateral por calor de fusión, en los apoyos soldar un elemento a cada lado para estabilizar la muestra en el ensayo y finalmente para conformar un apoyo estático fijar un extremo q asemeje la articulación y dejar libre el otro extremo para generar un apoyo de rodillo, aspecto que no se tomó en cuenta en este ensayo.

Se recomienda, al construir una probeta de viga de alma abierta, soldar las diagonales de manera alternada (saltando una) para evitar el pandeo lateral provocado por el calor de fusión durante el proceso de soldadura.

En los apoyos, se sugiere soldar un elemento a cada lado de la probeta para estabilizar la muestra durante el ensayo, asegurando así una correcta sujeción y evitando deformaciones no deseadas.

Finalmente, para conformar un apoyo estático adecuado, se debe fijar un extremo de la viga para simular una articulación y dejar libre el otro extremo, generando un apoyo de rodillo. Este aspecto no fue considerado en el ensayo realizado, pero es esencial para replicar condiciones de apoyo más realistas en futuras investigaciones.

7.- Bibliografía

[1] Yost Joseph Robert, Dinehart David W., Gross Shawn P., Pote Joseph J., y Gargan Brian, «Strength and Design of Open Web Steel Joists with Crimped-End Web Members», *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, n.º 5, Art. n.º 5, may 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:5(715).

[2] *SSM Joist Joist Girder Systems*. 2023.

[3] C. Chicaiza, D. Ayala, L. T. Rodríguez, G. Velástegui, y R. Baquero, «Comparación del comportamiento entre conectores de corte angulares de diferentes espesores bajo cargas monotónicas y cíclicas», jul. 2021, doi: 10.13140/RG.2.2.18659.27684.
[4] L. Hernández, M. J. Cevallos López, J. A. Mera Vera, y E. Guaminga, «Análisis de conectores de corte tipo ángulo en vigas compuestas de acero y hormigón», *Revista de Ciencias Tecnológicas*, vol. 6, n.º 3, pp. 1-15, 2023.
[5] M. N. A. Salih *et al.*, «Bending experiment on a novel configuration of composite system using rebar as shear connectors with partially encased cold-formed steel built-up beams», *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, pp. 999-1005, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.647.
[6] E. G. Alava Apráez, «Estudio experimental de conectores de corte en la unión losa LOSA DECK - VIGA ACERO», bachelorThesis, 2021. Accedido: 18 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/32587
[7] M. S. Abduljabbar, M. J. Hamood, y W. S. Abdulsahib, «Comportamiento a flexión de una viga compuesta de alma abierta de acero y losa de concreto.», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 737, n.º 1, p. 012017, feb. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/737/1/012017.
[8] *SSM Joist Joist Girder Systems*. 2023.
[9] G. Varón y C. Hernán, «Comparación de conectores de cortante tipo espigo con cabeza con tipo perno sobre tablero metálico».
[10] E. J. Sippel, R. D. Ziemian, y H. B. Blum, «Influence of torsional stiffness in double-angle open-web joist and joist girder chords», *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 199, p. 107595, dic. 2022, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107595.
[11] E. J. Sippel, R. D. Ziemian, y H. B. Blum, «Influence of torsional stiffness in double-angle open-web joist and joist girder chords», *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 199, p. 107595, dic. 2022, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107595.
[12] *Specification for Structural Steel Buildings American Institute of Steel Construction*. 2019.
[13] L. A. A. de Seixas Leal y E. de Miranda Batista, «Experimental investigation of composite floor system with thin-walled steel trussed beams and partially prefabricated concrete slab», *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 172, p. 106172, sep. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.106172.
[14] L. J. Henao Rodríguez, «Comportamiento de conectores de cortante tipo canal en sistemas de entrepiso conformados por viguetas en celosía, lámina colaborante y concreto reforzado», Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Accedido: 22 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1252?show=full
[15] J. C. Huertas Muñoz, «Comportamiento de canales como conectores de cortante para un sistema de Sección compuesta usando lámina colaborante», 2013, Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/50823
[16] R. Mauricio Rodríguez, «Comportamiento de conectores de cortante tipo canal en sistemas de entrepiso conformados por viguetas en celosía, concreto reforzado y lámina colaborante: Planteamiento de ecuación para cálculo de la capacidad de conectores», Posgrado en Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia, 2019. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1287

[17] J.-S. Lee, K.-J. Shin, H.-D. Lee, y J.-H. Woo, «Strength Evaluation of Angle Type Shear Connectors in Composite Beams», *Int J Steel Struct*, vol. 20, n.º 6, pp. 2068-2075, dic. 2020, doi: 10.1007/s13296-020-00433-2.
[18] R. Azzawi y N. Varughese, «Comportamiento a flexión de vigas compuestas de vigas de acero preflex y hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) encapsulado.», *Results in Engineering*, vol. 7, p. 100122, sep. 2020, doi: 10.1016/j.rineng.2020.100122.
[19] M. Redecki y B. Gosowski, «Effort and bearing capacity testing of laterally restrained asymmetrical stepped steel I-columns», *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 172, p. 106181, sep. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.106181.
[20] Y. Li, T. Zhou, L. Ren, L. Sang, y L. Zhang, «Elastic buckling of composite webs in back-to-back cold-formed steel built-up columns-Part II: Design formula», *Structures*, vol. 33, pp. 3515-3525, oct. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.05.100.
[21] G. Merryfield, A. El-Ragaby, y F. Ghrib, «New shear connector for Open Web Steel Joist with metal deck and concrete slab floor system», *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 1-11, oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.006.
[22] M. N. A. Salih *et al.*, «Bending experiment on a novel configuration of composite system using rebar as shear connectors with partially encased cold-formed steel built-up beams», *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, pp. 999-1005, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.647.
[23] M. Díaz, L. Hernández, y G. Parra, «SISTEMAS DE PISOS COMPUESTOS CON VIGAS DE ALMA ABIERTA», *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, vol. 26, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2021, doi: 10.24133/riie.v26i1.1961.
[24] Yost Joseph Robert, Dinehart David W., Gross Shawn P., Pote Joseph J., y Gargan Brian, «Strength and Design of Open Web Steel Joists with Crimped-End Web Members», *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, n.º 5, pp. 715-724, may 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:5(715).
[25] *Instituto Ecuatoriano de Normalización, «Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especimenes cilindros de hormigón de cemento hidraulico», NTE INEN 1573, Ecuador*. 2020.
[26] *Americán Society for Testing and Materials, «Standar Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens», C39/C39M-20, United States of America, ASTM*. 2021.
[27] M. Díaz, L. Hernández, y G. Parra, «Sistemas de pisos compuestos con vigas de alma abierta», *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, vol. 26, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2021, doi: 10.24133/riie.v26i1.1961.
[28] *Steel Joist Institute SJI, Standard Specifications, Load Tables and Weight Tables For Steel Joists and Joist Guirders*. 2010.
[29] *AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION ANSI/AISC 360-22*. 2022.
[30] *AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION ANSI/AISC 341-16*. 2022.
[31] *Ecuadorian Construction Standar NEC «Estructuras de Acero» NEC-SE-AC, Ecuador, MIDUVI*. 2023.
[32] *Ecuadorian Construction Standar NEC Seismic Loads Seismic Design NEC-SE-DS, Ecuador, MIDUVI*. 2023.
[33] *AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 318RS-14*. 2014.
[34] *International Organization for Standardization ISO 7438*. 2016E.
[35] *American Society for Testing and Materials ASTM A370-03a*. 2001.

[36] *S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1970.*