

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Tema: Evaluación de estado límite por deflexión en losas con vigas compuestas tipo Joist fabricadas con acero ASTM A36.

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

Modalidad del Trabajo de Titulación: Proyecto de Titulación con Componentes de Investigación Aplicada y/o de Desarrollo

Autor: Ing. Miguel Angel Allauca Llamuca

Director: Ing. Jorge Washington Cevallos Cabrera, Mg.

Ambato – Ecuador

2023

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

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por: Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg., e integrado por los señores: Ing. José Wladimir Ramírez Cabrera, Mg. e Ing. Carlos Patricio Navarro Peñaherrera, Mg.; designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “EVALUACIÓN DE ESTADO LÍMITE POR DEFLEXIÓN EN LOSAS CON VIGAS COMPUESTAS TIPO JOIST FABRICADAS CON ACERO ASTM A36”, elaborado y presentado por el Ing. Miguel Angel Allauca Llamuca, para optar por el Título 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 UTA.



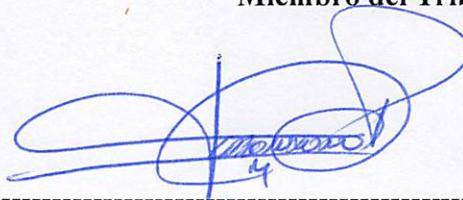
Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal



Ing. Wladimir José Ramírez Cabrera, Mg.

Miembro del Tribunal

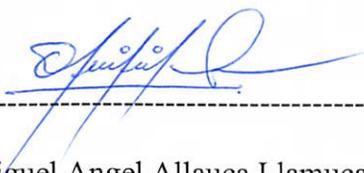


Ing. Carlos Patricio Navarro Peñaherrera, Mg.

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: EVALUACIÓN DE ESTADO LÍMITE POR DEFLEXIÓN EN LOSAS CON VIGAS COMPUESTAS TIPO JOIST FABRICADAS CON ACERO ASTM A36, le corresponde exclusivamente a: Ing. Miguel Angel Allauca Llamuca, Autor bajo la Dirección de Ing. Jorge Washington Cevallos Cabrera, Mg., Director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Miguel Angel Allauca Llamuca

c.c.: 0603477019

AUTOR



Ing. Jorge Washington Cevallos Cabrera, Mg.

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. Miguel Angel Allauca Llamuca

c.c.: 0603477019

ÍNDICE GENERAL

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.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
AGRADECIMIENTO.....	xii
DEDICATORIA	xiii
RESUMEN EJECUTIVO	xiv
EXECUTIVE SUMMARY.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. General	2
1.3.2. Específicos	2
CAPÍTULO II	4
2.1. Evolución de las vigas compuestas	4
2.2. Edificios de acero	6
2.3. Acero estructural	6
2.3.1. Perfiles de acero	7
2.3.2. Relación esfuerzo deformación del acero estructural	7
2.4. Secciones compuestas	8
2.4.1. Secciones compuestas con vigas Joist.....	9

2.4.2.	Componentes de una viga Joist.....	9
2.4.3.	Comportamiento del cordón inferior.....	12
2.4.4.	Comportamiento del cordón superior.....	12
2.4.5.	Comportamiento de las diagonales o alma.....	13
2.5.	Parámetros de diseño.....	13
2.5.1.	Cargas de diseño	13
2.5.2.	Combinaciones de carga	14
2.5.3.	Materiales.....	14
2.5.4.	Ancho efectivo (be).....	14
2.5.5.	Estados límites	15
2.5.6.	Esfuerzos de diseño.....	16
2.5.7.	Joist compuestos.....	18
2.5.8.	Diseño de la cuerda superior	21
2.5.9.	Diseño estado límite de servicio	21
2.5.10.	Conectores viga – losa.....	23
CAPÍTULO III.....		25
3.1.	Ubicación.....	25
3.2.	Equipos y materiales.....	25
3.3.	Tipo de investigación	26
3.4.	Prueba de hipótesis - pregunta científica – idea a defender	26
3.5.	Población o muestra	26
3.6.	Recolección de información	27
3.7.	Procesamiento de la información y análisis estadístico	27
3.8.	Variables respuesta o resultados alcanzados	27
3.8.1.	Variable dependiente.....	27
3.8.2.	Variable Independiente	28
CAPÍTULO IV.....		29

4.1.	Cargas de diseño.....	29
4.2.	Geometría de la viga Joist para el análisis.....	30
4.3.	Límite por deflexión de vigas Joist	31
4.4.	Diseño de viga Joist sin loseta de compresión.	32
4.4.1.	Diseño del cordón inferior de la viga Joist.....	34
4.4.2.	Diseño del cordón superior de la viga Joist	35
4.4.3.	Diseño del alma de la viga Joist.....	36
4.4.4.	Deflexión máxima teórica de la viga Joist no compuesta	37
4.5.	Diseño de viga Joist compuesta con losa maciza.	39
4.5.1.	Deflexión máxima teórica de la viga Joist compuesta con losa maciza.....	41
4.6.	Diseño de viga Joist compuesta con losa con lámina de acero (Steel Deck).....	42
4.6.1.	Deflexión máxima teórica de la viga Joist compuesta con steel deck.....	45
4.7.	Diseño de la silleta.....	46
4.8.	Diseño de conectores de corte	46
4.9.	Resultados de la evaluación de deflexiones por caso de estudio.....	47
4.10.	Probetas de ensayo experimental.....	49
4.11.	Resultado experimental de la prueba carga/deformación	50
4.11.1.	Prueba carga/deformación de la viga Joist no compuesta.....	53
4.11.2.	Prueba carga/deformación de la viga Joist compuesta con losa maciza.....	54
4.11.3.	Prueba carga/deformación de la viga Joist compuesta con steel deck.....	56
4.11.4.	Evaluación de estados límites por deflexión	58
4.11.5.	Falla del hormigón por cortante	59
CAPÍTULO V		61

5.1.	Conclusiones.....	61
5.2.	Recomendaciones.....	63
5.3.	BIBLIOGRAFÍA.....	64
5.4.	ANEXOS.....	67
5.4.1.	Informe de ensayo de compresión del hormigón.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tamaño mínimo del cordón superior para la instalación de pernos de corte soldados.....	16
Tabla 2. Longitud de análisis de la viga y espesor de losa.....	29
Tabla 3. Carga muerta empleada en el análisis	29
Tabla 4. Carga viva empleada en el análisis	29
Tabla 5. Combinaciones de carga	30
Tabla 6. Dimensiones de la viga Joist propuesta	30
Tabla 7. Esfuerzos últimos de diseño.....	34
Tabla 8. Diseño del cordón inferior de una viga Joist.....	34
Tabla 9. Diseño del cordón superior de una viga Joist.....	35
Tabla 10. Diseño del alma de una viga Joist	36
Tabla 11. Deflexión calculada vs admisible.....	38
Tabla 12. Resultados del diseño de viga Joist compuesta con losa maciza.	40
Tabla 13. Análisis de deflexión de la viga Joist compuesta con losa maciza.	41
Tabla 14. Resultados del diseño de viga Joist compuesta con lámina de acero.....	43
Tabla 15. Análisis de deflexión de la viga Joist compuesta con lámina de acero....	45
Tabla 16. Resultados del diseño de la silleta.....	46
Tabla 17. Resultados del diseño de los conectores de corte.....	47
Tabla 18. Comparación de deflexiones admisibles y calculadas	48
Tabla 19. Deflexión de la viga no compuesta	53
Tabla 20. Deflexión de la viga compuesta con losa maciza.....	54
Tabla 21. Deflexión de la viga compuesta con lámina de acero “Steel deck”	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Gráfico 1. Perfiles laminados de acero[17].....	7
Gráfico 2. Curvas características de esfuerzo-deformación[17] [18]	7
Gráfico 3. Detalle de sección compuesta [19].....	8
Gráfico 4. Deflexiones en vigas compuestas vs no-compuestas [11]	8
Gráfico 5. Sistemas de entrepiso constructivos VIGA-TEC[20]	9
Gráfico 6. Componentes de una viga Joist	10
Gráfico 7. Detalle de viga Joist apoyada sobre viga de hormigón [21]	10
Gráfico 8. Detalle de viga Joist apoyada sobre viga de acero [21]	10
Gráfico 9. Detalle de conexión Crimped [21]	10
Gráfico 10. Construcción de viga Joist con diagonales de hierro redondo	11
Gráfico 11. Construcción de viga Joist con diagonales con ángulo.....	11
Gráfico 12. Diagrama de carga vs deformación del cordón inferior de una viga Joist [8].....	12
Gráfico 13. Diagrama de carga vs deformación típica del cordón superior de una viga compuesta [8].....	12
Gráfico 14. Diagrama de carga Vs. deformación típica de las diagonales de una viga compuesta [8].....	13
Gráfico 15. Definición del ancho efectivo, b_e	15
Gráfico 16. Conector de corte tipo canal.....	24
Gráfico 17. Modelo de viga del proyecto.....	31
Gráfico 18. Construcción apuntalada	32
Gráfico 19. Asignación carga viva en unidades de kg/m.....	32
Gráfico 20. Asignación de carga muerta en unidades de kg/m.....	32
Gráfico 21. Resumen de cargas asignadas en unidades de kg/m	33
Gráfico 22. Resultados de esfuerzos axiales de la viga Joist.	33
Gráfico 23. Diagrama de esfuerzos axiales en los elementos de la viga Joist.	34
Gráfico 24. Verificación de demanda/capacidad asistida por el programa de análisis estructural.....	37
Gráfico 25. Dimensiones de los elementos de la viga Joist diseñada.	38
Gráfico 26. Diseño final de viga Joist	39
Gráfico 27. Sección compuesta con losa maciza	39
Gráfico 28. Sección compuesta con lámina de acero “Steel deck”	43

Gráfico 29. Disposición de los conectores de corte tipo canal.....	47
Gráfico 30. Resultados teóricos del estado límite por deflexión.....	48
Gráfico 31. Vigas Joist – secciones no compuestas	49
Gráfico 32. Viga Joist compuesta con losa maciza	49
Gráfico 33. Viga Joist Compuesta con lámina de acero “Steel deck”	50
Gráfico 34. Modelo matemático de viga Joist de sección compuesta.....	50
Gráfico 35. Deflexión de la viga Joist por incremento de carga	51
Gráfico 36. Deformímetro “Clockwise Tools DICR-0105”	51
Gráfico 37. Muestra de experimento de la viga Joist no compuesta.....	52
Gráfico 38. Muestra de experimento de la viga Joist compuesta con losa maciza....	52
.....	
Gráfico 39. Muestra de experimento de la viga Joist compuesta con lámina de acero	
“Steel deck”.....	52
Gráfico 40. Carga deformación de una viga Joist no compuesta.....	53
Gráfico 41. Carga deformación de una viga Joist no compuesta.....	55
Gráfico 42. Punto de falla del hormigón.....	55
Gráfico 43. Carga deformación de una viga Joist compuesta con lámina de acero	
“Steel deck”.....	57
Gráfico 44. Falla del hormigón el sistema de piso con lámina metálica.....	57
Gráfico 45. Análisis comparativo de vigas Joist no compuestas vs vigas Joist	
compuestas.....	58
Gráfico 46. Deformada de una viga simplemente apoyada con carga distribuida...	59
Gráfico 47. Agrietamiento por flexión y cortante en vigas de hormigón	59
Gráfico 48. Agrietamiento del hormigón – viga Joist compuesta con losa maciza .	60
Gráfico 49. Agrietamiento del hormigón – viga Joist compuesta con lámina de acero	
.....	60

AGRADECIMIENTO

“El agradecimiento es la memoria del corazón”

Lao Tsé

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto, gracias a la vida porque cada día me demuestra lo hermosa que es y lo justa que puede llegar a ser.

Me permito extender mi agradecimiento a la Universidad Técnica de Ambato, por abrirme las puertas para continuar con mi formación profesional.

Al Ing. Jorge Washington Cevallos Cabrera, Mg.; por brindarme su apoyo, conocimientos y acompañarme en el desarrollo de este proyecto titulación.

A la Ing. Marisol Bayas, por su calidez y preocupación durante nuestra formación académica y titulación.

Al personal docente, administrativo y compañeros de la Cohorte 2021 de la Maestría en Ingeniería Civil, Mención Estructuras Metálicas, por hacer posible que se cumpla a satisfacción este programa de formación.

Al Ing. Andrés Pulido Gerente de VIGA-TEC, por el aporte invaluable y asesoramiento oportuno del proyecto de investigación.

Al Ing. Iván Lara Castro e Ing. Edison Díaz, gracias por su amistad, apoyo incondicional y aporte realizado para el cumplimiento de este sueño.

Al Dr. Galo Naranjo, PHD., Dra. María Irene Murillo, MBA., Ing. Keren Jaramillo, Ing. Tlga. Ximena Vizueta, Ing. Gabriela Cabezas, Ing. Wilmer Quishpe e Ing. Viviana Rumipamba, gracias por su apoyo continuo en el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

“Todo tiene su tiempo, y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora”

Eclesiastés 3:4

Dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía, gracias a él superé los momentos difíciles y me levanté para culminar con éxito este proyecto. A Jesús, por escuchar mis peticiones y reconfortarme cada momento ¡En ti confié! y confiare siempre.

A mi esposa Dianita Paola, por darme su fortaleza e inspiración. Por creer siempre en mí y decirme que si podía lograrlo. Por ser la compañera ideal, este logro también es suyo, te amo.

A mis padres Lucita y Gustavo (+), por darme la vida e inculcarme buenos valores y darme la mejor educación.

A Hugo Vinuesa y Carmita Ramón, por entregarme a su más grande tesoro que me fortalece e inspira continuamente.

A mis hermanos Luis, Mary, Anita y mis cinco Angelitos que están en el cielo, que junto a nuestros padres han sido apoyo y fuente de inspiración para este trabajo.

A mis abuelitos Alejandro (+), Manuel (+), Rosario (+) y Dolores (+), estoy seguro que desde el cielo me acompañan con sus bendiciones en los momentos más difíciles.

A mis tíos Roberto, Concepción, Lucita (+), Inés (+) Allauca y Gualberto Maggi (+), por enseñarme el valor del trabajo arduo y constante, pero sobre todo a no darme por vencido.

A mis sobrinos por confiar en mí, brindarme su cariño y permitirme ser su fuente de inspiración y superación.

A las personas mágicas que me motivaron a superarme profesionalmente y me acompañaron durante mi formación académica, apoyándome incondicionalmente en el momento oportuno. Este proyecto representa el fruto de la semilla que depositaron en mí, siempre permanecerán en mi mente y mi corazón.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL, MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
METÁLICAS

TEMA: EVALUACIÓN DE ESTADO LÍMITE POR DEFLEXIÓN EN LOSAS
CON VIGAS COMPUESTAS TIPO JOIST FABRICADAS CON ACERO ASTM

A36

MODALIDAD DE TITULACIÓN: Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

AUTOR: Ing. Miguel Angel Allauca Llamuca

DIRECTOR: Ing. Jorge Washington Cevallos Cabrera, Mg.

FECHA: 10 de marzo de 2023

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar el estado límite por deflexión en losas con vigas compuestas tipo Joist fabricadas con acero ASTM A36, considerando los sistemas de piso frecuentemente usados en nuestro país.

El diseño de la viga Joist se realizó para una longitud libre de 5.00 m y un ancho efectivo de 0.40 m, considerando las especificaciones establecidas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción para la cuantificación de cargas, seguidamente, el análisis estructural de la viga se realizó en el programa de análisis estructural para obtener las cargas axiales a tensión y compresión de las barras que forman parte de la Joist, y mediante el uso de las especificaciones del SJI se diseñaron los cordones superior e inferior, diagonales del alma de la viga, la silleta y los conectores de corte.

Se procede al análisis de los estados límites por deflexiones en el programa de análisis estructural, de los tres casos de estudios planteados en el proyecto: viga Joist diseñada no compuesta, viga Joist compuesta con losa maciza y viga Joist compuesta con lámina metálica “Steel deck”, aplicando diferentes valores de carga.

Las vigas se fabricaron en los talleres de VIGA-TEC, ubicado en la ciudad de Quito, y fueron transportadas a la ciudad de Ambato para armar los encofrados y fundir el hormigón para formar las secciones compuestas con losa maciza y con lámina de

acero. El hormigón empleado fue elaborado con agregados de la ciudad de Ambato proveniente de las canteras de la Península con una resistencia a la compresión de 21MPa.

El ensayo experimental de carga/deformación se realizó en la Universidad Técnica de Ambato en el campus Ingahurco siguiendo los requerimientos de los códigos AISC 360-16 y American National Standard SJI 200 – 2015.

Finalmente, con los resultados del experimento se evaluaron los estados límites por deflexión de los tres casos de estudio presentado en este proyecto.

DESCRIPTORES: CONECTORES DE CORTE, DEFLEXIÓN, JOIST COMPUESTAS, SECCIONES COMPUESTAS, VIGAS DE ALMA ABIERTA.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL, MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
METÁLICAS

TEMA: EVALUACIÓN DE ESTADO LÍMITE POR DEFLEXIÓN EN LOSAS
CON VIGAS COMPUESTAS TIPO JOIST FABRICADAS CON ACERO ASTM

A36

MODALIDAD DE TITULACIÓN: Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

AUTOR: Ing. Miguel Angel Allauca Llamuca

DIRECTOR: Ing. Jorge Washington Cevallos Cabrera, Mg.

FECHA: 10 de marzo de 2023

EXECUTIVE SUMMARY

The goal of this project is to evaluate the limit state to deflection in slabs with composite Joist beams made of ASTM A36 steel, considering the floor systems frequently used in our country.

The Joist beam design was carried out for a free length of 5.00 m and an effective width of 0.40 m, considering the specifications established in the Ecuadorian Construction Standard for the quantification of loads, then, the structural analysis of the beam was carried out in the structural analysis program to obtain the axial loads in tension and compression of the bars that are part of the Joist, and by using the SJI specifications, the upper and lower chords, diagonals of the beam web, the saddle and the shear connectors were designed.

The limit state deflection analysis was carried out in the structural analysis program for the three case studies proposed in the project: Joist beam designed as non-composite, Joist beam composed with solid slab and Joist beam composed with steel deck, applying different load values.

The beams were manufactured in the VIGA-TEC workshops, located in Quito, and were transported to Ambato, to assemble the formwork and cast the concrete to form the composite sections with solid slab and steel deck. The concrete used was made

with aggregates from Peninsula's quarry of Ambato for a compressive strength of 21MPa.

The experimental load/strain test was carried out at the Technical University of Ambato at the Ingahurco campus following the requirements of the AISC 360-16 and American National Standard SJI 200 - 2015 codes.

Finally, the results of the experiment were used to evaluate the deflection limit states of the three case studies presented in this project.

KEYWORDS: SHEAR CONNECTORS, DEFLECTION, COMPOSITE JOISTS, COMPOSITE SECTIONS, OPEN WEB COMPOSITE BEAMS

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En las últimas cinco décadas, se han realizado varias investigaciones [1] [2] [3] [4] [5] [6] respecto al comportamiento de las vigas Joist como secciones compuestas y su implementación en los sistemas de piso con luces grandes, debido a su importante resistencia a la flexión, menor peso en relación a las vigas de alma llena y facilidad para realizar el tendido de ductos de las instalaciones de un edificio. De a poco, empresas internacionales como VIGA-TEC de origen colombiano ha implementado este sistema en Ecuador.

Desde su creación en la década de los años 60 [1], este sistema estructural ha tenido varios cambios en su alma y en losa de compresión, es así que, el alma se puede fabricar con barras redondas o ángulos de acero laminado y respecto a la losa estas pueden fabricarse con losa maciza, placa metálica “Steel deck” o sobre planchas de fibrocemento. Cualquiera que sea la combinación de elementos a emplear para construir una sección compuesta, se considera que es una sección más económica por cuanto reducen el peso de la estructura, lo cual resulta beneficioso por cuanto también se reduce el tamaño de algunos elementos estructurales como vigas principales, columnas muros y cimentación, logrando un ahorro económico en la construcción de esqueleto de un edificio.

Ante el crecimiento poblacional y demanda de espacios para uso público y privado, es necesario contar con nuevos elementos estructurales que aceleren los procesos de construcción y garanticen su resistencia ante sollicitaciones de cargas procurando que los trabajos para su fabricación sean en taller con el fin de garantizar que cumpla el control de calidad, sabiendo que en el país el costo de manufactura para la fabricación de elementos en acero es limitada y de alto costo.

El presente proyecto surge de la necesidad de evaluar el comportamiento por estados límites de deflexión ante sollicitaciones de cargas elevadas de los sistemas compuestos con vigas Joist, y que sean fabricados con perfiles de acero estructural ASTM A36 Gr. 36. Para ello se plantea el análisis experimental de los dos sistemas compuestos a través de procesos matemáticos y simulación en el programa de

análisis estructural y la fabricación de probetas con una longitud de 5.00m y 1.5m de área cooperante.

1.2. Justificación

El sector de la construcción en el Ecuador representa un indicador de la económica en general, que comprende actividades de construcción de edificios, viviendas y ejecución de obras de ingeniería civil, que generan una importante inversión, producción y nivel de empleo [7].

Durante los últimos años se ha desarrollado una importante cantidad de estudios para analizar el comportamiento de nuevos elementos estructurales a ser empleados en edificaciones con el fin de reducir el peso y costo de las estructuras, una de las alternativas son las vigas compuestas de alma abierta investigaciones [8] [9] [6] [10] [11].

Actualmente en Ecuador se construyen edificios con estructura de hormigón armado, acero estructural y sistemas mixtos. En los dos últimos casos se emplean sistema de entrepiso apoyado sobre vigas metálicas de alma llena [12] cuyo peso es relativamente mayor al de las vigas de alma abierta.

Los sistemas compuestos que emplean vigas de alma abierta hacen referencia al uso de más de un material para la fabricación de un elemento estructural, y que dichos materiales estén conectados rígidamente comportándose como un único cuerpo, aventajándose de las características mecánicas más favorables de cada material.

El objetivo de este proyecto de investigación es evaluar el estado límite por deflexión en losas compuestas por vigas tipo Joist fabricadas con acero ASTM A36.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Evaluar el estado límite por deflexión en losas con vigas compuestas tipo Joist fabricadas con acero ASTM A36.

1.3.2. Específicos

- Evaluar el estado límite por deflexión de una viga tipo Joist sin loseta de compresión.

- Evaluar el estado límite por deflexión de una viga compuesta tipo Joist con losa maciza.
- Evaluar el estado límite por deflexión de una viga compuesta tipo Joist con losa y lámina de acero (Steel Deck).

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1. Evolución de las vigas compuestas

Los primeros ensayos realizados sobre vigas de acero compuestas para sistemas de entresijos se desarrollaron en la década de 1960[5], uno de los primeros trabajos realizados con ensayos de vigas compuestas de alma abierta fue en 1965, la propuesta del elemento estructural ensayado estaba conformado por barras redondas en forma de zigzag y los cordones por ángulos. Para lograr obtener una sección compuesta una parte de las barras fue embebida en la loseta de hormigón, permitiendo que interactúe como conectores de corte, los resultados de estos ensayos permitieron concluir que es factible conseguir la acción compuesta de este tipo de vigas. Seguidamente [1] se realizaron ensayos de cuatro vigas de alma abierta, de las cuales tres de ellas se probó como una viga sección compuesta y la restante como sección no compuesta, con los resultados obtenidos se logró definir que estos sistemas se comportan adecuadamente como una sección compuesta reduciendo considerablemente las deformaciones y los esfuerzos en los miembros que forman parte de ella; además al comparar los resultados obtenidos de los ensayos se probó que las deformaciones en el centro de la luz se redujeron un 20% aproximadamente; por otra parte el momento final fue el 14% aproximadamente más alto que en vigas convencionales. El análisis de estos estudios determinó que se puede lograr una acción compuesta mediante la utilización de vigas de alma abierta.

Durante la década de 1970 [2], se realizó el ensayo de cinco vigas compuestas, en este caso se emplearon pernos de cortante de 9.5 mm de diámetro por 50 mm de largo, soldados al cordón superior de la vigueta, que fueron embebidos dentro de una losa maciza de hormigón de 76 mm de espesor para conseguir la sección compuesta, además se sobredimensionó los elementos del alma para evitar que se produzcan fallos en dichos elementos. El objetivo de este estudio fue, determinar el grado de acción compuesta que se podría obtener con el empleo de los conectores de corte, los resultados de este estudio determinaron que el modo de falla típico del cordón inferior fue por la fluencia del material.

Ante el interés de implementar este sistema constructivo[13], se realizó un estudio con seis vigas compuestas de alma abierta que soportaba una loseta con una lámina de acero, cada viga tenía una luz de 15.25 m. El modelo matemático desarrollado para estos ensayos demostró una buena correlación entre los resultados experimentales y los teóricos. La propuesta se basa en tres niveles de conexión de cortante: sub-conectado, equilibrado y sobre-conectado, cada modelo relaciona la resistencia de los conectores con la fuerza a la tracción del cordón inferior de la vigueta.

En 1978 [3], se realizó el estudio de vigas compuestas de alma abierta con acción parcial, es decir que la capacidad de los conectores de corte no es suficiente para equilibrar la resistencia a la tracción del cordón inferior, donde el cordón superior alcanza el esfuerzo por pandeo antes que el cordón inferior alcance el esfuerzo de fluencia, el resultado de este estudio permitió establecer una metodología para el diseño de vigas parcialmente compuestas.

Otro aporte importante realizado [4], permitió ensayar cuatro vigas a escala natural hasta alcanzar el modo de falla. El análisis para obtener los resultados de estos ensayos puede ser usados para determinar la capacidad por momento de una viga compuesta de alma abierta.

En 1992 [14], estudiaron el efecto de la refracción del hormigón en el comportamiento de las viguetas compuestas de alma abierta, para lo cual se ensayaron dos vigas a escala natural con una luz de 11.58 m, a los 65 días y a los 85 días, se determinó que la mayoría de la contracción se produjo en los primeros 30 días, por otra parte los ensayos de flexión mostraron que se puede obtener un comportamiento dúctil hasta llegar al punto de falla, las cargas experimentales empleadas se acercaron a las cargas teóricas obtenidas con base en el método de resistencia última que se consideró para el diseño únicamente el cordón inferior de la viga de alma abierta.

A partir del año 2000 se desarrollaron estudios sobre el comportamiento de las vigas de alma abierta, en Estados Unidos fueron desarrollados en el Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia, los proyectos tomaron énfasis sobre la resistencia a la rotura e investigaciones para mejorar los modelos en el diseño de los miembros

y la capacidad de los conectores de corte que forman parte del sistema compuesto con vigas de alma abierta.

En el 2007 el *Steel Joist Institute* publicó la primera edición del catálogo de especificaciones estándar para el diseño de vigas compuestas de alma abierta a las cuales denomina la serie CJ, posteriormente se publicó en 2010 y 2015 la segunda y tercera edición de este catálogo de especificaciones.

Otras investigaciones[11] realizadas donde se emplearon vigas compuestas de alma abierta con una lámina de acero (Steel Deck) en los ensayos determinaron que para vigas espaciadas a más de 1.50m de distancia y con luces superiores a 11.00 m, resultan más económicas que las vigas no compuestas.

En Ecuador [15], estudios realizados sobre vigas de alma abierta determinaron que este tipo de vigas no son adecuadas como parte del sistema resistente a cargas laterales debido a que el comportamiento ante cargas cíclicas de este tipo de sistema estructural es inadecuado para zonas sísmicas, ya que las vigas de alma abierta sin segmento especial poseen poca ductilidad.

2.2. Edificios de acero

Las ventajas que presenta el acero como material de construcción, así como su versatilidad para su fabricación y montaje ha permitido que en el Ecuador se proyecten grandes edificaciones dentro del sector público como privado ahorrando hasta el 45% de tiempo en relación a las estructuras de hormigón[16], sin embargo, el costo del acero, el empleo de mano de obra calificada y el control de calidad aún son consideradas como desventajas en nuestro medio.

Por esta razón es importante contar con estructuras de acero que sean más livianas para abaratar el costo de la estructura y que sean prefabricadas para mejorar los procesos de fabricación.

2.3. Acero estructural

El acero estructural es un material que posee grandes ventajas, relativamente en comparación con las estructuras de hormigón, entre ellas es su alta resistencia, uniformidad, elasticidad, durabilidad, ductilidad y tenacidad [17].

2.3.1. Perfiles de acero

El acero estructural puede laminarse en diversas formas y tamaños sin alteración considerable de sus propiedades físicas. Generalmente los elementos estructurales más convenientes que se considera en el diseño son aquellos que cuentan con mayor momento de inercia[17].

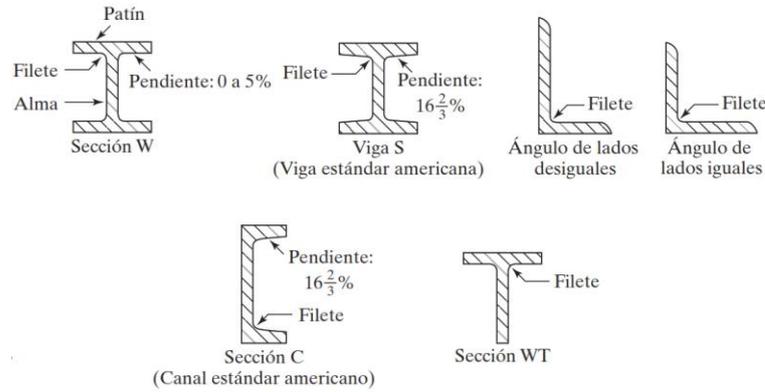


Gráfico 1. Perfiles laminados de acero[17]

2.3.2. Relación esfuerzo deformación del acero estructural

El acero tiene la capacidad de resistir grandes deformaciones y recuperar su estado inicial luego de someter a la acción de carga y descarga siempre que no se supere el límite de fluencia. En Ecuador generalmente se comercializan perfiles de acero con una resistencia a la fluencia de 36 ksi, sin embargo, debido a la demanda que existe actualmente se puede importar perfiles con una resistencia de 50 ksi.

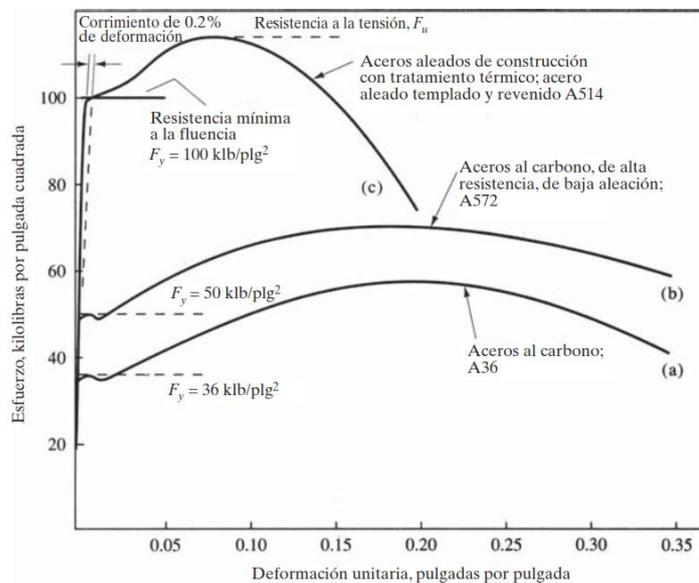


Gráfico 2. Curvas características de esfuerzo-deformación[17] [18]

2.4. Secciones compuestas

En el diseño y construcción de estructuras de acero con hormigón armado se emplea secciones compuestas para reducir el tamaño de los elementos estructurales, posiblemente las dimensiones en cimentación, columnas y vigas principales y consecuentemente reducir el peso y costo de la estructura. El comportamiento de una sección compuesta depende del nivel de conexión entre la viga y la losa, que generalmente se realiza mediante conectores de cortante [19].

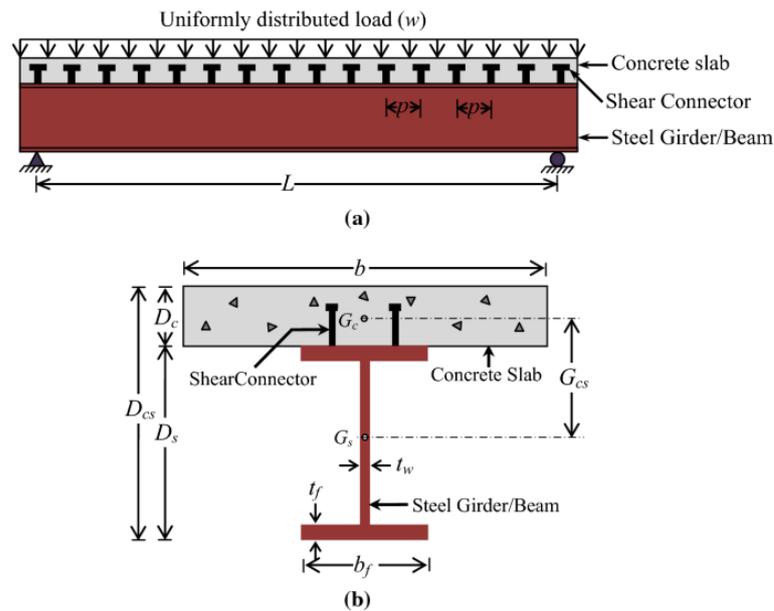


Gráfico 3. Detalle de sección compuesta [19]

En comparación con sistemas de entrepiso con secciones no compuestas, las secciones compuestas presentan mayor rigidez y consecuentemente menores deflexiones [8] [11], con mayor capacidad de momento resistente.

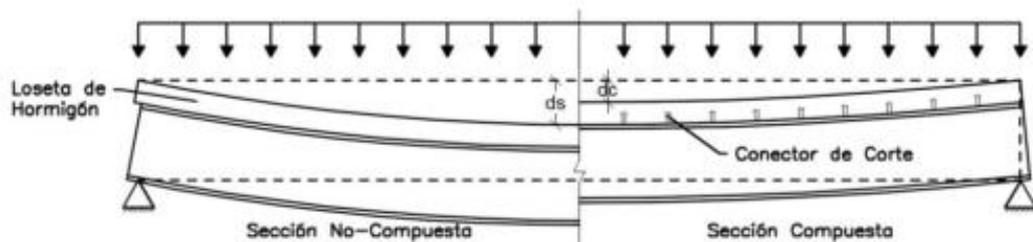


Gráfico 4. Deflexiones en vigas compuestas vs no-compuestas [11]

Los sistemas constructivos que contienen secciones compuestas con vigas Joist, pueden estar conformadas únicamente con una placa de hormigón armado o con una placa metálica steel deck.

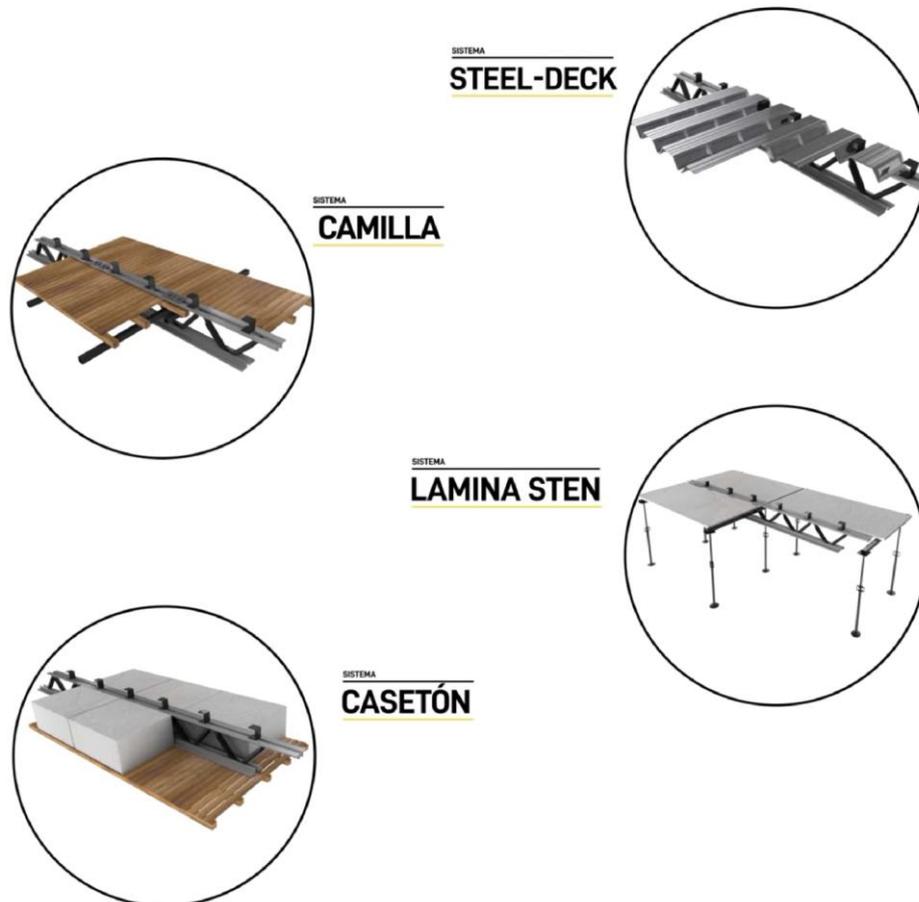


Gráfico 5. Sistemas de entrepiso constructivos VIGA-TEC[20]

2.4.1. Secciones compuestas con vigas Joist

Son elementos estructurales con alma abierta que se apoyan sobre las vigas principales que pueden ser de acero u hormigón armado, las vigas Joist soportan directamente las cargas de las cubiertas o entrepisos.

2.4.2. Componentes de una viga Joist

Los componentes principales de una viga Joist están conformados por dos ángulos en forma de T, con una separación de 25mm constante a lo largo de la viga. El alma de la viga puede ser de hierro redondo [5] o un ángulo que se encuentra conectado

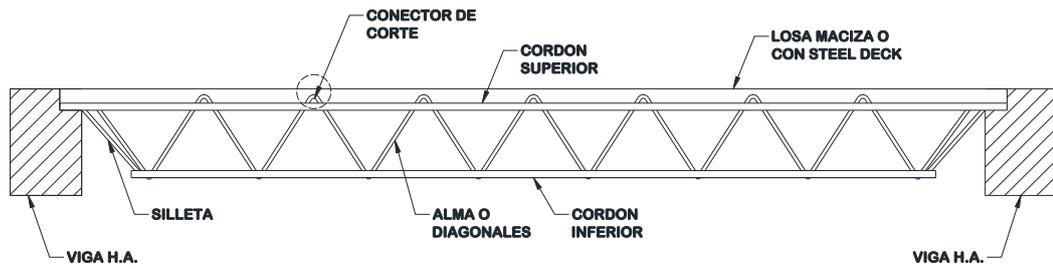


Gráfico 6. Componentes de una viga Joist

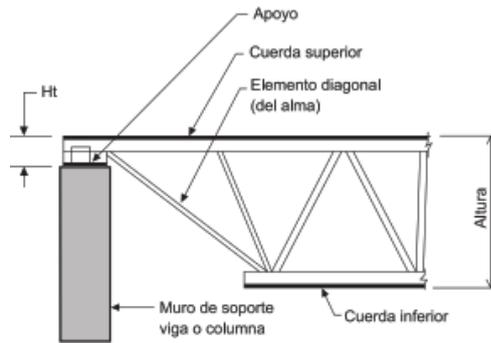


Gráfico 7. Detalle de viga Joist apoyada sobre viga de hormigón [21]

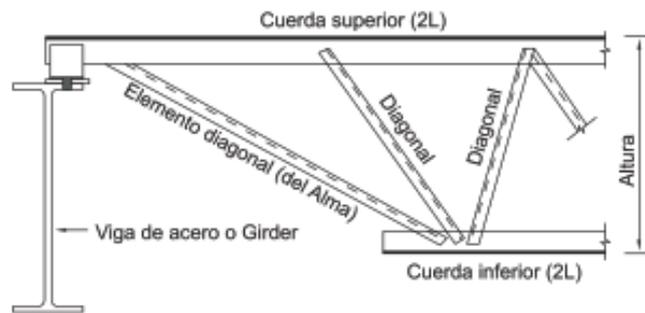


Gráfico 8. Detalle de viga Joist apoyada sobre viga de acero [21]

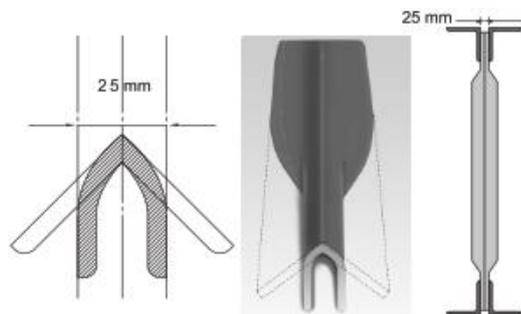


Gráfico 9. Detalle de conexión Crimped [21]

Las primeras vigas Joist fueron fabricadas con hierro redondo en su alma [5], este diseño aún lo desarrollan algunas empresas de Chile, Colombia, México y Estados Unidos . El hierro se figura en formas de zigzag. Como se puede observar en el gráfico 6, la cresta de la varilla puede trabajar como conector de corte.



Gráfico 10. Construcción de viga Joist con diagonales de hierro redondo

Fuente: <https://viga-tec.com/>

Las especificaciones del SJI, permite el uso de ángulos para la fabricación del alma de la viga, la misma que cuenta con una conexión Crimped en los extremos. Este método constructivo ha sido probado por VIGA-TEC, que a través de un ensayo de carga se pudo comprobar que *“La deflexión teórica es mayor que la experimental”* [20].



Gráfico 11. Construcción de viga Joist con diagonales con ángulo.

Fuente: <https://viga-tec.com/>

2.4.3. Comportamiento del cordón inferior

Cuando se aplica carga a una sección compuesta con una viga Joist, el cordón inferior trabaja a esfuerzo de tensión dentro del rango elástico del acero. Si se incrementa la carga, los ángulos del cordón inferior puede alcanzar su límite elástico y luego continúa alargándose inelásticamente [8] [22]. Si se reduce la carga luego de alcanzar el rango inelástico, se genera una deformación residual debido a la incursión dentro del rango inelástico.

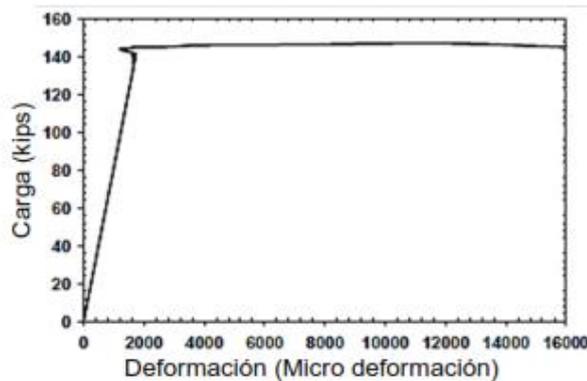


Gráfico 12. Diagrama de carga vs deformación del cordón inferior de una viga Joist [8]

2.4.4. Comportamiento del cordón superior

Cuando el hormigón del tablero de compresión no ha alcanzado su resistencia para transmitir las cargas al cordón superior de la viga Joist a través de los conectores de corte, este elemento no trabajará como una sección compuesta, lo cual se puede observar en la parte inicial del siguiente grafico [22].

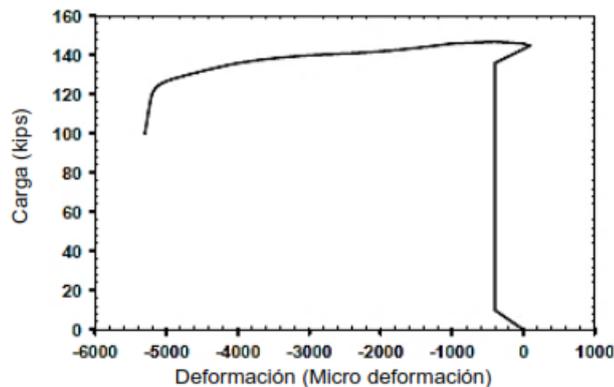


Gráfico 13. Diagrama de carga vs deformación típica del cordón superior de una viga compuesta [8]

Una vez que el hormigón alcanza la resistencia de diseño, las cargas se transfieren al cordón superior a través de los conectores de corte. Al aplicar la carga, una vez que el cordón inferior empieza a trabajar dentro del rango inelástico el cordón superior entrará a trabajar a tensión. Una vez que la conexión a cortante comienza a fallar, la fuerza de tensión que se ha desarrollado en el cordón superior comenzará a reducirse. Finalmente, el cordón superior continuará desarrollando más esfuerzo de compresión hasta que la viga compuesta alcance su capacidad de momento último [22].

2.4.5. Comportamiento de las diagonales o alma

Estudios han demostrado que las pruebas de carga a escala real, las diagonales de las vigas compuesta se comportan de forma similar a las de una no compuesta. En síntesis, las diagonales de la viga compuesta deben ser capaces de transferir los esfuerzos de cortante vertical desde el interior hacia los apoyos de los extremos. Antes de que el cordón inferior ceda, las diagonales trabajan dentro del rango elástico, una vez que el cordón inferior empieza a ceder y la conexión a cortante empieza a perderse.

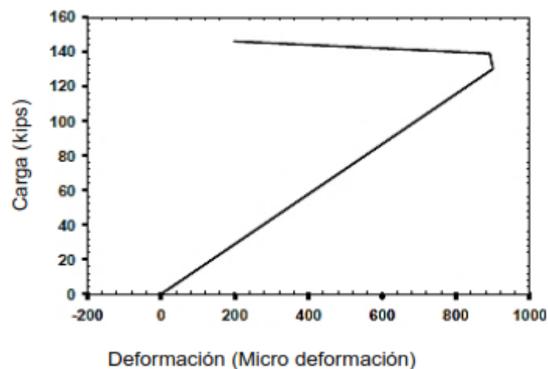


Gráfico 14. Diagrama de carga Vs. deformación típica de las diagonales de una viga compuesta [8].

2.5. Parámetros de diseño

2.5.1. Cargas de diseño

Las cargas y fuerzas utilizadas para el diseño de viguetas compuestas de este proyecto, deben ser calculadas de acuerdo a lo especificado en los códigos y normas de construcción aplicable y deberán ser provistas en los planos estructurales [23].

La NEC-SE-CG (cargas no sísmicas), especifica las cargas y valores para el diseño estructural, dentro del territorio ecuatoriano [23].

2.5.2. Combinaciones de carga

Las estructuras y sus componentes deberán ser diseñadas de tal manera que la resistencia de diseño iguale o exceda los efectos de las cargas incrementadas [23], de acuerdo con lo que determina la NEC-SE-CG en la sección 3.4.3, para el caso de vigas Joist el SJI recomienda el uso de las siguientes combinaciones:

$$1.4D \qquad \text{Ec. (1) [23]}$$

$$1.2D + 1.6(L, Lr, S \text{ o } R) \qquad \text{Ec. (2) [23]}$$

Donde:

D: carga muerta debida al peso de los elementos estructurales y las características permanentes de la estructura.

L: carga viva debido a la ocupación y equipo móvil.

Lr: carga viva del techo.

S: carga de nieve.

R: carga debida al agua de lluvia inicial o al hielo, sin incluir la contribución al encharcamiento.

2.5.3. Materiales

El acero que comúnmente es comercializado en el país y que será utilizado en la fabricación las vigas de sección compuesta deberá cumplir con una de las siguientes especificaciones de la ASTM [24]:

- Acero estructural al carbono, ASTM A36
- Acero estructural de columbio-vanadio de alta resistencia y baja aleación, ASTM A572

2.5.4. Ancho efectivo (be)

El ancho efectivo de la loseta de compresión a cada lado del eje central de la viga de acero debe tomarse igual al menor valor de los siguientes:

$$be = \min\left(\frac{L}{8}; \frac{s}{2}; Lg\right) \quad \text{Ec. (3) [25]}$$

- 1) Un octavo del claro de la viga medido entre los centros de los apoyos para claros simples y continuos.
- 2) La mitad de la distancia entre el eje central de la viga y el eje central de la viga adyacente.
- 3) La distancia entre el eje central de la viga y el borde de la losa.

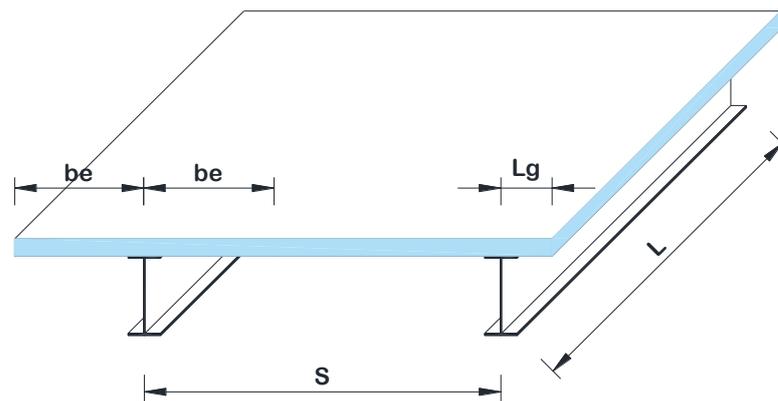


Gráfico 15. Definición del ancho efectivo, be

2.5.5. Estados límites

La resistencia a la flexión de la sección compuesta, ϕMn , deberá ser calculada como el menor valor de los siguientes estados límites [8]: fluencia por tracción del cordón inferior, rotura por tracción del cordón inferior, aplastamiento del hormigón y resistencia del conector a cortante [22].

a) Fluencia del cordón inferior: $\phi t = 0.90$.

$$\phi Mn = \phi t \cdot Ab \cdot Fy \cdot de \quad \text{Ec. (4)[8]}$$

b) Ruptura del cordón inferior: $\phi tr = 0.75$.

$$\phi Mn = \phi tr \cdot Ab \cdot Fu \cdot de \quad \text{Ec. (5) [8]}$$

c) Aplastamiento del hormigón: $\phi cc = 0.85$.

$$\phi Mn = \phi cc \cdot 0.85 f'c \cdot be \cdot tc \cdot de \quad \text{Ec. (6) [8]}$$

d) Capacidad de los conectores de Corte: $\phi stud = 0.90$.

$$\phi Mn = \phi stud \cdot N \cdot Qn \cdot de$$

$$\phi Mn = \phi stud \cdot N \cdot Qn \cdot de \quad \text{Ec. (7) [8]}$$

Donde.

Ab : área de la sección transversal del cordón inferior

Fy : Resistencia de fluencia especificado del acero del cordón.

Fu . Resistencia a tracción mínima especificada del acero del cordón

$f'c$: Resistencia a compresión del hormigón de la losa.

tc : espesor de la losa de hormigón.

N : número de conectores

Qn : capacidad resistente de un conector.

Además de los requisitos especificados anteriormente, el tamaño y espesor mínimo del ángulo del cordón superior deberán ser igual o mayor a los especificados en la sección 4.4.1.1 del *American National Standard SJI 200 – 2015* [24].

Tabla 1. *Tamaño mínimo del cordón superior para la instalación de pernos de corte soldados*

Diámetro del perno de corte		Ancho mínimo del ángulo del ala		Espesor mínimo	
in	mm	in	mm	in	mm
0.375	10	1.50	38	0.125	3.2
0.500	13	1.75	44	0.167	4.2
0.625	16	2.00	51	0.209	5.3
0.750	19	2.50	64	0.250	6.3

Fuente: American National Standard SJI 200 – 2015

2.5.6. Esfuerzos de diseño

Los elementos que forman parte de la sección compuesta se diseñaran empleando el método LRFD, de manera que los esfuerzos de diseño fu no exceda de los esfuerzos nominales ϕfn .

Donde:

fu : esfuerzo requerido.

F_n : esfuerzo nominal.

ϕ = factor de resistencia.

ϕF_n : esfuerzo de diseño.

F_y : esfuerzo a la fluencia del acero.

E_s : módulo de elasticidad del acero.

El cálculo del esfuerzo de diseño para cuerdas se debe basar en un límite elástico, F_y , del material utilizado.[24].

Tensión $\phi=0.9$

$$\phi F_n = 0.9 \cdot F_y \quad \text{Ec. (8)[24]}$$

Compresión $\phi=0.9$

$$\phi F_n = 0.9 \cdot F_{cr} \quad \text{Ec. (9) [24]}$$

Donde:

Para miembros con

$$\frac{kl}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{Q \cdot F_y}} \quad \text{Ec. (10) [24]}$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658 \left(\frac{Q \cdot F_y}{F_e} \right) \right] \cdot F_y \quad \text{Ec. (11) [24]}$$

Para miembros con

$$\frac{kl}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E_s}{Q \cdot F_y}} \quad \text{Ec. (12) [24]}$$

$$F_{cr} = 0.877 \cdot F_y \quad \text{Ec. (13) [24]}$$

Donde F_e es el Esfuerzo de pandeo elástico:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kl}{r} \right)^2} \quad \text{Ec. (14) [24]}$$

Para secciones laminadas en caliente y ángulos formados en frío, el factor de forma, Q , debe tomarse como el factor de reducción total para elementos esbeltos en compresión, según se determina de acuerdo con AISC 360[26].

$$Q = \frac{2.25}{\frac{w}{t}} + \frac{t}{25.4} \quad \text{Ec. (15) [24]}$$

Donde:

w : tamaño del ángulo (mm).

t : espesor del ángulo (mm).

2.5.7. Joist compuestos

Las secciones compuestas con vigas Joist son más económicas que el uso de Joist simples, debido al aporte del concreto para resistir esfuerzos de compresión [5] [25]. Cuando las vigas Joist compuestas trabajan como simplemente apoyadas, la losa de hormigón resiste los esfuerzos de compresión, el cordón inferior resiste los esfuerzos de tensión y el cortante vertical resiste las diagonales. La losa de hormigón es conectada al cordón superior por los conectores de corte. Las especificaciones que se emplean en este proyecto, fueron propuestas por el comité de la ASCE [24] [27], considerando que el modo de falla es la fluencia del cordón inferior antes de cualquier tipo de falla en otro miembro de la sección compuesta para asegurar que exista una falla dúctil antes de una falla frágil[28].

Para diseño de las vigas compuestas con Joist, se debe considerar las siguientes etapas [25].

- **Etapla inicial:** se diseña la viga para que soporte las cargas de construcción empleando las especificaciones del SJI o del AISC – LRFD. Se deberá proveer el soporte lateral del cordón superior para prevenir el pandeo.
- **Etapla final:** empleando las cargas totales factorizadas se obtiene el momento último, considerando que la viga se encuentra simplemente apoyada y se calcula el momento resistente tomando en cuenta las siguientes consideraciones:
 - 1) Ocurre la falla por fluencia del cordón inferior antes que la falla por aplastamiento en la losa de hormigón.

- 2) La resistencia de compresión en la losa puede representarse como un bloque equivalente de esfuerzos a compresión.
- 3) Los conectores de cortante tienen la suficiente capacidad para transferir el cortante horizontal entre el cordón superior y la losa de hormigón
- 4) La contribución del cordón superior para resistir esfuerzos de compresión es despreciable.

Las especificaciones propuestas establecen que el cordón inferior debe diseñarse para que trabaje como un elemento sometido a cargas axial de tensión de acuerdo a lo que determina el AISC – LRFD o SJI, debe tener una dimensión que permita la fluencia del acero del cordón antes que falle la losa, los conectores de corte o las diagonales, tomando en cuenta que la relación máxima de esbeltez de los elementos a tensión no sea mayor que 240.

El diseño a flexión de la sección compuesta debe calcularse a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\phi Mn = \phi As \cdot Fy \cdot d \quad \text{Ec. (16)[25]}$$

$$As \cdot Fy \leq 0.85 \cdot f'c \cdot be \cdot tc \quad \text{Ec. (17) [25]}$$

$$As \cdot Fy \leq 0.80 \cdot Ae \cdot Fu \quad \text{Ec. (18) [25]}$$

Donde:

ϕ : Factor de resistencia para fluencia por tensión 0.9

As : Área de la sección transversal de la cuerda inferior

Fy : Esfuerzo de fluencia del acero de la cuerda inferior

d : Distancia del centro de gravedad del cordón inferior al centro del bloque de cortante de esfuerzos del hormigón.

be : Ancho efectivo de la losa

tc : Espesor mínimo de la losa de hormigón

Ae : Área efectiva del acero del cordón inferior.

Fu : esfuerzo último del acero del cordón inferior

La distancia del centro de gravedad del cordón inferior al centro del bloque de cortante de esfuerzos del hormigón, debe calcularse empleando un esfuerzo de compresión del hormigón de $0.85f'c$ y un ancho efectivo tomando el menor valor establecido en la sección 2.6.4 de este documento.

$$d = h - \frac{a}{2} \quad \text{Ec. (19) [25]}$$

$$a = \frac{As \cdot Fy}{0.85 \cdot f'c \cdot be} \leq tc \quad \text{Ec. (20) [25]}$$

Donde:

h : Distancia del centro de gravedad del cordón inferior al extremo superior del bloque de cortante del hormigón.

Los elementos del alma deben diseñarse para resistir el mayor valor de:

- 1) El cortante producido por la carga factorizada
- 2) El cortante generado por la carga requerida para que fluya el cordón inferior cuando la viga Joist es analizada como una armadura.

Los elementos del alma que trabajan en compresión pueden ser diseñados como columnas con sus extremos articulados empleando el capítulo E del AISC-360 [26]. Pero con un factor de resistencia a carga axial de $\phi c=0.75$ [25]. Los límites de relación de esbeltez deben cumplir los especificados en el SJI [24].

Los conectores de corte deberán cumplir:

$$N = \frac{1.3 \cdot As \cdot Fy}{Qn} \quad \text{Ec. (21) [25]}$$

Donde:

Qn : El menor valor de Qns y Qnc .

$$Qns = Ast \cdot Fu \quad \text{Ec. (22) [25]}$$

$$Qnc = 0.5 \cdot Ast \sqrt{f'c \cdot Ec} \quad \text{Ec. (23) [25]}$$

$$Ec = 4700 \sqrt{f'c} \quad \text{Ec. (24) [25]}$$

Donde:

N : Número de conectores requerido para momentos positivo.

A_s : Área de la sección transversal de la cuerda inferior.

A_{st} : Área del conector.

E_c : Módulo de elasticidad del hormigón.

El cálculo de deflexiones [29], puede realizarse con el siguiente proceso:

- 1) Determinar los momentos de inercia de la viga Joist (solo acero) I_s y de la viga Joist compuesta I_t , basándose en el área de acero y de la sección transformada del área del concreto.
- 2) Dividir cada uno de los valores por 1.10, obteniendo los valores $I's$ y $I't$.
- 3) Calcular el momento de inercia efectivo I_e .

$$I_e = I's + 0.77(I't - I's) \quad \text{Ec. (25) [25]}$$

- 4) Calcular los desplazamientos utilizando el momento de inercia efectiva de acuerdo a las condiciones de apoyo de la viga Joist compuesta.

2.5.8. Diseño de la cuerda superior

Las especificaciones del SJI, establece que para el diseño de las vigas de la serie K como de las series LH y DLH, debe realizarse considerando el efecto combinado de flexión y compresión en el caso de los paneles exteriores y cuando la longitud de los paneles interiores sea mayor a 24 pulgadas [25] [30].

2.5.9. Diseño estado límite de servicio

De acuerdo a lo que establece el SJI, las deflexiones por la acción de la carga viva no deben ser mayor que:

- **Piso:** la deflexión máxima no debe ser mayor que 1/360 de la luz libre de la viga
- **Techos:** la deflexión máxima no debe ser mayor que 1/240 de la luz libre de la viga.

Para determinar la deflexión máxima, se debe determinar la inercia equivalente de la Joist compuesta [31], la cual fue probada mediante ensayos a escala real

realizados en el año 2002 [5]. la metodología para el cálculo del momento de inercia efectivo de la viga Joist compuesta, se detalla a continuación:

$$I_{eff} = \frac{1}{\frac{\gamma}{I_{chords}} + \frac{1}{I_{comp}}} \quad \text{Ec. (26)[8]}$$

$$\gamma = \frac{1}{Cr} - 1 \quad \text{Ec. (27) [8]}$$

Donde:

I_{chords}: Esbeltez de la viga Joist como una unidad en la dirección de pandeo

I_{comp}: Momento de Inercia transformado de la sección compuesta.

I_{eff}: Momento de inercia efectiva de la sección compuesta

Cuando se utilice ángulos en el alma de la viga el valor de *Cr* se calculará de acuerdo con la siguiente expresión:

Para $6 \leq \frac{L}{D} \leq 24$

$$Cr = 0.90 \cdot (1 - e^{-0.28 \cdot (L/D)})^{2.8} \quad \text{Ec. (28) [8]}$$

Cuando se utilice barras dobladas de forma continua en el alma de la viga el valor de *Cr* se calculará de acuerdo con la siguiente expresión:

Para $10 \leq \frac{L}{D} \leq 24$

$$Cr = 0.721 + 0.00725(L/D) \quad \text{Ec. (29) [8]}$$

Si las cargas aplicadas sobre la sección compuesta son transitorias a corto plazo se determinará una relación *n* entre el módulo de elasticidad del acero y el módulo de elasticidad del hormigón. Si las cargas aplicadas son permanentes a largo plazo se empleará una relación de módulos de *3n*.

$$n = \frac{Es}{Ec} \quad \text{Ec. (30)[25]}$$

$$Ec = 1.15 \cdot \sqrt[3]{Ea} \cdot \sqrt{f'c} \quad \text{Ec. (31)[32]}$$

Donde:

Es: Módulo de elasticidad del acero

Ec: Módulo de elasticidad del hormigón

Ea: Módulo de elasticidad del concreto [23]

La deformación calculada deberá ser menor que los límites establecidos para piso o techos[15].

2.5.10. Conectores viga – losa

En el presente proyecto se empleará conector de corte tipo canal, para lo cual se tomará en cuenta los siguientes aspectos[15].

- 1) La fuerza cortante que resiste el conector
- 2) La capacidad de carga que resiste el conector
- 3) El número de conectores requeridos

La resistencia a cortante del conector, considerando el momento positivo máximo se determina con la siguiente expresión:

$$Th = Ab \cdot Fy \quad \text{Ec. (32)[8]}$$

El aporte del acero del cordón superior no tiene participación en la viga compuesta conforme lo detallado en la sección 2.4.4 de este documento.

La viga compuesta debe garantizar la adherencia con la losa de hormigón, la misma que puede reducirse por la contracción del hormigón o por la vibraciones ocasionadas por la acción de la carga viva [12].

El AISC 360-16 establece la resistencia nominal de un conector de corte tipo canal [26].

$$Qn = 0.3 \cdot (tf + 0.5 \cdot tw) \cdot la \cdot \sqrt{f'c \cdot Ec} \quad \text{Ec. (33) [8]}$$

El número de conectores se determinará conforme a la siguiente expresión [15]:

$$Nc = \frac{Th}{Qn} + 1 \quad \text{Ec. (34) [8]}$$



Gráfico 16. Conector de corte tipo canal

Fuente: Cortesía VIGA-TEC

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Ubicación

El presente trabajo de investigación se desarrollará en la ciudad de Ambato capital de la provincia de Tungurahua, dentro de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, Campus Huachi Chico.

3.2. Equipos y materiales

Los equipos y materiales que serán utilizados para el desarrollo de la investigación y el procesamiento de datos se detallan a continuación:

a) Equipos Informáticos

- Computadora equipada con los siguientes recursos:
- Procesador: Intel Core i7-4700MQ 2.40 GHz
- Memoria RAM: 16GB
- Sistema Operativo: Windows 10 Home, 64-bit
- Tarjeta de Video: NVIDIA GeForce GT 740M

b) Software

- Paquete informático Office 365
- Software de diseño y análisis estructural

c) Probetas de ensayo

- Acero estructural ASTM A36
- Equipo de soldadura GTAW

d) Bibliografía

- ANSI/AISC 341-16, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings.
- ANSI/AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings.
- Catálogo Navacero.
- Manual de Diseño Sistema Constructivo Joistec.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC - SE – DS.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC - SE – AC.
- Standard Specification For CJ-Series Composite Steel Joists.

3.3. Tipo de investigación

En el presente trabajo de titulación contempla los siguientes tipos de investigación:

- **Bibliográfico**

En la presente investigación se utilizará material bibliográfico como libros, tesis de pre y post grado, artículos científicos, normativas nacionales e internacionales que guiaran el proceso investigativo respecto a las metodologías previstas a emplear en esta investigación.

- **Experimental**

En el presente trabajo también se considerará investigación de tipo experimental, debido a que la evaluación del estado límite por deflexión de las vigas compuestas tipo Joist, serán sometidas a la aplicación de carga estática para evaluar los resultados obtenidos del análisis teórico.

- **Descriptiva**

Se considera de tipo descriptiva en vista que los resultados obtenidos del análisis teórico y experimental de las deflexiones de los tres modelos planteados en los objetivos específicos permiten evaluar el mejor comportamiento ante la acción de cargas de servicio.

3.4. Prueba de hipótesis - pregunta científica – idea a defender

La deflexión de las vigas compuestas tipo Joist no debe exceder de la condición $L/360$, ante la acción de las cargas de diseño definidas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

3.5. Población o muestra

En el presente trabajo titulación se ha realizado un análisis de muestra determinística para la evaluación de las deflexiones de las vigas compuestas tipo Joist, tomando como referencia la cantidad de muestras establecidas en la sección No. 8 de la Norma ASTM D790 [33].

El número de muestras a ensayar se define a continuación:

Descripción de la muestra	No. de muestras
Viga tipo Joist sin losa	3
Viga compuesta tipo Joist con losa maciza	3
Viga compuesta tipo Joist con losa deck	3

Respecto a la longitud de las muestras, se ha tomado como referencia investigaciones anteriores, donde han demostrado que las vigas compuestas tipo Joist se comportan adecuadamente con longitudes de claro comprendidas entre los 5.00m y 24.00[34] [35]. Por lo que para el desarrollo de la presente investigación se fabricarán muestras de 5.00m de longitud.

3.6. Recolección de información

Los estados de carga que se empleará en el análisis corresponden a la acción de carga muerta por el peso propio de los elementos estructurales y la carga viva empleada en estructuras esenciales que se encuentra establecida en la Norma Ecuatoriana de la Construcción [23].

La metodología de diseño de las vigas compuestas tipo Joist, se realizará en base a los trabajos realizados anteriormente [8] [34] [35] [36] [21] y conforme las especificaciones de la *American National Standard SJI 200 – 2015* [22] [24]. Tomado las secciones y propiedades de los materiales disponibles en el mercado ecuatoriano.

La metodología para realizar los ensayos se obtendrá de trabajos de investigación realizadas anteriormente[34].

3.7. Procesamiento de la información y análisis estadístico

El modelo estadístico que se va a emplear para la correlación de la variable será el Tukey-Kramer. Para lo cual se emplearán los resultados de análisis teórico y los resultados obtenidos de los ensayos.

3.8. Variables respuesta o resultados alcanzados

3.8.1. Variable dependiente

La deflexión de la viga compuesta tipo Joist varía en función de la cantidad de carga impuesta.

3.8.2. Variable Independiente

La carga impuesta incide en el resultado de la deflexión de la viga compuesta tipo Joist.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cargas de diseño

En las siguientes secciones se describe los resultados del diseño para vigas compuestas con vigas Joist con una longitud de luz libre de 5.00 m y un espaciamiento entre vigas de 1.50 m, en base a las especificaciones del ACI 318-19 sección 7.3.1.1, se determina el espesor mínimo de la losa con el fin de cuantificar la carga muerta actuante.

Tabla 2. Longitud de análisis de la viga y espesor de losa

GEOMETRÍA PARA EL ANÁLISIS		
Descripción	kg/m ²	Unidad
Longitud de la viga	$L_v = 5.00$	m
Separación entre vigas	$S = 1.50$	m
Espesor mín. losa ACI 318-19 7.3.1.1	$tc_{min.} = 7.50$	cm
Espesor de losa sumido	$tc = 8.00$	cm

Las cargas empleadas en el análisis de esfuerzos, se cuantificaron conforme lo descrito en las secciones 2.5.1, 2.5.2 de este documento y especificaciones establecidas en la NEC-SE-CG.

Tabla 3. Carga muerta empleada en el análisis

CARGA MUERTA [D]		
Descripción	kg/m ²	kg/m
Peso loseta de compresión	192.0	288.0
Peso de acabados (baldosa)	52.0	78.0
Peso cielo raso (gypsum)	15.0	22.5
Peso mampostería	200.0	300.0
Total carga muerta	459.0	688.5

La carga muerta total que se empleara en el análisis, se refiere únicamente al peso del sistema de piso, mamposterías y recubrimientos. No se ha considerado el peso propio de la viga Joist, por cuanto el análisis se enfoca al diseño de la viga y su comportamiento de estado límite por deflexión en función de la carga aplicada.

Tabla 4. Carga viva empleada en el análisis

CARGA VIVA [L]		
Carga viva para uso de Oficinas	250.00	375.0

Tabla 5. Combinaciones de carga

COMBINACIONES DE CARGA			
Descripción		kg/m ²	kg/m
1.2D+1.6L	W1 =	950.8	1,426.2
1.4D+L	W2 =	892.6	1,338.9
Carga de diseño	Wu =	950.8	1,426.2

Para el diseño de los componentes de la viga Joist se toma la combinación de carga No.1 de la tabla 5, por ser la mayor de todas.

4.2. Geometría de la viga Joist para el análisis

La geometría propuesta para el análisis se determina en base a las siguientes consideraciones:

Tabla 6. Dimensiones de la viga Joist propuesta

GEOMETRIA DE LA VIGA JOIST			
Descripción		Valor	Unidad
Longitud de la viga entre apoyos	$L_v =$	5.00	m
Peralte mínimo	$h_{mín} =$	0.21	m
Peralte de la viga (asumido)	$h_{asumido} =$	40.00	cm
Longitud del apoyo	$T_{cx} =$	10.00	cm
Longitud del cordón superior	$L_{cs} =$	520.00	cm
Longitud del panel	$1.5h =$	60.00	cm
# paneles cordón superior		8.00	u
# paneles cordón inferior		7.00	u
Longitud del cordón inferior	$L_{ci} =$	450.00	cm
Longitud de las diagonales	$L_{diag.} =$	50.00	m
Inclinación de las diagonales		53.13	grados
Distancia de la viga a la primera onda		10.00	cm

El peralte mínimo de la viga se obtiene con la siguiente expresión:

$$h_{mín} = \frac{L_v}{24} \quad \text{Ec. (35)[32]}$$

La longitud del apoyo T_{cx} , se asume el valor mínimo de 10 cm conforme lo establece las especificaciones del SJI. La longitud del cordón superior es igual a la longitud de la viga entre apoyos más los dos apoyos T_{cx} .

$$L_{cs} = L_v + 2T_{cx} \quad \text{Ec. (36)[21]}$$

El tamaño del panel del cordón superior, se adopta el valor de 1.5 veces la altura de la viga conforme a trabajos realizados anteriormente [21] y el número de paneles en el cordón superior es igual a la longitud de la viga entre apoyos dividido para el tamaño del panel en el cordón superior, para el caso del cordón inferior de descontará una unidad del número de paneles del cordón superior, posteriormente se determina el tamaño del cordón inferior con la siguiente expresión.

$$L_{ci} = \text{PanelesCordónInferior} * \text{Long.Panel} + 30 \quad \text{Ec. (37) } [21]$$

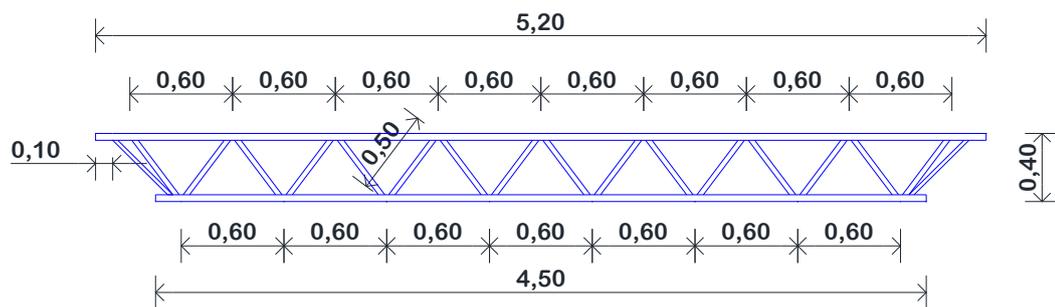


Gráfico 17. Modelo de viga del proyecto

4.3. Límite por deflexión de vigas Joist

Las deflexiones que se analizan en este, fueron calculadas tomando en cuenta el proceso constructivo de las secciones compuestas; es decir, para conformar la viga Joist compuesta fue necesario encofrar la base de la loseta por lo que se considera una construcción apuntalada y en consecuencia el diseño se basa en la resistencia elástica. Una vez que el hormigón ha endurecido, la carga viva fue soportada por la viga como elemento compuesto.

Con el fin de garantizar el criterio indicado, se verificó que el hormigón cumpla una resistencia a la compresión al menos del 75% de su resistencia de diseño para retirar los puntales e iniciar las pruebas de carga, el resultado del ensayo de compresión cilíndrica de las muestras de hormigón consta en el anexo 5.4.1.



Gráfico 18. Construcción apuntalada

4.4. Diseño de viga Joist sin loseta de compresión.

Con los datos descritos en la sección 4.1 y el prototipo de la sección 4.2 de este documento, a través del programa de análisis estructural , se determina las cargas axiales que actúan sobre cada elemento de la viga Joist.

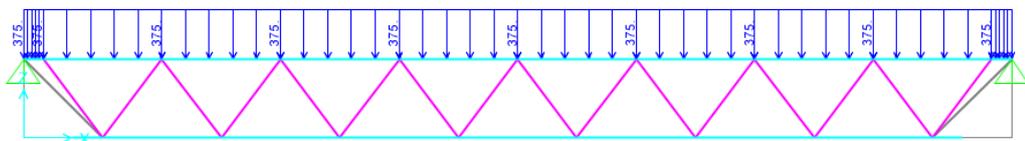


Gráfico 19. Asignación carga viva en unidades de kg/m

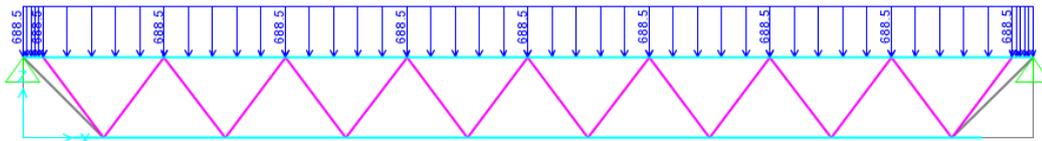


Gráfico 20. Asignación de carga muerta en unidades de kg/m

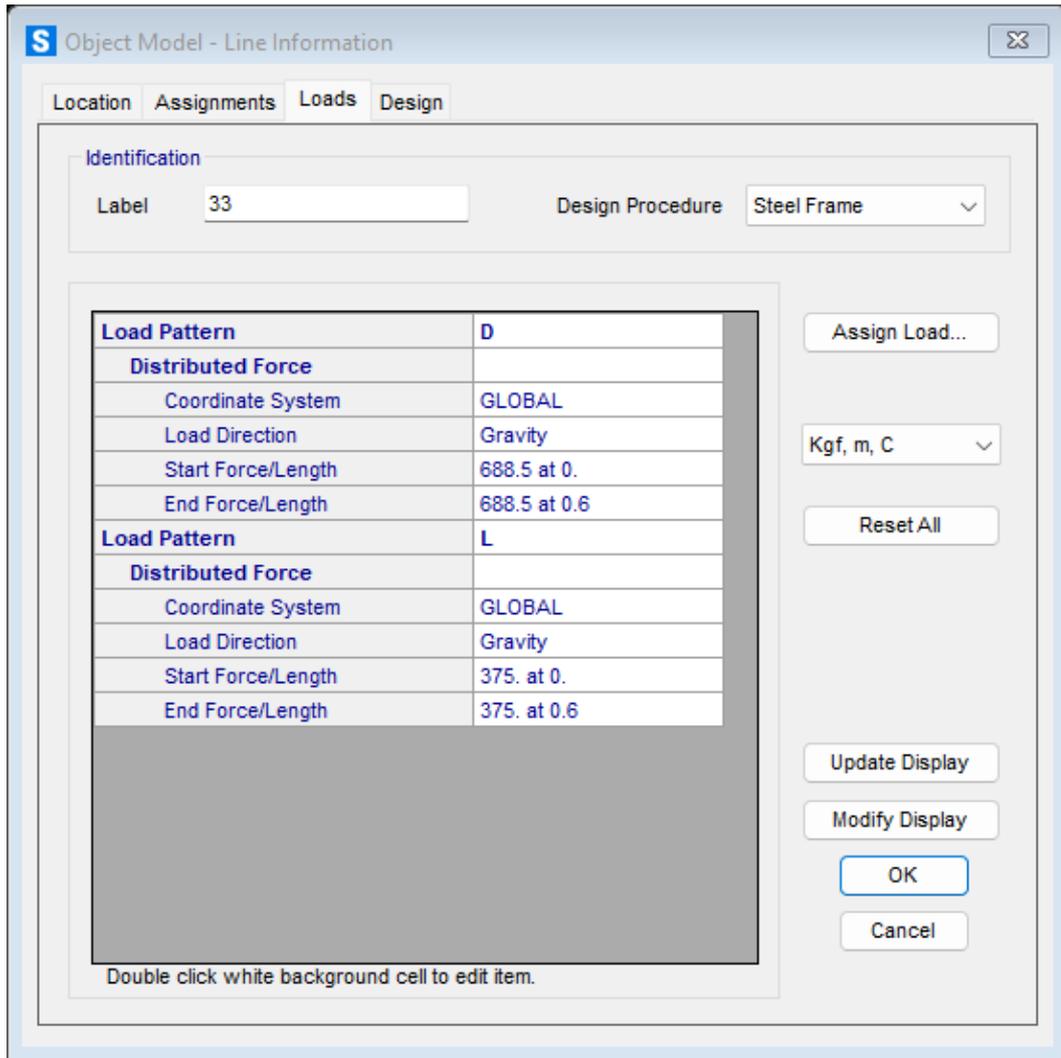


Gráfico 21. Resumen de cargas asignadas en unidades de kg/m

Los resultados del análisis se obtienen usando la combinación de carga con mayor valor conforme el análisis de la tabla 5, empleando la combinación de carga $W1=1.2D+1.6L$.



Gráfico 22. Resultados de esfuerzos axiales de la viga Joist.

Los esfuerzos de mayor valor que se usa en el análisis se detallan en la tabla 7.

Tabla 7. Esfuerzos últimos de diseño

ESFUERZOS ACTUANTES SOBRE LA VIGA JOIST			
Elemento	Tipo de esfuerzo	Valor	Unidad
Cordón inferior	Tensión	11,142.19	kg
Cordón superior	Tensión	4327.80	kg
	Compresión	3373.68	kg
Alma / diagonales	Tensión	4941.53	kg
	Compresión	3743.78	kg

4.4.1. Diseño del cordón inferior de la viga Joist

En una viga Joist simplemente apoyada, los mayores esfuerzos a tensión se originan en el cordón inferior y de acuerdo a lo descrito en la sección 2.4.3 de este documento, los resultados del análisis estructural reflejan que aún cuando no trabaja la viga como sección compuesta el comportamiento es similar.

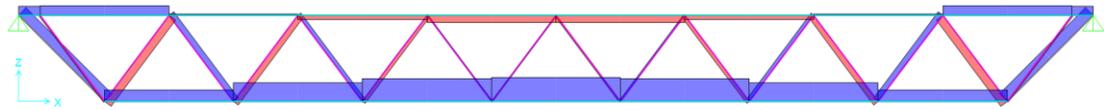


Gráfico 23. Diagrama de esfuerzos axiales en los elementos de la viga Joist.

El cordón inferior está diseñado con doble ángulo de 40x4 mm y en relación a las propiedades del material se empleó acero ASTM A36 grado 36, con el fin de cumplir con los objetivos planteados en el proyecto y considerando que en el mercado nacional se comercializa con mayor frecuencia este material en relación al acero ASTM A572 grado 50.

Tabla 8. Diseño del cordón inferior de una viga Joist

DISEÑO DEL CORDÓN INFERIOR			
Descripción		Valor	Unidad
Fuerza axial de diseño a tensión	$fnt =$	11142.19	kg
Tipo de acero		ASTM A36 Gr. 36	
Límite de fluencia del acero	$Fy =$	2530	kg/cm ²
Resistencia a la tracción del acero	$Fu =$	4080	kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	$Es =$	2043000	kg/cm ²
Ángulo usado en el diseño		2L40X4	
Ancho del ala del ángulo	$w =$	40	mm

Espesor del ángulo	$t =$	4	mm
Área de acero 2L40X4	$A_s =$	6.08	cm ²
<u>Chequeos:</u>			
Relación ancho espesor	$w/t =$	10.00	
Relación ancho espesor elementos a tensión	$\lambda r =$	12.79	O.K.
Resistencia a la tensión	$\phi F_n =$	13844.16	O.K.
Resistencia a la fractura	$\phi F_n =$	18604.8	O.K.
Demanda capacidad del material	$D/C =$	0.80	O.K.

El ángulo seleccionado cumple los parámetros de diseño a tensión, el mismo que trabaja al 80% de su máxima resistencia dentro del rango elástico.

4.4.2. Diseño del cordón superior de la viga Joist

Las acciones de la carga axial en compresión y tensión del cordón superior representan un 30% de los esfuerzos generados sobre el cordón inferior, al respecto de las vigas compuestas los esfuerzos se transmiten a la losa a través de los conectores de cortante y su comportamiento cumple con la sección 2.4.4 de este documento. Con respecto al espesor de los ángulos que forma parte del cordón superior, debe cumplir con la sección 4.4.1.1 [24] de las especificaciones del SJI.

Para el diseño del cordón superior se asume doble ángulo de acero ASTM A36 grado 36 de 40x4 mm [37].

Tabla 9. Diseño del cordón superior de una viga Joist

DISEÑO DEL CORDÓN SUPERIOR			
Descripción		Valor	Unidad
Fuerza axial de diseño a compresión	$f_{nc} =$	4327.8	kg
Longitud del panel de análisis	$l =$	60.00	cm
Tipo de acero		ASTM A36 Gr. 36	
Límite de fluencia del acero	$F_y =$	2530	kg/cm ²
Resistencia a la tracción del acero	$F_u =$	4080	kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	$E_s =$	2043000	kg/cm ²
Ángulo usado en el diseño		2L40X4	
Ancho del ala del ángulo	$w =$	40	mm
Espesor del ángulo	$t =$	4	mm
Área de acero 2L40X4	$A_s =$	6.08	cm ²
Momento de inercia del cordón superior	$I_{xx} =$	9.22	cm ⁴
Radio de giro	$r_x =$	1.23	cm

Chequeos:

Factor de longitud efectiva	$K =$	1	
Límite de esbeltez máxima	$K l/r =$	48.72	O.K.
Factor de forma	$Q =$	0.68	
Esfuerzo de pandeo elástico	$F_e =$	8493.62	kg
Esfuerzo a la compresión	$F_{cr} =$	1585.83	kg
Resistencia al esfuerzo a la compresión	$\phi F_{cr} =$	8677.68	O.K.
Demanda capacidad del material	$D/C =$	0.50	O.K.

El ángulo seleccionado cumple con los parámetros de diseño al 50% de su resistencia máxima dentro del rango elástico.

4.4.3. Diseño del alma de la viga Joist

Las diagonales de alma están sometidas a esfuerzos de tensión y compresión, lo que conlleva a realizar el análisis en los dos casos, para ello se tomó los valores de los dos primeros elementos que poseen la sollicitación de carga más alta.

Se ha considerado para el análisis un ángulo de 40x4 mm, se emplea una conexión Crimped para unir las diagonales del alma a la viga, de acuerdo al detalle del gráfico 9. El acero empleado es ASTM A36 grado 36.

Tabla 10. Diseño del alma de una viga Joist

DISEÑO DEL ALMA / DIAGONALES			
Descripción		Valor	Unidad
Fuerza axial de diseño a compresión	$fn =$	3743.78	kg
Longitud del panel de análisis	$l =$	50.00	cm
Tipo de acero		ASTM A36 Gr. 36	
Límite de fluencia del acero	$F_y =$	2530	kg/cm ²
Resistencia a la tracción del acero	$F_u =$	4080	kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	$E_s =$	2043000	kg/cm ²
Ángulo usado en el diseño		L 40X4	
Ancho del ala del ángulo	$w =$	40	mm
Espesor del ángulo	$t =$	4	mm
Área de acero L 40X4	$A_s =$	3.08	cm ²
Momento de inercia del cordón superior	$I_{xx} =$	4.47	cm ⁴
Radio de giro	$r_x =$	1.20	cm
<u>Diseño a compresión</u>			

Factor de longitud efectiva	$K =$	1	
	$K l/r$		
Límite de esbeltez máxima	$=$	41.50	O.K.
Factor de forma	$Q =$	0.68	
Esfuerzo de pandeo elástico	$F_e =$	11705.36	kg
Esfuerzo a la compresión	$F_{cr} =$	1623.29	kg
	ϕF_{cr}		
Resistencia al esfuerzo a la compresión	$=$	4499.77	O.K.
Demanda capacidad del material	$D/C =$	0.83	O.K.
<u>Diseño a tensión</u>			
Fuerza axial de diseño a compresión o tensión	$f_n =$	4941.53	kg
Resistencia a la tensión	$\phi F_n =$	7013.16	O.K.
Resistencia a la fractura	$\phi F_n =$	9424.8	O.K.
Demanda capacidad del material	$D/C =$	0.53	O.K.

Del análisis de las diagonales se obtiene como resultado que los ángulos seleccionados trabajan al 83% de su capacidad respecto a los esfuerzos de compresión y al 53% a esfuerzos de tensión. Las diagonales internas de la viga reciben menores esfuerzos por lo que constructivamente se mantendrá la misma sección en toda el alma de la viga.

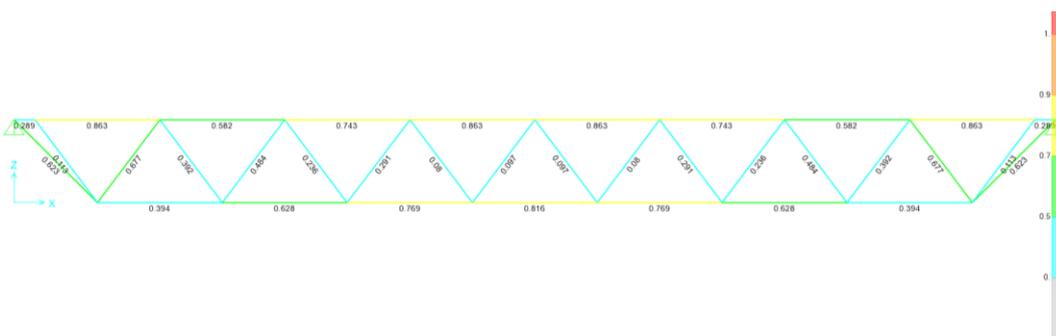


Gráfico 24. Verificación de demanda/capacidad asistida por el programa de análisis estructural.

4.4.4. Deflexión máxima teórica de la viga Joist no compuesta

El análisis de deflexiones en este caso se evalúa únicamente de la viga Joist no compuesta por lo que se asume el valor del módulo de elasticidad del acero usado. La deflexión admisible conforme lo descrito en la sección 2.5.9 de este documento y lo establecido en la sección 5.10 del *American National Standard SJI 200 - 2015* se determina en relación de longitud libre de la viga dividido para 360.

El cálculo de la deflexión se determinó en base al proceso establecido en la sección 2.4 del *Code of Standard Practice for Steel Joists and Joist Girders 2020*, como se detalla a continuación:

$$\delta_{adm.} = 1.15 \frac{5 \cdot W_L \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad \text{Ec. (38) [19]}$$

Donde:

W_L : Carga viva distribuida

L_v : Longitud libre de la viga

E : Módulo de elasticidad

I : momento de inercia

Tabla 11. Deflexión calculada vs admisible

DEFLEXIONES VIGA JOIST NO COMPUESTA			
Descripción		Valor	Unidad
Carga viva	$W_L =$	3.75	kg/cm
Longitud de la viga	$L_v =$	500	cm
Módulo de elasticidad del acero	$E =$	2043000	kg/cm ²
Momento de inercia	$I_{xx} =$	9.22	cm ⁴
Deflexión calculada	$\delta_{cal.} =$	0.186	cm
Deflexión admisible	$\delta_{adm.} =$	1.39	cm
Control		$\delta_{cal.} < \delta_{adm.}$	O.K.

Las dimensiones de los ángulos obtenidos del diseño de la viga se detallan en el gráfico 25.

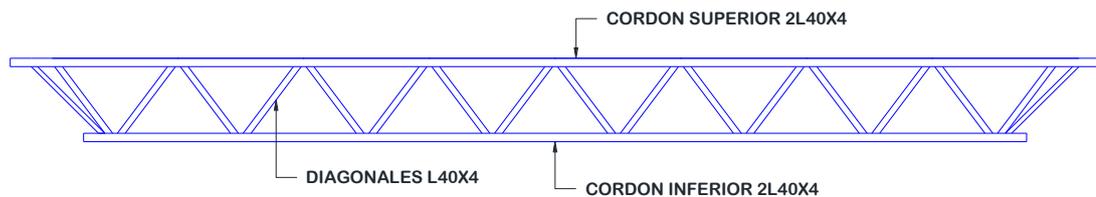


Gráfico 25. Dimensiones de los elementos de la viga Joist diseñada.

En el gráfico 26 se presenta la verificación del diseño de la viga Joist como sección no compuesta.

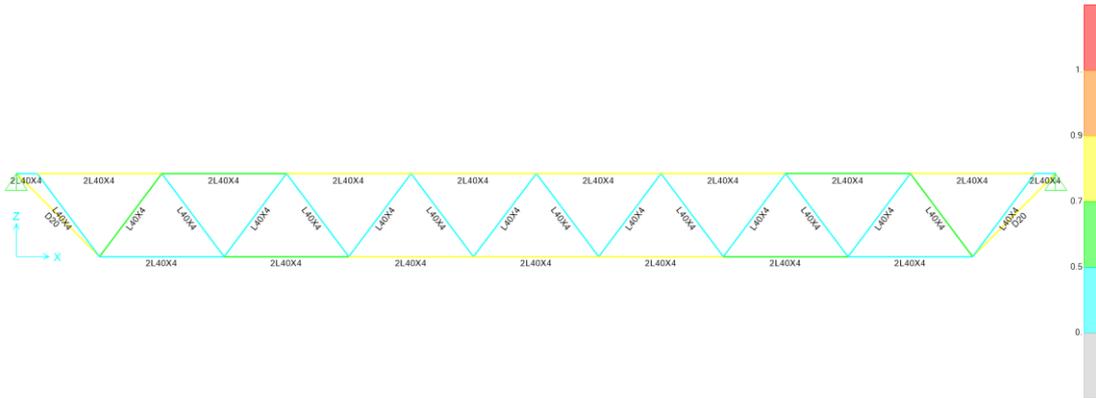


Gráfico 26. Diseño final de viga Joist

4.5. Diseño de viga Joist compuesta con losa maciza.

El hormigón empleado en el análisis cuenta con una resistencia a la compresión de 21MPa. El cálculo del módulo de elasticidad del concreto, fue determinado en base al módulo de elasticidad del agregado que consta en la tabla 11 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-HM [23] para el diseño de estructuras de hormigón armado, el valor empleado en el análisis es 17.5 GPa que corresponde al agregado de la cantera la Península de la provincia de Tungurahua.

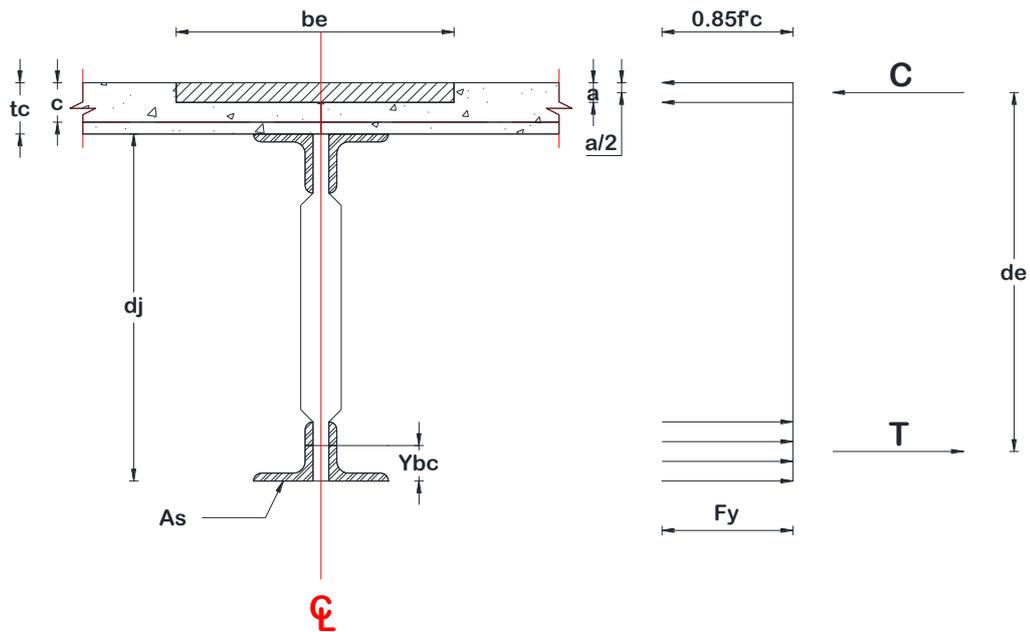


Gráfico 27. Sección compuesta con losa maciza

Para el análisis de la sección compuesta con losa maciza se consideró que el eje neutro se encuentra ubicado en el hormigón sobre el cordón superior de la viga Joist como se muestra en el gráfico 27.

En la tabla 12 se presenta los resultados de los cálculos realizados para el diseño de la viga Joist compuesta con losa maciza.

Tabla 12. Resultados del diseño de viga Joist compuesta con losa maciza.

DISEÑO DE VIGA JOIST COMPUESTA CON LOSA MACIZA		
Descripción	Valor	Unidad
<u>Losa de compresión:</u>		
Resistencia a la compresión del hormigón	$f'c = 21$	MPa
Módulo de elasticidad del agregado	$Ea = 17.5$	GPa
Módulo de elasticidad del hormigón	$Ec = 136821.23$	kg/cm ²
Espesor de la losa de hormigón	$tc = 8.00$	cm
<u>Viga Joist:</u>		
Tipo de acero	ASTM A36 Gr. 36	
Límite de fluencia del acero	$Fy = 2530$	kg/cm ²
Resistencia a la tracción del acero	$Fu = 4080$	kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	$Es = 2043000$	kg/cm ²
Peralte de la viga	$h = 40$	cm
Distancia al eje de compresión	$dj = 44$	cm
Longitud libre entre apoyos de la viga	$Lv = 500$	cm
Separación entre vigas	$S = 40$	cm
<u>Carga de diseño:</u>		
Carga muerta	$D = 688.5$	kg/m
Carga viva	$L = 375.0$	kg/m
Carga de servicio	$D+L = 1063.5$	kg/m
<u>Diseño de sección compuesta</u>		
Relación módulos de elasticidad Es/Ec	$n = 14.93$	
Ancho efectivo	$be = 40$	cm
Sección cordón inferior	2L40X4	
Área de acero cordón inferior	$As = 6.08$	cm ²
Distancia al eje de compresión	$Yc = 13.72$	cm

Distancia al eje de tensión	$Yt =$	34.28	cm
Momento de inercia de la sección compuesta	$Ixx =$	293,892.04	cm ⁴
Módulo de sección a tensión	$St =$	8,574.34	cm ³
Módulo de sección a compresión	$Sc =$	21,414.09	cm ³
Momento último de diseño	$Mn =$	3,323.44	kg-m
Esfuerzo resistente a tensión	$\sigma_s =$	5,787,642.22	kg/cm ²
Resistencia a la flexión del cordón inferior	$0.6Fy =$	15,180,000.00	O.K.
<u>Diseño por estados límites</u>			
Carga última de diseño	$Wu =$	1,426.20	kg/m
Momento último de diseño	$Mu =$	445,687.50	kg-cm
Resistencia a la tensión	$As.Fy =$	15,382.40	kg
	$0.85f'c.be.tc =$	57,120.00	kg
Resistencia a la compresión	$=$		
Bloque de compresión	$a =$	2.15	cm
Distancia al eje del bloque de compresión	$de =$	45.85	cm
<u>Chequeos:</u>			
Resistencia a la fluencia del cordón inferior	$\phi M =$	634,693.85	O.K.
Resistencia a la ruptura del cordón inferior	$\phi M =$	852,948.26	O.K.
Resistencia al aplastamiento del hormigón	$\phi M =$	2,225,895.68	O.K.

4.5.1. Deflexión máxima teórica de la viga Joist compuesta con losa maciza

El resultado de las deflexiones calculadas para una sección compuesta con losa maciza se presenta en la tabla 13. La deflexión a largo plazo es la sumatoria de la deflexión de la viga Joist más el aporte de la losa de compresión.

Tabla 13. Análisis de deflexión de la viga Joist compuesta con losa maciza.

DEFLEXIONES VIGA JOIST COMPUESTA CON LOSA MACIZA			
Descripción		Valor	Unidad
Carga viva	$W_L =$	3.75	kg/cm
Longitud de la viga	$L_v =$	500	cm
Distancia al eje de compresión	$d_j =$	44	cm
	h		
	<i>asumido</i>	40	cm
Peralte de la viga (asumido)	$=$		
Tipo de acero		ASTM A36 Gr. 36	

Límite de fluencia del acero	$F_y =$	2530	kg/cm ²
Resistencia a la tracción del acero	$F_u =$	4080	kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	$E_s =$	2043000	kg/cm ²
<u>Cordón superior</u>			
Ángulo usado en el diseño		2L40X4	
Ancho del ala del ángulo	$w =$	40	mm
Espesor del ángulo	$t =$	4	mm
Área de acero 2L40X4	$A_s =$	6.08	cm ²
Momento de inercia	$I_{xx} =$	9.22	cm ⁴
Distancia al centro de gravedad	$Y_{bc} =$	11.47	cm
<u>Cordón inferior</u>			
Ángulo usado en el diseño		2L40X4	
Ancho del ala del ángulo	$w =$	40	mm
Espesor del ángulo	$t =$	4	mm
Área de acero 2L40X4	$A_s =$	6.08	cm ²
Momento de inercia	$I_{xx} =$	9.22	cm ⁴
Distancia al centro de gravedad	$Y_{bc} =$	11.47	cm
<u>Calculo del momento de inercia efectiva</u>			
	$Y_{chord} =$	22	cm
Esbeltez de la viga Joist	$I_{chord} =$	1365.81	cm ⁴
Relación longitud de la viga / peralte de la viga	$L/h =$	12.50	
	$Cr =$	0.83	
	$\gamma =$	0.21	
Momento de inercia efectivo de la sección compuesta	$I_{eff} =$	6341.73	cm ⁴
Deflexión calculada	$\delta_{cal.} =$	0.271	cm
Deflexión admisible	$\delta_{adm.} =$	1.39	cm
<u>Control</u>		$\delta_{cal.} < \delta_{adm.}$	O.K.

4.6. Diseño de viga Joist compuesta con losa con lámina de acero (Steel Deck).

El espesor de la lámina de acero empleada en los cálculos fue de 0.65mm de espesor y el límite de fluencia de 2750kg/cm². Para el análisis de la sección compuesta con lámina de acero, se partió de las siguientes consideraciones:

La lámina de acero se colocó perpendicular a la viga Joist como se muestra en la el gráfico 28 y el eje neutro se encuentra ubicado en el hormigón sobre el deck.

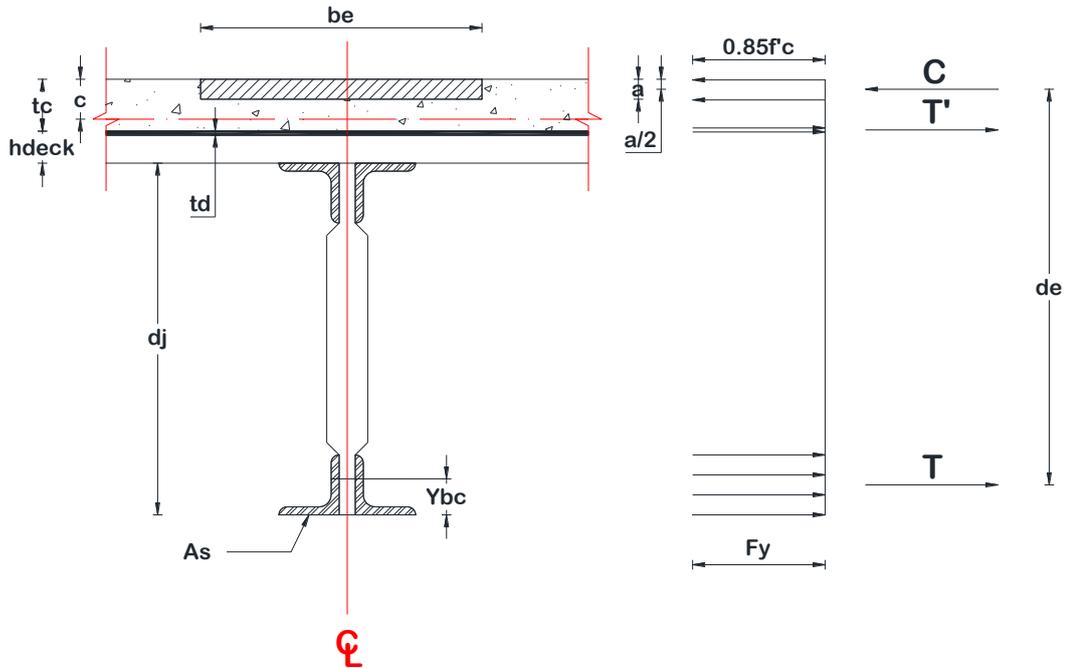


Gráfico 28. Sección compuesta con lámina de acero “Steel deck”

Para el cálculo del bloque de compresión se empleó la siguiente fórmula:

$$a = \frac{As \cdot Fy + be \cdot td \cdot Fyd}{0.85 \cdot f'c \cdot be} \quad \text{Ec. (39)[8]}$$

En la tabla 14 se presenta los resultados de los cálculos realizados para el diseño de la viga Joist compuesta con lámina de acero “Steel deck”.

Tabla 14. Resultados del diseño de viga Joist compuesta con lámina de acero

DISEÑO DE VIGA COMPUESTA CON LAMINA DE ACERO		
Descripción	Valor	Unidad
<u>Losa de compresión:</u>		
Resistencia a la compresión del hormigón	$f'c =$ 21	MPa
Módulo de elasticidad del agregado	$Ea =$ 17.5	GPa
Módulo de elasticidad del hormigón	$Ec =$ 136821.23	kg/cm ²
Espesor de la losa de hormigón	$tc =$ 7.00	cm
Esfuerzo de fluencia del acero de steel deck	$Fyd =$ 2750.00	kg/cm ²
Espesor del steel deck	$td =$ 0.065	cm
<u>Viga Joist:</u>		
Tipo de acero	ASTM A36 Gr. 36	

Límite de fluencia del acero	$F_y =$	2530	kg/cm ²
Resistencia a la tracción del acero	$F_u =$	4080	kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	$E_s =$	2043000	kg/cm ²
Peralte de la viga	$h =$	40	cm
Distancia al eje de compresión	$d_j =$	43.5	cm
Longitud libre entre apoyos de la viga	$L_v =$	500	cm
Separación entre vigas	$S =$	150	cm
<u>Carga de diseño:</u>			
Carga muerta	$D =$	686.8	kg/m
Carga viva	$L =$	375.0	kg/m
Carga de servicio	$D+L =$	1061.8	kg/m
<u>Diseño de sección compuesta</u>			
Relación módulos de elasticidad Es/Ec	$n =$	14.93	
Ancho efectivo	$be =$	40	cm
Sección cordón inferior		2L40X4	
Área de acero cordón inferior	$A_s =$	6.08	cm ²
Distancia al eje de compresión	$Y_c =$	14.15	cm
Distancia al eje de tensión	$Y_t =$	32.85	cm
Momento de inercia de la sección compuesta	$I_{xx} =$	284,185.83	cm ⁴
Módulo de sección a tensión	$S_t =$	8,651.24	cm ³
Módulo de sección a compresión	$S_c =$	20,082.59	cm ³
Momento último de diseño	$M_n =$	3,318.26	kg-m
Esfuerzo resistente a tensión	$\sigma_s =$	5,727,264.66	kg/cm ²
Resistencia a la flexión del cordón inferior	$0.6F_y =$	15,180,000.00	O.K.
<u>Diseño por estados límites</u>			
Carga última de diseño	$W_u =$	1,424.21	kg/m
Momento último de diseño	$M_u =$	445,066.50	kg-cm
Resistencia a la tensión	$A_s.F_y =$	15,382.40	kg
	$0.85f'_c.be.tc$	49,980.00	kg
Resistencia a la compresión	$=$		
Bloque de compresión	$a =$	3.16	cm
Distancia al eje del bloque de compresión	$de =$	43.84	cm
<u>Chequeos:</u>			
Resistencia a la fluencia del cordón inferior	$\phi M =$	606,986.14	O.K.
Resistencia a la ruptura del cordón inferior	$\phi M =$	815,712.60	O.K.
Resistencia al aplastamiento del hormigón	$\phi M =$	1,862,633.22	O.K.

4.6.1. Deflexión máxima teórica de la viga Joist compuesta con steel deck

El resultado de las deflexiones calculadas para una sección compuesta con lámina de acero se presenta en la tabla 15. La deflexión a largo plazo es la sumatoria de la deflexión de la viga Joist más el aporte de la losa de compresión y el aporte de la rigidez de la lámina metálica “Steel deck”.

Tabla 15. Análisis de deflexión de la viga Joist compuesta con lámina de acero.

DEFLEXIONES VIGA JOIST COMPUESTA A LARGO PLAZO			
Descripción		Valor	Unidad
Carga viva	$W_L =$	3.75	kg/cm
Longitud de la viga	$L_v =$	500	cm
Distancia al eje de compresión	$d_j =$	43.5	cm
	h		
Peralte de la viga (asumido)	$asumido =$	40	cm
Tipo de acero		ASTM A36 Gr. 36	
Límite de fluencia del acero	$F_y =$	2530	kg/cm ²
Resistencia a la tracción del acero	$F_u =$	4080	kg/cm ²
Módulo de elasticidad del acero	$E_s =$	2043000	kg/cm ²
<u>Cordón superior</u>			
Ángulo usado en el diseño		2L40X4	
Ancho del ala del ángulo	$w =$	40	mm
Espesor del ángulo	$t =$	4	mm
Área de acero 2L40X4	$A_s =$	6.08	cm ²
Momento de inercia	$I_{xx} =$	9.22	cm ⁴
Distancia al centro de gravedad	$Y_{bc} =$	11.47	cm
<u>Cordón inferior</u>			
Ángulo usado en el diseño		2L40X4	
Ancho del ala del ángulo	$w =$	40	mm
Espesor del ángulo	$t =$	4	mm
Área de acero 2L40X4	$A_s =$	6.08	cm ²
Momento de inercia	$I_{xx} =$	9.22	cm ⁴
Distancia al centro de gravedad	$Y_{bc} =$	11.47	cm
<u>Calculo del momento de inercia efectiva</u>			
	$Y_{chord} =$	21.75	cm
Esbeltez de la viga Joist	$I_{chord} =$	1302.57	cm ⁴
Relación longitud de la viga / peralte de la viga	$L/h =$	12.50	

	$Cr =$	0.83	
	$\gamma =$	0.21	
Momento de inercia efectivo de la sección compuesta	$I_{eff} =$	6049.89	cm ⁴
Deflexión calculada	$\delta_{cal.} =$	0.284	cm
Deflexión admisible	$\delta_{adm.} =$	1.39	cm
Control		$\delta_{cal.} < \delta_{adm.}$	O.K.

4.7. Diseño de la silleta

La silleta es un elemento que forma parte del alma de la viga Joist absorbe esfuerzos a tensión en los extremos de la viga y sirve como apoyo en las conexiones de la viga Joist con la viga principal. Para el análisis se ha empleado una barra redonda de producción nacional y con un límite de fluencia de 36 ksi.

Tabla 16. Resultados del diseño de la silleta

DISEÑO DE BARRA DE REFUERZO (SILLETA)			
Descripción		Valor	Unidad
Tensión última	$f_{nt} =$	4941.53	kg
Diámetro de la barra	$Diámetro =$	20	mm
Tipo de acero		ASTM A36 Gr. 36	
Límite de fluencia del acero	$F_y =$	2530	kg/cm ²
Resistencia a la tracción del acero	$F_u =$	4080	kg/cm ²
Área de barra	$A_g =$	3.14	cm ²
Límite de fluencia del acero	$F_y =$	2530	kg/cm ²
Resistencia a la tensión de la barra	$\phi F_n =$	7153.406472	O.K.
Resistencia a la fractura	$\phi F_n =$	9613.27352	O.K.
Demanda capacidad del material	$D/C =$	0.69	O.K.

4.8. Diseño de conectores de corte

De acuerdo a la sección 2.5.10 del proyecto para el estudio se emplea conectores tipo canal fabricados con acero ASMT A36. El número de conectores y el espaciamiento para permitir que la viga Joist trabaje como sección compuesta es empleado en los dos casos de estudio.

La dirección del ala del conector se orienta en dirección a la deformada de la viga ante la acción del momento flector, con la finalidad de generar mayor anclaje con el hormigón.

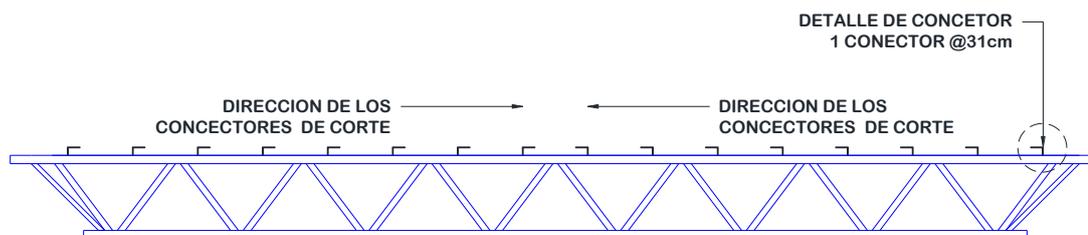


Gráfico 29. Disposición de los conectores de corte tipo canal

Los resultados del diseño de los conectores constan en la tabla 17.

Tabla 17. Resultados del diseño de los conectores de corte

DISEÑO DE CONECTORES DE CORTE TIPO CANAL			
Descripción	Valor	Unidad	
Cortante de diseño	$Th =$ 153824	N	
Resistencia a la compresión del hormigón	$f_c =$ 21	MPa	
Módulo de elasticidad del hormigón	$E_c =$ 13682.12	MPa	
Longitud del ala del conector	$tf =$ 60	mm	
Espesor del perfil del conector	$tw =$ 4	mm	
Longitud del conector	$la =$ 105	mm	
Altura del conector	$hc =$ 40	mm	
Resistencia nominal del conector	$Q_n =$ 10468.60	N	
Número de conectores	$N_c =$ 16.00	u	
Espaciamiento de conectores	31.00	cm	

4.9. Resultados de la evaluación de deflexiones por caso de estudio

En esta sección se analizan los resultados de la deflexión calculada vs la admisible de los tres casos de estudio.

En la tabla 18 se presenta el resultado del análisis de los estados límites por deflexión de los tres casos de estudio. La deflexión admisible se refiere a la deflexión máxima que debe alcanzar una viga de 5.00 m de luz libre; mientras que el valor calculado, representa la deflexión a largo plazo que sufriría la viga diseñada como sección compuesta. En los tres casos, cumplen con el estado límite por deflexión; sin embargo, se puede observar que en función de la inercia de cada sección analizada existe una variación respecto a cada sistema de piso empleado en el análisis para determinar el momento de inercia efectiva.

Tabla 18. Comparación de deflexiones admisibles y calculadas

DEFLEXIONES CALCULADAS vs EXPERIMENTALES		
Descripción	Calculada	Experimental
	mm	mm
Deflexión máxima admisible $L_v/360$	13.90	13.90
Viga Joist no compuesta	1.86	4.64
Viga Joist compuesta con losa maciza	2.71	1.40
Viga Joist compuesta con lámina de acero	2.84	1.63

$$\delta_{adm} = \frac{L}{360} \quad \text{Ec. (40) } [21]$$

$$\delta_{adm} = \frac{5000\text{mm}}{360} = 13.89\text{mm}$$

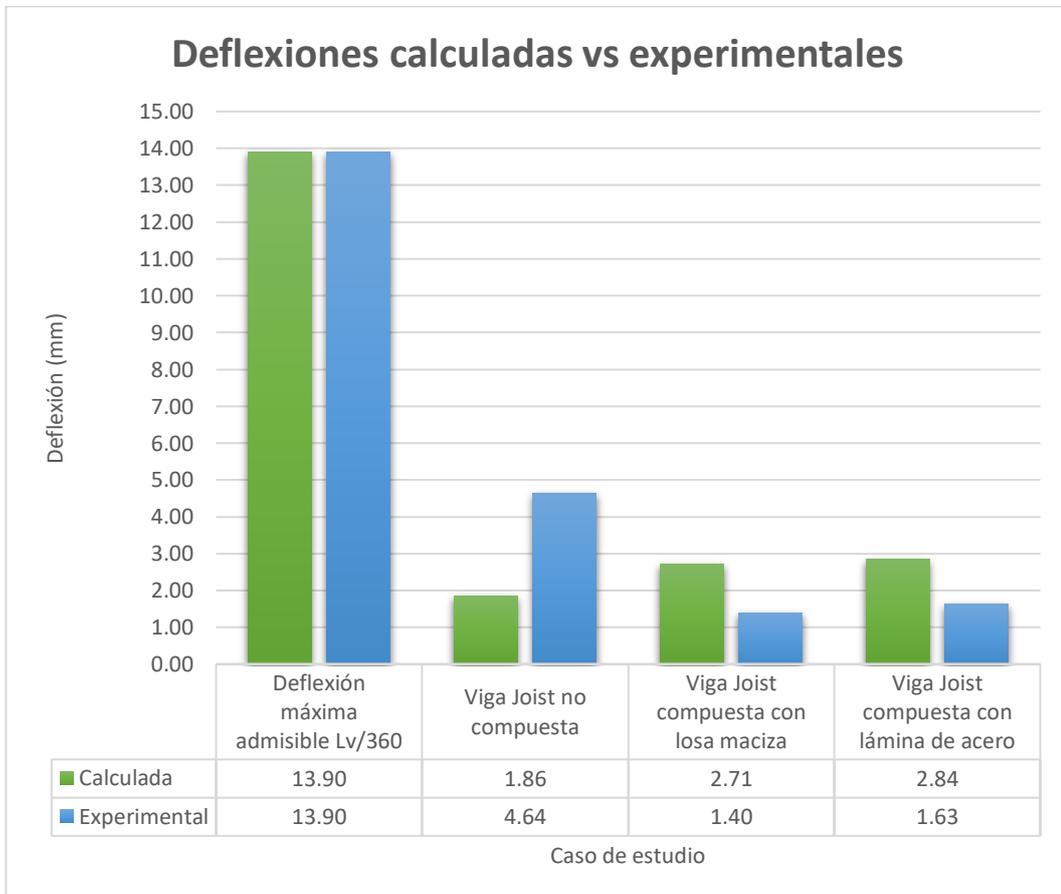


Gráfico 30. Resultados teóricos del estado límite por deflexión

En base a los resultados obtenido del análisis y del ensayo experimental podemos comprobar que existe un significativo aporte de la losa de compresión de los dos sistemas de viga compuesta en relación a una sección no compuesta, donde el resultado de la deflexión es mayor. En el grafico 31 se representa gráficamente que

4.10. Probetas de ensayo experimental

El ensayo experimental se realizó con las vigas fabricadas con las mismas medidas y secciones de los elementos estructurales, con el objeto de evaluar los resultados respecto a los valores calculados que consta en la No. 18.



Gráfico 31. Vigas Joist – secciones no compuestas

El hormigón empleado en la fabricación de las secciones compuestas tiene una resistencia a la compresión de 21MPa.



Gráfico 32. Viga Joist compuesta con losa maciza



Gráfico 33. Viga Joist Compuesta con lámina de acero “Steel deck”

Para el desarrollo del experimento se consideró que el hormigón cumpla la resistencia de diseño, previo a la aplicación de la carga.

4.11. Resultado experimental de la prueba carga/deformación

En el gráfico 34 se representa el modelo matemático empleado para la evaluación del estado limite por deflexión.

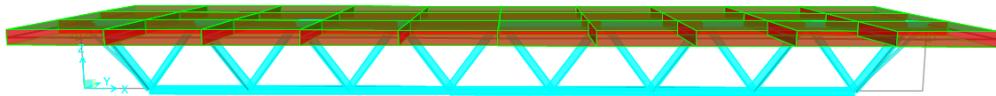


Gráfico 34. Modelo matemático de viga Joist de sección compuesta

Se realizó una simulación en el programa de análisis estructural, de la viga Joist con diferentes valores de carga, con el fin analizar de forma gráfica el incremento de la deflexión en función de la carga aplicada.

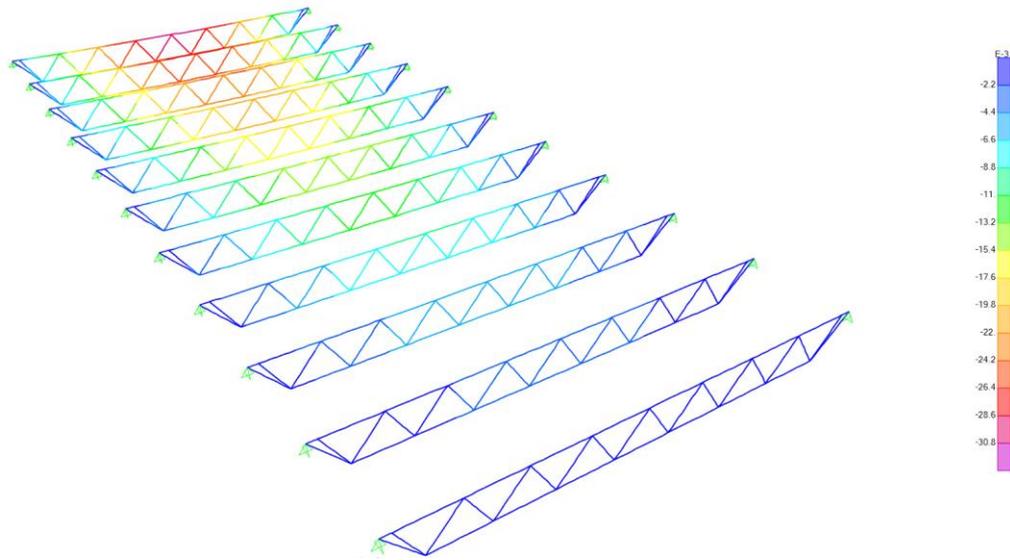


Gráfico 35. Deflexión de la viga Joist por incremento de carga

Una vez previsto de forma analítica el comportamiento de la viga Joist respecto a la variación de carga, se desarrolló el experimento, empleando sacos de cemento de 50kg y mortero prefabricado de 40kg, la carga empleada simula la carga viva a la cual se somete la viga para obtener la deflexión.

Los valores de deflexión se obtuvieron con deformímetros digitales con unidades de medida en milímetros. Los registros de medición se tomaron en intervalos de tiempo de 15 minutos entre cada incremento de carga con el fin de estabilizar el valor de medición.



Gráfico 36. Deformímetro "Clockwise Tools DICR-0105"

Los valores medidos de la deflexión, se registraron hasta el punto de falla de la losa de hormigón, para los tres casos se empleó una carga total de 3.15ton. No se ha

considerado la falla del acero por fluencia, es su lugar se evaluó el estado límite de deflexión máxima obtenida para una luz de 5.00m.

En los gráficos No.35, 36 y 37 se representa las muestras sometidas a carga distribuida de los tres casos de estudio.



Gráfico 37. Muestra de experimento de la viga Joist no compuesta



Gráfico 38. Muestra de experimento de la viga Joist compuesta con losa maciza



Gráfico 39. Muestra de experimento de la viga Joist compuesta con lámina de acero "Steel deck"

4.11.1. Prueba carga/deformación de la viga Joist no compuesta

Los registros de medición de deflexión de la viga no compuesta se presentan en la tabla 19. Con los datos obtenidos y de acuerdo al criterio de diseño, se empleó carga distribuida para el análisis del momento flector y el esfuerzo transmitido a la viga.

Tabla 19. Deflexión de la viga no compuesta

Carga kg	Deflexión mm
0.00	0.00
400.00	2.97
800.00	5.64
1,200.00	7.95
1,600.00	9.77
2,000.00	11.67

El resultado del experimento de una viga Joist no compuesta, permite comprobar que la flexión de la viga diseñada no supera el valor máximo admisible para una longitud de 5.00 m. Además, se puede observar que la viga Joist no compuesta es más flexible que las vigas Joist compuesta, este criterio se puede observar en el grafico No. 40.



Gráfico 40. Carga deformación de una viga Joist no compuesta

Además, se puede observar que la viga Joist no compuesta es más flexible que las vigas Joist compuesta, este criterio se puede observar en el grafico No. 39.

4.11.2. Prueba carga/deformación de la viga Joist compuesta con losa maciza

Los registros de medición de deflexión de la viga compuesta con losa maciza se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Deflexión de la viga compuesta con losa maciza

Carga	Deflexión
kg	mm
0.00	0.00
250.00	0.67
500.00	1.40
750.00	2.15
1,150.00	3.47
1,550.00	4.73
1,950.00	5.54
2,350.00	6.83
2,750.00	8.02
3,150.00	10.52

De acuerdo al criterio de diseño, se empleó carga distribuida para el análisis del momento flector y el esfuerzo transmitido a la viga, tomando en cuenta que la distancia a la acción de los esfuerzos de tensión para el cálculo del momento flector se encuentra en el eje neutro del bloque de compresión del hormigón sobre el acero del cordón superior de la viga Joist.

Con los resultados del experimento se comprueba que la hipótesis es verdadera ya que la deflexión de las vigas compuestas tipo Joist no exceden de la condición $L/360$, ante la acción de las cargas de diseño definidas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Respecto a una viga Joist no compuesta, el aporte de la losa maciza de hormigón provee mayor rigidez a la sección compuesta lo cual se puede comprobar por el valor obtenido del momento de inercia de la viga y el resultado de los esfuerzos que se transmiten ante la acción de carga variable.

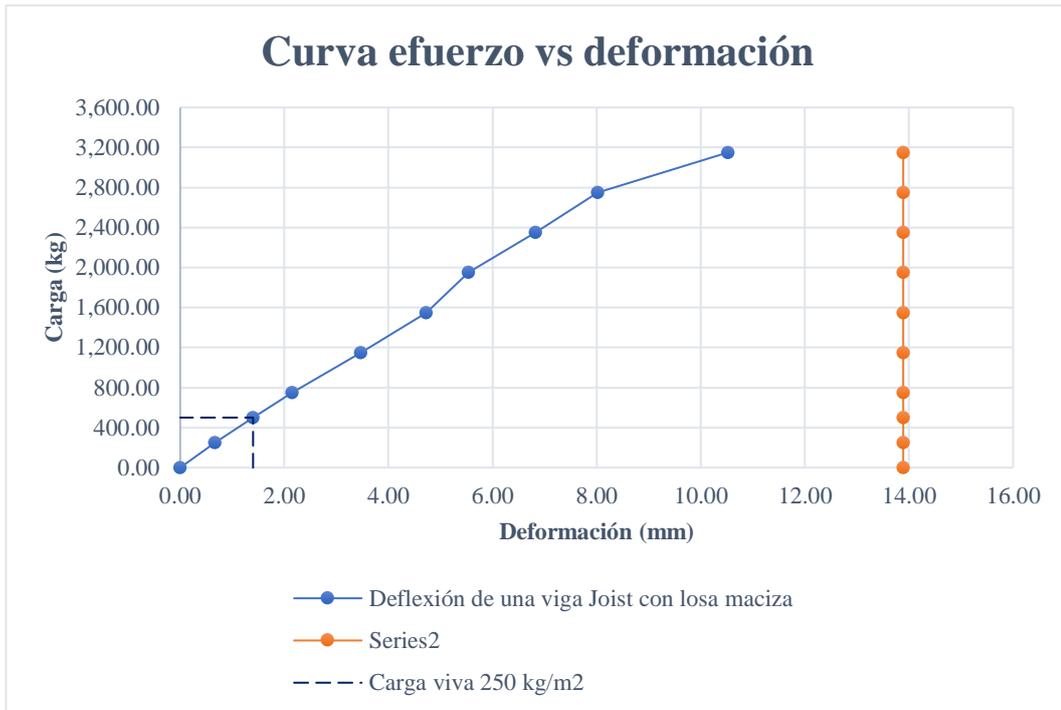


Gráfico 41. Carga deformación de una viga Joist no compuesta

El gráfico 41 representa la carga vs la deformación de una viga Joist compuesta con losa maciza hasta el punto de falla del hormigón, el mismo que se genera en las zonas de mayor momento negativo ubicado entre el refuerzo de la silleta y el primer ángulo del alma. El experimento demuestra que la sección compuesta puede resistir 24 veces más de la carga viva empleada en el diseño.



Gráfico 42. Punto de falla del hormigón

4.11.3. Prueba carga/deformación de la viga Joist compuesta con steel deck

Los registros de medición de deflexión de la viga compuesta con lámina de acero “steel deck” se presentan en la tabla 21. Con los datos obtenidos y de acuerdo al criterio de diseño, se empleó carga distribuida para el análisis del momento flector y el esfuerzo transmitido a la viga, tomando en cuenta que la distancia a la acción de los esfuerzos de tensión para el cálculo del momento flector se encuentra en el eje neutro del bloque de compresión del hormigón sobre los valles de la lámina de acero.

Tabla 21. Deflexión de la viga compuesta con lámina de acero “Steel deck”

Carga	Deflexión
kg	mm
0.00	0.00
400.00	1.07
800.00	1.97
1,200.00	3.02
1,600.00	4.17
2,000.00	5.28
2,400.00	6.30
2,650.00	7.09
2,900.00	8.03
3,150.00	8.64

El experimento comprueba que la hipótesis es verdadera ya que la deflexión de las vigas compuestas tipo Joist con lámina de acero no excede la condición $L/360$, ante la acción de las cargas de diseño definidas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Respecto a una viga Joist no compuesta y la viga Joist compuesta con losa maciza, el aporte de la lámina de acero provee mayor rigidez a la sección compuesta con “Steel deck” lo cual se puede comparar con el valor de deflexión obtenido con la carga máxima aplicada en las pruebas anteriores.



Gráfico 43. Carga deformación de una viga Joist compuesta con lámina de acero “Steel deck”



Gráfico 44. Falla del hormigón el sistema de piso con lámina metálica

El gráfico 43 representa la carga deformación de una viga Joist compuesta con una viga Joist compuesta con lámina de acero “Steel deck”. Durante el experimento se observó que las fisuras del hormigón del gráfico 42, son menores a las fisuras de la viga Joist compuesta con losa maciza, esto se debe al aporte de las láminas metálicas.

4.11.4. Evaluación de estados límites por deflexión

Los resultados obtenidos del experimento demuestran que el estado límite por deflexión de los tres tipos de vigas Joist empleados en la evaluación, no sobrepasan la deflexión máxima admisible, lo cual garantiza su alta resistencia a grandes cargas y luces. Además, la diferencia del valor de deflexión de una viga Joist compuesta con losa maciza respecto a la viga Joist con lámina de acero “Steel deck”, permite deducir que la geometría de la lamina de acero aporta mayor rigidez a la sección compuesta, como se demuestra en el gráfico 44.



Gráfico 45. Análisis comparativo de vigas Joist no compuestas vs vigas Joist compuestas

Una viga Joist compuesta con lamina metálica “Steel deck” posee menos el 18% de deflexión que una viga compuesta con losa maciza. Los resultados de deflexión de 10.52 mm de una viga Joist compuestas con losa maciza y 8.64 mm para vigas Joist con lámina de acero “Steel deck” demuestra que los sistemas de piso construidos

con lámina de acero son más rígidos que los sistemas de piso con losa maciza, lo cual es un factor importante al momento de tomar una decisión sobre qué tipo de sistema piso usar en una edificación, considerando el costo beneficio entre el proceso de construcción del encofrado respecto a uso de las láminas de acero.

4.11.5. Falla del hormigón por cortante

Durante el proceso de experimentación, los dos casos de sección compuesta se produjeron fallas por cortante en los extremos de las vigas. En el gráfico 46 podemos observar la deformada de una viga ante la acción de la carga distribuida, donde la mayor deformación se presenta en el centro de la viga. con este criterio podemos definir que las fibras inferiores se encuentran sometido a esfuerzos de tensión mientras que las fibras superiores del hormigón se encuentran sometidos a esfuerzos de compresión, dicho esto en la zona cercana a los apoyos estos esfuerzos con menores a los del centro de la viga por lo cual se concluye que la falla del hormigón cerca de los apoyos es generados por el esfuerzo a corte.

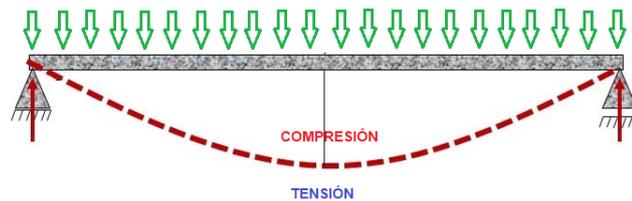


Gráfico 46. Deformada de una viga simplemente apoyada con carga distribuida

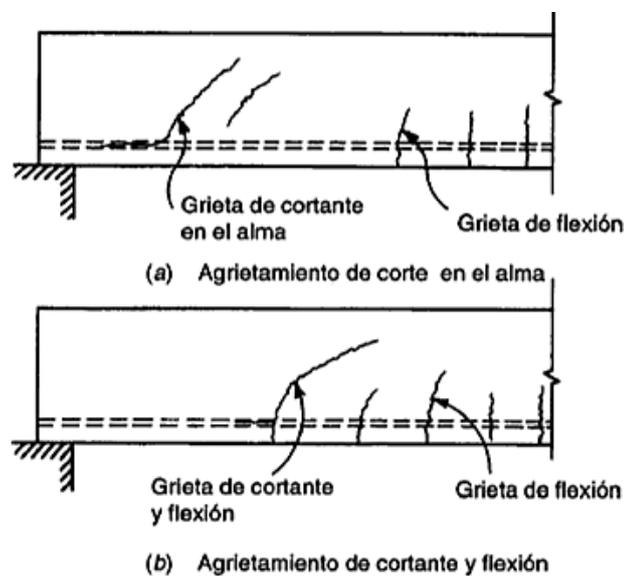


Gráfico 47. Agrietamiento por flexión y cortante en vigas de hormigón

En el gráfico 47 (a), podemos observar en el apoyo de la viga el agrietamiento por cortante, este caso nos conduce a que los agrietamientos que se produjeron durante el proceso de experimentación de las vigas Joist compuestas se genera por la acción de esfuerzos de cortante, como lo podemos observar en los gráficos 48 y 49.



Gráfico 48. Agrietamiento del hormigón – viga Joist compuesta con losa maciza



Gráfico 49. Agrietamiento del hormigón – viga Joist compuesta con lámina de acero

Este tipo de falla se generó al aplicar una carga viva seis veces mayor a la carga de diseño, por lo que en caso que la estructura sea sometida a sobre cargas que superen las del diseño de deberá agregar acero de refuerzo a una longitud de dos veces la altura de la viga.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

5.1. Conclusiones

El objetivo de este proyecto de investigación fue evaluar el estado límite por deflexión de las vigas Joist como secciones no compuestas y compuestas, tomando en consideración dos sistemas de pisos frecuentemente empleados en nuestro país que son losas macizas y losas con lámina de acero “steel deck”, se ensayaron los tres casos con vigas Joist de 5.00 m de largo.

- Los resultados de la evaluación realizada indican que las vigas Joist no compuesta poseen mayor deflexión que las secciones compuestas. Al usar una carga viva de 250 kg/m^2 para calcular la deflexión de los tres casos de estudio y posterior a las pruebas realizadas se obtuvo resultados en los cuales la viga Joist no compuesta se deforma al menos tres veces más que las secciones compuestas. Por lo que se comprueba que las secciones compuestas pueden ser empleadas con seguridad en la construcción de sistemas de entrepiso de una edificación.
- Respecto al estado límite por deflexión de las vigas Joist y conforme el proceso de cálculo establecido por el *Steel Joist Institute*, para determinar el valor de deflexiones, se comprobó que la deflexión máxima alcanzada en la prueba de los tres casos de estudio no superó el límite permisible de $L/360$, tomando en cuenta que en la prueba se empleó una sobre carga de 3.15 ton., la cual fue seis veces mayor a la carga viva empleada en el diseño de 250 kg/m^2 , pues en este punto se registraron fallas por cortante en el hormigón en el extremo de las vigas.
- Durante el proceso experimental no registraron agrietamientos en las zonas donde fueron ubicados los conectores de corte, por lo que se concluye que los conectores de corte tipo canal empleados en este proyecto, garantizan el comportamiento como sección compuesta entre la viga Joist y el hormigón de las losas de compresión.
- Los resultados de este proyecto de investigación se basan en el estado límite por deflexión, sin embargo al emplear acero estructural ASTM A36 para el diseño y fabricación de las vigas Joist y luego de retirar la sobre carga

impuesta para medir las deformaciones se constato que la viga no perdió su elasticidad ya que la misma retomo su posición inicial, este caso indica que el análisis del estado limite por deflexión nos permite que los diseños de secciones compuestas con vigas Joist sean conservadores. Por otra parte, las especificaciones del Steel Joist Instituto recomiendan que para la fabricación de los cordones superior e inferior de la viga se emplee acero ASTM A572 grado 50, sin embargo, los resultados de este experimento indica que al no existir falla por fluencia del acero se puede emplear acero ASTM A36 en la fabricación de vigas Joist para secciones compuestas.

5.2. Recomendaciones

- Como alcance a este tema de investigación se recomienda realizar un análisis comparativo de estados límites por deflexión entre una viga compuesta de alma llena vs una viga Joist compuesta empleando los dos casos de análisis de este proyecto, con el fin de determinar la eficiencia y costo de los materiales empleados para la fabricación de secciones compuestas.
- En relación a la zona de falla del hormigón se recomienda realizar una investigación donde se coloque acero de refuerzo, para contrarrestar las cargas por cortante y se evalúe la deflexión máxima que se puede alcanzar con secciones compuestas de alma abierta.
- Con los resultados del ensayo experimental y conforme a la metodología constructiva de nuestro país se puede emplear ángulos estructurales ASTM A36 fabricados en caliente.
- Respecto a la falla por corte, en el caso que la estructura sea sometida a sobre cargas que superen las cargas de diseño se deberá agregar acero de refuerzo a una longitud de dos veces la altura de la viga.

5.3. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. C. Wang y D. J. Kaley, «Composite Action of Concrete Slab and Open Web Joist (Without the Use of Shear Connectors)», 1967, [En línea]. Disponible en: <https://www.aisc.org/Composite-Action-of-Concrete-Slab-and-Open-Web-Joist-Without-the-Use-of-Shear-Connectors>
- [2] R. Tide y T. Galambos, «Composite Open-Web Steel Joists», vol. 7, 1970.
- [3] H. Robinson y E. H. Fahmy, «The design of partially connected composite open-web joists», *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 5, n.º 4, NRC Research Press, pp. 611-614, 1978.
- [4] S. Easterling, D. Samuelson, y T. Murray, «Behavior and Design of Longspan Composite Joists», pp. 274-285, 2000, doi: 10.1061/40616(281)24.
- [5] D. Samuelson, «Composite Steel Joists | American Institute of Steel Construction», 2002, Accedido: 21 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.aisc.org/Composite-Steel-Joists>
- [6] M. Sami, M. Hamood, y W. Abdulsahib, «Flexural behavior of composite open web steel joist and concrete slab», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 737, p. 012017, mar. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/737/1/012017.
- [7] K. Lucero, «La construcción, un pilar de la economía debilitado por la pandemia», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistagestion.ec/economia-y-finanzas-analisis/la-construccion-un-pilar-de-la-economia-debilitado-por-la-pandemia>
- [8] M. Díaz, L. Hernández, y G. Parra, «Sistemas de Pisos Compuestos con Vigas de Alma Abierta», *Rev. Int. Ing. Estruct.*, vol. 26, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2021, doi: 10.24133/riie.v26i1.1961.
- [9] M. Díaz, «Propuesta de cálculo para entrepisos compuestos de hormigón y acero, con vigas de alma abierta para su aplicación en Ecuador», Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19059>
- [10] L. Araújo y E. Batista, «Composite floor system with CFS trussed beams, concrete slab and innovative shear connectors», *REM - Int. Eng. J.*, vol. 73, n.º 1, pp. 23-31, mar. 2020, doi: 10.1590/0370-44672019730049.
- [11] A. Muhammad, «Behaviour of Open Web Steel Joist in Composite Deck Floor System», University of Windsor, Canada, 2015.
- [12] M. E. Columba Morocho y G. A. Crespo Palma, «Estudio de elementos compuestos por una losa de hormigón sobre una viga de acero de alma no compacta y patines compactos, sometidos a flexión con momentos negativos», Quito, 2016., 2016. Accedido: 17 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16861>
- [13] M. Azmi, «Composite Open-Web Trusses with Metal Cellular Floor», McMaster University, Canada, 1972.
- [14] A. Brattland y L. Kennedy, «Flexural tests of two full-scale composite trusses», vol. 19, p. 17, 1992, doi: <https://doi.org/10.1139/192-033>.

- [15] M. H. Díaz Sánchez, «Propuesta de cálculo para entresijos compuestos de hormigón y acero, con vigas de alma abierta para su aplicación en Ecuador», ene. 2018, Accedido: 7 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19059>
- [16] G. Jiménez, «Reducción de la vulnerabilidad sísmica de estructuras ocupacionales de acero en el cantón Ambato», PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, Ambato, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/35114>
- [17] J. McCormac y S. Csernac, *Diseño de estructuras de acero*, Quinta. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C. V., México.
- [18] C. Salmon y J. Johnson, *Steel Structures: Design and Behavior*, Cuarta. United States of America: HarperCollins College Publisher.
- [19] S. Kumar, K. A. Patel, S. Chaudhary, y A. K. Nagpal, «Rapid Prediction of Long-term Deflections in Steel-Concrete Composite Bridges Through a Neural Network Model», doi: <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00458-1>.
- [20] L. Aycardi, «Informe ensayo No.1 VIGA-TEC, pórtico de prueba sistema Joist - deck», 2008.
- [21] A. Maccioni y B. Ramírez, *Manual de Diseño Sistema Constructivo JOISTEC*, 2.ª ed. Chile, 2015.
- [22] D. Samuelson y P. S. Green, «The SJI Composite Steel Joist Catalog First Edition 2007 for use by the Design Professional», p. 16, 2007.
- [23] NEC-15, «Norma Ecuatoriana de la Construcción». 2015.
- [24] Steel Joist Institute, «Standard Specification For CJ-Series Composite Steel Joists». 2015. [En línea]. Disponible en: <https://vimeo.com/114765602>
- [25] C. Rubio López, «Simulador de Vibraciones en Sistemas de Piso Formados por Joists y Joists Girders con Criterios de Aceptabilidad -Edición Única», may 2002, Accedido: 11 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/568056>
- [26] ANSI/AISC 360-16, «Specification for Structural Steel Buildings», p. 680, 2016.
- [27] S. Easterling, D. Gibbings, y T. Murray, «Strength of Shear Studs in Steel Deck on Composite Beams and Joists», 1993.
- [28] S. Yanez, D. Dinehart, y S. Santhanam, «Composite steel joist analysis using experimental stiffness factor from push-out tests», 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.04.001>.
- [29] A. Brattland y L. Kennedy, «Shrinkage and flexural tests of two full-scale composite trusses», 1986, doi: <https://doi.org/10.7939/R3ZC7RZ33>.
- [30] P. S. Green y M. Winarta, «SJI First Edition CJ-Series Standard Specifications for Composite Steel Joists, Weight Tables, Bridging Tables, and Code of Standard Practice — A Brief Overview», pp. 1-9, abr. 2012, doi: 10.1061/41016(314)44.

- [31] T. Murray, D. Allen, y E. Ungar, «Floor vibrations due to human activity», vol. Second Printing, p. 71, 2003.
- [32] NEC-SE-HM, «Estructuras de hormigón armado», 2015.
- [33] ASTM D790-10, «Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials». 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d0790-10.html>
- [34] F. Pfenniger, «Manual de Diseño para Arquitectos del Sistema Constructivo Joistec.», octubre de 2015. Accedido: 18 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.construccionenacero.com/content/manual-de-diseno-para-arquitectos-del-sistema-constructivo-joistec>
- [35] O. de B. López de Heredia, *Diseño de Estructuras de Acero Construcción Compuesta*, vol. I. México, 2004.
- [36] N. Null, «Proposed Specification and Commentary for Composite Joists and Composite Trusses», *J. Struct. Eng.*, vol. 122, n.º 4, pp. 350-358, abr. 1996, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:4(350).
- [37] J. Figueroa *et al.*, «Perfiles angulares estructurales de acero al carbono laminados en caliente, requisitos e inspección», *Primera*, vol. 1, p. 15, 2013.

5.4. ANEXOS

5.4.1. Informe de ensayo de compresión del hormigón

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍAS LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL		CCT FICM CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍAS Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica										
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE TESTIGOS CILÍNDRICOS DE CONCRETO NORMA ASTM C-39 / AASHTO T22												
OBRA O PROYECTO: Evaluación de estado límite por deflexión en losa con vigas compuestas tipo JOIST, fabricadas con acero ASTM A 36		ORDEN DE TRABAJO: CTT-FICM-2023-042										
LUGAR DEL PROYECTO: Ambato		NÚMERO DE MUESTRAS: 2										
CONTRATISTA: Ing. Miguel Allauca												
FISCALIZACIÓN: Ing. Jorge Cevallos												
FECHA DE EXPEDICIÓN: 3-mar-23												
ENSAYO DE ROTURAS DE PROBETAS DE CONCRETO												
PROBETA	DIÁMETRO (cm)	ALTURA (cm)	ÁREA (cm ²)	CARGA KN	CARGA Kg	ESFUERZO (Kg/cm ²)	FECHA DE:		DIAS	IDENTIFICACIÓN	ESPECIFICACIÓN (Kg/cm ²)	TIPO DE FALLA
N°							ELABORACIÓN	ENSAYO				
1	10,00	20,00	78,54	182,2	18221,237	232	14/2/2023	3/3/2023	17	Losa	210	6
2	10,00	20,00	78,54	189,3	18928,096	241	14/2/2023	3/3/2023	17	Losa	210	5
TIPOS DE FALLA												
1.- Conos bien formados en ambos extremos 2.- Conos bien formado en un extremo y grieta vertical 3.- Grietas de acollumado vertical en ambos extremos 4.- Fractura diagonal sin agrietarse a traves de extremos 5.- Fracturas laterales en la parte superiores o fondo 6.- Similar a tipo 5 pero el extremo es acentado												
OBSERVACIONES:												
NOTA Revisar resistencias para distintos días de edad 3 días (45% - 55%) de la resistencia especificada 7 días (65% - 75%) de la resistencia especificada 14 días (80% - 90%) de la resistencia especificada 21 días (90% - 100%) de la resistencia especificada												
La toma y entrega de muestras, fecha de elaboración, identificación y especificación son de estricta responsabilidad de la persona o entidad contratante.												
 Ing. Byron Lopez Sanchez TÉCNICO DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						 Ing. José Sánchez TÉCNICO DE LABORATORIO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						