



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Civil

**Desarrollo de software para el cálculo y diseño de estructuras
compuestas formadas por vigas en celosía y losas de hormigón.**

Trabajo previo a la obtención del grado académico de Ingeniero Civil

Marcela María Muñoz Peñafiel

Daniel Sebastián Solano Valdivieso

Director: Ing. Civil Vladimir Carrasco, M.Sc.

Cuenca-Ecuador

2026

Dedicatoria

“Soy como el junco que se dobla, pero luego se repone, me choqué contra una roca,
pero Dios me salvó...”

- Bolívar Peñafiel 2009

A Dios, por haberme acompañado todo este camino.

A mis papás, Gonzalo Ernesto y Delia María, por enseñarme que cualquier lugar es mi hogar si eran ellos quienes estaban detrás de la puerta esperando mi llegada con la comida caliente, los abrazos, la tertulia o la literatura... “su perrito ya es Ingeniera”.

A mi mami, María Eugenia, por ser la maravillosa mujer de quien recibí el nombre, llenó cada milímetro de nuestra casa de amor y libros dándome modelos como Jane Austen, Louisa May Alcott, cada página fue un nuevo norte y cada palabra me dio un camino... Mami al fin ya somos Ingenieras.

A mi papi, Hugo Marcelo, por el viaje de la vida y los viajes a Cuenca de mínimo tres idas diarias a la Universidad, treinta y tres kilómetros nunca fue una larga distancia incluso en los días que fueron seis veces. Por tanto, que no cabe en líneas.

A mi extranjero favorito, Gael Simon, por cruzar el mundo para escribir nuestra historia, demostrando que el amor no conoce fronteras ni entiende de idiomas, pero siempre encuentra la manera de unirnos.

A mis abuelitos del cielo, en especial a los que deberían estar: Teófilo, María Gerónima, Leonardo Olmedo, Carlos Alipio y Wilson Ramiro, de seguro están con permiso divino del cielo para verme,

A mis hermanos de corazón que mi vida académica me dio el placer de conocerlos, Andy Josué, Daniel Sebastián, Doménica Sofía, Gabriela Estefanía, Emilia Amelia, María Fernanda y Marcia Lizbeth, sin ustedes no hubiese sido lo mismo sentarse en la primera fila.

A mi amigo fiel, Mombito, por esperarme todos los días de tu vida cuando llegaba de la Universidad o al pie de mi cama, hasta los que no estuviste, te esperé. Seguro que aprendiste a resolver ecuaciones diferenciales, derivar e integrar por partes siempre serás mi compañero de vida.

- Marcela María Muñoz Peñafiel

“Mirar y comprender es el mejor don que nos ha dado la naturaleza”

- Albert Einstein

A mis padres, el Dr. Giovanni Solano y la Dra. Maribel Valdivieso por haberme dado la oportunidad de estudiar la carrera que realmente me apasiona y apoyarme cada vez que lo necesite durante estos 5 años, mi mayor meta es hacerlos sentir orgullosos. También por inspirar en mi la necesidad de cada día saber más y aprender algo nuevo.

A mi hermano, el Mgs. Andrés Solano por ser mi inspiración para seguir adelante en el ámbito académico, y también por ser el mejor compañero de vida que pude tener.

A mis cuatro abuelitos: Cesar Solano, Marcia Ortiz, Carlos Valdivieso y Carmela Espinoza cada uno de ellos están en la esencia de mis ideas, ellos formaron la calidad de persona y de ingeniero que soy.

A mis tíos y tías, en especial al Dr. Cesar Solano por incentivar el gusto por la búsqueda del conocimiento en mí.

- Daniel Sebastián Solano Valdivieso

Agradecimientos

A la Universidad del Azuay por devolverme la vida.

Mi más profundo agradecimiento al Ingeniero José Vázquez por rescatarme cuando creía que ya todo estaba perdido, ser mi padre académico y brindarme los impulsos y las fuerzas que necesitaba todos los días para seguir haciendo camino en mi andar.

A mis muy distinguidos y queridísimos directores del proyecto de titulación, Vladimir Carrasco y Fabián Carrasco por compartirme sus valiosos libros, y por todo lo que hacen por mí persona; porque sin él no hubiese sido posible lograr exitosamente este sueño. Gracias por la confianza.

A mi codirector, Esteban Cabrera por haberme ayudado a construir las alas que me hicieron volar y ayudarme en el despegue.

A uno de mis profesores que marcó profundamente mi vida universitaria, Diego Correa, por enseñarme el valor de la lealtad, confianza, valentía, y por convertirse en un pilar fundamental durante los últimos ciclos de mi formación académica.

A mis estimados profesores, Iván Mendoza, Josué Larriva, Pablo Ordóñez, Pablo Quinde, por confiar en mi paso, por acompañarme con sabiduría y fé cada tramo de este recorrido.

A mi camarada eterno, Bolívar Iván por ser mi ángel desde que ayudó a mi mamá a cuidarme en la termo cuna y por aquellos sábados de complicidad. Gracias por enseñarme que el amor también puede construirse, como una obra que perdura en el tiempo.

Mención especial a mi mamá que hace unos días me dijo ya estamos cerca, “Mami lo hicimos” gracias por acompañarme a clases y esperarme que saliera para que no me sienta sola. Siempre seremos ciudadanas de Cuenca.

A mi querido laboratorio de suelos que siempre fue mi segunda casa, a Bernardo Feijoo y William Lituma por haberme convertido este espacio en el lugar más especial e importante de mi vida universitaria, todos esos momentos libres que me iba a pasar con ellos resumiendo lo que aconteció esa semana en mi vida.

A mis tíos Milton Peñafiel y Wilson Peñafiel porque siempre serán el apoyo detrás de mí, un mensaje, una llamada fue fundamental.

A Paola Ortiz, por acompañarme en este camino y regalarme algunos de los momentos más memorables de mi vida universitaria.

A Daniel Solano por haber sido el mejor compañero de tesis y de banca porque los mejores años de mi vida los compartimos juntos, por las veces que parecía imposible avanzar con los trabajos o las pruebas, siempre fuimos la bomba.

A quienes estuvieron acompañándome todo este largo camino, Andrés, Lucía, Bertha Lucía, Blanca Rocío y Daniela.

- Marcela María Muñoz Peñafiel

A mis padres y hermano por impulsarme a seguir adelante y aconsejarme en cada una de las etapas de la vida universitaria.

Al estimado ingeniero José Vázquez por hacerme sentir en casa cada vez que iba a las aulas de clases.

A los queridos directores el ingeniero Vladimir Carrasco y el ingeniero Fabian Carrasco por la oportunidad y la confianza que nos dieron para realizar este trabajo de titulación.

A nuestro codirector el ingeniero Esteban Cabrera el codirector que con su experiencia y sabiduría nos motivó en la ejecución de este trabajo.

A todos los apreciados profesores que me formaron en mi vida académica, en especial a Juan Carlos Malo, Iván Mendoza, Pablo Quinde y Josué Larriva, por hacer que me interesaran profundamente cada una de las áreas de la ingeniería que impartieron en clases.

A Marcela Muñoz por haber sido la mejor compañera con la que compartí este trabajo, siempre se nos ocurrió algo ingenioso para solucionar cada problema que nos encontramos en el camino ¡bomba!.

A todos mis amigos que me acompañaron en este maravilloso viaje académico.

- Daniel Sebastián Solano Valdivieso

Resumen

Este trabajo de titulación tiene como objetivo determinar la resistencia última de estructuras compuestas conformadas por vigas en celosía de acero y losas de hormigón, mediante el desarrollo de un código computacional orientado a la optimización del diseño estructural. Para ello, se llevó a cabo una revisión teórica de los métodos de análisis de sistemas compuestos, resaltando la interacción entre ambos materiales y la función de los elementos de conexión en su comportamiento conjunto. Con base en esta fundamentación, se realizó la modelación computacional del sistema, incorporando parámetros geométricos, propiedades mecánicas y condiciones de carga. De manera complementaria, se construyó un modelo físico para la ejecución de ensayos experimentales, en los cuales se registraron las cargas aplicadas y las deformaciones, permitiendo comparar los resultados teóricos con el comportamiento real de la estructura. El análisis permitió identificar la verificación de la esbeltez, tanto local como global, la que resulta esencial para evaluar la estabilidad del sistema estructural. Finalmente, la metodología propuesta integra estos aspectos junto con las condiciones de carga y la acción compuesta de los materiales, facilitando modelar una losa de hormigón fundida a una viga en celosía tratando como un solo elemento, lo que mejora la precisión en la estimación de la resistencia última y contribuye a un diseño más eficiente.

Palabras clave: Resistencia última, esbeltez, viga en celosía, losa, código computacional.

Abstract

This research aims to determine the ultimate strength of composite structures composed of steel truss beams and concrete slabs through the development of a computational tool for structural design optimization. To achieve this, we conducted a theoretical review of composite system analysis methods, emphasizing the interaction between materials and the role of connection elements in ensuring composite behavior. Based on this framework, a computational model was developed incorporating geometric characteristics, material properties, and loading conditions. In parallel, a physical model was built and tested experimentally, where loads and deformations were measured to compare theoretical predictions with the actual structural response. The results highlight the importance of both local and global slenderness verification in assessing structural stability. Finally, the proposed methodology integrates these considerations with load conditions and composite action, allowing the system—comprising a concrete slab cast over a truss beam—to be modeled as a single structural element. This approach improves the accuracy of ultimate strength predictions and supports more efficient structural design.

Keywords: Ultimate strength, slenderness, truss, slab, computational code.

Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iv
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice de contenidos	ix
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xv
Introducción	xvi
Problemática y Justificación	xviii
Objetivos	xx
1. Capítulo 1: Marco Teórico	1
1.1 Hormigón	1
1.1.1. Alta resistencia	1
1.1.2. Componentes del hormigón	3
1.1.3. Cemento	3
1.1.4. Agregado grueso	4
1.1.5. Agregado fino	6
1.1.6. Aditivo	7
1.1.7. Etapas del hormigón	7
1.1.8. Hormigón en estado fresco	7
1.1.9. Hormigón durante el fraguado	9
1.1.10. Hormigón durante el curado	10
1.1.11. Hormigón endurecido	11
1.1.12. Resistencia a la compresión	11
1.1.13. Resistencia a la Tracción y módulo de ruptura	12
1.1.14. Módulo de elasticidad	12

1.1.15.	Densidad y porosidad _____	13
1.1.16.	Permeabilidad _____	13
1.1.17.	Resistencia a la abrasión _____	13
1.1.18.	Retracción y fluencia _____	14
1.1.19.	Conductividad térmica _____	14
1.1.20.	Durabilidad _____	14
1.2	Acero Estructural _____	14
1.2.1.	Resistencia a la tracción _____	14
1.2.2.	Ductilidad _____	15
1.2.3.	Sistema estructural _____	17
1.3	Estructuras Compuestas _____	18
1.3.1.	Ventajas _____	18
1.3.2.	Mecanismo de transferencia _____	19
1.3.3.	Usos de la construcción compuesta _____	19
1.3.4.	Tipo de construcción compuesta _____	21
1.3.5.	Estado límite de las secciones compuestas _____	22
1.3.6.	Pérdida de acción compuesta entre acero y hormigón _____	23
2.	Capítulo 2: Diseño de Estructuras Compuestas _____	25
2.1.	Diseño viga en celosía _____	25
2.1.1.	Elemento barra _____	26
2.1.2.	Matriz de rigidez elemento barra _____	27
2.1.3.	Resistencia última elemento barra _____	28
2.2.	Diseño elementos compuestos _____	32
2.2.1.	Elemento tipo viga _____	33
2.2.2.	Matriz de rigidez elemento barra _____	34
2.2.3.	Resistencia última elemento viga _____	35
2.2.4.	Grados de libertad _____	37

2.2.5.	Matriz efectiva _____	37
2.2.6.	Fuerzas locales _____	37
2.2.7.	Varilla de unión _____	37
3.	Capítulo 3: Desarrollo del código computacional _____	40
3.1.	Algoritmo del código _____	40
3.1.1.	Entrada de datos _____	41
3.1.2.	Consideraciones constructivas _____	41
3.1.3.	Ensamblaje de la matriz _____	42
3.1.4.	Cálculo de las reacciones y fuerzas internas _____	42
3.1.5.	Grados de libertad _____	43
3.1.6.	Condiciones de frontera _____	43
3.1.7.	Desplazamientos _____	43
3.1.8.	Cargas _____	44
3.1.9.	Elemento más afectado _____	45
3.2.	Diagrama de flujo _____	46
3.3.	Resultados _____	48
4.	Capítulo 4: Diseño y construcción del modelo _____	49
4.1.	Ensamblaje _____	49
4.1.1.	Diseño del modelo _____	50
4.1.2.	Resistencia última del modelo _____	52
4.2.	Construcción del modelo _____	53
4.2.1.	Armado de la viga en celosía _____	54
4.2.2.	Colocación de las varillas de unión _____	56
4.2.3.	Fundición de la losa _____	56
4.2.4.	Curado _____	59
4.2.5.	Ensayo cilindros de hormigón _____	60
4.3.	Recolección de datos _____	65

4.4.	Ensayo del modelo	66
4.4.1.	Primer ensayo	68
4.4.2.	Segundo ensayo	71
4.5.	Discusión	75
4.5.1.	Resistencia última del modelo vs. calculada mediante el software	76
4.5.2.	Curva Fuerza vs. Desplazamiento	76
	Conclusiones	79
	Recomendaciones	81
	Referencias	82
	Anexos	88
	Anexo A	88
	Anexo B	88
	Anexo C	89
	Anexo D	90
	Anexo E	91
	Anexo F	92
	Anexo G	93

Índice de figuras

Figura 1-1: Tiempo de curado en función de Temperatura (°C) VS Humedad (%)	10
Figura 1-2: Curva esfuerzo-deformación del acero	15
Figura 1-3: Celosía tipo Pratt	18
Figura 1-4: Modelo estructural	22
Figura 1-5: Falla por aplastamiento del hormigón	23
Figura 2-1: Numeración del modelo	26
Figura 2-2: Boceto del modelo real	38
Figura 3-1: Boceto prototipo 2	45
Figura 3-2: Diagrama de flujo del código	47
Figura 4-1: Detallado prototipo 2	49
Figura 4-2: Ensamblaje de la viga en celosía	50
Figura 4-3: Detallado de prototipo 1	51
Figura 4-4: Vista en sección modelo real	51
Figura 4-5: Vista 3d del modelo final.....	52
Figura 4-6: Resultados de diseño de la estructura compuesta	53
Figura 4-7: Vigas en celosía	54
Figura 4-8: Vista de perfil del modelo real.....	55
Figura 4-9: Armado del modelo	55
Figura 4-10: Varillas de unión del modelo	56
Figura 4-11: Preparación de losa	57
Figura 4-12: Vertido de hormigón.....	57
Figura 4-13: Enrasado de losa	58
Figura 4-14: Fundición de losa.....	59
Figura 4-15: Colocación de muestras	62
Figura 4-16: Cilindro de hormigón en prensa	62
Figura 4-17: Rotura en prensa hidráulica	63
Figura 4-18: Curva resistencia a la compresión del hormigón.....	64
Figura 4-19: Configuración para prueba en campo	65
Figura 4-20: Apoyos del modelo construido	66
Figura 4-21: Loseta modelo.....	67
Figura 4-22: Grúa de transporte.....	68
Figura 4-23: Ensayo 1 con la loseta 1	69

Figura 4-24: Ensayo 1 con la loseta 2	69
Figura 4-25: Ensayo 1 con la loseta 3	70
Figura 4-26: Ensayo 1 con la loseta 4	70
Figura 4-27: Ensayo 1 con la loseta 4 más 1 bloque de hormigón.....	71
Figura 4-28: Ensayo 2 con la loseta 1	72
Figura 4-29: Ensayo 2 con la loseta 2	72
Figura 4-30: Ensayo 2 con la loseta 3	73
Figura 4-31: Ensayo 2 con la loseta 4	73
Figura 4-32: Ensayo 2 con la loseta 4 más 1 bloque de hormigón.....	74
Figura 4-33: Deformación de la estructura en el ensayo 2	75
Figura 4-34: Curva fuerza vs desplazamiento ensayo 1	76
Figura 4-35: Curva fuerza vs desplazamiento ensayo 2	77

Índice de tablas

Tabla 2-1: Esbeltez elementos sometidos a compresión	28
Tabla 2-2: Coeficientes para elementos esbeltos.....	30
Tabla 2-3: Esbeltez elementos sometidos a flexión.....	35
Tabla 4-1: Resistencia a compresión f_c de las muestras.....	61

Introducción

En el Ecuador, una gestión empresarial eficiente y estructurada influye de manera significativa en los procesos de innovación desarrollados dentro de las sociedades por acciones pertenecientes al campo de la construcción (Holguín et al., 2025), lo que significa que el crecimiento del sector inmobiliario actúa como un motor de desarrollo para las profesiones vinculadas directamente con la ejecución de obras civiles, tales como la ingeniería civil, la arquitectura, la topografía y la construcción.

Actualmente, el sector de la construcción aporta aproximadamente el 10% al Producto Interno Bruto del Ecuador, posicionándose como una de las actividades económicas más relevantes y con mayor incidencia en el desarrollo productivo del país (Díaz-Kovalenko et al., 2023).

Con fundamento en los registros locales de la ciudad de Cuenca, la adquisición de permisos de construcción y otros indicadores sectoriales, se estima que la actividad inmobiliaria experimentó un incremento aproximado del 18% durante el año 2024 (Primicias, 2024). Esto evidencia la necesidad de optimizar los procesos constructivos, tanto en términos de planificación como de ejecución.

Los materiales de construcción sostenibles constituyen una opción técnica relevante a considerar en los procesos de edificación, tanto para viviendas como para otro tipo de edificaciones, con el fin de optimizar los recursos durante el ciclo de vida de la obra (Sornoza-Tituano et al., 2022).

Las estructuras mixtas de acero y hormigón presentan una elevada capacidad portante, una alta rigidez estructural y un comportamiento dúctil favorable frente a sollicitaciones dinámicas intensas, constituyéndose como una alternativa económica y técnicamente eficiente para el desarrollo de edificaciones y obras de ingeniería (Elchalakani et al., 2021).

La principal eficiencia estructural del sistema radica en la interacción entre el acero y el hormigón, permitiendo optimizar el aprovechamiento de las propiedades mecánicas específicas de cada material para maximizar el desempeño global de la estructura

La implementación del sistema constructivo de estructuras de acero permite alcanzar mejoras sustanciales en sostenibilidad ambiental, optimización de los procesos

constructivos y desempeño estructural, constituyéndose en una alternativa eficiente que favorece el desarrollo de edificaciones seguras y sostenibles (Baque Galarraga et al., 2024)

La incorporación de un software especializado en ingeniería estructural ha transformado significativamente los procesos de cálculo, permitiendo optimizar en el diseño mediante simulaciones precisas, análisis automatizados y verificación normativa integrada. Estas herramientas contribuyen a reducir los márgenes de error humano, mejorar la eficiencia en la toma de decisiones estructurales y acelerar los tiempos de respuesta en proyectos complejos. De acuerdo con la revisión de Alvarado Acuña et al. (2023), el uso de plataformas digitales para el análisis estructural ha demostrado ser clave en la mejora del desempeño técnico y económico de las obras civiles, al facilitar la evaluación de múltiples escenarios y la selección de soluciones estructurales más eficientes.

Si bien existen diversos programas de uso general para el análisis y diseño estructural, orientados a una amplia gama de tipologías constructivas, en el presente trabajo de titulación se propone el desarrollo de un software específico para el cálculo estructural de sistemas compuestos por losas de hormigón y vigas en celosía. Esta herramienta busca responder a las particularidades mecánicas y geométricas de este tipo de estructuras, optimizando los procesos de verificación y dimensionamiento mediante algoritmos adaptados a su comportamiento estructural en conjunto, con el objetivo de eficiencia técnica para su aplicación en edificaciones e infraestructura.

Problemática y Justificación

En la actualidad, el sector inmobiliario se encuentra en constante crecimiento, involucrando a profesiones afines al ámbito de la construcción, el diseño, y otras actividades relacionadas, que se ven obligadas a ejecutar propuestas con diferentes alternativas aplicadas a la ingeniería estructural para disminuir tiempos de obra y optimizar recursos, buscando la manera de que económicamente pueda ser accesible para toda la sociedad y reducir el impacto ambiental.

La ciudad de Cuenca, se proyectaba con edificaciones de hormigón armado, que al momento son considerados como un generador de una gran cantidad de desperdicios, estructuras difíciles de desmontar, e incluso que requieren una mayor cantidad de mano de obra; por lo tanto, se ha dirigido la mirada hacia una opción que incluya estructuras combinadas de acero y hormigón de manera que permitirá reducir el tiempo de obra y estandarizar la construcción. Por ello, este tipo de estructuras representan una respuesta que mejorará la gestión de la infraestructura garantizando su desempeño.

Esta zona caracterizada por una alta actividad sísmica, por esta razón, el uso del acero en la construcción resulta especialmente útil, porque permite diseñar edificaciones sismorresistentes de manera eficaz. Además, el acero posee una notable capacidad para disipar energía contribuyendo a la seguridad estructural ante un posible sismo de gran magnitud. En relación al ámbito económico, la utilización de perfiles comerciales disminuye de manera significativa la generación de restos; y, en referencia al peso propio de las edificaciones se tiene un comportamiento estructural más estable que mejora los tiempos de cálculo, la eficiencia constructiva y la capacidad de los elementos estructurales frente a los sismos.

Por tanto, se impulsa el concepto de construir elementos compuestos fusionando las propiedades de cada material, para beneficiar su diseño con el aprovechamiento de la resistencia del acero a la tracción y la del hormigón a la compresión, empleando los diversos softwares de análisis estructural disponibles para las obras civiles, con resultados globales de esfuerzos, deformaciones, derivas de entrepiso y demás parámetros estructurales. En consecuencia, a pesar de la gran utilidad que ofrecen, se evidencia la necesidad de herramientas más definidas de automatización de procesos del diseño, la resistencia última de las vigas de acero, la determinación de los ángulos máximos permisibles en las configuraciones de celosía utilizadas en estas estructuras que

garanticen el adecuado comportamiento y desempeño durante su vida útil, la distribución de cargas, la eficiencia de los elementos y la estabilidad de la armadura en conjunto.

En este contexto, el presente trabajo de titulación propone desarrollar una solución práctica de programación en Python para obtener un software orientado a calcular la resistencia última de las vigas en celosía unidas a una losa de hormigón. Previamente se investiga y estudia en una revisión bibliográfica exhaustiva el cálculo de estructuras compuestas sus principios estructurales y el método de diseño. La elección de este lenguaje de programación se justifica por versatilidad, amplia disponibilidad de bibliotecas y facilidad de integración con interfaces gráficas; convirtiéndose en la herramienta más viable y efectiva en el diseño estructural con la ejecución de este programa. Entonces, este proyecto contribuye a optimizar el proceso de diseño estructural, reduciendo tiempos de cálculo, y potenciando el uso de metodologías computacionales aplicadas a la combinación de dos diferentes tipos de materiales en una misma estructura. Finalmente, para el análisis de los resultados se comparan los datos obtenidos por medio de la construcción de un modelo real a partir de los valores obtenidos con el programa.

Objetivos

En respuesta a la problemática planteada, se establecen los siguientes objetivos general:

- Determinar la resistencia última de las estructuras compuestas por vigas en celosía y losas de hormigón mediante la elaboración de un código computacional para la optimización del diseño estructural.

Para cumplir con lo anteriormente señalado, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Investigar y estudiar el cálculo de estructuras compuestas sus principios estructurales incluyendo el método de diseño.
- Elaborar el código computacional para el cálculo de la resistencia última de la estructura compuesta.
- Construir un modelo a partir del análisis de datos con el programa.
- Analizar la diferencia entre la resistencia última del modelo y la calculada mediante el software.
- Realizar la curva Fuerza vs. Desplazamiento del modelo físico para la comprobación de su resistencia y ductilidad.

1. Capítulo 1: Marco Teórico

Las combinaciones de elementos estructurales de distintos materiales para desempeñarse en obras civiles se prueban constantemente con diversos resultados y los más exitosos, incluso, se popularizan y se fortalecen con métodos constructivos específicos; así como, con herramientas de cálculo y diseño desarrolladas particularmente para analizar una combinación.

En este trabajo de titulación, se analiza la combinación conformada por vigas de acero en celosía y losas de hormigón, por lo que, para analizar el funcionamiento conjunto de ambos elementos, primero se describen las propiedades de resistencia del hormigón y del acero.

1.1 Hormigón

El hormigón es un material de construcción que presenta una elevada capacidad para resistir esfuerzos de compresión (León González, 2005), que lo convierte en un material ideal para soportar cargas verticales y conformar elementos estructurales como columnas, cimentaciones y losas. Este comportamiento se debe principalmente a que su composición es una mezcla de aglomerante, agua y partículas que aportan resistencia mecánica; el aglomerante que se utiliza prácticamente a nivel universal en el mundo de la construcción es el cemento Portland, que forma una pasta al mezclarse con el agua y se vuelve el cuerpo de la mezcla a la que luego se le adicionan los agregados fino y grueso que aportan resistencia mecánica.

Para endurecer, la pasta requiere un tiempo durante el que ocurren los procesos químicos y físicos necesarios para que el material adquiera resistencia y durabilidad, siempre que exista la hidratación apropiada. El proceso que se desarrolla en este tiempo es conocido como curado, que inicia con el hormigón en estado fresco y culmina con el hormigón endurecido.

1.1.1. Alta resistencia

En una alta resistencia inicialmente se debe establecer la dosis del aditivo para la mezcla de hormigón, el porcentaje de adición, relación agua/cemento, granulometría de los agregados finos y gruesos, lo cual constituye una base preliminar para ajustar las cantidades de los componentes, optimizar estos procesos para generar así un ahorro de tiempo y recursos materiales. Actualmente se investigan alternativas orientadas a

optimizar las propiedades de los materiales de construcción, específicamente el incremento de su resistencia a la compresión con el fin de mejorar su durabilidad y desempeño estructural.

El hormigón endurecido se caracteriza por ser capaz de soportar altas cargas por unidad de superficie. Si bien, todos los componentes son importantes para alcanzar tal resistencia a la compresión, ésta depende fundamentalmente de la relación agua/cemento de la mezcla: mientras menor sea la razón agua/cemento, mayor será la resistencia que alcanzará la mezcla al endurecer (ScienceDirect, 2017). Por su parte, los agregados de la mezcla deben cumplir con los umbrales de resistencia requeridos por normativa para cada tipo de agregado -fino o grueso- y deben estar presentes en una distribución apropiada de tamaños, conocida como granulometría.

Cada país tiene una normativa que dicta las propiedades de resistencia que deben cumplir los agregados utilizados en hormigones. En Ecuador, esta normativa se compone del conjunto de normas técnicas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), sin embargo, la normativa utilizada por excelencia es la del Instituto Americano del Concreto, conocida como ACI por sus siglas en inglés.

La mezcla de agua, cemento y agregados, una vez fundida, irá incrementando su resistencia a medida que endurece; como medida de control, se mide la resistencia a los 7, 14 y 28 días de iniciado el curado, con la prueba de cilindros de la mezcla de hormigón ensayados a compresión axial. El tiempo en que se espera que la mezcla alcance su resistencia de diseño es a los 28 días, sin embargo, si se agrega un aditivo acelerante, tanto el fraguado como el endurecimiento se desarrollarán en menos tiempo y, como resultado, la resistencia de diseño se alcanzará en mucho menos tiempo, dependiendo del tipo y la dosis de aditivo.

La resistencia a la compresión que puede llegar a desarrollar un hormigón, utilizando el diseño del (ACI 225, 2019), es:

- $200\text{--}350 \text{ kg/cm}^2$ (aprox. 20–35 MPa), para hormigón normal de uso general.
- $400\text{--}500 \text{ kg/cm}^2$ (aprox. 40–50 MPa), para hormigón estructural resistente.
- $600\text{--}1000 \text{ kg/cm}^2$ (60–100 MPa), para hormigón de alta resistencia (con aditivos especiales y control riguroso de curado).

Tanto en la mezcla como en el curado, el agua no puede contener partículas corrosivas o sales que generen reacciones adversas con el cemento y luego con el acero de refuerzo, por lo que no se puede utilizar agua de mar o similares, ni agua con materia orgánica porque reduce la resistencia.

1.1.2. Componentes del hormigón

Cuando se analiza el hormigón en las estructuras, se lo hace asumiendo al material como homogéneo, con propiedades mecánicas uniformes, con valores únicos de resistencia y módulo de elasticidad. Sin embargo, no se puede perder de vista que el hormigón es un material heterogéneo, compuesto por una matriz continua que rodea a los agregados presentes en función de una granulometría de diseño. Esta composición está estrechamente asociada a la fisuración que se origina en las interfaces pasta – agregado, visibles a una escala más fina de observación, en la que se puede apreciar que la matriz no es absolutamente continua, sino que presenta un volumen de porosidades en la pasta en la que se puede identificar los componentes: silicatos de calcio hidratados, los hidróxidos de calcio y partículas de cemento anhidro.

Pasta y agregados tienen propiedades físicas y mecánicas distintas y no permanecen uniformes durante la mezcla y el curado (García, 2021), a pesar de que una vez endurecido se asumen como un solo material.

Cemento, agua, agregado fino y agregado grueso se dosifican en masa o volumen, según el método de diseño que se esté utilizando, mas, es común que su interacción en la mezcla se vea modificada por aditivos que, generalmente, aceleran el tiempo de fraguado y endurecimiento con el fin de reducir el tiempo de construcción.

1.1.3. Cemento

El cemento es el material que da cohesión, resistencia y durabilidad al hormigón. Cuando se mezcla con agua, inicia la hidratación y se producen una serie de reacciones químicas y la pasta aglomerante (ACI 225, 2019).

Durante el estado fresco, la pasta de cemento proporciona trabajabilidad, permitiendo colocar y compactar la mezcla adecuadamente. Normas como ASTM C150 regulan las características químicas y físicas de los cementos Portland, garantizando que posean finura, composición y calor de hidratación adecuados para su desempeño. La calidad del cemento influye directamente en la velocidad de fraguado, control de

retracción y desarrollo de la resistencia durante el curado, parámetros que se detallan en la norma ACI 211.1-91 (2009)

La interacción entre cemento, agua y agregados determina la microestructura del hormigón, un contenido excesivo de agua provoca mayor porosidad y menor resistencia, mientras que una relación agua/cemento controlado garantiza un material más denso y duradero. El cemento, por tanto, no solo une los componentes, sino que define el desempeño mecánico, la durabilidad y la vida útil de la estructura.

El agua utilizada para fabricar el hormigón y para el curado se insiste que no puede, por ningún motivo, contener materia orgánica ni sales que obstaculicen las reacciones químicas generadoras de los cristales y el gel de resistencia, además, su presencia estará controlada por la relación agua/cemento del diseño y por el control permanente durante el curado. En la norma ecuatoriana, el agua apropiada para utilizarse en mezclas para hormigón se describe en la INEN 2617, 2012).

1.1.4. Agregado grueso

El agregado representa entre el 40 y el 50% del volumen total de la mezcla, por lo que sus propiedades influyen decisivamente en el comportamiento mecánico y en la durabilidad del material. De acuerdo con el ACI 318 (2019), el agregado grueso aporta resistencia, estabilidad volumétrica, rigidez y economía, actuando como un esqueleto interno que reduce la demanda de pasta de cemento y mejora el desempeño estructural del hormigón.

Uno de los aportes esenciales del agregado grueso es su contribución al módulo elástico y a la resistencia a la compresión. Cuando las partículas poseen una elevada resistencia intrínseca, baja absorción y granulometría adecuada, permiten que el hormigón alcance resistencias superiores y presente menor deformación ante cargas. Las normas ASTM C33 (2018) y INEN 872 (2011) establecen los requisitos para los agregados destinados a hormigón estructural, específicamente, condiciones de limpieza, forma, granulometría y densidad que deben tener las partículas y el porcentaje tolerable de partículas perjudiciales para la adherencia y compactación de la mezcla.

La forma y textura superficial de los agregados gruesos también influyen en la trabajabilidad. Los agregados angulares o con superficies rugosas mejoran la adherencia pasta-agregado, aunque reducen la fluidez del hormigón. En cambio, los agregados más

redondeados mejoran la trabajabilidad, pero pueden disminuir ligeramente la resistencia mecánica. Esto es considerado en el diseño de mezcla establecido por (ACI 211, 1991), donde el volumen relativo del agregado grueso depende del tamaño máximo nominal y del módulo de finura del agregado fino.

El control de calidad del agregado grueso se realiza mediante una serie de ensayos normalizados. La granulometría y el tamaño máximo se determinan por tamizado conforme a ASTM C136 (2019), mientras que la densidad y absorción se evalúan según ASTM C127 (2015), parámetros que permiten ajustar el agua efectiva en la mezcla. La resistencia del agregado a la fragmentación se mide mediante el ensayo de abrasión Los Ángeles (ASTM C131, 2020) y la presencia de material nocivo se controla con ensayos como ASTM C142 (2017) (carbones y lignito) o ASTM C40 (2020) (impurezas orgánicas). Estos ensayos garantizan que el agregado grueso no comprometa la durabilidad del hormigón, especialmente en condiciones ambientales agresivas tales como fuertes lluvias, actividad sísmica.

En el hormigón endurecido, el agregado grueso participa en la transmisión de esfuerzos y contribuye a la limitación de la deformación, siendo indispensable para lograr hormigones estructurales de mediana y alta resistencia.

El ACI 318 (2019) establece que la calidad del agregado es un factor crítico para el cumplimiento de la resistencia a compresión especificada ($f'c$) y para la durabilidad en exposición a ciclos de humedad, sulfatos o congelamiento. Por ello, el agregado grueso debe seleccionarse considerando no solo su resistencia, sino su compatibilidad petrográfica, controlada mediante (ASTM C295, 2019).

En síntesis, el agregado grueso desempeña un papel estructural importante por su tamaño, forma, calidad mineralógica y propiedades físicas que determinan la trabajabilidad de la mezcla, la resistencia, la rigidez y la durabilidad del elemento construido. Las normativas ACI, ASTM e INEN proporcionan los criterios y ensayos necesarios para garantizar que los agregados cumplan con los estándares exigidos para la construcción moderna. A continuación, se enlistan los principales ensayos INEN sobre agregado grueso para hormigones:

- INEN 872 – Agregados para hormigón. Requisitos (para finos y gruesos).
- INEN 872-1 – Determinación de granulometría.

- INEN 872-2 – Peso específico y absorción del agregado grueso.
- INEN 872-3 – Ensayo de Desgaste Los Ángeles.
- INEN 872-5 – Terrones de arcilla y partículas deletéreas.
- INEN 872-7 – Partículas alargadas y planas.
- INEN 872-8 – Humedad superficial del agregado.

1.1.5. Agregado fino

Es el material granular compuesto por partículas cuyo tamaño pasa predominantemente el tamiz de 4.75 mm, según establecen las normas ASTM C33 (2018) e INEN 872 (2011). Aunque su función suele ser menos destacada que la del cemento o el agregado grueso, su presencia es esencial para garantizar la cohesión, la trabajabilidad y la resistencia final del hormigón e influye directamente en su comportamiento tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Una de las contribuciones principales del agregado fino es la trabajabilidad de la mezcla. De acuerdo con ACI 211 (1991), el agregado fino actúa como un lubricante interno que facilita la colocación, disminuye la segregación y evita la exudación excesiva. La proporción adecuada de agregado fino permite rellenar los vacíos entre las partículas gruesas, proporcionando una matriz más uniforme y manejable. Igualmente, la granulometría del agregado fino es un parámetro clave; la ASTM C136 (2019), que regula los métodos de análisis por tamices, establece la importancia de controlar la distribución de tamaños para optimizar la compacidad de la mezcla y reducir el contenido necesario de pasta cementante.

Desde la perspectiva del desempeño mecánico, el agregado fino influye en la resistencia a la compresión y durabilidad, la distribución granulométrica continua contribuye a la disminución de porosidad y, por lo tanto, a un hormigón más denso y resistente. La norma ASTM C128 (2022) que establece los métodos de determinación del peso específico y absorción del agregado fino, señala que estas propiedades inciden en la demanda de agua de la mezcla. Un agregado con alta absorción puede afectar la relación agua/cemento, comprometiendo la resistencia y la durabilidad. En el contexto ecuatoriano, la INEN 872-1 (2011) y la INEN 872-2 (2011) complementan estos requisitos asegurando que los agregados usados en obras cumplan valores aceptables de humedad, finura y peso específico.

El agregado fino también influye en la durabilidad del hormigón, por la susceptibilidad a contener materiales deletéreos, como arcillas, materia orgánica o sulfatos, puede generar expansiones, pérdida de adherencia y baja resistencia mecánica. La ASTM C142 (2017) regula la presencia de terrones de arcilla y partículas friables, mientras que la ASTM C40 (2020) establece procedimientos para detectar materia orgánica. La normativa ecuatoriana INEN 872-5 (2011) refuerza estos controles para prevenir fallas prematuras en estructuras.

En conjunto, la selección apropiada del agregado fino, su caracterización mediante ensayos estandarizados y su adecuada proporción en la mezcla son factores determinantes en la calidad del hormigón; el papel que desempeña, no solo es rellenar espacios, sino aportar cohesión, estabilidad, densidad y resistencia. Cumplir con las normas (ASTM C33, 2018) y INEN 872 (2011) garantiza que el agregado fino satisfaga los requisitos físicos, químicos y granulométricos necesarios para producir hormigones económicos, más durables, seguros y eficientes.

1.1.6. Aditivo

El aditivo es un acelerante en el fraguado, conjuntamente con la dosificación adecuada, permite reducir el tiempo de endurecimiento de la mezcla sin afectar negativamente la resistencia mecánica que se debe alcanzar a largo plazo (Giménez Carbó et al., 2018). Esto permite que adquiera altas resistencias en un periodo menor y efectiviza los procesos constructivos.

1.1.7. Etapas del hormigón

La mezcla de los componentes del hormigón atraviesa tres etapas hasta alcanzar su estado endurecido: el estado fresco, el fraguado y el curado.

1.1.8. Hormigón en estado fresco

El estado fresco del hormigón va desde el momento que entran en contacto el agua y el cemento hasta el momento en que el hormigón inicia el fraguado inicial, que implica el fin de la trabajabilidad. En estado fresco, el hormigón se puede colocar, compactar, nivelar y trabajar, por eso, es en este momento en que se evalúa la trabajabilidad entendida como la facilidad de colocación en obra, que se asocia directamente con su posterior deformación bajo la aplicación de esfuerzos, resistencia a la rotura interna, disminución del asentamiento, el momento en que se inicia y culmina el fraguado, la posible exudación

y el riesgo de segregación, además de aspectos prácticos relacionados con el proceso de llenado y la presión ejercida sobre los encofrados

El comportamiento del hormigón en estado fresco es determinante de las características que tendrá una vez endurecido, por lo tanto, de la resistencia, por eso, es fundamental obtener características adecuadas de trabajabilidad en estado fresco y con eso garantizar su buen desempeño estructural posteriormente.

La característica principal en este estado es la uniformidad, entendida como el nivel de homogeneidad de la mezcla, qué tan constante y equilibrada es la mezcla. La uniformidad apropiada garantiza que la colocación y compactación deseadas se puedan lograr en obra. La uniformidad es afectada por la segregación, que es la separación de los componentes de la mezcla de manera que la distribución de las partículas deja de ser uniforme.

La diferencia de tamaño y densidad son la causa principal de la segregación, que es la causante que en la estructura se produzcan zonas de muy baja resistencia en comparación de otras en el mismo elemento, produciendo una disminución en la seguridad de la estructura y la vida útil.

Una forma particular de segregación es la exudación, donde el agua tiende a ascender hacia la superficie del hormigón recién colocado, por ser el componente de menor densidad en la mezcla. Como consecuencia, la parte superior del hormigón tiene una mayor relación agua/cemento y en el cuerpo del hormigón se quedan porosidades orientadas en la misma dirección de ascenso del agua, que aumenta la permeabilidad y facilita el ataque de agentes que deterioran el cuerpo del hormigón.

En este estado, la trabajabilidad es el indicador fundamental de la cantidad de trabajo que se requerirá para producir una compactación completa de la mezcla de hormigón y se mide a través del ensayo de asentamiento conocido como el “Ensayo del cono de Abrams”, detallado en la norma ASTM C143 (2020).

La mezcla uniforme se coloca directamente en su posición o encofrado definitivo y se somete a vibración hasta cuando dejan de aparecer burbujas de aire en la superficie e inicia el fraguado.

1.1.9. Hormigón durante el fraguado

El fraguado es la etapa entre el hormigón fresco y el curado. Inicia cuando el hormigón deja de ser trabajable, es decir, cuando ya no se puede vibrar ni colocar con facilidad y avanza con un endurecimiento que hace que el hormigón pierda su consistencia plástica, hasta adquirir una resistencia inicial.

Se mide con el ensayo del conocido como “aparato de Vicat”, detallado en la norma ASTM C191 (2021), que también se utiliza para efectuar el control de calidad en obra y para medir la influencia de los aditivos utilizados en una mezcla.

De manera general, el fraguado del hormigón se divide en inicio de fraguado y fin de fraguado, términos que reflejan el desarrollo progresivo de la rigidez. Según la ASTM C191 (2021), el inicio de fraguado corresponde al momento en que la pasta de cemento reduce significativamente su penetrabilidad, indicando que la mezcla abandona su estado completamente plástico. El fin de fraguado marca el punto en el que la pasta adquiere suficiente rigidez para considerarse endurecida. En la normativa ecuatoriana, la INEN-ISO 9597 (2012) adopta procedimientos equivalentes para determinar los tiempos de fraguado mediante el aparato de Vicat.

Desde el punto de vista microestructural, el fraguado está vinculado a la formación inicial de productos de hidratación, entre ellos el gel C-S-H (silicato cálcico hidratado) y el hidróxido de calcio, los cuales comienzan a generar una red cohesiva entre las partículas de cemento. Este proceso es influenciado por la temperatura, la finura del cemento, la proporción agua/cemento, la presencia de aditivos y las propiedades de los agregados. Tal como señala el (ACI 116, 2019), el fraguado no debe confundirse con el endurecimiento propiamente dicho, porque el primero corresponde a la pérdida de plasticidad, mientras que el segundo implica el desarrollo de resistencia mecánica a través del avance continuo de la hidratación.

El control adecuado del fraguado tiene implicaciones directas en la constructibilidad y durabilidad del hormigón. Un fraguado demasiado rápido puede dificultar la colocación y el acabado superficial, producir juntas frías entre capas sucesivas y generar mayor riesgo de fisuras por contracción plástica. Por el contrario, un fraguado excesivamente lento puede retrasar el proceso constructivo, aumentar la vulnerabilidad a daños en las primeras horas y afectar el curado inicial. El ACI 302.1R

(2015), recomienda, por tanto, prever el comportamiento del fraguado según las condiciones ambientales y el uso de aditivos acelerantes o retardantes.

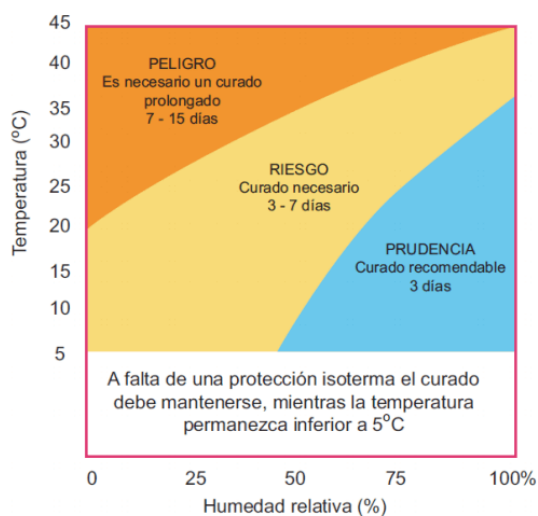
Para garantizar que el fraguado ocurra en condiciones adecuadas, es indispensable mantener la humedad y la temperatura del hormigón dentro de rangos controlados. En esta etapa temprana, el material es altamente susceptible a la evaporación rápida del agua, fenómeno que puede generar fisuración prematura. El ACI 308 (2019) establece que el curado debe comenzar inmediatamente después del fin de fraguado, lo cual pone de manifiesto la estrecha relación entre ambos procesos.

El fraguado no es solamente un indicador de tiempo, sino un fenómeno complejo que influye en todas las propiedades posteriores del hormigón.

1.1.10. Hormigón durante el curado

El curado es la etapa en la que el hormigón adquiere progresivamente la resistencia y las propiedades mecánicas de diseño, conservando la humedad y temperatura adecuadas para que la hidratación sea capaz de generar los cristales y geles responsables de la resistencia mecánica que se prueba en un período de 28 días. Se puede inferir que, el tiempo de curado puede estimarse en términos de temperatura VS humedad, como se aprecia en la Figura 1-1. En ambientes con temperaturas bajas e hidratación insuficiente, el tiempo de curado suele prolongarse y se extiende aún más si la temperatura aumenta, pero no la humedad; en esas condiciones, el desarrollo del gel de resistencia requiere más días para que la mezcla alcance su valor de diseño (WOTAchem, 2025).

Figura 1-1: Tiempo de curado en función de Temperatura (°C) VS Humedad (%)



Fuente: Yura (2025)

De acuerdo con la norma INEN 0694 (2013): “el curado es la acción que se adopta para mantener las condiciones de humedad y temperatura en una mezcla cementante recién colocada, permitiendo la hidratación del cemento hidráulico y las reacciones puzolánicas que se produzcan, de manera que puedan desarrollarse las propiedades potenciales de la mezcla”.

En esta fase de endurecimiento, la hidratación forma el principal elemento responsable del desarrollo de la mayor parte de la resistencia mecánica: el gel C-S-H (silicato de calcio hidratado).

El (ACI 318, 2019) indica que la resistencia característica del hormigón depende de la adecuada hidratación del cemento, que solo puede lograrse mediante un curado apropiado, especialmente en las horas tempranas. Si la hidratación no es adecuada, se producirá una retracción plástica, especialmente notoria en elementos con alta relación superficie/volumen, como las losas; esta retracción se visibilizará en las fisuras por retracción. Para las losas, la práctica ideal para asegurar un buen curado es la inundación o la aplicación de membranas de curado.

1.1.11. Hormigón endurecido

El hormigón endurecido es una mezcla que ha terminado el fraguado y el curado, considerando al curado como el endurecimiento hasta que esta mezcla alcanza la resistencia de diseño, porque el endurecimiento continúa durante meses e incluso años. De acuerdo con la terminología establecida por el ACI 116 (2019), el hormigón endurecido corresponde al estado en el que el material ya ha perdido completamente la plasticidad y tiene un comportamiento mecánico casi en su totalidad.

Entonces, el hormigón endurecido es un material capaz de cumplir el papel de soporte de carga y desempeñarse estructuralmente con una resistencia que desarrolla hasta los 28 días, de acuerdo con el método (ACI 318, 2019); más, en todos los tipos de hormigón, sus propiedades obedecen a lo descrito a continuación.

1.1.12. Resistencia a la compresión

Es la propiedad más representativa del hormigón endurecido y es el parámetro de diseño estructural según (ACI 318, 2019). Depende de la relación agua/cemento, el grado

de compactación, el tipo de agregado, la calidad del curado y la finura del cemento. El ensayo más común para su determinación es el ASTM C39 (2021), donde se aplican cargas crecientes a cilindros normalizados hasta su falla. Esta propiedad define la capacidad del material para resistir esfuerzos de aplastamiento y es la referencia estándar para clasificar hormigones normales, de alta resistencia o especiales.

1.1.13. Resistencia a la Tracción y módulo de ruptura

Aunque el hormigón es fuerte a la compresión, su resistencia a la tracción es considerablemente menor (aproximadamente 8 a 12 % de la compresión). Este comportamiento frágil tiene implicaciones directas en fenómenos como fisuración, retracción y deflexiones.

La resistencia a tracción indirecta se evalúa mediante el ensayo de tracción por división (ASTM C496, 2017), mientras que el módulo de ruptura (ASTM C78, 2022) mide la capacidad del material para resistir flexión. Estas propiedades son críticas en elementos donde predominan esfuerzos de tracción, como losas, pavimentos y vigas sin refuerzo. En el caso del módulo de ruptura, según el ACI 318 (2019), el valor se puede expresar como

$$f_r = 0.62 \lambda \sqrt{f'_c}$$

donde:

f_r : módulo de ruptura

λ : factor que depende del peso de los agregados de la mezcla, de acuerdo con la

f'_c : resistencia de diseño del hormigón.

1.1.14. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del hormigón endurecido describe la relación entre esfuerzo y deformación dentro del rango elástico. De acuerdo con ASTM C469 (2022), esta propiedad está fuertemente influenciada por la rigidez del agregado grueso y, en menor medida, por la resistencia a la compresión. Por esta razón, el ACI 318 (2019) señala que el módulo de elasticidad del hormigón es sensible al módulo de elasticidad del agregado grueso y, por lo tanto, a su dosificación en el hormigón. Un módulo alto indica un material menos deformable. Es fundamental para evaluar deflexiones, comportamiento a largo plazo y vibraciones estructurales.

De acuerdo con el (ACI 318, 2019), el módulo de elasticidad se puede calcular a partir de la densidad del hormigón, por lo que diferirá dependiendo de los pesos y densidad de la pasta cementante y de los agregados en la mezcla. En términos de kg/m³, se tiene:

para densidades entre 1440 y 2560 Kg/m^3

$$E_c = densidad^{1.5} * 0.043 * \sqrt{f'_c}$$

donde:

E_c : módulo de elasticidad

f'_c : resistencia de diseño del hormigón.

1.1.15. Densidad y porosidad

La densidad del hormigón está estrechamente ligada a su porosidad, y ambas determinan propiedades como permeabilidad, resistencia y durabilidad. La porosidad resulta de espacios vacíos no ocupados por productos de hidratación o del aire atrapado durante la mezcla. El hormigón denso y con baja porosidad presenta mayor resistencia y menor susceptibilidad a agentes agresivos. Normas como (ASTM C642, 2021) permiten evaluar la absorción y la porosidad al agua.

1.1.16. Permeabilidad

La permeabilidad es una de las propiedades más importantes del hormigón endurecido para efectos de durabilidad, porque un material permeable permite el ingreso de agua, cloruros, sulfatos y otros agentes agresivos que pueden causar corrosión del acero de refuerzo y expansiones internas. La permeabilidad depende, en gran medida, de la relación agua/cemento, la continuidad de los poros y la calidad del curado inicial. El (ACI 201.2R-16, 2016) resalta su importancia en ambientes severos y propone estrategias de diseño para reducirla.

1.1.17. Resistencia a la abrasión

En pavimentos, pisos industriales y estructuras expuestas a desgaste mecánico, la resistencia a la abrasión es determinante. Esta propiedad se evalúa mediante métodos como (ASTM C944, 2019), y depende de la dureza del agregado y la calidad de la pasta cementante. Un hormigón con baja resistencia a la abrasión puede pulverizarse o deteriorarse rápidamente bajo cargas dinámicas o en condiciones de tránsito.

1.1.18. Retracción y fluencia

La retracción es la reducción volumétrica del hormigón al perder agua o terminar la hidratación. La fluencia, por su parte, es la deformación lenta y progresiva bajo carga sostenida. Ambas propiedades influyen en la durabilidad y desempeño estructural, especialmente en elementos de gran longitud o esbeltez. El ACI 209R (1992) presenta modelos para predecir estos comportamientos a lo largo del tiempo.

1.1.19. Conductividad térmica

El hormigón endurecido posee una conductividad térmica relativamente baja, lo que influye en su comportamiento ante variaciones de temperatura. Cambios bruscos pueden causar tensiones térmicas y fisuración. El (ACI 216R, 1989) aborda la relación entre propiedades térmicas y comportamiento al fuego.

1.1.20. Durabilidad

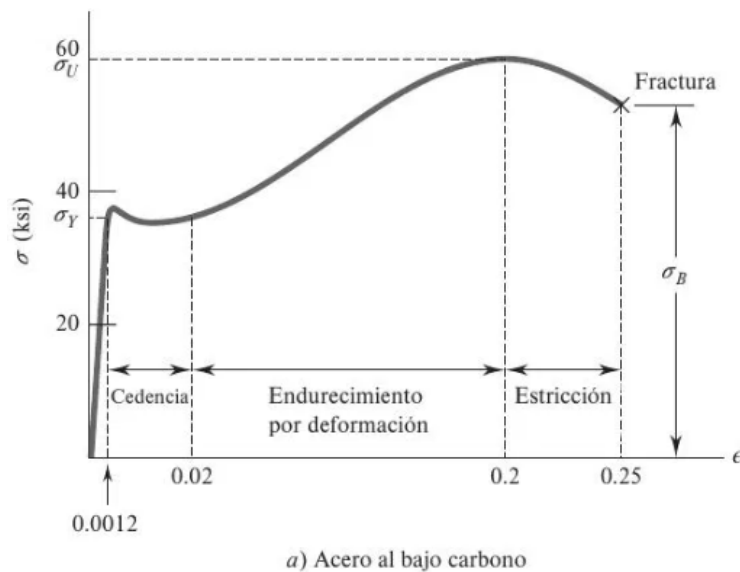
La durabilidad es la capacidad de la estructura para resistir condiciones ambientales sin deteriorarse significativamente durante su vida útil. Depende no solo de la resistencia a compresión sino también de propiedades como permeabilidad, absorción y resistencia química. Normas como ASTM C1202 (2022) (ensayo de penetración rápida de cloruros) y criterios del ACI 318 (2019) guían la selección de materiales y la proporción de mezcla para ambientes agresivos como zonas marinas, suelos sulfatados y exposiciones cíclicas de congelamiento y deshielo.

1.2 Acero Estructural

El acero es un material ferroso conformado por una aleación de hierro con bajo contenido de carbono, al que se incorporan elementos como manganeso, silicio, fósforo, azufre, níquel, cromo, cobre y titanio, con el objetivo de modificar su microestructura para mejorar sus propiedades mecánicas clave como la resistencia a la tracción, la dureza, la tenacidad y la soldabilidad, según los requerimientos estructurales en cada una de las obras civiles a usarse.(Roque-Villalonga & Camaraza-Medina, 2022). Teniendo como resultado un elemento eficaz en las edificaciones por sus favorables propiedades mecánicas de resistencia que beneficia a las condiciones de la edificación garantizando la seguridad y la preservación de la misma.

1.2.1. Resistencia a la tracción

Figura 1-2: Curva esfuerzo-deformación del acero



Fuente: Beer, et al. (2013)

Las aleaciones dúctiles, como el acero, presentan la capacidad de fluir. Para comprender este comportamiento, es necesario analizar la curva esfuerzo–deformación representada en la Figura 1-2. En la etapa inicial, la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante se describe mediante una línea recta, correspondiente al rango elástico, donde rige la proporcionalidad establecida por la Ley de Hooke.

Este comportamiento se mantiene hasta alcanzar un punto crítico denominado límite de fluencia, a partir del cual el material ingresa en el rango plástico. Posteriormente, se observa una disminución transitoria del esfuerzo, seguida de una fase de endurecimiento por deformación, y el material incrementa la resistencia conforme avanza la deformación. Este proceso culmina en su valor máximo conocido como esfuerzo último del acero. Superado este punto, el material experimenta una marcada estricción en la sección transversal, lo que conduce finalmente a la fractura (Beer, et al., 2013).

1.2.2. Ductilidad

La ductilidad del acero es la capacidad que tiene para deformarse significativamente antes de la rotura, permitiendo disipar energía, redistribuir esfuerzos y evitar fallas frágiles. Esta característica distingue al acero de otros materiales de construcción y lo convierte en un elemento clave de los sistemas estructurales de alta resiliencia. Comprender la ductilidad, los factores que la determinan y los métodos para evaluarla resulta esencial para garantizar el desempeño adecuado de estructuras metálicas y de hormigón armado.

Esta característica del acero se debe a la microestructura cristalina, la presencia de dislocaciones y su capacidad de desplazarse bajo cargas permite que el material exhiba deformaciones plásticas extensas antes de un colapso. La curva tensión–deformación del acero estructural, definida por ensayos de tracción como los especificados por ASTM A370 (2024), muestra claramente una zona elástica, seguida de un punto de fluencia, un tramo plástico y finalmente la fractura. La relación entre la deformación máxima y la deformación en el punto de fluencia constituye una medida estándar de ductilidad.

Normativamente, existen diversas especificaciones que definen este requisito para asegurar un comportamiento global seguro. La norma ASTM A36 (2019), por ejemplo, establece propiedades mínimas de alargamiento para aceros de uso general, mientras que tipos más avanzados como (ASTM A572, 2021) o ASTM A992 (2022) presentan mayores límites elásticos y también exigencias de ductilidad adecuadas para estructuras sometidas a cargas dinámicas.

En el ámbito del diseño estructural, el AISC 360 (2022) señala que el acero utilizado en elementos que participan en mecanismos de disipación de energía debe poseer una relación suficientemente amplia entre la tensión de fluencia y la tensión última, evitando comportamientos frágiles.

La ductilidad adquiere especial importancia en el diseño sísmico, las fuerzas sísmicas generan demandas cíclicas que superan frecuentemente la resistencia elástica de los materiales. En estos casos, la ductilidad permite que la estructura ingrese a un régimen inelástico controlado sin fallar súbitamente.

El (ACI 318, 2019), aunque enfocado en hormigón, considera explícitamente esta propiedad del acero de refuerzo en requisitos como la adherencia, el anclaje y la conformación de estribos. El acero usado como refuerzo debe cumplir con ASTM A615 (2022) o ASTM A706 (2022), siendo este último un acero de refuerzo de alta ductilidad diseñado para aplicaciones sísmicas, como señalan los comentarios del ACI 318R (2019), donde se afirma que la ductilidad del acero es indispensable para permitir la formación de rótulas plásticas y la disipación de energía.

Los sistemas estructurales metálicos se benefician de la ductilidad del acero, por la capacidad para desarrollar grandes rotaciones plásticas y permitir la formación de mecanismos globales de resistencia previstos por diseño. Las Normas de Construcción en Acero ((AISC 341, 2022) – *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*) regulan

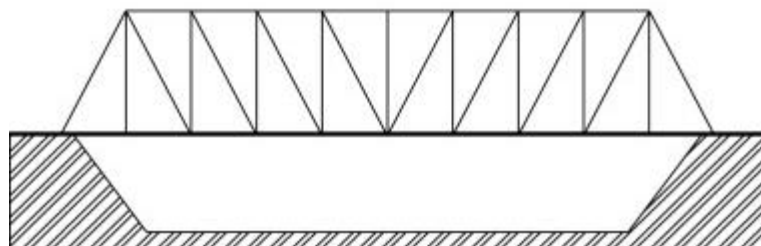
estrictamente la ductilidad necesaria para conexiones, vigas, columnas y sistemas de arriostramiento. Estas disposiciones especifican que el acero empleado debe poseer no solo alargamientos adecuados, sino también un comportamiento predecible de endurecimiento por deformación, necesario para el análisis no lineal y los criterios de diseño por capacidad.

La evaluación de la ductilidad involucra diversos parámetros mecánicos como el alargamiento porcentual en el ensayo de tracción que es la medida más simple, aunque no la única; la relación entre la resistencia última y la de fluencia (f_u/f_y) que es un valor cercano a 1 sugiere un material poco dúctil. ASTM y AISC recomiendan valores típicos de 1.15 a 1.25 para aceros estructurales de buena ductilidad. Otras pruebas, como el ensayo de impacto Charpy (ASTM E23, (2023)), permite evaluar la tenacidad, que está estrechamente vinculada a la ductilidad, especialmente a bajas temperaturas.

1.2.3. Sistema estructural

Los sistemas estructurales como las celosías tipo Pratt (Figura 1-3) funcionan esencialmente como estructuras en las que cada barra desarrolla esfuerzos predominantemente axiales, que permite aprovechar de forma eficiente la resistencia a tensión de los perfiles estructurales. Bajo cargas gravitatorias, la geometría característica de este arreglo —diagonales inclinadas hacia el centro y montantes verticales— produce que las diagonales trabajen mayormente a tensión, mientras que los elementos verticales resisten compresión, reduciendo la susceptibilidad a pandeo en los miembros más largos. La transmisión de cargas se basa en la hipótesis de uniones articuladas, por tanto, las barras no deben experimentar momentos significativos, concentrando el comportamiento estructural en la conducción directa de fuerzas axiales. Para que se cumpla esta condición el diseño de las conexiones entre las vigas celosía debe ser adecuado para la transmisión de los esfuerzos mencionados anteriormente. La eficiencia mecánica de las celosías radica en que la triangulación obliga a que todas las fuerzas internas sean axiales, permitiendo un diseño más liviano y un comportamiento predecible bajo carga gravitacional. (Kassimali et al., 2015)

Figura 1-3: Celosía tipo Pratt



Fuente: Adaptación de Lin & Yoda (2017)

1.3 Estructuras Compuestas

Las estructuras compuestas son sistemas estructurales que integran materiales con propiedades diferentes, como el acero y el hormigón, para hacer más eficiente el diseño frente a cargas gravitacionales y sísmicas. Esta combinación, permite aprovechar de la mejor manera la capacidad mecánica en la que cada material es más efectivo: el acero a tracción y el hormigón a compresión, generando elementos con menores dimensiones, pero con capacidad portante.

Estudios recientes destacan que este tipo de estructuras no solo optimizan la capacidad portante, sino que también mejora la respuesta dinámica de edificaciones ante eventos sísmicos, especialmente cuando se consideran las condiciones de interacción entre materiales y el proceso constructivo (González & Rodríguez, 2023). En este sentido, las estructuras compuestas se consolidan como una estrategia de diseño que responde a los desafíos actuales de seguridad estructural, sostenibilidad y eficiencia constructiva.

1.3.1. Ventajas

La principal ventaja de las estructuras compuestas radica en la eficiencia estructural, al permitir una distribución más equilibrada de los esfuerzos internos. La interacción entre el concreto y el acero, cuando se diseña adecuadamente mediante conectores y detalles constructivos, intenta hacer que todas las fibras del perfil de acero se encuentren a tracción y las fibras de hormigón se hallen a compresión.

Según (Muñoz Pérez et al., 2022), el uso de elementos compuestos con fibras de acero reciclado no solo incrementa la resistencia a flexión, sino que también mejora la tenacidad del concreto, lo que resulta en estructuras más seguras y durables. Esta interacción entre materiales permite optimizar el uso de recursos, reducir el peso propio de la estructura y facilitar procesos constructivos más rápidos y económicos.

Además, un beneficio técnico relevante de las estructuras compuestas es su capacidad para mitigar el riesgo de pandeo en elementos de acero sometidos a compresión. En sistemas tradicionales de acero, los perfiles delgados y esbeltos pueden presentar inestabilidad lateral o torsional, lo que limita su capacidad resistente y exige refuerzos adicionales.

Al integrarse con el hormigón, estos elementos adquieren mayor rigidez y estabilidad, reduciendo significativamente la longitud libre de pandeo y mejorando el comportamiento global tanto ante cargas axiales como también en flexión. Se han demostrado que la colaboración entre ambos materiales permite diseñar columnas y vigas más esbeltas sin comprometer la seguridad estructural, lo que se traduce en soluciones más eficientes y económicas (Martínez & Herrera, 2022).

1.3.2. Mecanismo de transferencia

Una vez que conceptualizamos el funcionamiento de las estructuras compuestas, para que estas trabajen de la manera en la se diseñan se debe dar una adecuada transferencia de esfuerzos entre los elementos que componen a la estructura. La primera manera puede ser por fricción entre el acero y el hormigón (como en los elementos de hormigón armado), sin embargo, esta opción no es factible para unir perfiles de acero lisos con losas de hormigón. Por otro lado, está la unión mecánica por medio de conectores a cortante los cuales al diseñarse con una separación requerida aseguran el trabajo en conjunto como un solo elemento tanto de la losa como del perfil de acero. (Vizuet Romo, 2014)

1.3.3. Usos de la construcción compuesta

Los elementos estructurales compuestos han adquirido un rol fundamental en la ingeniería civil contemporánea debido a su capacidad de combinar materiales con propiedades complementarias para obtener sistemas más eficientes, resistentes y económicos. Entre estos, se puede citar a las vigas de acero y losas con placa colaborante o a las vigas de acero con losas de hormigón, las que constituyen una de las soluciones más utilizadas en edificaciones, puentes y obras de infraestructura por su excelente desempeño estructural y su facilidad constructiva.

La razón principal de este uso radica en la forma en que cada material aporta el mejor comportamiento mecánico: el acero posee una alta resistencia a tracción y una ductilidad notable, mientras que el hormigón es un material eficiente frente a esfuerzos de compresión y ofrece rigidez y durabilidad. Cuando se los hace trabajar en conjunto

mediante conectores de corte, se genera un elemento compuesto cuyo desempeño supera ampliamente al que tendría cada material de manera independiente. Esta colaboración estructural permite reducir secciones, disminuir flechas y aumentar la capacidad portante sin incrementar significativamente el peso propio de la estructura.

En el campo de la edificación, una de las configuraciones más extendidas es la viga de acero con losa de hormigón armado, conocida como viga compuesta, que tiene uso especialmente común en edificios de varios pisos, centros comerciales, hospitales y oficinas, donde se requiere alcanzar grandes luces con un control riguroso de vibraciones y deformaciones. Gracias a su gran relación resistencia-peso, estas vigas permiten reducir la cantidad de elementos verticales, otorgando mayor flexibilidad arquitectónica y tiempos de ejecución más cortos. Además, están las losas colaborantes sobre lámina metálica, un sistema compuesto ampliamente empleado en sustitución del encofrado tradicional y aceleran el proceso constructivo, siendo de uso habitual en estructuras metálicas de construcción rápida.

En infraestructura, las vigas compuestas se utilizan frecuentemente en puentes carreteros y peatonales, la losa de hormigón proporciona rigidez y resistencia a compresión, mientras que las vigas de acero aportan ductilidad y capacidad de tracción, permitiendo luces más largas y costos menores en comparación con soluciones puramente de hormigón. La versatilidad del sistema facilita también los montajes acelerados, reduciendo las interrupciones del tránsito durante la construcción.

Entre los elementos compuestos más usados se destacan: vigas I de acero laminado o armadas con losa de hormigón colado in situ, losas colaborantes sobre chapas metálicas, vigas cajón de acero con losa de hormigón, puentes mixtos de vigas de acero–losa de hormigón y, en menor medida, columnas mixtas de acero y hormigón relleno. Cada uno de estos elementos se selecciona de acuerdo a las necesidades de rigidez, velocidad constructiva, resistencia al fuego, control de vibraciones y economía del proyecto.

Ahora, cuando se demanda cargas elevadas, poco comunes, se considera la utilización de vigas de acero en celosía, que se caracteriza por su conformación de cordones longitudinales conectados entre sí por diagonales y montantes que trabajan bajo la combinación de esfuerzos de tracción y compresión. Esta configuración permite una

distribución eficiente de los esfuerzos en el material, logrando una relación resistencia-peso difícil de alcanzar con vigas macizas.

Una de las ventajas principales de este sistema radica en su capacidad para cubrir grandes luces sin incrementar de manera significativa el peso propio ni la altura total del edificio. Esto resulta especialmente útil en naves industriales, centros logísticos, gimnasios, auditorios y terminales de transporte, donde la presencia de áreas diáfanos es un requisito esencial. La geometría abierta de la celosía permite además el paso de instalaciones, lo cual otorga una flexibilidad adicional en el diseño y reduce la necesidad de perforaciones o sistemas auxiliares.

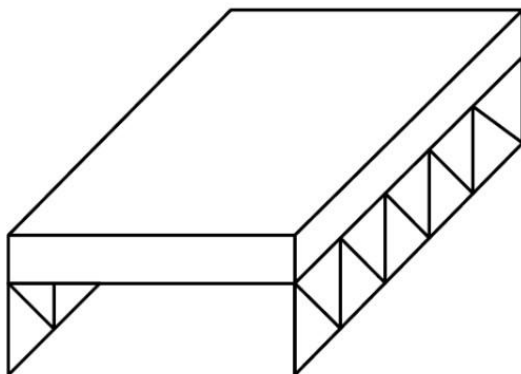
Desde el punto de vista constructivo, las vigas en celosía presentan ventajas en transporte y montaje debido a su ligereza relativa, la fabricación puede ser totalmente mecanizada o ejecutada mediante soldadura manual en taller, que permite una producción estandarizada y controlada. Al combinarse con la losa de hormigón, el sistema mejora su rigidez global, reduce deformaciones y aumenta la capacidad portante frente a esfuerzos gravitacionales y cargas dinámicas. Este comportamiento combinado es especialmente importante en estructuras sometidas a vibraciones, como instalaciones deportivas o áreas industriales con maquinaria pesada.

En términos de desempeño estructural, la interacción entre la losa y la viga en celosía puede diseñarse para trabajar de manera simplemente apoyada o como sistema compuesto, dependiendo del uso de conectores mecánicos que permitan la transferencia de esfuerzos horizontales. En configuraciones compuestas, la losa contribuye significativamente a la resistencia a flexión, reduciendo la demanda de acero en el cordón superior y mejorando la rigidez global. En sistemas no compuestos, la losa cumple principalmente funciones de diafragma y de distribución de cargas, manteniendo la independencia resistente de la viga de acero.

1.3.4. Tipo de construcción compuesta

En este contexto, se llevará a cabo la fundición de una losa de hormigón de alta resistencia a una viga de acero en celosía mostrada en la Figura 1-4:

Figura 1-4: Modelo estructural



Fuente: Elaboración propia

En el presente trabajo de titulación se plantea determinar la resistencia última de un sistema estructural compuesto, conformado por la unión de una viga de acero en celosía y una losa de hormigón. Este estudio se enfoca en el análisis del comportamiento conjunto de ambos materiales, considerando la interacción que se genera a través de los elementos de conexión, los cuales permiten que el sistema actúe de manera solidaria como un solo miembro estructural.

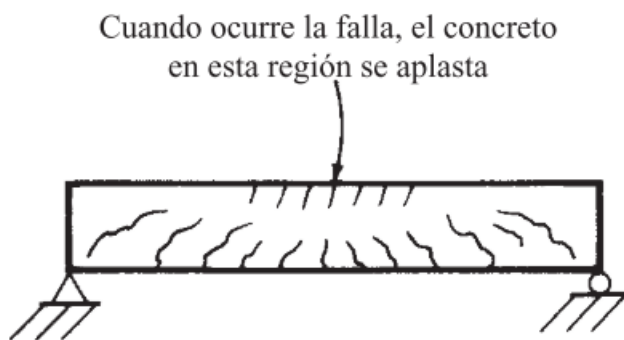
En el desarrollo de la investigación se contempla la evaluación de la capacidad resistente del conjunto frente a distintas condiciones de carga, incorporando tanto el análisis teórico como la validación experimental. De esta forma, se busca comprender cómo la acción compuesta influye en la distribución de esfuerzos, la rigidez global y los posibles modos de falla, con el fin de establecer criterios más precisos para el diseño y optimización de este tipo de estructuras.

1.3.5. Estado límite de las secciones compuestas

Los estados límite de resistencia en estructuras compuestas identifican las condiciones críticas en las que una estructura (o parte de ella) deja de cumplir su función portante. Estos estados surgen cuando se supera la capacidad máxima de los materiales constituyentes o cuando se pierde la acción compuesta entre ellos. En el caso de las estructuras compuestas como las vigas en celosía y losas de hormigón, los modos de fallo que definen la capacidad última incluyen: el aplastamiento del hormigón bajo compresión, la fluencia por tracción del acero y la pérdida de la integridad de la conexión que asegura el comportamiento compuesto.

El fallo por aplastamiento del hormigón en una sección compuesta, ocurre cuando la fibra comprimida extrema del hormigón excede su capacidad resistente bajo compresión, es decir, cuando su resistencia nominal f'_c es superada. En ese momento, se inician microfisuras como se observan en la Figura 1-5 que desencadenan en una fisuración generalizada y eventual colapso de la zona comprimida. Este modo de falla es típico en losas compuestas sometidas a momento flector, cuando la zona superior (hormigón) trabaja a compresión. (Quiroga, 2018). En un diseño adecuado de estructuras compuestas se procura que este modo de falla ocurra sólo después de que el acero haya alcanzado su fluencia de esa forma la estructura tendrá ductilidad antes de colapsar, evitando un comportamiento frágil.

Figura 1-5: Falla por aplastamiento del hormigón



Fuente: McCormac (2011)

La fluencia del acero estructural ocurre cuando la tensión en las fibras sometidas a tracción alcanza el límite elástico del acero, permitiendo que la sección pase a un comportamiento elastoplástico: el acero sigue deformándose (incremento en deformación unitaria) con poca o ninguna ganancia adicional de tensión. Este fenómeno es clave en estructuras compuestas, ya que aporta ductilidad al sistema y permite disipar energía a través de deformaciones significativas antes del colapso. (Johnson, 2018). Cuando el diseño procura que el acero fluya antes de que el hormigón falle a compresión, se logra un comportamiento dúctil: la estructura tiene la capacidad de deformarse notablemente, que permite redistribuciones de esfuerzos o fallas progresivas en vez de un colapso súbito.

1.3.6. Pérdida de acción compuesta entre acero y hormigón

Un modo de fallo crítico en estructuras de acero y hormigón es la pérdida de la acción compuesta, cuando los conectores de cortante no transfieren el esfuerzo cortante

longitudinal generado por las diferencias de deformación entre acero y hormigón. Si esto ocurre, se puede producir deslizamiento relativo entre la losa de hormigón y la viga de acero, lo que anula la hipótesis de que el hormigón trabajara a compresión y el acero a tracción comprometiendo el comportamiento de la estructura global. La función principal de los conectores de corte es garantizar la transferencia de cortante longitudinal, impidiendo el deslizamiento y la separación vertical entre los materiales. Cuando estos fallan ya sea por: aplastamiento del hormigón alrededor del conector, por rotura del mismo, o por deslizamiento excesivo la rigidez efectiva de la sección compuesta cae abruptamente, y la capacidad portante puede reducirse en gran medida. (Cárdenas et al., 2024).

Por esto, en el diseño de estructuras compuestas se verifica explícitamente la resistencia de los conectores y la ductilidad. Dicha verificación asegura que los conectores resistan las fuerzas de cortante longitudinal y permitan una suficiente redistribución de esfuerzos antes de que ocurra un fallo global. Este control es igual de esencial como comprobar los estados límite del acero y el hormigón mencionadas anteriormente.

2. Capítulo 2: Diseño de Estructuras Compuestas

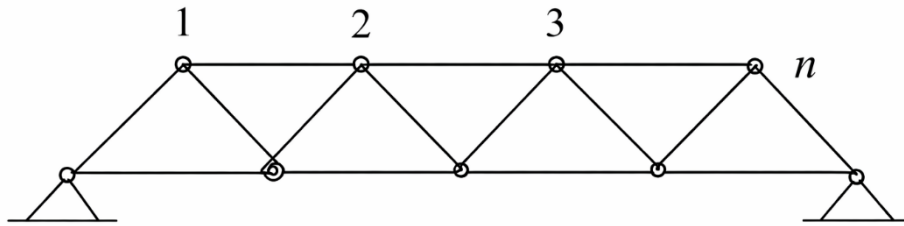
En el presente capítulo se desarrolla el procedimiento para el cálculo de la resistencia última de los materiales, así como los criterios de diseño asociados, con el objetivo de determinar el esfuerzo máximo que el material puede soportar antes de alcanzar la fractura.

2.1. Diseño viga en celosía

Para analizar y diseñar la viga en celosía, se conceptúa como un sistema estructural hecho de elementos lineales que se unen en los extremos. Bajo esta idea, se asume que las cargas externas actúan solo sobre los nodos y que las conexiones no tienen rigidez suficiente para transmitir momentos de flexión. Esta simplificación permite que el comportamiento interno de la estructura dependa principalmente de los esfuerzos axiales. Esto significa que cada miembro, ya sea cordón, montante o diagonal, funciona mejor bajo tracción o compresión pura, maximizando así la eficiencia del material. (Quispe Paca, 2015)

Para los elementos bajo tracción, el tamaño se basa en la verificación de dos estados límite de resistencia: la fluencia en la sección bruta y la ruptura en la sección neta. El primer criterio busca evitar deformaciones plásticas excesivas que puedan afectar la funcionalidad de la estructura. El segundo considera la pérdida de integridad en los puntos de conexión, ya sean soldados o empernados. La forma de la sección transversal y la disposición de los conectores son cruciales para asegurar que el elemento pueda soportar las cargas de diseño sin llegar a su límite de falla. Por otro lado, los miembros sometidos a compresión presentan una mayor complejidad debido a los problemas de inestabilidad elástica e inelástica. El diseño en estos casos, no solo depende de la resistencia del material sino también del fenómeno del pandeo. Este debe evaluarse de manera rigurosa, tanto a nivel local, analizando la esbeltez de las paredes de la sección, como a nivel global, teniendo en cuenta la flexión o torsión del elemento completo. Para mitigar estos efectos, es vital controlar la relación de esbeltez definida por el factor de longitud efectiva K . Esto asegura que la rigidez geométrica del perfil sea suficiente para prevenir una falla por inestabilidad prematura.

Figura 2-1: Numeración del modelo



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 2-1, el procedimiento inicia con la correcta numeración de todos los nodos y elementos del sistema estructural, etapa fundamental para la organización y el tratamiento adecuado de la información. Esta identificación permite estructurar las matrices de coordenadas y de conectividad, las cuales constituyen la base para el procesamiento de los datos dentro del modelo de análisis.

N°	x	y
1	x_1	y_1
2	x_2	y_2
3	x_3	y_3
·	·	·
·	·	·
·	·	·
n	x_n	y_n

A partir de la matriz de coordenadas, se procede con el desarrollo del análisis estructural, en ella se definen las posiciones espaciales de los nodos y se establece la geometría del sistema. Este paso resulta esencial para la formulación de las matrices de rigidez, la aplicación de las condiciones de borde y la evaluación del comportamiento del conjunto frente a las cargas actuantes. De esta manera, se garantiza un proceso ordenado, preciso y coherente con los principios del análisis estructural.

2.1.1. Elemento barra

Para que una viga en celosía responda como un modelo de estructura articulada, se deben cumplir ciertas condiciones geométricas y mecánicas. En primer lugar, los nudos deben actuar como rótulas que no transmitan momentos. Esto permite que las barras giren libremente entre sí. Además, los ejes centrales de todos los elementos que se encuentran deben cruzarse en un solo punto teórico para evitar desalineaciones. Por último, las cargas externas deben aplicarse solo en los nudos. Esto asegura que cada miembro funcione bajo

un estado de esfuerzo axial uniforme, ya sea en tracción o compresión, sin flexión transversal.

Desde la perspectiva del análisis matricial, el comportamiento de estos elementos se define inicialmente en su sistema de coordenadas local. Aquí, el eje de la barra coincide con el eje longitudinal de referencia. En esta configuración unidimensional, el elemento se modela mecánicamente como un resorte lineal. Su rigidez depende de sus propiedades físicas: el módulo de elasticidad del material E , el área de la sección transversal A y la longitud L . Esta relación indica que la capacidad de la barra para resistir deformaciones axiales es proporcional al factor de rigidez elástica EA/L .

Bajo estas consideraciones, la matriz de rigidez local K_{local} se organiza como un arreglo de 2×2 . Este arreglo vincula las fuerzas de nudo con los desplazamientos axiales en sus extremos. Los términos de la diagonal principal representan la fuerza necesaria para generar un desplazamiento unitario en un nodo. Los términos fuera de la diagonal reflejan la reacción de equilibrio en el nodo opuesto. Esta matriz resume la rigidez intrínseca del elemento y es fundamental para el posterior ensamblaje del modelo estructural completo.

$$K_{local} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

2.1.2. Matriz de rigidez elemento barra

Para integrar el comportamiento individual de cada barra en el análisis de la celosía completa, es necesario realizar una transformación de coordenadas del sistema local al sistema global x y y . La orientación de cada elemento varía según su ángulo de inclinación θ . Por ello, se usa una matriz de transformación T que incluye los cosenos directores de la barra. Al aplicar la operación matricial $[K_{global}] = [T^T][K_{local}][T]$, se obtiene la matriz de rigidez global del elemento. Esta matriz expande las relaciones de fuerza y desplazamiento a un formato de 4×4 . La matriz resultante no solo captura la rigidez axial intrínseca, sino que también distribuye sus componentes en las direcciones cartesianas globales. Esto permite ensamblar la matriz de rigidez total de la estructura y resolver los desplazamientos en cada nudo mediante el método de rigidez directa.

$$K_{global} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix}$$

Una vez que se tiene la matriz de rigidez global de la estructura $[K]$ y con las condiciones de frontera, que en este caso son las restricciones de movimiento en los apoyos, se puede resolver el sistema mediante la ecuación fundamental del método de la rigidez:

$$\{F\} = [K] \times \{U\}$$

Con $\{F\}$ es el vector de cargas nodales externas y $\{U\}$ es el vector de desplazamientos desconocidos en los nudos. Para la solución del sistema, se divide la matriz global y los vectores en submatrices. De esta manera, se separan los grados de libertad libres de aquellos que están restringidos por los apoyos, permitiendo encontrar primero los desplazamientos en los nudos que pueden moverse libremente. Luego, se puede calcular las reacciones en los apoyos haciendo un equilibrio de fuerzas en los nodos restringidos.

Finalmente, una vez que tenemos los desplazamientos globales de cada nudo, volvemos al sistema local de cada barra. Multiplicando estos desplazamientos por la rigidez de cada elemento, se obtienen las fuerzas internas axiales (tracción o compresión) que actúan en cada miembro de la celosía. Estos valores se utilizan como solicitaciones de diseño para verificar la capacidad resistente y la estabilidad de los perfiles seleccionados frente a los estados límite.

2.1.3. Resistencia última elemento barra

Para determinar la resistencia última de una viga en celosía sometida a compresión se puede seguir el procedimiento establecido en la normativa *American Institute of Steel Construction (2022)*:

Tabla 2-1: Esbeltez elementos sometidos a compresión

TABLA B4.1a Razón Ancho-Espesor: Elementos de Compresión Miembros sometidos a Compresión Axial					
	Caso	Descripción del elemento	Relación Ancho-Espesor	Límite de la relación Ancho-Espesor λ_r (no esbelta/esbelta)	Ejemplos
Elementos no	1	(1) Patines de perfiles laminados en I.	b/t	$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

	<p>(2) Placas salientes de perfiles laminados en I.</p> <p>(3) Patines salientes de pares de ángulos conectados con contacto continuo.</p> <p>(4) Patines de canales</p> <p>(5) Patines de T.</p>			
2	<p>(1) Patines de perfiles armados en forma de I.</p> <p>(2) Placas o ángulos que sobresalen de perfiles armados en forma de I.</p>	b/t	$0.56 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$	
3	<p>(1) Patines de ángulos simples.</p> <p>(2) Patines de ángulos dobles con separadores.</p> <p>(3) Todos los demás elementos no atiesados.</p>	b/t	$0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
4	Alma de perfil T.	d/t	$0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Fuente: Tabla tomada del American Institute of Steel Construction (2022)

Según con la Tabla 2-1, se debe seleccionar el tipo de perfil de acero que se empleará en el sistema estructural, en esta elección se condiciona el conjunto de expresiones y criterios de cálculo a utilizar. La geometría del perfil como secciones abiertas o cerradas, laminadas o conformadas, determinan propiedades fundamentales

tales como el área, los momentos de inercia, el radio de giro y los módulos resistentes, parámetros indispensables para el análisis de esfuerzos y deformaciones.

En función del perfil seleccionado, se aplican las formulaciones específicas para evaluar su comportamiento estructural, incluyendo la verificación de resistencia, rigidez y estabilidad frente a los distintos estados de carga. Esta definición permite emplear modelos de cálculo adecuados y coherentes con las características del elemento, garantizando que el análisis refleje de manera precisa su desempeño dentro del sistema estructural.

Para el cálculo de la resistencia a la compresión, primero se debe comprobar la esbeltez local, si no se cumple el límite de esbeltez se procede a castigar el área calculando un ancho efectivo y un área efectiva con los coeficientes de la *tabla 2-2*, con c_1 con un valor de 0.18 y c_2 de 1.31.

Tabla 2-2: Coeficientes para elementos esbeltos

TABLA E7.1			
Factores de ajuste de imperfección de ancho efectivo,			
c_1 y c_2			
Caso	Descripción del elemento	c_1	c_2
(a)	Elementos rigidizados excepto muros de HSS cuadrados y rectangulares.	0.18	1.31
(b)	Muros de HSS cuadrados y rectangulares	0.20	1.38
(c)	Todos los demás elementos	0.22	1.49

Fuente: Tabla tomada del American Institute of Steel Construction (2022)

Con base en la Tabla 2-2, se procede a seleccionar el caso correspondiente de acuerdo con la descripción y condiciones del elemento estructural analizado, tales como su configuración, tipo de apoyo, longitud efectiva y forma de trabajo dentro del sistema. Esta clasificación es fundamental para identificar el comportamiento específico del elemento frente a las cargas aplicadas.

Esta elección, se determina el coeficiente adecuado que será empleado en el cálculo, el cual influye directamente en la evaluación de la resistencia, la rigidez y la estabilidad del elemento. Su correcta asignación permite ajustar el análisis a las condiciones reales de funcionamiento, garantizando resultados más precisos y coherentes con los criterios de diseño estructural establecidos.

Además, se debe calcular las siguientes variables:

$$F_{el} = \left(c_2 \frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^2 F_y$$

$$b_e = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{F_{el}}{F_n}} \right) \sqrt{\frac{F_{el}}{F_n}}$$

Para el cálculo de la resistencia a la compresión primero se debe comprobar la esbeltez local y posteriormente la global.

La esbeltez global se calcula cuando

$$\frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25$$

$$F_n = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e} \right) F_y$$

Cuando

$$\frac{L_c}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\frac{F_y}{F_e} > 2.25$$

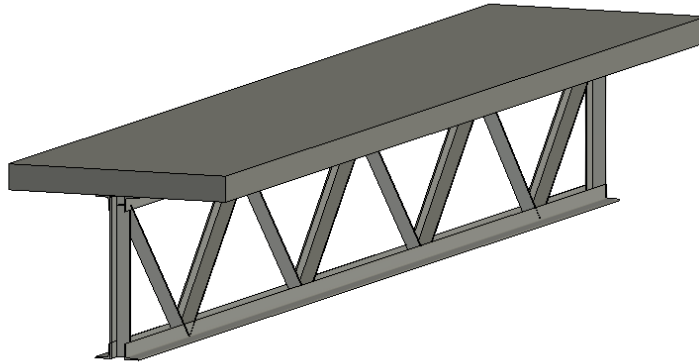
$$F_n = 0.877 F_e$$

Después de obtener F_n se calcula

$$P_n = F_n A_g$$

2.2. Diseño elementos compuestos

Figura 2-2: Vista 3D prototipo 1



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-2, se considera a la unión entre los dos materiales de construcción como un sistema compuesto, en el cual ambos elementos actúan de manera conjunta bajo la acción de las cargas. Esto se logra mediante mecanismos de conexión que garantizan la transferencia de esfuerzos entre el acero y el hormigón, evitando el deslizamiento relativo en la interfaz de contacto.

Bajo este enfoque, el conjunto estructural se modela como un solo elemento resistente, que permite aprovechar las propiedades mecánicas de cada material: el acero contribuye principalmente a la resistencia a tracción, mientras que el hormigón aporta capacidad a compresión y rigidez. Este comportamiento integrado mejora la eficiencia estructural del sistema, optimiza la distribución de esfuerzos y permite una evaluación más precisa de su capacidad resistente y desempeño global.

El diseño de elementos compuestos es una forma de tratar al hormigón y al acero como si fueran un solo elemento. La interacción entre estos materiales debe ser tal que, trabajen juntos como una sola unidad. La base de este análisis es encontrar la relación entre los módulos de elasticidad de los materiales. Esta relación se llama relación modular y se calcula dividiendo el módulo de elasticidad de un material por el módulo de elasticidad del otro material. Esto se puede expresar como:

$$M_1 = \frac{E_c}{E_s}$$

Esta relación permite ajustar la forma de uno de los materiales para obtener una sección nueva. Se puede cambiar el ancho de la losa usando un factor multiplicador. Esto hace que la sección resultante se pueda tratar como si fuera homogénea.

$$b = M_1 t$$

A partir de esta sección, se calcula la inercia total sumando las inercias de cada parte. Si es necesario, se aplica el teorema de los ejes paralelos para referenciar todo al nuevo eje neutro elástico.

$$I = \frac{b \times h^3}{12}$$

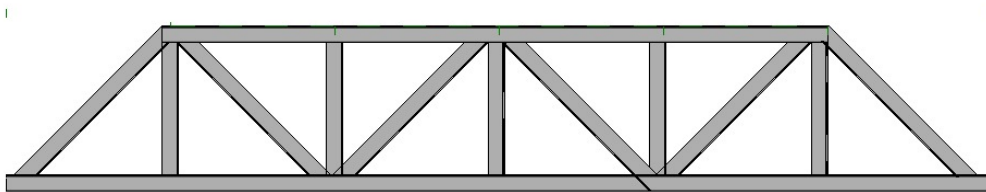
$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

Una vez que se tienen las propiedades geométricas equivalentes, se procede a verificar los estados límite de servicio y resistencia. El esfuerzo normal se determina usando la relación entre el momento flector y el momento de inercia. Esto asegura que las fibras más alejadas no superen los esfuerzos admisibles de cada material.

$$\sigma = \frac{M}{I}$$

2.2.1. Elemento tipo viga

Figura 2-3: Vista de perfil prototipo 1



Fuente: Elaboración propia

A partir de la Figura 2-3 se define que la viga en celosía se analizará como un elemento tipo viga, lo que permite simplificar su comportamiento estructural sin perder representatividad en la respuesta global. Esta consideración facilita la aplicación de métodos de análisis más directos, enfocados en la evaluación de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos.

Cada nodo del sistema aporta de manera diferenciada al comportamiento del conjunto, ya que en ellos se concentran las uniones entre los elementos que conforman la celosía. En estos puntos se transmiten fuerzas internas y se desarrollan desplazamientos y rotaciones que influyen en la respuesta estructural. La adecuada caracterización de los nodos permite comprender con mayor precisión la distribución de esfuerzos y el funcionamiento integral de la viga, contribuyendo a una evaluación más completa de su desempeño frente a las cargas aplicadas.

En el caso de los elementos tipo viga, parte de un análisis extenso, debido a que estos miembros deben ser capaces de resistir y transmitir cargas transversales. A diferencia de las celosías, en las que se diseña para soportar esfuerzo axial, en las vigas el diseño se basa en la flexión y el corte.

El elemento viga introduce grados de libertad adicionales en cada nudo. Además de los desplazamientos traslacionales, se deben considerar las rotaciones o giros. Esto da lugar a una matriz de rigidez local de mayor dimensión, donde los términos dependen no solo de la rigidez axial, sino fundamentalmente de la rigidez a la flexión.

La formulación permite capturar la continuidad de la pendiente y la deflexión en los nudos, lo cual es esencial para el modelado de pórticos rígidos y estructuras donde la estabilidad depende de la capacidad de los nudos para transmitir momentos.

La matriz de rigidez para una viga en el plano se puede expresar como:

$$K_{local} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

2.2.2. Matriz de rigidez elemento barra

A diferencia del modelo de barras articuladas, el análisis de elementos tipo pórtico introduce una interdependencia cinemática entre los desplazamientos y las rotaciones. En este escenario, la transformación al sistema global no se limita a proyectar una fuerza axial, sino que debe gestionar la transferencia de momentos flectores y fuerzas cortantes a través de nudos rígidos. Esto implica que la matriz de transformación [T] actúa sobre un vector de estado más robusto, donde el giro, aunque es un escalar invariante respecto a la rotación del plan, se vincula con los desplazamientos transversales para definir la curvatura de la elástica. Así, un movimiento en el eje global y de un nudo no solo genera

una reacción vertical, sino que induce momentos de empotramiento en todos los miembros concurrentes, una característica ausente en los sistemas de solo tracción-compresión.

El ensamblaje de la matriz de rigidez global para este tipo de elementos exige una gestión de la conectividad basada en la continuidad de la pendiente. Mientras que en las celosías los nudos funcionan como puntos de concurrencia de fuerzas, en los pórticos los nudos transmiten flexión. Al superponer las submatrices de cada elemento, se garantiza que el ángulo relativo entre las barras se mantenga constante durante la deformación, lo que otorga a la estructura su capacidad de resistir cargas laterales mediante la rigidez de sus marcos. Este proceso de ensamble da lugar a una matriz global la cual es la siguiente:

$$K_{local} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \left(\frac{A}{I}c^2 + \frac{12}{L^2}s^2\right) & \left(\frac{A}{I} - \frac{12}{L^2}\right)cs & -\frac{6}{L}s & -\left(\frac{A}{I}c^2 + \frac{12}{L^2}s^2\right) & -\left(\frac{A}{I} - \frac{12}{L^2}\right)cs & -\frac{6}{L}s \\ \left(\frac{A}{I} - \frac{12}{L^2}\right)cs & \left(\frac{A}{I}s^2 + \frac{12}{L^2}c^2\right) & \frac{6}{L}c & -\left(\frac{A}{I} - \frac{12}{L^2}\right)cs & -\left(\frac{A}{I}s^2 + \frac{12}{L^2}c^2\right) & \frac{6}{L}c \\ \frac{6}{L}s & \frac{6}{L}c & 4 & \frac{6}{L}s & -\frac{6}{L}c & 2 \\ -\left(\frac{A}{I}c^2 + \frac{12}{L^2}s^2\right) & -\left(\frac{A}{I} - \frac{12}{L^2}\right)cs & \frac{6}{L}s & \left(\frac{A}{I}c^2 + \frac{12}{L^2}s^2\right) & \left(\frac{A}{I} - \frac{12}{L^2}\right)cs & \frac{6}{L}s \\ -\left(\frac{A}{I} - \frac{12}{L^2}\right)cs & -\left(\frac{A}{I}s^2 + \frac{12}{L^2}c^2\right) & -\frac{6}{L}c & \left(\frac{A}{I} - \frac{12}{L^2}\right)cs & \left(\frac{A}{I}s^2 + \frac{12}{L^2}c^2\right) & -\frac{6}{L}c \\ \frac{6}{L}s & \frac{6}{L}c & 2 & \frac{6}{L}s & -\frac{6}{L}c & 4 \end{bmatrix}$$

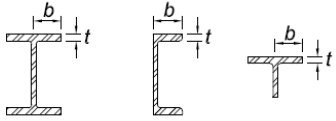
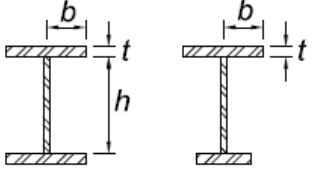
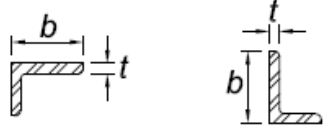
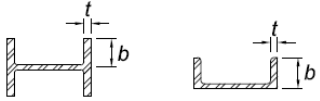
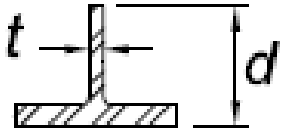
2.2.3. Resistencia ultima elemento viga

Para la resistencia a la flexión se calcula con la fórmula:

$$M_n = M_p = F_y Z_x$$

Tabla 2-3: Esbeltez elementos sometidos a flexión

TABLA B4.1b Razón Ancho-Espesor: Elementos de Compresión Miembros sometidos a Flexión						
	Caso	Descripción del Elemento	Relación Ancho-Espesor	Límite de la relación Ancho-Espesor		Ejemplos
				λ_p (compacto/no compacto)	λ_r (esbelto/no esbelta)	

Elementos no atiesados	10	(1) Patines de perfiles laminados en I. (2) Patines de canales (3) Patines de T.	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.10 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11	Patines de secciones I soldadas con doble y simple simetría	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95 \sqrt{\frac{K_c E}{F_L}}$	
	12	Patines de ángulos simples	b/t	$0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Patines de toda doble T y canal entorno a su eje más débil	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	Alma de perfil T.	d/t	$0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Fuente: Tabla tomada del American Institute of Steel Construction (2022)

Según la Tabla 2-2, es necesario seleccionar la descripción correspondiente al elemento no atiesado, identificando sus condiciones geométricas y de soporte para una correcta clasificación. Esta elección resulta fundamental, porque define los parámetros que intervienen en el análisis y condiciona la aplicación de las expresiones de cálculo apropiadas.

Una vez determinada la categoría del elemento, se emplean los coeficientes y relaciones establecidos para evaluar su resistencia a la flexión. Estos factores consideran aspectos como la esbeltez, la estabilidad y el comportamiento del perfil frente a sollicitaciones, permitiendo estimar con mayor precisión su capacidad portante. La correcta selección y aplicación de estos coeficientes contribuye a garantizar un diseño seguro y coherente con los criterios estructurales establecidos.

2.2.4. Grados de libertad

Los grados de libertad libres de la estructura se consideran como los desplazamientos de los nodos que interesan saber. Además, se deben identificar los grados de libertad conocidos de la misma estructura por condiciones de frontera conocidas como los apoyos para poderlos eliminar de la matriz de rigidez global y obtener los desplazamientos incógnita del problema.

2.2.5. Matriz efectiva

La matriz de rigidez efectiva surge de eliminar las filas y columnas relacionadas con los desplazamientos conocidos del sistema estructural, esto para poder encontrar los desplazamientos de los nodos libres producidos por las fuerzas externas aplicadas al sistema.

2.2.6. Fuerzas locales

Una vez obtenidos los desplazamientos de los grados de libertad libres y los desplazamientos conocidos se puede completar el vector de desplazamientos $\{U\}$. A través de la ecuación matricial fundamental

2.2.7. Varilla de unión

El diseño de la varilla de unión como conector de cortante se basa en el estado límite de fluencia del acero en el área de contacto. Cuando se utilizan barras de construcción corrugadas, la capacidad nominal del conector depende de su área

transversal y de su esfuerzo de tensión último. La capacidad nominal del conector depende del área transversal y el esfuerzo de tensión último.

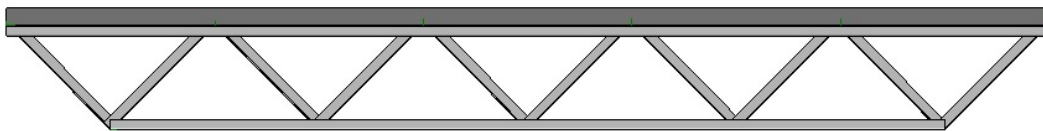
$$Q_{sa} = A_{sc} \times f_u$$

Una varilla corrugada mejora la adherencia mecánica, y es importante la resistencia de la soldadura en su base y la ductilidad del material. La varilla debe poder deformarse plásticamente para que los esfuerzos se redistribuyan a lo largo de la viga. Esto es característico de los aceros de refuerzo grado 40 y 60, lo que favorece el comportamiento de la conexión parcial.

Por otro lado, el estado límite de aplastamiento localizado del hormigón evalúa la capacidad de la losa para resistir la presión frontal ejercida por la varilla. Esto depende de la resistencia a la compresión del hormigón y de su módulo de elasticidad. La capacidad del concreto, se define como la mitad de su área transversal multiplicada por la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del hormigón y su módulo de elasticidad.

Es importante considerar que el hormigón confinado dentro del doblez de la varilla aporta una restricción adicional que evita el desprendimiento vertical. La resistencia de diseño final del conector se toma como el valor menor entre ambos estados límite, afectado por un factor de reducción.

Figura 2-2: Boceto del modelo real



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-4 se presenta el diseño final de la viga, que define las características geométricas que regirán el comportamiento del modelo estructural. En esta representación se especifican dimensiones clave como la longitud total, la altura, el espaciamiento de los elementos, así como la configuración de los componentes que conforman la celosía.

Finalmente, el espaciamiento y la configuración geométrica de las varillas determinan la eficiencia de la sección mixta. En este caso, la disposición con un doblez a 180° optimiza el anclaje mecánico al abrazar una mayor masa de hormigón. Para asegurar una interacción efectiva, el espaciamiento longitudinal debe cumplir con los límites

normativos, garantizando que el flujo de cortante sea constante durante toda la vida útil de la estructura. El número de conectores necesarios se calcula mediante la relación entre la fuerza cortante horizontal total y la capacidad nominal del conector. El espaciamiento longitudinal debe ser menor o igual a ocho veces el grosor de la losa o menor o igual a 60 centímetros, según lo establecido en las normas.

3. Capítulo 3: Desarrollo del código computacional

En el presente capítulo se expone de manera detallada el desarrollo del algoritmo propuesto, describiendo de forma sistemática cada una de sus etapas, desde el planteamiento del problema hasta la obtención de los resultados. Se explican los fundamentos teóricos que sustentan su formulación, la lógica empleada en su estructura, así como los criterios adoptados para la selección de variables y parámetros.

Además, se presenta el procedimiento paso a paso para su implementación, incluyendo el análisis del flujo de datos, las condiciones de control y las operaciones realizadas en cada fase del proceso. Finalmente, se detallan las consideraciones técnicas y las validaciones efectuadas para garantizar la correcta ejecución y confiabilidad del algoritmo desarrollado.

3.1. Algoritmo del código

A continuación, se explica manera detallada los datos de entrada requeridos, las consideraciones estructurales adoptadas, el procesamiento de la información, la delimitación y definición de las cargas actuantes, así como la lógica de operación del código desarrollado.

En primer lugar, se describen los parámetros de entrada necesarios para la modelación, incluyendo las propiedades geométricas y mecánicas de los elementos, así como la configuración espacial de la estructura. Posteriormente, se establecen las hipótesis y criterios de diseño considerados, tales como condiciones de apoyo, tipo de análisis y supuestos de comportamiento estructural.

Seguidamente, se expone el procedimiento de procesamiento de datos, en el cual se realizan los cálculos intermedios requeridos para la evaluación estructural, como la determinación de esbeltez, rigideces y parámetros de resistencia. A continuación, se define la delimitación de cargas, contemplando tanto cargas permanentes como variables, y su adecuada distribución sobre los elementos estructurales.

Finalmente, se detalla la operación del código, describiendo la secuencia lógica de ejecución, las funciones implementadas y la forma en que se integran los distintos módulos para obtener los resultados del análisis de manera eficiente y confiable.

3.1.1. Entrada de datos

Para el ingreso de datos, es necesario definir con precisión las dimensiones de los perfiles estructurales, incorporando sus propiedades mecánicas y físicas relevantes, tales como el límite de fluencia del acero, el módulo de elasticidad y las características geométricas de la sección. Adicionalmente, se debe considerar el peso propio de la losa a fundir, el cual constituye una carga permanente que influye directamente en el comportamiento estructural del sistema.

De esta manera, es fundamental ingresar las longitudes de los elementos de la viga, verificando su correspondencia con la configuración del modelo estructural adoptado, a fin de garantizar la consistencia entre la geometría definida y las condiciones reales de análisis.

Equivalentemente, resulta indispensable establecer las coordenadas de los nodos que conforman la estructura, ya que estas permiten definir la geometría global del sistema, así como la correcta orientación y conectividad de los elementos en el espacio. Un ingreso adecuado y coherente de esta información es esencial para asegurar una correcta interpretación del modelo y la obtención de resultados precisos y confiables en el análisis estructural posterior.

3.1.2. Consideraciones constructivas

En una primera etapa, se procede al procesamiento de los datos de entrada mediante el cálculo de la esbeltez de los elementos estructurales, tanto a flexión como a compresión. Este parámetro se determina a partir de la relación entre la longitud efectiva del elemento y sus propiedades geométricas, tales como el radio de giro, que permite evaluar su susceptibilidad al pandeo y su comportamiento estructural bajo diferentes tipos de sollicitación.

Con base en los valores obtenidos de esbeltez, se establece el régimen de trabajo de los elementos, ya sea en el rango elástico o inelástico, que resulta fundamental para seleccionar la formulación adecuada en el cálculo de la resistencia última del conjunto estructural. De esta manera, se garantiza que las expresiones empleadas sean coherentes con el comportamiento real de los elementos bajo carga.

Adicionalmente, el algoritmo incorpora una verificación de las longitudes de los elementos, emitiendo advertencias en caso de identificarse valores excesivos de esbeltez

o dimensiones poco eficientes. Estas condiciones pueden comprometer la estabilidad del sistema y dificultar la ejecución constructiva; por lo que, su detección temprana permite realizar ajustes oportunos en la etapa de diseño.

3.1.3. Ensamblaje de la matriz

Los datos de entrada son procesados mediante la formulación matricial de la rigidez, construyendo tanto la matriz de rigidez de cada elemento como la matriz de rigidez global del sistema estructural. Este procedimiento se complementa con la consideración de la rigidez efectiva de los elementos, la cual incorpora posibles reducciones asociadas a efectos de esbeltez, pandeo o comportamiento inelástico, según corresponda.

A partir del ensamblaje de la matriz global y la aplicación de las condiciones de frontera, se procede al análisis nodal de la estructura, determinando los desplazamientos y rotaciones en cada nodo. Con estos resultados, se calculan las fuerzas internas en los elementos, tales como esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores.

Finalmente, mediante la comparación entre las solicitaciones obtenidas y la capacidad resistente de los elementos, se evalúa la carga máxima que puede soportar el sistema antes de alcanzar el estado límite último. Este enfoque, permite identificar el nodo o elemento crítico y establecer el punto de falla estructural, garantizando un análisis integral y coherente del comportamiento de la estructura.

3.1.4. Cálculo de las reacciones y fuerzas internas

Se procede al cálculo de las reacciones en los apoyos y de las fuerzas internas en cada uno de los elementos que conforman la armadura, a partir de la solución del sistema estructural mediante el método matricial de rigidez. Este análisis permite obtener, para cada barra, los esfuerzos axiales de tracción o compresión; así como, en caso de ser necesario los esfuerzos cortantes, dependiendo del tipo de elemento considerado.

Con base en las solicitaciones internas determinadas, se evalúa la capacidad resistente de cada elemento mediante la comparación con sus respectivas resistencias de diseño, considerando propiedades del material, geometría de la sección y posibles efectos de inestabilidad, como el pandeo en elementos comprimidos.

Este procedimiento permite identificar los elementos más solicitados o críticos dentro de la armadura, establecer su capacidad portante y verificar el cumplimiento de los criterios de seguridad estructural, garantizando así un diseño eficiente y confiable del sistema.

3.1.5. Grados de libertad

Los grados de libertad se ingresan en el programa según las fuerzas internas que se deseen analizar. En particular, para el modelo estructural que se detallará en el capítulo posterior, el programa ha sido configurado para que la interpretación de resultados se centre exclusivamente en las fuerzas axiales de los elementos. En el algoritmo, esto se logra mediante el mapeo sistemático de los componentes de un vector, el cual vincula la conectividad de los elementos con la numeración global del sistema. Esta flexibilidad en la configuración permite que el código pase de un análisis de pórtico rígido a uno de armadura axialmente solicitada simplemente mediante la gestión de las restricciones y la interpretación selectiva de los desplazamientos calculados.

3.1.6. Condiciones de frontera

El programa requiere la especificación de las condiciones de frontera para solucionar la ecuación matricial del modelo. Este proceso se gestiona computacionalmente a través de un vector de restricciones, donde el usuario ingresa los grados de libertad conocidos debido a las condiciones de apoyo de la estructura.

La transformación de la matriz de rigidez global a la matriz efectiva se realiza mediante una rutina de partición, en la cual se reorganizan los términos del sistema en función de los grados de libertad libres y restringidos. Para llevar a cabo este procedimiento se emplean librerías específicas que permiten manipular matrices de forma eficiente, incluyendo la eliminación simultánea de las filas y columnas asociadas a las restricciones impuestas por las condiciones de apoyo. Esta operación disminuye la dimensión del sistema de ecuaciones, simplificando el proceso de cálculo y permitiendo obtener una solución única y consistente para el vector de desplazamientos correspondientes a los grados de libertad libres.

3.1.7. Desplazamientos

De igual modo, se determinan los desplazamientos y rotaciones nodales de la estructura como resultado del análisis matricial, los cuales constituyen una respuesta fundamental para la evaluación de su comportamiento global. A partir de estos resultados,

es posible inferir las deformaciones de cada elemento, así como la configuración deformada del sistema bajo las cargas aplicadas.

El análisis de desplazamientos permite verificar el cumplimiento de los estados límite de servicio, tales como deflexiones admisibles y control de vibraciones, además de identificar posibles concentraciones de deformación que puedan comprometer el desempeño estructural.

De esta manera, la obtención y evaluación de los desplazamientos contribuyen a una comprensión integral del comportamiento de la estructura, complementando el análisis de esfuerzos y garantizando que el diseño no solo sea seguro desde el punto de vista resistente, sino también adecuado en términos de funcionalidad y servicio.

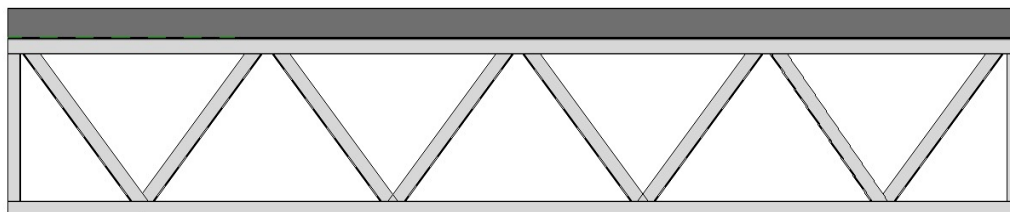
3.1.8. Cargas

Las consideraciones de carga para la estructura incluyen, en primer lugar, el peso propio de la losa que será fundida, el cual se modela como una carga distribuida uniformemente a lo largo de los elementos estructurales que la soportan. Esta carga permanente se determina en función del espesor de la losa, la densidad del material y las características constructivas adoptadas.

Adicionalmente, se consideran las cargas asociadas al uso o destino de la estructura, comúnmente denominadas cargas variables o de servicio, las cuales dependen de la función que cumplirá la edificación o elemento estructural, por ejemplo, uso residencial, comercial o industrial. Estas cargas se establecen de acuerdo con la normativa vigente y se aplican considerando las combinaciones de carga correspondientes para garantizar un diseño seguro.

Por otro lado, pueden incluirse otras acciones relevantes, tales como cargas accidentales, sobrecargas temporales, o efectos adicionales si el análisis lo requiere. La correcta definición y combinación de estas cargas es fundamental para representar de manera realista las condiciones de servicio y asegurar que la estructura cumpla con los criterios de resistencia y desempeño establecidos.

Figura 3-1: Boceto prototipo 2



Fuente: Elaboración propia

A partir de la Figura 3-1 se define la forma en que las cargas se distribuyen sobre el modelo estructural, lo cual permite representarlas adecuadamente en el programa de análisis. En esta etapa se identifican los tipos de carga que actúan sobre el sistema, tales como cargas puntuales, distribuidas o concentradas en nodos específicos, así como su magnitud, dirección y punto de aplicación.

La correcta interpretación de esta distribución resulta fundamental para configurar el modelo numérico de manera coherente con las condiciones reales de sollicitación. Una adecuada asignación de las cargas influye directamente en la precisión de los resultados obtenidos, determinando la respuesta estructural en términos de esfuerzos, deformaciones y posibles zonas críticas. Esto permite lograr un análisis más representativo y confiable del comportamiento del sistema frente a las acciones externas.

3.1.9. Elemento más afectado

Para identificar el elemento más crítico de la estructura, el algoritmo implementa un proceso iterativo en el que se analizan secuencialmente todos los elementos que conforman la armadura. En cada etapa se evalúan los valores de resistencia última y las sollicitaciones internas correspondientes a cada componente, permitiendo realizar una comparación sistemática entre sus capacidades resistentes y las demandas actuantes. Este procedimiento facilita la determinación del elemento que presenta la condición más desfavorable, es decir, aquel cuya relación entre resistencia y esfuerzo aplicado resulta más crítica, constituyéndose como el punto de control para la verificación del diseño estructural.

El criterio de selección se basa en la determinación del elemento que presenta la menor capacidad resistente en relación con las fuerzas actuantes, es decir, aquel que se encuentra más próximo a alcanzar su estado límite último. Este procedimiento permite detectar de manera eficiente el elemento más desfavorable desde el punto de vista estructural.

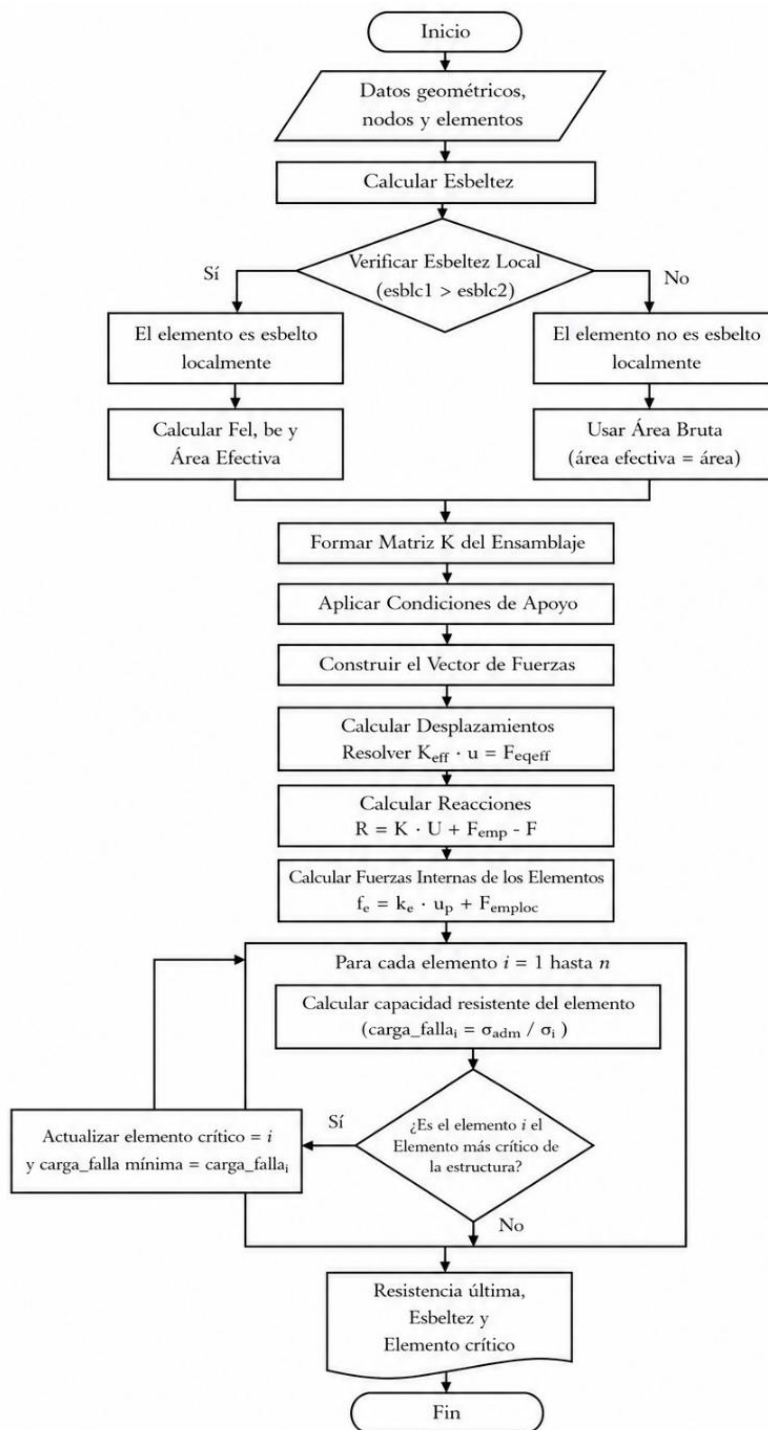
Como resultado, se identifica el elemento crítico que gobierna el diseño, que es fundamental para la toma de decisiones en el dimensionamiento, optimización de secciones y verificación de la seguridad global de la estructura.

3.2. Diagrama de flujo

A continuación, se presenta el funcionamiento del algoritmo implementado en el código, con el propósito de facilitar la comprensión de la lógica y secuencia de cálculo.

La Figura 3-2 ilustra el procedimiento desarrollado para determinar la carga última del sistema, considerando como datos de entrada las características geométricas, las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción, así como las coordenadas correspondientes a nodos y elementos.

Figura 3-2: Diagrama de flujo del código



Fuente: Elaboración propia

En una primera etapa se realiza la verificación de la esbeltez de los componentes, lo que permite clasificar cada elemento como esbelto o no esbelto. Esta distinción resulta clave para seleccionar los coeficientes y las expresiones de cálculo adecuadas. Posteriormente, la información se incorpora en la matriz de rigidez global, donde se

establecen las condiciones de apoyo y se definen los grados de libertad del sistema estructural.

Una vez configurado el modelo, se procede al cálculo de reacciones, fuerzas internas y desplazamientos, obteniendo así la respuesta completa del sistema frente a las acciones aplicadas. Finalmente, se evalúa el comportamiento individual de cada elemento con el fin de identificar aquel que presenta la menor capacidad resistente. Con base en este análisis, el algoritmo determina e imprime la resistencia última, el nivel de esbeltez y el elemento crítico, proporcionando información esencial para la evaluación y optimización del diseño estructural.

3.3. Resultados

Al finalizar la ejecución del algoritmo, se presentan como resultados principales la resistencia última de la armadura, las reacciones en los apoyos y la esbeltez de los elementos estructurales, con el objetivo de proporcionar al usuario una evaluación integral del comportamiento del sistema.

La resistencia última permite identificar la capacidad máxima de carga que puede soportar la estructura antes de alcanzar un estado límite de falla, constituyendo un parámetro clave para la verificación de seguridad. Por su parte, las reacciones en los nodos o apoyos reflejan la distribución de fuerzas hacia las condiciones de soporte, lo que resulta fundamental para el diseño adecuado de cimentaciones y conexiones.

En cuanto a la esbeltez, este parámetro facilita la evaluación de la susceptibilidad de los elementos a fenómenos de inestabilidad, como el pandeo, permitiendo identificar posibles deficiencias en la configuración geométrica. La integración de estos resultados proporciona una visión completa del desempeño estructural, abarcando tanto la capacidad resistente como las condiciones de estabilidad y equilibrio del sistema.

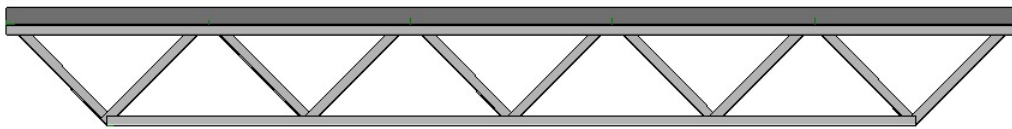
4. Capítulo 4: Diseño y construcción del modelo

Este capítulo presenta en detalle el prototipo que se desarrolla, en función de los materiales seleccionados y del diseño previamente establecido. Se describe de manera precisa componentes, dimensiones, especificaciones técnicas y criterios de ensamblaje, así como, los procedimientos constructivos necesarios para su correcta fabricación. Además, se justifica la elección de cada material y elemento estructural, considerando aspectos de resistencia, funcionalidad, eficiencia y viabilidad técnica, con el fin de garantizar que el prototipo cumpla adecuadamente con los objetivos planteados en el diseño inicial.

4.1. Ensamblaje

En primer lugar, se verifican y validan las dimensiones que se emplean en el prototipo, y los materiales seleccionados, con el propósito de garantizar su viabilidad constructiva. Este proceso implica la revisión detallada de planos, tolerancias y especificaciones técnicas, asegurando que las medidas sean coherentes con el diseño propuesto y compatibles con los procesos de fabricación y ensamblaje.

Figura 4-1: Detallado prototipo 2



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-1 se presenta la configuración adoptada para el modelo estructural, en la cual se define una viga con un espaciamiento uniforme de 30 centímetros entre sus elementos y una longitud total de 1,80 metros. Estas dimensiones responden a criterios de diseño orientados a garantizar un comportamiento adecuado del sistema frente a las solicitaciones previstas. La elección del espaciamiento influye directamente en la distribución de cargas y en la rigidez del conjunto, mientras que la longitud establecida condiciona la magnitud de los esfuerzos internos y las deformaciones que se desarrollan durante el ensayo. La definición precisa de estas variables permite contar con un modelo representativo, facilitando tanto el análisis teórico como la validación experimental del comportamiento estructural.

También, se analiza la disponibilidad, resistencia y adecuación de los materiales elegidos, considerando sus propiedades mecánicas, comportamiento estructural y facilidad de manipulación. Esta etapa preliminar permite prevenir inconsistencias, optimizar recursos y asegurar que el prototipo pueda ejecutarse de manera eficiente, segura y conforme a los requerimientos técnicos establecidos.

Figura 4-2: Ensamblaje de la viga en celosía



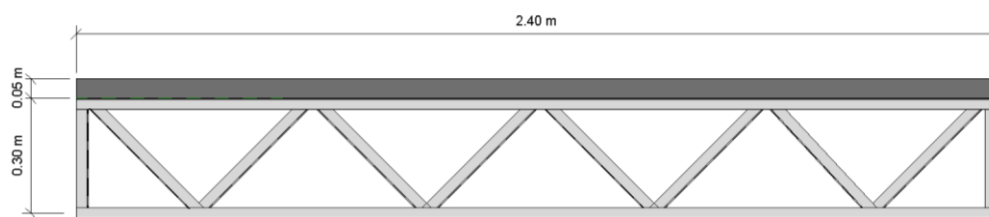
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-2 se presenta la viga completamente ensamblada, que incorpora las solicitaciones previamente definidas. En esta representación se aprecia la disposición final de los elementos estructurales, así como la forma en que las cargas serán aplicadas sobre el sistema.

4.1.1. Diseño del modelo

La viga en celosía presenta dimensiones de 3 m de largo y 30 cm de altura, armada por perfiles de $30\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ correspondientes al ancho y espesor de sus elementos estructurales, respectivamente. Sobre esta estructura se proyecta la fundición de una losa de 3 m de longitud, 1.80 m de ancho y 5 cm de espesor, la cual trabajará de manera conjunta con la viga, conformando un sistema estructural compuesto.

Figura 4-3: Detallado de prototipo 1

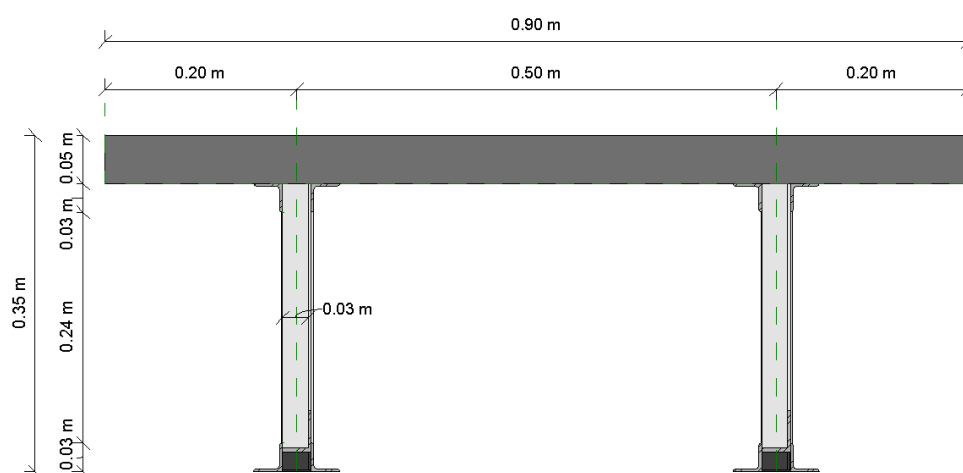


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-3 se presentan las medidas constructivas definidas para el modelo, donde se detallan las dimensiones principales que rigen su fabricación y ensamblaje, incluyendo longitudes, alturas de los distintos elementos que conforman la estructura, lo cual permite establecer con precisión la geometría del sistema y asegurar la correspondencia entre el diseño planteado y su ejecución física, garantizando así una adecuada representación del comportamiento estructural durante el proceso de ensayo y análisis.

La conexión entre ambos elementos se realiza mediante una varilla de 0.10 cm de diámetro, cuya función es garantizar la adecuada transferencia de esfuerzos entre la losa y la viga en celosía. Este elemento de unión permite asegurar que se realice un solo trabajo, mejorando la capacidad resistente y el comportamiento frente a cargas. De esta manera, se busca optimizar la rigidez y estabilidad del sistema estructural, cumpliendo con los criterios de diseño y seguridad previamente establecidos.

Figura 4-4: Vista en sección modelo real

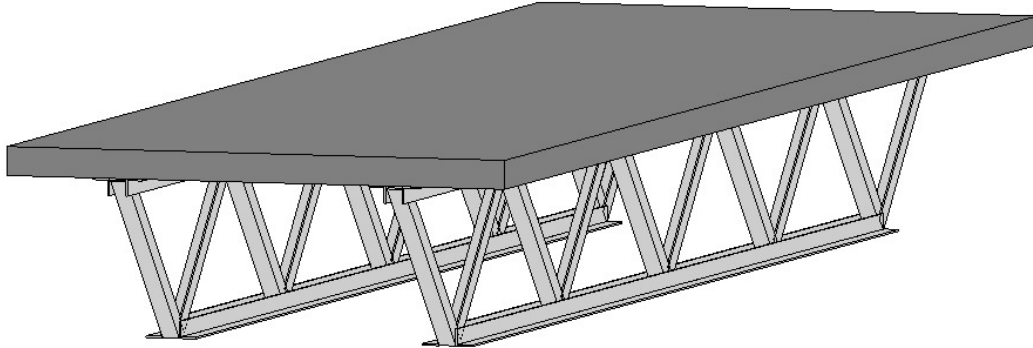


Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-4 muestra en detalle la unión de los perfiles dentro del modelo, junto con las dimensiones que caracterizan esta conexión, permitiendo identificar la disposición

de los elementos, las longitudes de solape, los puntos de fijación y las distancias que influyen en la transferencia de esfuerzos.

Figura 4-5: Vista 3d del modelo final



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-5 muestra una vista en tres dimensiones de los elementos que forman parte de la estructura compuesta, dos vigas en celosía en las que se apoyara la losa de hormigón.

4.1.2. Resistencia última del modelo

Para determinar la resistencia última del modelo, se realiza inicialmente el ingreso de los parámetros geométricos, propiedades mecánicas de los materiales y condiciones de carga en el código de cálculo correspondiente, obteniendo los resultados de la Figura 4-6. A partir de este procesamiento se estima el valor teórico de la carga máxima que el sistema puede soportar antes de alcanzar la falla, considerando los criterios de diseño y los estados límite establecidos.

Posteriormente, se realiza el ensayo experimental de rotura del modelo, mediante la aplicación progresiva de carga controlada. Durante este procedimiento se registran de forma sistemática los valores de carga aplicada y las deformaciones generadas, con el fin de analizar el comportamiento estructural a lo largo de todo el proceso de sollicitación. Finalmente, se comparan los resultados experimentales con los valores teóricos obtenidos en el análisis previo, permitiendo evaluar la precisión del modelo, validar el diseño y determinar el modo de falla presentado.

Figura 4-6: Resultados de diseño de la estructura compuesta

```
Elemento más crítico: 18
Ingrese el ancho en mm: 30
Ingrese el espesor en mm: 2
Ingrese el esfuerzo de fluencia del acero: 2531
Ingrese la longitud no arriostrada en m: 0.42
Area en cm^2: 1.16
Inercia en cm^4: 1.02
El valor de esbeltez es: 15.0
SE PUEDE TRABAJAR
El esfuerzo nominal a compresión es:2530.94 Kg/cm2
La fuerza resistente a compresión es: 2.64 Ton
El momento resistente es: 0.05 Ton*m
El numero de losetas para el fallo es: 3.455115851866492
```

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-6 se definen los materiales empleados para la elaboración del modelo dentro del algoritmo, junto con sus características geométricas, propiedades mecánicas, las cuales se ingresan como parámetros de entrada para la ejecución del programa; a partir de esta información, el sistema procesa los datos y calcula la resistencia última, la capacidad a compresión, la esbeltez entre otros resultados estructurales previamente establecidos en las líneas de código, permitiendo evaluar el comportamiento del modelo, verificando el cumplimiento de los criterios de diseño establecidos.

4.2. Construcción del modelo

La construcción del modelo se inicia con el armado de la viga en celosía, proceso que comprende el ensamblaje cuidadoso de sus elementos longitudinales y diagonales, garantizando la correcta alineación, nivelación y fijación de cada componente. En esta etapa se verifican las dimensiones, ángulos y puntos de unión, con el fin de asegurar que la estructura cumpla con las especificaciones establecidas en el diseño.

Una vez conformada la viga, se procede a la colocación de las varillas de unión, dispuestas estratégicamente para permitir la adecuada transferencia de esfuerzos entre la viga y la losa. Estas varillas se fijan respetando el espaciamiento y el recubrimiento definidos, asegurando así el trabajo conjunto del sistema estructural.

Figura 4-7: Vigas en celosía



Fuente: Elaboración propia

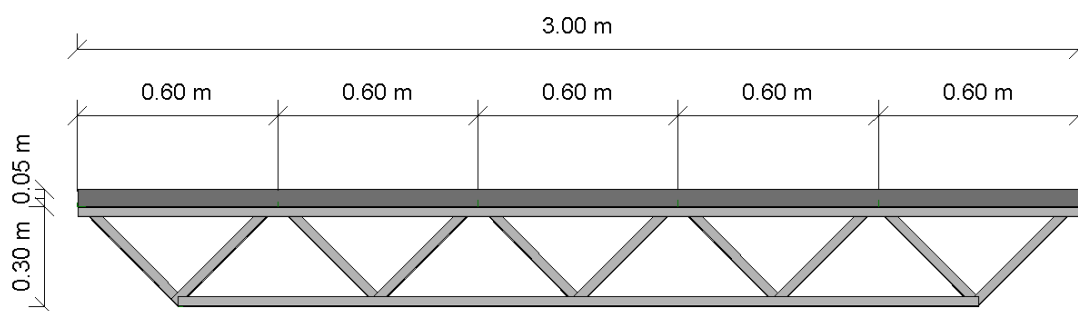
La Figura 4-7 presenta la unión de las dos vigas en celosía, en la cual se define la disposición y el acoplamiento de ambos elementos como etapa previa a la fundición de la losa de hormigón; esta configuración permite establecer una base estructural adecuada para la colocación del encofrado y el vertido del material, garantizando la correcta integración entre los componentes y favoreciendo el trabajo conjunto del sistema durante su comportamiento frente a las cargas.

Finalmente, se realiza la fundición de la losa, vertiendo el material de manera uniforme y controlada para evitar segregaciones o vacíos. Durante este proceso se garantiza una correcta compactación y nivelación, de modo que se logre una adecuada adherencia con la viga en celosía y se obtenga un elemento compuesto con el desempeño estructural previsto en el diseño.

4.2.1. Armado de la viga en celosía

A partir de la modelación computacional, se procede a la construcción del prototipo físico respetando rigurosamente las mismas dimensiones y condiciones definidas en el modelo. Esta correspondencia geométrica y material es fundamental para garantizar que los resultados del ensayo experimental sean comparables con las predicciones teóricas obtenidas en la etapa de análisis.

Figura 4-8: Vista de perfil del modelo real



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-8 se definen las características geométricas de la viga, incluyendo sus dimensiones principales, proporciones y disposición de los elementos que la conforman, lo que permite establecer con precisión los parámetros necesarios para su fabricación; esta información resulta fundamental para guiar el proceso constructivo, asegurar la correcta ejecución del modelo y garantizar que la geometría adoptada responda a los requerimientos estructurales planteados en el diseño.

Durante la construcción, se verifican aspectos como tolerancias dimensionales, disposición de los elementos, propiedades de los materiales y condiciones de apoyo, con el fin de reproducir fielmente el comportamiento previsto en la simulación. De esta manera, se busca asegurar la validez del ensayo, reducir posibles fuentes de error y obtener resultados confiables que permitan evaluar el desempeño estructural del sistema y contrastar el modelo teórico con la respuesta real.

Figura 4-9: Armado del modelo



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-9 se presenta el resultado final del ensamblaje de la viga en celosía, en el cual se materializan las dimensiones previamente definidas en el diseño y obtenidas

mediante el programa de cálculo, mostrando la configuración completa de los elementos estructurales y su disposición dentro del sistema, lo que permite contar con un modelo físico coherente con los parámetros establecidos y adecuado para su evaluación en las etapas posteriores del estudio.

4.2.2. Colocación de las varillas de unión

La varilla de unión se incorpora con el propósito de garantizar la acción compuesta entre los elementos estructurales, permitiendo que la viga en celosía y la losa trabajen de manera solidaria. Su función principal es asegurar la adecuada transferencia de esfuerzos cortantes en la interfaz de contacto, evitando el deslizamiento relativo entre ambos componentes y promoviendo un comportamiento conjunto.

Figura 4-10: Varillas de unión del modelo



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-10 presenta la forma en que se ejecuta la conexión entre la viga en celosía y la losa de hormigón, donde se define el mecanismo de unión que permite la interacción entre ambos elementos; gracias a esta configuración, el sistema estructural actúa como un único miembro resistente, lo que incrementa su rigidez, su capacidad para soportar cargas y su eficiencia global, favoreciendo una distribución más uniforme de tensiones y deformaciones frente a las solicitaciones aplicadas y permitiendo un comportamiento integral coherente con los criterios de diseño establecidos.

4.2.3. Fundición de la losa

El vertido del hormigón se realiza directamente en el encofrado previamente dispuesto, asegurando que la colocación del material sea continua y uniforme a lo largo

de toda la sección. Durante este proceso se controla la altura de caída y la distribución de la mezcla, con el fin de evitar la segregación de los componentes y garantizar una adecuada conformación del elemento estructural.

Figura 4-11: Preparación de losa



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 4-11, se realiza la preparación del encofrado que servirá como molde para la fundición de la losa de hormigón, definiendo su geometría, dimensiones y alineación, lo que permite contener la mezcla durante el vertido y garantizar una adecuada conformación del elemento, asegurando estabilidad durante el proceso constructivo y una correcta ejecución conforme a las especificaciones del diseño.

Figura 4-12: Vertido de hormigón



Fuente: Elaboración propia

Para realizar el vertido del hormigón, como se ilustra en la Figura 4-12, es necesario ejecutar el proceso de manera uniforme y controlada, cuidando la altura de descarga y la distribución de la mezcla dentro del encofrado, con el fin de minimizar la incorporación de aire y evitar la formación de vacíos internos, lo que contribuye a lograr una adecuada compactación, homogeneidad del material y un correcto desempeño durante el desarrollo del experimento.

Posteriormente, se procede a la vibración de la mezcla mediante el equipo, que permite eliminar los espacios vacíos y burbujas de aire atrapadas en el interior del hormigón. Este procedimiento favorece una correcta compactación y homogeneidad del material, mejorando su adherencia con las armaduras y con la viga en celosía.

Todas estas acciones tienen como objetivo reducir la porosidad, incrementar la densidad del hormigón y asegurar que el elemento final alcance las propiedades mecánicas y la resistencia previstas en el diseño, contribuyendo así a un desempeño estructural seguro y eficiente.

Figura 4-13: Enrasado de losa



Fuente: Elaboración propia

Al finalizar el vertido, se procede al enrasamiento de la losa, tal como se muestra en la Figura 4-13, mediante el uso de una regla para distribuir y nivelar el hormigón fresco, eliminando excedentes y corrigiendo irregularidades superficiales, lo que permite obtener una superficie uniforme con el espesor previsto y condiciones adecuadas para las etapas posteriores de acabado y endurecimiento del material.

Figura 4-14: Fundición de losa



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-14 se presenta el resultado final del modelo completamente conformado por sus miembros estructurales, donde se observa la integración de la viga en celosía y la losa de hormigón como un sistema unificado; esta configuración está diseñada para que, en los ensayos posteriores, ambos componentes actúen de manera conjunta, permitiendo una adecuada transmisión de esfuerzos y un comportamiento estructural coherente con los principios de acción compuesta considerados en el diseño.

4.2.4. Curado

El curado del hormigón se llevará a cabo mediante un riego constante y controlado durante un período de 28 días, con el fin de garantizar las condiciones adecuadas de hidratación del cemento. Este proceso es fundamental para que el material desarrolle progresivamente sus propiedades mecánicas y alcance la resistencia prevista en el diseño.

El suministro continuo de humedad evita la evaporación prematura del agua de la mezcla, que podría generar fisuras superficiales, retracción excesiva o una disminución en la resistencia final. Además, un curado adecuado contribuye a mejorar la durabilidad, reducir la porosidad y optimizar la adherencia entre los componentes del sistema estructural.

Al mantener condiciones apropiadas de humedad y, de ser posible, de temperatura, se asegura que el hormigón alcance su resistencia característica a los 28 días, etapa en la cual generalmente se considera que ha desarrollado la mayor parte de su capacidad resistente.

4.2.5. Ensayo cilindros de hormigón

Se elaboran cuatro muestras representativas de la mezcla de hormigón utilizada en el modelo, con el propósito de someterlas a ensayos de compresión en el laboratorio y determinar su resistencia real. Estas probetas verifican que el material cumple con las especificaciones de diseño y de valor confiable de resistencia a compresión para el análisis estructural.

Figura 4-15: Obtención de pesos de muestras de hormigón



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-15 se muestran las cuatro muestras de hormigón ensayadas en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad del Azuay, con el objetivo de comprobar que la dosificación empleada cumple con la resistencia especificada de diseño, $f'c = 280$, para lo cual se realizaron ensayos de compresión que permitieron evaluar el comportamiento del material bajo carga, obteniéndose valores consistentes y representativos, cuyo promedio alcanzó $f'c = 285.27$, confirmando que la mezcla utilizada satisface los requerimientos establecidos y garantiza un desempeño adecuado dentro del modelo estructural desarrollado.

Tabla 4-1: Resistencia a compresión f_c de las muestras

Nº de cilindro	Resistencia a la Compresión <i>MPa</i>	Resistencia a la Compresión <i>kg/cm²</i>	Diámetro <i>cm</i>	Altura <i>cm</i>	Peso <i>kg</i>
1	27.5	280.42	15.49	30.70	13.047
2	27.6	281.44	14.99	30.89	13.060
3	28.3	288.58	15.10	30.21	12.585
4	28.5	290.62	15.08	30.17	12.658
Promedio		285.27			

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4-1 presenta los datos correspondientes a las características geométricas, el peso y la resistencia obtenida de los cilindros de hormigón ensayados, proporcionando información detallada sobre sus dimensiones, peso y comportamiento frente a la compresión, lo que permite analizar la calidad de la mezcla utilizada y contar con parámetros representativos para la evaluación del desempeño del material dentro del modelo estructural.

El procedimiento contempla el vertido de la mezcla en moldes normalizados, asegurando su correcta colocación en capas. Cada capa compactada mediante el varillado manual, a fin de eliminar el aire atrapado y evitar la formación de vacíos internos que puedan alterar los resultados del ensayo. Posteriormente, las probetas se mantienen en condiciones adecuadas de curado, controlando la humedad y temperatura, para garantizar el desarrollo óptimo de la resistencia del hormigón hasta el momento de su ensayo.

Este proceso es fundamental para validar la calidad del material empleado y correlacionar los resultados experimentales con los valores teóricos considerados en el diseño.

Figura 4-15: Colocación de muestras



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-15 se observa la colocación de los cilindros de hormigón en la máquina de ensayo, donde se emplean acoples y dispositivos de sujeción que garantizan su adecuada alineación, estabilidad, permitiendo que la prensa aplique la carga de manera uniforme desde el inicio del ensayo, evitando excentricidades o concentraciones indebidas de esfuerzos que puedan alterar los resultados, lo cual resulta fundamental para obtener mediciones precisas y confiables del comportamiento del material frente a la compresión.

Figura 4-16: Cilindro de hormigón en prensa



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-16 indica el proceso de introducción del cilindro de hormigón en la prensa de ensayo, donde se posiciona cuidadosamente entre las placas de carga con el fin de asegurar su correcta alineación y contacto uniforme, lo que permite que la aplicación de la fuerza se realice de manera controlada y progresiva, garantizando condiciones adecuadas para el desarrollo del ensayo de compresión y la obtención de resultados precisos sobre la resistencia del material.

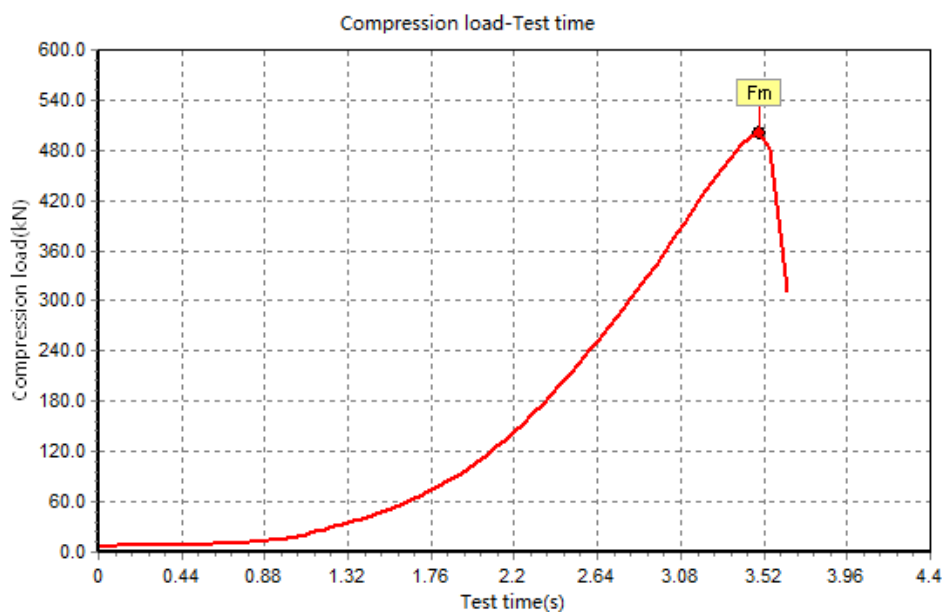
Figura 4-17: Rotura en prensa hidráulica



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 4-17 se presenta el estado del cilindro de hormigón después de su rotura en la prensa hidráulica, donde se evidencian las fracturas generadas por la aplicación de la carga de compresión, permitiendo observar el tipo de falla desarrollado, la distribución de grietas y el comportamiento del material al alcanzar su capacidad resistente, lo que aporta información relevante para la interpretación de los resultados del ensayo y la evaluación del desempeño mecánico de la mezcla utilizada.

Figura 4-18: Curva resistencia a la compresión del hormigón



Fuente: Elaboración propia

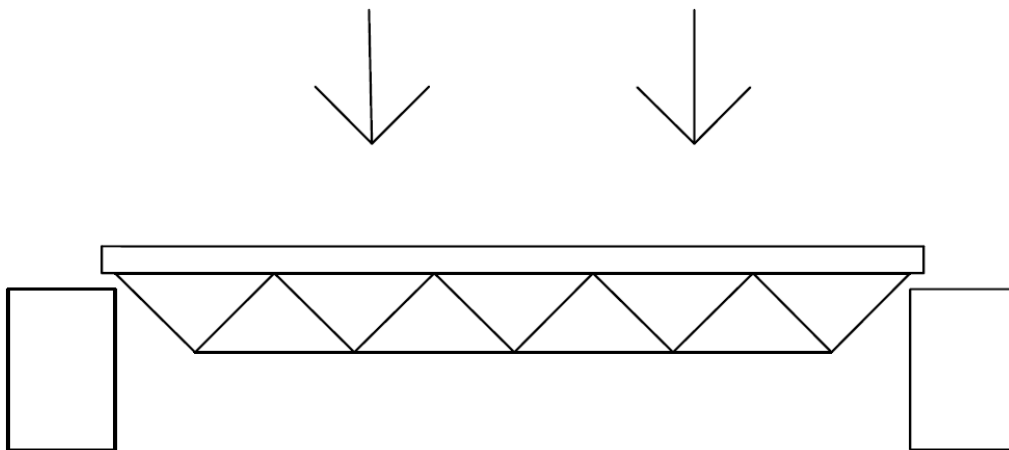
La gráfica carga vs. Tiempo, Figura 4-18 del ensayo de compresión del cilindro de hormigón muestra un comportamiento característico del material, iniciando con una fase de asentamiento donde la carga es baja debido al ajuste del sistema, seguida de un tramo de incremento progresivo que representa el comportamiento elástico, en el cual la relación entre carga y deformación es estable; posteriormente, la curva presenta una tendencia no lineal asociada al desarrollo de fisuras internas que reducen gradualmente la rigidez del material, hasta alcanzar un valor máximo de carga cercano a 490–500 kN, correspondiente a la resistencia última del espécimen; finalmente, se observa una caída abrupta de la carga después del pico, lo que indica una falla frágil típica del hormigón bajo compresión, producida por la propagación rápida de fisuras y la pérdida súbita de capacidad resistente.

La resistencia a la compresión obtenida fue de 288.58 kg/cm^2 , valor que supera la resistencia de diseño establecida en 280 kg/cm^2 , lo que permite concluir que el proceso de dosificación, mezclado y vertido del hormigón se ejecutó de manera adecuada, logrando un material con propiedades mecánicas acordes a los requerimientos planteados y un desempeño satisfactorio dentro de los parámetros establecidos para el estudio.

4.3. Recolección de datos

Se fallar el modelo incrementando la carga aplicada sobre el elemento estructural, se registra de forma sistemática los valores de deformación correspondientes. Este procedimiento establece la relación carga vs. deformación y analiza el comportamiento del sistema a lo largo de las distintas etapas de sollicitación, desde el rango elástico inicial hasta la aproximación al estado de falla.

Figura 4-19: Configuración para prueba en campo



Fuente: Elaboración propia

A partir de la Figura 4-19 se realiza la simulación de la rotura del modelo, el cual se encuentra apoyado sobre dos columnas, con el propósito de analizar su comportamiento estructural ante la aplicación de cargas y determinar el momento en que se produce la flexión significativa, permitiendo identificar la respuesta del sistema, la evolución de las deformaciones y las condiciones críticas que marcan el inicio del colapso.

El modelo se apoya en columnas de 45 cm para simular una estructura simplemente apoyada y comenzar a cargarla de losetas para ver su fallo.

El registro continuo de las deformaciones, mediante instrumentos de medición adecuados, posibilita identificar cambios en la rigidez, la aparición de fisuras y el inicio del comportamiento no lineal del material. De esta manera, se obtiene información fundamental para evaluar el desempeño estructural del modelo, comparar los resultados experimentales con los valores teóricos y determinar con mayor precisión el punto de falla y el modo en que este se produce.

Figura 4-20: Apoyos del modelo construido



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-20 se aprecia que la losa de hormigón se apoya a una altura de 20 cm, condición establecida para iniciar la aplicación de carga sobre el modelo mediante las losetas previamente definidas en el diseño experimental, lo cual permite reproducir de manera controlada el esquema de sollicitación, garantizar una adecuada distribución de esfuerzos y observar el comportamiento estructural del sistema frente al incremento progresivo de las cargas.

4.4. Ensayo del modelo

Para inducir la rotura del modelo estructural, se emplea un procedimiento de carga progresiva mediante la colocación de losas de hormigón de $1\text{ m} \times 1.90\text{ m} \times 17.5\text{ cm}$ previamente construidas, las cuales actúan como cargas gravitacionales adicionales. Estas losas aportan un incremento controlado del peso de 809.64 kg aplicado sobre la estructura, generando un aumento gradual de las sollicitaciones internas y de las deformaciones, particularmente en forma de deflexiones o flechas en los elementos principales.

Durante el proceso, se realiza una estimación previa del número de losas necesarias para alcanzar niveles de carga cercanos al estado límite último, con el fin de una ejecución adecuada del ensayo y evitar incrementos abruptos que puedan comprometer la toma de datos. A medida que se adicionan las losas, se monitorea el comportamiento estructural, registrando la evolución de las deformaciones y la respuesta global del sistema.

El procedimiento culmina con el colapso de la estructura, momento en el cual se reanalizan los datos recopilados experimentales, tales como el peso total aplicado y las

deformaciones alcanzadas. Esta información permite evaluar la capacidad resistente real del modelo, contrastarla con los resultados teóricos y comprender el mecanismo de falla desarrollado.

Para iniciar los ensayos es indispensable realizar el transporte de las losetas de hormigón, tarea que requiere una manipulación cuidadosa y el uso de medios adecuados para evitar daños, fisuras o alteraciones en sus propiedades, garantizando que lleguen en condiciones óptimas al lugar de prueba y que puedan ser utilizadas correctamente en la aplicación de cargas sobre el modelo estructural.

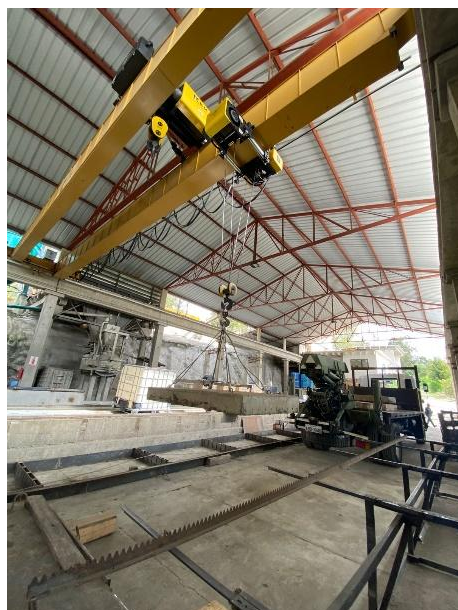
Figura 4-21: Loseta modelo



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-21 se observan los distintos modelos de losetas que serán utilizados durante el ensayo, donde se identifican sus características geométricas y físicas, las cuales han sido definidas previamente para garantizar una adecuada aplicación de cargas sobre el sistema estructural, permitiendo así reproducir condiciones controladas y obtener resultados representativos del comportamiento del modelo.

Figura 4-22: Grúa de transporte



Fuente: Elaboración propia

Para iniciar la aplicación de carga sobre el modelo, en la Figura 4-22 se muestra el transporte de las losetas mediante una grúa mecánica, la cual permite elevarlas y ubicarlas con precisión sobre la losa de hormigón, garantizando una correcta distribución y posicionamiento de cada elemento, lo que resulta esencial para asegurar una transmisión uniforme de las cargas y un desarrollo adecuado del ensayo estructural.

4.4.1. Primer ensayo

A continuación, se presenta el primer ensayo de compresión, en el cual la carga se ubica a 0.73 m del apoyo, establecida en metros, con el propósito de evaluar la respuesta estructural del modelo frente a una condición de sollicitación definida, permitiendo analizar la distribución de esfuerzos, el desarrollo de deformaciones y la influencia de la posición de la carga en el comportamiento global del sistema.

Figura 4-23: Ensayo 1 con la loseta 1



Fuente: Elaboración propia

Al aplicar la primera carga sobre el modelo, se evidencia en la Figura 4-23 que la estructura no presenta flexión apreciable ni deformaciones visibles, lo que indica que el sistema se mantiene dentro de un comportamiento inicial estable y en el rango elástico, respondiendo adecuadamente a la sollicitación sin manifestar alteraciones significativas en su geometría ni indicios de daño estructural.

Figura 4-24: Ensayo 1 con la loseta 2



Fuente: Elaboración propia

Durante la segunda aplicación de carga en la Figura 4-24 el modelo mantiene un comportamiento estable, sin presentar deformaciones significativas ni signos de daño, lo

que indica que la estructura continúa respondiendo dentro del rango elástico, conservando su rigidez inicial y una adecuada distribución de esfuerzos frente al incremento de la sollicitación.

Figura 4-25: Ensayo 1 con la loseta 3



Fuente: Elaboración propia

En la tercera aplicación de carga, como se muestra en la Figura 4-25, el modelo comienza a presentar una ligera flexión, evidenciando el inicio de deformaciones visibles; sin embargo, esta variación es aún reducida y proporcional al incremento de la sollicitación, lo que permite concluir que la estructura continúa comportándose dentro del rango elástico, manteniendo su capacidad de recuperar la forma original al retirar la carga y sin manifestar daños permanentes.

Figura 4-26: Ensayo 1 con la loseta 4



Fuente: Elaboración propia

Al incorporar una cuarta loseta como incremento de carga, Figura 4-26, el modelo presenta una deformación más pronunciada en comparación con el estado previo,

evidenciando un aumento en la respuesta estructural frente a la sollicitación aplicada, lo que permite inferir que los nodos de la viga comienzan a experimentar de manera más significativa la transmisión de esfuerzos, reflejando una mayor participación de los elementos en la distribución de cargas dentro del sistema.

Figura 4-27: Ensayo 1 con la loseta 4 más 1 bloque de hormigón



Fuente: Elaboración propia

Para concluir el primer ensayo, tal como se encuentra la Figura 4-27, se incorporaron dos cargas adicionales correspondientes a bloques de hormigón, lo que generó un incremento notable en las deformaciones y una mayor flexión del modelo, evidenciando una respuesta más exigida del sistema estructural frente a la sollicitación aplicada; de igual manera, se pudo establecer que, al someterse a una carga distribuida con separación 1.585 m de la luz, el modelo mantiene su capacidad resistente, demostrando un comportamiento adecuado bajo esta condición de carga.

4.4.2. Segundo ensayo

Posterior a la ejecución del primer ensayo, se llevó a cabo una segunda prueba en la cual las cargas fueron ubicadas a una distancia específica respecto a los apoyos, con el propósito de evaluar la respuesta del modelo bajo una condición distinta de sollicitación, permitiendo analizar la influencia de la posición de la carga en la distribución de esfuerzos, las deformaciones generadas y el comportamiento global del sistema estructural.

Figura 4-28: Ensayo 2 con la loseta 1



Fuente: Elaboración propia

En este ensayo, como se muestra en la Figura 4-28, se evidencia que el modelo no presenta deformaciones apreciables durante la aplicación inicial de carga, manteniendo su configuración original y un comportamiento estable, lo que indica que la estructura permanece dentro del rango elástico y es capaz de soportar la sollicitación aplicada sin manifestar daños ni alteraciones significativas en su respuesta.

Figura 4-29: Ensayo 2 con la loseta 2



Fuente: Elaboración propia

Al aplicar la segunda carga, como se aprecia en la Figura 4-29, la estructura mantiene su configuración sin variaciones visibles, sin evidenciar deformaciones ni cambios en su geometría, lo que refleja un comportamiento estable frente al incremento de la sollicitación, conservando su integridad y sin manifestar indicios de daño o deterioro en sus elementos.

Figura 4-30: Ensayo 2 con la loseta 3



Fuente: Elaboración propia

En el tercer ensayo, como se aprecia en la Figura 4-30, el aumento de la carga genera una deformación leve en el modelo a la sollicitación aplicada, evidenciando una ligera variación en la respuesta estructural; sin embargo, no se observan daños permanentes, lo que indica que el sistema aún se mantiene dentro del rango elástico y conserva la capacidad de recuperar su forma original al retirar la carga.

Figura 4-31: Ensayo 2 con la loseta 4



Fuente: Elaboración propia

Al posicionar la cuarta carga sobre la losa, en la Figura 4-31 se aprecia que la viga comienza a presentar una flexión más pronunciada en comparación con el estado anterior,

demostrando que en esta adición la respuesta estructural frente a la solicitación aplicada, lo que indica una mayor exigencia del sistema y una participación más marcada de sus elementos en la absorción y distribución de los esfuerzos.

Figura 4-32: Ensayo 2 con la loseta 4 más 1 bloque de hormigón



Fuente: Elaboración propia

Para finalizar el ensayo se colocaron dos bloques adicionales de hormigón, Figura 4-32 lo que adicionalmente generó una deformación más notable y un mayor grado de flexión en la estructura, mostrando una respuesta con mayor demanda en el sistema; a pesar de ello, el modelo mantuvo su capacidad resistente sin presentar fallas críticas, lo que permite concluir que soporta adecuadamente las condiciones de carga impuestas en el laboratorio y confirma la relación del diseño con los resultados obtenidos mediante el algoritmo desarrollado.

Figura 4-33: Deformación de la estructura en el ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-33 se aprecia que la viga en celosía presenta una deformación de 2.7 cm por flexión, lo que permite que el hormigón contribuya a la resistencia del conjunto frente a este tipo de demanda, favoreciendo el trabajo conjunto entre ambos materiales; esta interacción mejora el desempeño estructural del sistema, mejore su capacidad portante y optimiza la transmisión de esfuerzos en la zona de unión, generando un comportamiento más eficiente y estable.

4.5. Discusión

Según Carrasco (2010) la resistencia última de los elementos sometidos a flexión se calcula en normativas como el ACI mediante factores de mayoración de carga y disminución de la resistencia. Al incorporar este proceso de diseño en el código computacional se logra optimizar el proceso de diseño permite mejorar los tiempos de cálculo prediciendo de forma teórica la realidad.

Además, al integrar ambos materiales en un sistema compuesto, se aprovecha la interacción entre el hormigón y el acero. Esta unión permite que el hormigón absorba eficazmente los esfuerzos de compresión en la fibra superior, mientras que el acero de la celosía absorbe los esfuerzos de tracción, optimizando así el comportamiento del modelo frente a la flexión. Esta configuración estructural incrementa la rigidez del elemento, además de mejorar su ductilidad y capacidad de carga, garantizando un desempeño más eficiente en comparación con el uso de materiales aislados.

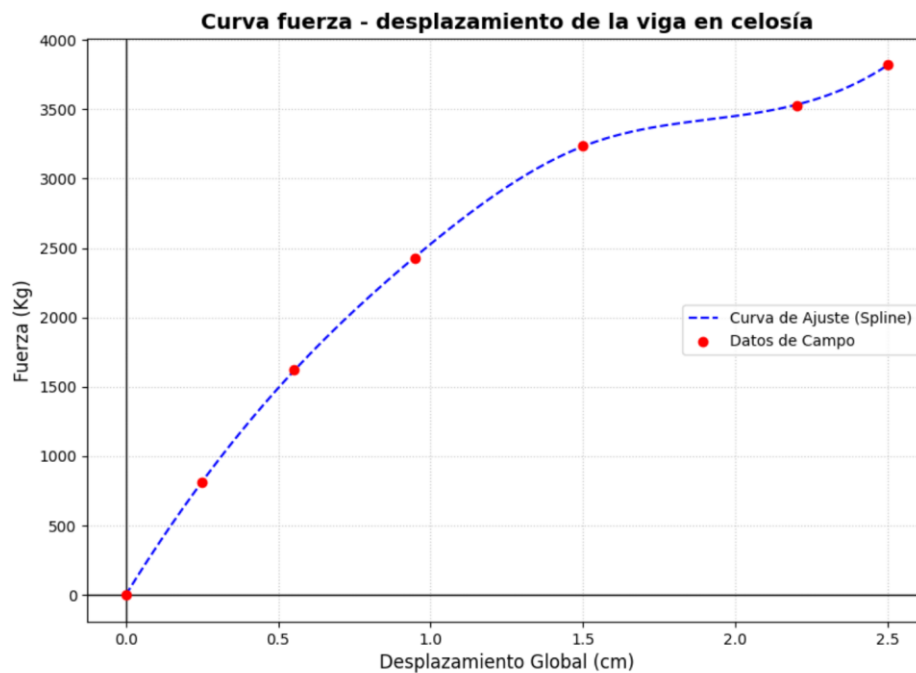
4.5.1. Resistencia última del modelo vs. calculada mediante el software

Aunque no se registraron fisuras visibles en el hormigón durante el ensayo, es razonable asumir que el material en la zona traccionada ya se encontraba fisurado en etapas avanzadas de carga, dada la naturaleza frágil del concreto ante esfuerzos de tensión. Por tanto, la transferencia de esfuerzos permite inferir que los componentes más críticos del sistema son los elementos de acero que conforman la celosía, particularmente aquellos miembros diagonales sometidos a compresión, los cuales son susceptibles a fallos por inestabilidad o pandeo.

Por otro lado, el modelo computacional desarrollado en el software de diseño predijo que el sistema compuesto resistiría una fuerza interna de 2.64 Tn en cada uno de los elementos diagonales de la viga en celosía. Esta estimación teórica fue comprobada exitosamente en la fase experimental al someter la estructura a una carga total de 3.82 Tn, configurada mediante la adición de cuatro losetas y dos bloques macizos de hormigón. Este resultado no solo valida la fiabilidad del modelo numérico empleado, sino que también evidencia un adecuado desempeño estructural y una reserva de capacidad de carga en el sistema compuesto antes de alcanzar el colapso.

4.5.2. Curva Fuerza vs. Desplazamiento

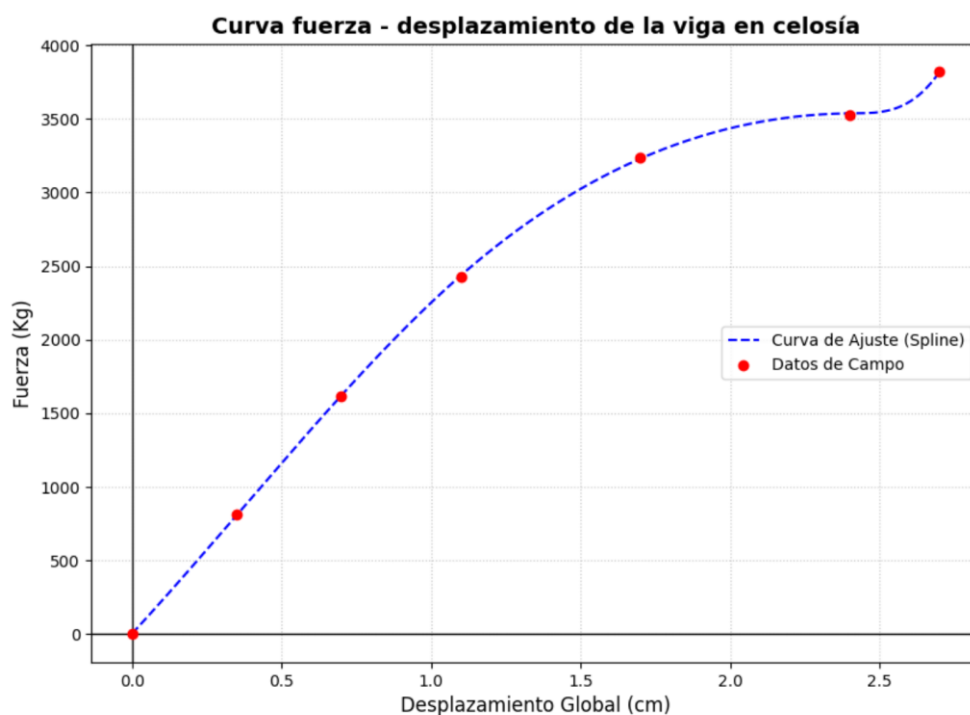
Figura 4-34: Curva fuerza vs desplazamiento ensayo 1



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-34, correspondiente al primer ensayo, se aprecia que al incrementar la distancia entre apoyos el modelo presenta un comportamiento predominantemente elástico en las etapas iniciales de carga, manteniendo una respuesta estable; no obstante, al incorporar la cuarta loseta se produce una disminución en la rigidez del sistema, reflejada en la curva mediante una reducción en la pendiente, lo que indica una mayor deformabilidad y el inicio de una respuesta estructural menos rígida frente al incremento de la carga; en comparación con la curva del hormigón, donde el rango elástico siempre es en menor proporción, se puede concluir que la integración con el acero mejora significativamente el comportamiento a flexión, aportando mayor capacidad de deformación y un desempeño estructural más eficiente del conjunto.

Figura 4-35: Curva fuerza vs desplazamiento ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-35, correspondiente al segundo ensayo con la carga ubicada próxima al centro de la luz, presenta una mayor respuesta en términos de deformación del modelo; al igual que en la Figura 4-34, al incorporar la cuarta loseta se observa una reducción en la rigidez, reflejada en la variación de la pendiente de la curva; a diferencia del primer ensayo, en el que la carga se encuentra en otra posición, este caso la curva mantiene características similares en su comportamiento, lo que indica una respuesta consistente del sistema estructural frente a distintas configuraciones de carga.

El análisis de las curvas de fuerza versus desplazamiento de la Figura 4-34 y de la Figura 4-35 revela distintas etapas en el comportamiento estructural del modelo. En una primera fase, ambas gráficas evidencian un rango elástico lineal bien definido hasta alcanzar una carga aproximada de 2400 a 2500 kg, con desplazamientos cercanos a 1.0 cm, lo que denota una rigidez inicial estable del sistema compuesto frente a las primeras solicitaciones. Además, es fundamental destacar la notable similitud en la trayectoria de ambas curvas, lo cual confirma la fiabilidad del experimento.

Superado el límite elástico, y enfocándose en la parte final de las curvas, se observa una reducción significativa de la rigidez del sistema. Esto queda en evidencia al registrar grandes incrementos de desplazamiento (llegando hasta los 2.7 cm) con incrementos relativamente pequeños de carga, un fenómeno que es consistente con un proceso de plastificación progresiva. Sin embargo, el ligero aumento y posterior estabilización de la carga en el tramo final (alcanzando los 3800 kg) no corresponde estrictamente al comportamiento típico de fluencia de un elemento metálico aislado, sino a la interacción del sistema compuesto.

Esto puede explicarse por la eficiente redistribución de esfuerzos entre los distintos componentes (acero estructural, losa de hormigón y conectores de cortante), así como por la capacidad remanente del hormigón sometido a compresión y la participación de elementos que aún no han plastificado dentro de la celosía. En conjunto, estos resultados sugieren que el sistema compuesto no experimenta una falla frágil tras la plastificación inicial del acero, sino que presenta una respuesta progresiva con una elevada capacidad de redistribución de esfuerzos, consolidando así un comportamiento estructural altamente dúctil y seguro.

Conclusiones

En conclusión, la resistencia última de las estructuras compuestas conformadas por vigas en celosía y losas de hormigón se determinó mediante el desarrollo e implementación del código computacional basado en el análisis matricial del sistema estructural. Los resultados evidenciaron que el comportamiento de la estructura estuvo condicionado por el pandeo global a compresión, siendo la diagonal correspondiente al elemento 18 el miembro que alcanzó el estado crítico de inestabilidad. La evaluación de sus parámetros de esbeltez conforme a los criterios establecidos en la normativa American Institute of Steel Construction (AISC-360) confirmó que este fenómeno constituye el modo de colapso determinante del sistema. En consecuencia, la capacidad última de la viga en celosía compuesta quedó limitada por la carga asociada a la falla de dicho elemento, validando la efectividad del modelo computacional.

La interacción resistente entre el hormigón y el acero, el primero trabaja predominantemente a compresión, contribuyendo a la rigidez y estabilidad del sistema al resistir los esfuerzos compresivos generados por las cargas aplicadas; y, el segundo, se encarga de resistir los esfuerzos de tracción, aprovechando su elevada capacidad resistente y ductilidad, lo que permite un adecuado desempeño frente a sollicitaciones que inducen deformaciones significativas. La acción compuesta garantiza mediante los conectores de corte que se transmitan los esfuerzos cortantes en la interfaz acero–hormigón, permitiendo que ambos materiales trabajen de forma solidaria. Estos elementos sometidos a fuerzas paralelas al plano de contacto son esenciales para evitar el deslizamiento relativo, asegurando así un comportamiento conjunto eficiente y el desarrollo pleno de la capacidad resistente de la sección compuesta.

El desarrollo del código computacional permitió optimizar el proceso de análisis y diseño estructural por automatización de los cálculos, considerando como parámetros de entrada las dimensiones de los elementos y las coordenadas nodales que definen la geometría del sistema; a partir de esta información, el algoritmo determina propiedades como la esbeltez y los momentos de inercia, y ejecuta el análisis estructural para obtener las fuerzas internas, reacciones en los apoyos y demás variables relevantes, facilitando una evaluación integral del comportamiento de la estructura en pro de una mejora de la eficiencia, precisión y confiabilidad del proceso de diseño para el modelo considerado.

La construcción del modelo permitió verificar con precisión las dimensiones definidas en el diseño e identificar las posibles restricciones constructivas que pueden presentarse durante su ejecución, tales como dificultades de ensamblaje, tolerancias, accesibilidad o comportamiento de los materiales, lo que brinda información clave para ajustar detalles del proceso, mejorar la secuencia de fabricación y lograr un uso más eficiente de los recursos, contribuyendo así a optimizar tanto el procedimiento constructivo como el aprovechamiento de los materiales empleados.

La resistencia última estimada mediante el programa fue de 2.64 toneladas correspondiente a la carga de diseño para las diagonales a compresión, mientras que en las pruebas de campo el modelo alcanzó una carga de 3.82 toneladas, lo que permite establecer una referencia clara entre el comportamiento teórico y experimental del sistema; esta comparación demuestra que la herramienta computacional constituye un apoyo eficaz para el diseño, al ofrecer una estimación confiable del desempeño de estructuras compuestas por vigas de acero y losas de hormigón, permitiendo optimizar los criterios de dimensionamiento y aportar mayor eficiencia en el proceso de diseño estructural.

Finalmente, al construir la curva Fuerza vs. Desplazamiento del modelo físico para ambos ensayos, se aprecia con claridad que la interacción entre los dos materiales mejora el comportamiento a flexión del sistema, ya que el acero aporta capacidad para resistir esfuerzos de tracción y contribuye a un desempeño más eficiente del conjunto; se observa que, al alcanzar niveles de carga superiores al cincuenta por ciento de la carga de diseño, la rigidez del sistema comienza a reducirse, lo que se refleja en la variación de la pendiente de la curva y en un aumento más pronunciado de las deformaciones, comportamiento asociado al desarrollo progresivo de fisuración en el hormigón y a una mayor participación del acero en la respuesta estructural.

Recomendaciones

Debido a la distribución de esfuerzos en el modelo, se recomienda plantear el diseño de manera que los elementos diagonales sean más robustos con dimensiones mayores que los elementos de las cuerdas superior e inferior, esto para evitar una falla repentina por pandeo en las diagonales a compresión y mejorar la ductilidad del mismo.

Para incrementar la versatilidad de la herramienta, se sugiere incorporar matrices de masa para la realización de análisis dinámicos tales como modales o espectrales, permitiendo así la evaluación del sistema compuesto ante sollicitaciones sísmicas conforme a la NEC.

Además, para futuras líneas de investigación se recomienda investigar a fondo como la falla de los conectores de cortante influyen en la pérdida de la acción compuesta entre las vigas y la losa para predecir el comportamiento estructural previo a la falla de la construcción de un nuevo modelo.

Referencias

- ACI 116. (2019). *Terminología del cemento y el hormigón (ACI 116)*.
- ACI 201.2R-16. (2016). *Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-16)*.
- ACI 209R. (1992). *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (ACI 209R-92)*.
- ACI 211. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*.
- ACI 216R. (1989). *Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements (ACI 216R-89)*.
- ACI 225. (2019). *ACI 225R-19 Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements. Technical Documents*.
- ACI 302.1R. (2015). *Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15)*.
- ACI 308. (2019). *Guide to Curing Concrete (ACI 308R-16)*.
- ACI 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*.
- AISC 341. (2022). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (AISC 341-22)*.
- AISC 360. (2022). *AISC 360-22 Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction*.
- Alvarado Acuña, L., Iturra Molina, R., Gómez Valdés, M., & Acevedo Acevedo, S. (2023). Impacto de la metodología BIM en la gestión de proyectos de construcción. *Tecnología En Marcha*, 36(7), 66–77.
- ASTM A36. (2019). *Standard Specification for Carbon Structural Steel (ASTM A36/A36M-19)*.
- ASTM A370. (2024). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products (ASTM A370-24)*.
- ASTM A572. (2021). *Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel (ASTM A572/A572M-21)*.

ASTM A615. (2022). *Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement (ASTM A615/A615M-22)*.

ASTM A706. (2022). *Standard Specification for Deformed and Plain Low-Alloy Steel Bars for Concrete Reinforcement (ASTM A706/A706M-22a)*.

ASTM A992. (2022). *Standard Specification for Structural Steel Shapes (ASTM A992/A992M-22)*.

ASTM C33. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C33/C33M-18)*.

ASTM C39. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C39/C39M-21)*.

ASTM C40. (2020). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete (ASTM C40/C40M-20)*.

ASTM C78. (2022). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) (ASTM C78/C78M-22)*.

ASTM C127. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate (ASTM C127-15)*.

ASTM C128. (2022). *ASTM C128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International.*

ASTM C131. (2020). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine (ASTM C131/C131M-20)*.

ASTM C136. (2019). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (ASTM C136/C136M-19)*.

ASTM C142. (2017). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates (ASTM C142/C142M-17)*.

ASTM C143. (2020). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (ASTM C143/C143M-20)*.

ASTM C150. (2022). *ASTM C150/C150M-22 Standard specification for portland cement. American Society for Testing and Materials (ASTM).*

- ASTM C191. (2021). ASTM C191: Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. *ASTM International*.
- ASTM C295. (2019). *Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete (ASTM C295/C295M-19)*.
- ASTM C469. (2022). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (ASTM C469/C469M-22)*.
- ASTM C496. (2017). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C496/C496M-17)*.
- ASTM C642. (2021). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete (ASTM C642-21)*.
- ASTM C944. (2019). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method (ASTM C944/C944M-19)*.
- ASTM C1202. (2022). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (ASTM C1202-22)*.
- ASTM E23. (2023). *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (ASTM E23-23a)*.
- Baque Galarraga, E. J., Asifuela Cisneros, C. P., Barba Barba, K. J., & Bustamante Sánchez, S. I. B. (2024). Análisis de la capacidad de absorción de vibraciones y sismo-resistencia de las estructuras Steel Framing. *Revista Social Fronteriza*, 4(4), e44350–e44350.
- Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2013). *Mecánica de materiales* (7th ed.). McGraw Hill Mexico.
- Cárdenas, F., Villegas, J., Hernández Rodríguez, L. T., Guaminga, E., & Herrera, M. (2024). Estudio Experimental de Conectores Tipo Ángulo en Vigas Compuestas de Acero y Hormigón. *Revista Politécnica*, 53(2), 59–68. <https://doi.org/10.33333/rp.vol53n2.06>
- Carrasco, F. (2010). *Hormigón pretensado: diseño de elementos isostáticos*. Universidad de Cuenca. Facultad de ingeniería.

- Díaz-Kovalenko, I. E., Larrea-Rosas, K. P., & Barros-Naranjo, J. (2023). El sector de la construcción en la economía ecuatoriana, importancia y perspectivas. *Ciencias Sociales y Económicas*, 6(2), 58–69. <https://doi.org/10.18779/csye.v6i2.598>
- Elchalakani, M., Ayough, P., & Yang, B. (2021). Single Skin and Double Skin Concrete Filled Tubular Structures: Analysis and Design: A volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. In *Single Skin and Double Skin Concrete Filled Tubular Members: Analysis and Design*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85596-9.01001-5>
- García, R. M. (2021). *Evaluación del uso de áridos reciclados de hormigón en la fabricación de hormigones autocompactantes y morteros de cemento* [Tesis doctoral]. Universidad de León.
- Giménez Carbó, E., Torres Remón, R., & Serna Ros, P. (2018). *Tiempos de fraguado, consistencia y propiedades mecánicas de hormigón de ultra alta resistencia con fibras (UHPRC)*.
- González, M. ., & Rodríguez, L. (2023). Desempeño estructural de sistemas compuestos acero-concreto en edificaciones sismorresistentes. *Revista Ingeniería y Construcción*, 38(2), 115–130. <https://doi.org/https://doi.org/10.4067/S0718-50732023000200115>
- Holguín, C. D., Zambrano, M. F., & Loor, B. L. (2025). Gestión empresarial e innovación: incidencia en sociedades por acciones simplificadas, sector construcción de Ecuador. *Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales*, 27(3), 877–885. <https://doi.org/10.36390/telos273.08>
- INEN 0694. (2013). *NTE INEN 0694: Hormigón de cemento hidráulico. Terminología*.
- INEN 872. (2011). *Áridos para hormigón. Requisitos (NTE INEN 872)*.
- INEN 2617. (2012). *Hormigón de cemento hidráulico. Agua para mezcla. Requisitos (NTE INEN 2617)*. <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- INEN-ISO 9597. (2012). *Cementos. Métodos de ensayo. Determinación del tiempo de fraguado y de la expansión (NTE INEN-ISO 9597)*.

- Johnson, R. P. (2018). *Composite Structures of Steel and Concrete: beams, slabs, columns and frames for buildings* *Composite Structures of Steel and Concrete: beams, slabs, columns and frames for buildings*. John Wiley & Sons.
- Kassimali, A., Galán, A. A. A., & Mellado, J. F. H. (2015). *Análisis estructural*. Cengage Learning.
- León González, J. (2005). *Notas para una historia del hormigón estructural*.
- Lin, W., & Yoda, T. (2017). Truss Bridges. *Bridge Engineering*, 137–153. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804432-2.00008-6>
- Martínez, J. A., & Herrera, F. G. (2022). Estabilidad de elementos compuestos acero-concreto frente a cargas de compresión: análisis y recomendaciones de diseño. *Revista Ingeniería Estructural*, 40(1), 45–60.
- Muñoz Pérez, S. P., Portocarrero Bustamante, J. P., & Nunton Carrasco, J. A. (2022). Una revisión del comportamiento mecánico del concreto con adición de fibras de acero de neumáticos reciclados. *Ingeniería y Competitividad*, 24(2). <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11741>
- Primicias. (2024, November 28). Inmobiliarias de Cuenca ponen sus ojos en sectores con potencial turístico. *Primicias*.
- Quiroga, F. (2018). *Diseño estructural de sistemas compuestos acero-hormigón* [Tesis de grado, Universidad de Guayaquil]. https://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/32602/1/QUIROGA_FLAVIO_TRABAJO_TITULACION_ESTRUCTURAS_ENERO_2018.pdf
- Quispe Paca, A. J. (2015). *Análisis matricial de estructuras*. Biblioteca Hernán Malo González.
- Roque-Villalonga, G., & Camaraza-Medina, Y. (2022). Modelación empírica de la conductividad térmica para un grupo de aceros. *DYNA*, 89(224), 156–164.
- Sornoza-Tituano, J. A., Zambrano-Sacón, R. W., Caballero-Giler, B. I., & Veliz-Párraga, J. F. (2022). Ciencias Técnicas y Aplicadas Artículo de Revisión. *Polo Del Conocimiento: Revista Científico-Profesional*, 7(4). <https://doi.org/10.23857/pc.v7i4.3875>

Vizuet Romo, E. A. (2014). *Diseño de edificios de acero con elementos compuestos*
[Escuela Politécnica Nacional (EPN)].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8334>

WOTAchem. (2025). *¿Cuánto tiempo tarda el concreto en curar?*
<https://wotaichem.com/es/cuanto-tiempo-tarda-el-concreto-en-curar/>

Anexos

Anexo A

Armado del molde para la fundición de la losa de hormigón



Anexo B

Ensayo de los cilindros de hormigón



Anexo C

Reporte del primer cilindro de hormigón

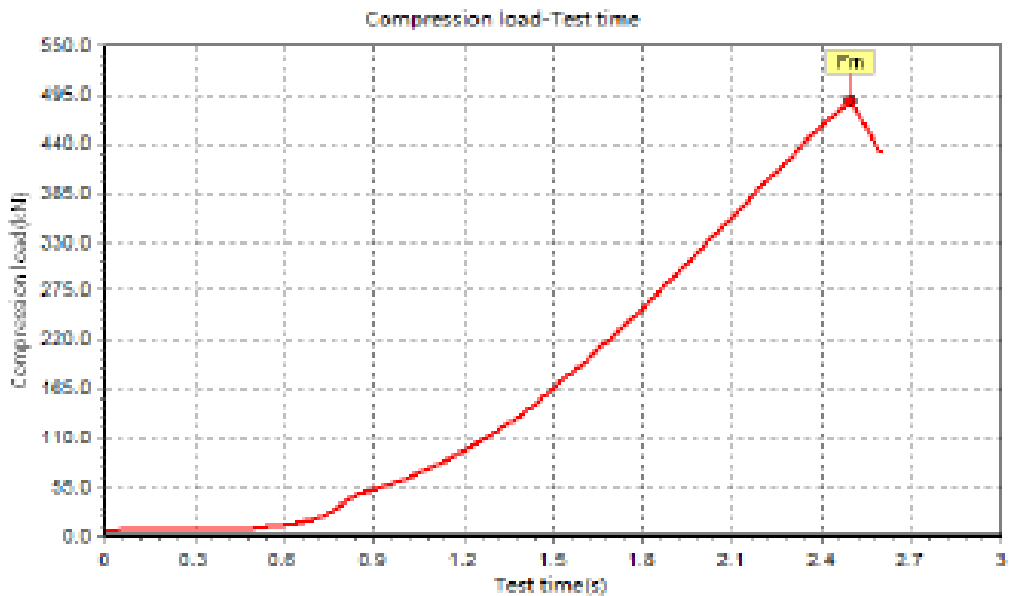
Concrete compression test report

Test number	distfkp	Test date	4/21/2026 15:38
Test unit		Age	28
Strength grade	25MPa	Conversion coefficient	1
Size (mm)	150*300	Area(mm ²)	17671.5

Result data

Serial number	Failure load (kN)	Compressive strength (MPa)	Effective load(kN)	Effective strength (MPa)
1	486.32	27.5	Invalid results	Invalid results
2				
3				

Detection basis	GB/T 50081-2002
-----------------	-----------------



Remarks			
Person in charge		To examine	

Anexo D

Reporte del segundo cilindro de hormigón

Concrete compression test report

Test number	diskq		Test date	4/21/2026 15:41	
Test unit			Age	28	
Strength grade	25MPa		Conversion coefficient	1	
Size (mm)	150*300		Area(mm²)	17671.5	
Result data					
Serial number	Failure load (kN)	Compressive strength (MPa)	Effective load(kN)	Effective strength (MPa)	
1	488.6	27.6	Invalid results	Invalid results	
2					
3					
Detection basis	GB/T 50081-2002				
<p>Compression load-Test time</p>					
Remarks					
Person in charge			To examine		

Anexo E

Reporte del tercer cilindro de hormigón

Concrete compression test report

Test number	disfir		Test date	4/21/2026 19:45	
Test unit			Age	28	
Strength grade	25MPa		Conversion coefficient	1	
Size (mm)	150*300		Area(mm²)	17671.5	
Result data					
Serial number	Failure load (kN)	Compressive strength (MPa)	Effective load(kN)	Effective strength (MPa)	
1	500.84	28.3	Invalid results	Invalid results	
2					
3					
Detection basis	GB/T 50081-2002				
<p>Compression load-Test time</p>					
Remarks					
Person in charge			To examine		

Anexo F

Reporte del cuarto cilindro de hormigón

Concrete compression test report

Test number	disks		Test date	4/21/2026 13:46	
Test unit			Age	28	
Strength grade	25MPa		Conversion coefficient	1	
Size (mm)	150*300		Area(mm ²)	17671.5	
Result data					
Serial number	Failure load (kN)	Compressive strength (MPa)	Effective load(kN)	Effective strength (MPa)	
1	504.04	28.5	Invalid results	Invalid results	
2					
3					
Detection basis	GB/T 50081-2002				
<p>Compression load-Test time</p>					
Remarks					
Person in charge			To examine		

Anexo G

Traslado de las losetas

