



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Comparación técnica-económica de diafragmas en acero y hormigón
para puentes con vigas de acero**

Trabajo previo a la obtención del grado académico de:

INGENIERO CIVIL

Autores:

Luis Guillermo Encalada Bernal

Karen Gabriela Morales Mena

Tutor:

José Vázquez Calero

Co-tutor:

Mateo Narváez

Cuenca-Ecuador

2024

DEDICATORIA

Con mucho amor para mis padres, Marcelo y Paulina, quienes me han apoyado incondicionalmente para alcanzar este logro. Sus sacrificios invaluable me han enseñado que los sueños se logran con esfuerzo, determinación y disciplina.

A mi querida hermana, Paulina, quien ha sido mi confidente y con su ejemplo de valentía y fortaleza me ha motivado a enfrentar cualquier desafío. Su presencia, su amor y su risa contagiosa han hecho más ameno este arduo camino.

Con gratitud a mis abuelitos, Luis César y Mariana, quienes desde el primer día me apoyaron constantemente para no rendirme y cumplir esta meta. Sus palabras de aliento han sido el sustento para seguir adelante.

A mi amada Karito, con mucho amor y agradecimiento por su paciencia, comprensión y su pleno apoyo en toda esta etapa universitaria. Su infinito amor y su ejemplo de coraje, valentía y dedicación han sido el motor que me ha impulsado a superar cada obstáculo de este largo camino.

Luis Guillermo Encalada Bernal

DEDICATORIA

A mi Dios, pues en este trabajo está reflejada su sabiduría infinita y ha sido mi consuelo, refugio y fortaleza en cada paso que doy. Reconozco que, sin él, nada de esto sería posible.

A mis padres, Gabriel y Jenny, quienes, con su amor incondicional, sacrificio e incansable dedicación para brindarme las herramientas necesarias, han sido la fuerza detrás de cada logro en mi vida. De la misma manera, a mi hermano Luis, quien me ha ayudado a superar obstáculos y a alcanzar mis metas con determinación y perseverancia.

A mis queridos abuelitos, Luis y Lupita, Milton y Angelita, que, con sus enseñanzas, historias, palabras de aliento y valores han sido una fuente de inspiración en el día a día. Les dedico este trabajo con todo mi cariño y reconocimiento a su legado.

A mi compañero de tesis y amado Luis, por sostenerme en los momentos de duda y cansancio, y con su amor ser una fuente inagotable de inspiración. Que este trabajo sea testimonio de nuestro amor y de la profunda gratitud que siento por tenerlo a mi lado.

A mis mejores amigas, Mishel y Belén, su amistad ha sido mi luz en tiempos difíciles y mi compañía en momentos de éxito. Cada conversación nocturna y abrazo sincero me han recordado que no estoy sola en este camino.

Karen Gabriela Morales Mena

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por ser luz en este camino universitario y por otorgarnos la sabiduría, fortaleza y salud para llegar hasta aquí. En cada paso de esta investigación, hemos sentido su presencia guiándonos en momentos de duda y dándonos fuerza para perseverar.

A nuestros padres y hermanos por creer en nosotros y brindarnos su apoyo incondicional, ánimo y comprensión en los momentos más difíciles. Su amor y aliento fueron nuestra mayor motivación.

Agradecemos al Ing. José Vásquez, tutor de este trabajo de titulación, por su orientación, paciencia y conocimiento brindado a lo largo de este proceso. Sus consejos expertos y su respaldo absoluto fueron fundamentales para alcanzar este logro.

Este triunfo no solo es nuestro, sino de todos los que nos han apoyado a lo largo de este viaje. Estamos profundamente agradecidos por todas las experiencias y aprendizajes que la Universidad del Azuay nos ha brindado.

Comparación técnica-económica de diafragmas en acero y hormigón para puentes con vigas de acero.

RESUMEN

El trabajo de investigación determina el comportamiento de los diafragmas de acero y hormigón para puentes con vigas de acero en diferentes luces, estableciendo una comparación técnica y económica, y aplicando ingeniería de valor entre las variantes para definir la opción más favorable. La metodología implementada abarca la modelación de la superestructura de puentes con diferentes alternativas de diafragmas aplicando parámetros de las normativas AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 2020 y NEVI-12 en el software de análisis CSi Bridge. Los resultados fueron procesados mediante gráficos estadísticos para interpretación de solicitaciones y parámetros como: fabricación y montaje, economía, tiempo, mantenimiento y mano de obra calificada. En este contexto, la variación de diafragmas de hormigón presentó diferencias significativas en los factores analizados, principalmente en las demandas de diseño y valor económico.

Palabras clave: diafragmas, solicitaciones, puentes, demandas, vigas, superestructura.



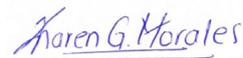
Ing. José Vásquez Calero

Tutor de trabajo de titulación



Luis G. Encalada Bernal

Autor



Karen G. Morales Mena

Autora

Technical-economic comparison of steel and concrete diaphragms for steel girder bridges.

ABSTRACT

The research work determines the behavior of steel and concrete diaphragms for steel girder bridges at different spans, establishing a technical and economic comparison, and applying value engineering between the variants to define the most favorable option. The methodology implemented covers the modeling of the superstructure of bridges with different diaphragm alternatives by applying parameters of the AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 2020 and NEVI-12 standards in the CSi Bridge analysis software. The results were processed by means of statistical graphs for interpretation of stresses and parameters such as: manufacturing and assembly, economy, time, maintenance and qualified labor. In this context, the variation of concrete diaphragms presented significant differences in the factors analyzed, mainly in the design demands and economic value.

Keywords: diaphragms, stresses, bridges, demands, girders, superstructure.



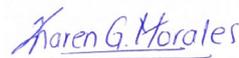
Ing. José Vásquez Calero

Thesis tutor



Luis G. Encalada Bernal

Author



Karen G. Morales Mena

Author

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xx
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
Justificación.....	3
Objetivos.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Metodología.....	3
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1 Estado del arte.....	5
1.2 Conceptos fundamentales.....	6
2. INFORMACIÓN TÉCNICA REFERENTE.....	9

2.1	Filosofía de diseño	9
2.2	Carril de diseño	9
2.3	Cargas	10
2.3.1	Cargas permanentes	10
2.3.2	Cargas vivas.....	11
2.3.2.1	Camión de diseño	11
2.3.2.2	Tándem de diseño	12
2.3.2.3	Carga de carril de diseño.....	13
2.3.3	Cargas de fatiga	13
2.4	Combinaciones de carga	14
2.5	Estados límites	14
2.6	Factores de carga.....	16
2.7	Factor de presencia múltiple	17
2.8	Acero estructural.....	17
2.9	Longitud efectiva del tramo	19
2.10	Relaciones de altura de viga/longitud del tramo	19
2.11	Secciones sísmicamente compactas	21
2.12	Diafragmas	22
2.13	Deflexiones	23
3.	MODELAMIENTO DE VARIANTES DE TABLEROS CON VIGAS DE ACERO Y DIAFRAGMAS.....	25
3.1	Determinación de luces, prediseño de vigas y diafragmas	25

3.2	Determinación de materiales.....	27
3.3	Configuración de las secciones de vigas y diafragmas.....	28
3.4	Configuración de vehículos de diseño	55
3.5	Conformación de la sección del puente	57
3.6	Definición de combinaciones de carga	58
4.	ANÁLISIS COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÓMICO.....	65
4.1	Obtención de las solicitaciones en diafragmas	65
4.2	Análisis de las solicitaciones de los modelos	72
4.3	Estimación del valor económico de las variantes de diafragmas.....	78
4.4	Comparación económica.....	82
4.5	Aplicación de ingeniería de valor	83
	CONCLUSIONES.....	88
	RECOMENDACIONES	90
	BIBLIOGRAFÍA	91
A.	ANEXOS.....	94
A.1	Comparación de solicitaciones en diafragmas de acero y hormigón.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Pesos específicos de materiales.....	11
Tabla 2-2: Combinaciones y factores de carga.....	16
Tabla 2-3: Factores de presencia múltiple.....	17
Tabla 2-4: Propiedades mecánicas mínimas del acero estructural por forma, resistencia y espesor	18
Tabla 2-5: Propiedades a Tensión Especificadas por la Norma ASTM.....	18
Tabla 2-6: Profundidades mínimas utilizadas tradicionalmente para superestructuras de profundidad constante	19
Tabla 2-7: Máximas relaciones ancho-espesor para elementos no rigidizados a compresión (adoptado de AISC 360-22).....	21
Tabla 2-8: Máximas relaciones ancho-espesor para elementos rigidizados a compresión (adoptado AISC 360-22)	22
Tabla 3-1: Prediseño de vigas según la AASHTO (2020).....	25
Tabla 3-2: Prediseño de vigas según la NEVI-12 (2013).....	26
Tabla 3-3: Dimensionamiento de diafragmas de acero	26
Tabla 3-4: Dimensionamiento de diafragmas de hormigón	27
Tabla 4-1: Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 10m	65
Tabla 4-2: Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 15m	66
Tabla 4-3: Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 20m	67
Tabla 4-4: Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 25m	67
Tabla 4-5: Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 30m	68
Tabla 4-6: Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 35m	69

Tabla 4-7: Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 40m	70
Tabla 4-8: Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 45m	71
Tabla 4-9: Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 50m	72
Tabla 4-10: Solicitaciones máximas de diafragmas extremos e intermedios.....	74
Tabla 4-11: Promedio de solicitaciones de momento en diafragmas	76
Tabla 4-12: Cantidades de obra-Diafragmas de acero.....	78
Tabla 4-13: Cantidades de obra-Diafragmas de hormigón in situ.....	78
Tabla 4-14: Cantidades de obra-Diafragmas de hormigón prefabricado	79
Tabla 4-15: Presupuesto de diafragmas para puente de 10m	79
Tabla 4-16: Presupuesto de diafragmas para puente de 15m	80
Tabla 4-17: Presupuesto de diafragmas para puente de 20m	80
Tabla 4-18: Presupuesto de diafragmas para puente de 25m	80
Tabla 4-19: Presupuesto de diafragmas para puente de 30m	81
Tabla 4-20: Presupuesto de diafragmas para puente de 35m	81
Tabla 4-21: Presupuesto de diafragmas para puente de 40m	81
Tabla 4-22: Presupuesto de diafragmas para puente de 45m	82
Tabla 4-23: Presupuesto de diafragmas para puente de 50m	82
Tabla 4-24: Resumen de presupuestos para las variantes de diafragmas	83
Tabla 4-25: Aplicación de la ingeniería de valor	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Partes de la subestructura y superestructura de un puente.....	6
Figura 1-2: Tipos de vigas según su sección transversal.....	7
Figura 1-3: Tipos de diafragmas.....	8
Figura 2-1: Carril de diseño AASHTO LRFD	10
Figura 2-2: Carril de diseño NEVI-12.....	10
Figura 2-3: Camión de diseño AASHTO LRFD.....	12
Figura 2-4: Camión de diseño NEVI-12.....	12
Figura 2-5: Tándem de diseño AASHTO LRFD.....	12
Figura 2-6: Tándem de diseño NEVI-12	13
Figura 2-7: Carga de carril de diseño AASHTO LRFD.....	13
Figura 3-1: Propiedades del acero ASTM A588 Gr50	27
Figura 3-2: Propiedades del hormigón $f_c=300$ kg/cm ²	28
Figura 3-3: Dimensiones de vigas principales para puente de 10m	29
Figura 3-4: Propiedades de vigas principales para puente de 10m	29
Figura 3-5: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 10m.....	30
Figura 3-6: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 10m	30
Figura 3-7: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 10m	31
Figura 3-8: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 10m	31
Figura 3-9: Dimensiones de vigas principales para puente de 15m	32
Figura 3-10: Propiedades de vigas principales para puente de 15m.....	32

Figura 3-11: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 15m.....	33
Figura 3-12: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 15m	33
Figura 3-13: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 15m	34
Figura 3-14: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 15m	34
Figura 3-15: Dimensiones de vigas principales para puente de 20m	35
Figura 3-16: Propiedades de vigas principales para puente de 20m.....	35
Figura 3-17: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 20m.....	36
Figura 3-18: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 20m	36
Figura 3-19: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 20m	37
Figura 3-20: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 20m	37
Figura 3-21: Dimensiones de vigas principales para puente de 25m	38
Figura 3-22: Propiedades de vigas principales para puente de 25m.....	38
Figura 3-23: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 25m.....	39
Figura 3-24: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 25m	39
Figura 3-25: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 25m	40
Figura 3-26: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 25m	40
Figura 3-27: Dimensiones de vigas principales para puente de 30m	41
Figura 3-28: Propiedades de vigas principales para puente de 30m.....	41
Figura 3-29: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 30m.....	42
Figura 3-30: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 30m	42
Figura 3-31: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 30m	43

Figura 3-32: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 30m	43
Figura 3-33: Dimensiones de vigas principales para puente de 35m	44
Figura 3-34: Propiedades de vigas principales para puente de 35m.....	44
Figura 3-35: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 35m.....	45
Figura 3-36: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 35m	45
Figura 3-37: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 35m	46
Figura 3-38: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 35m	46
Figura 3-39: Dimensiones de vigas principales para puente de 40m	47
Figura 3-40: Propiedades de vigas principales para puente de 40m.....	47
Figura 3-41: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 40m.....	48
Figura 3-42: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 40m	48
Figura 3-43: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 40m	49
Figura 3-44: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 40m	49
Figura 3-45: Dimensiones de vigas principales para puente de 45m	50
Figura 3-46: Propiedades de vigas principales para puente de 45m.....	50
Figura 3-47: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 45m.....	51
Figura 3-48: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 45m	51
Figura 3-49: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 45m	52
Figura 3-50: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 45m	52
Figura 3-51: Dimensiones de vigas principales para puente de 50m	53
Figura 3-52: Propiedades de vigas principales para puente de 50m.....	53

Figura 3-53: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 50m.....	54
Figura 3-54: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 50m	54
Figura 3-55: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 50m	55
Figura 3-56: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 50m	55
Figura 3-57: Cargas del vehículo HL-93	56
Figura 3-58: Cargas del vehículo HS-MTOP	56
Figura 3-59: Sección de puente para modelamiento en el software CSi Bridge	57
Figura 3-60: Carga lineal generada por barandas.....	57
Figura 3-61: Carga de área generada por la carpeta asfáltica.....	58
Figura 3-62: Patrones de carga	59
Figura 3-63: Combinación de carga con el vehículo HL-93	59
Figura 3-64: Combinación de carga con el vehículo HS-MTOP	60
Figura 3-65: Factor de presencia múltiple en el modelo	60
Figura 3-66: Puente de 10m modelado en CSi Bridge	61
Figura 3-67: Puente de 15m modelado en CSi Bridge	61
Figura 3-68: Puente de 20m modelado en CSi Bridge	62
Figura 3-69: Puente de 25m modelado en CSi Bridge	62
Figura 3-70: Puente de 30m modelado en CSi Bridge	62
Figura 3-71: Puente de 35m modelado en CSi Bridge	63
Figura 3-72: Puente de 40m modelado en CSi Bridge	63
Figura 3-73: Puente de 45m modelado en CSi Bridge	63

Figura 3-74: Puente de 50m modelado en CSi Bridge	64
Figura 4-1: Numeración de diafragmas-Puente de 10m.....	65
Figura 4-2: Numeración de diafragmas-Puente de 15m.....	66
Figura 4-3: Numeración de diafragmas-Puente de 20m.....	66
Figura 4-4: Numeración de diafragmas-Puente de 25m.....	67
Figura 4-5: Numeración de diafragmas-Puente de 30m.....	68
Figura 4-6: Numeración de diafragmas-Puente de 35m.....	68
Figura 4-7: Numeración de diafragmas-Puente de 40m.....	69
Figura 4-8: Numeración de diafragmas-Puente de 45m.....	70
Figura 4-9: Numeración de diafragmas-Puente de 50m.....	71
Figura 4-10: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón- Puente 40m	73
Figura 4-11: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 30m	73
Figura 4-12: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 15m	73
Figura 4-13: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas extremos e intermedios	74
Figura 4-14: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas extremos e intermedios	75
Figura 4-15: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas extremos e intermedios	76
Figura 4-16: Promedio de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón	77

Figura 4-17: Porcentaje de incremento de solicitaciones de momento en diafragmas de hormigón respecto a acero	77
Figura 4-18: Comparación de presupuestos de las variantes de diafragmas	83
Figura 4-19: Importancia de factores en diafragmas	84
Figura 4-20: Comparación de dificultad de fabricación y montaje de las variantes de diafragmas	84
Figura 4-21: Comparación del valor económico de las variantes de diafragmas	85
Figura 4-22: Comparación del tiempo de construcción de las variantes de diafragmas	85
Figura 4-23: Comparación de la dificultad de mantenimiento de las variantes de diafragmas	86
Figura 4-24: Comparación de la dificultad para conseguir mano de obra calificada en las diferentes técnicas de construcción	86
Figura A-1: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 10m	94
Figura A-2: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 10m	94
Figura A-3: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 10m	95
Figura A-4: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 15m	95
Figura A-5: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 15m	96
Figura A-6: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 15m	96
Figura A-7: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 20m	97

Figura A-8: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 20m	97
Figura A-9: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 20m	98
Figura A-10: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 25m	98
Figura A-11: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 25m	99
Figura A-12: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 25m	99
Figura A-13: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 30m	100
Figura A-14: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 30m	100
Figura A-15: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 30m	101
Figura A-16: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 35m	101
Figura A-17: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 35m	102
Figura A-18: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 35m	102
Figura A-19: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 40m	103
Figura A-20: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 40m	103

Figura A-21: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 40m	104
Figura A-22: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 45m	104
Figura A-23: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 45m	105
Figura A-24: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 45m	105
Figura A-25: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 50m	106
Figura A-26: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 50m	106
Figura A-27: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 50m	107

ÍNDICE DE ANEXOS

A. ANEXOS	94
A.1 Comparación de solicitaciones en diafragmas de acero y hormigón.....	94

INTRODUCCIÓN

El proyecto titulado “Comparación técnica-económica de diafragmas en acero y hormigón para puentes con vigas de acero” nace con la finalidad de comparar el comportamiento e interacción de vigas de acero con diafragmas de hormigón y acero en puentes, caracterizando las uniones entre estos elementos estructurales para garantizar la adecuada recepción y transmisión de cargas, sin generar daño en el sistema.

Las condiciones a las cuales se someten los elementos estructurales y sus materiales de construcción han generado complicaciones en la interacción de los mismos, limitando el correcto funcionamiento de los puentes. Por lo que, la importancia de garantizar las conexiones entre vigas y diafragmas gira en torno a conservar su integridad tanto en geometría como en vida útil.

El desarrollo del proyecto consiste en el modelamiento de las variantes de puentes con vigas de acero y diafragmas en hormigón y acero, utilizando el software de análisis estructural CSI Bridge. Además, la aplicación de ingeniería de valor para obtener la alternativa óptima en cuanto a parámetros técnicos y económicos, a través de un análisis de precios unitarios y presupuestos.

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

Antecedentes

A lo largo del tiempo, los puentes han buscado proporcionar continuidad a una vía terrestre conectando dos puntos para salvar un obstáculo mediante la utilización de varios materiales de construcción. Además, con el uso de aceros y hormigones mejoró la resistencia de los sistemas, al ser utilizados en obras estructurales evolucionaron los puentes en cuanto a su diseño, desarrollo de nuevos procesos constructivos y tareas de reforzamiento con el fin de aumentar su vida útil (Manterola, 1984).

Por otro lado, se han presentado patologías en las interacciones de ciertos elementos estructurales que componen los puentes. En este contexto, se pretende enfocar la relación vigas-diafragmas, estos últimos se colocan para generar estabilidad del alma de las vigas y rigidizarlas para evitar pandeos laterales y torsiones que pueden ocasionar las cargas móviles, de viento y sísmicas (Macas, 2018). Sin embargo, la problemática gira en torno a la conexión e interacción entre estos dos elementos y sus materiales de construcción.

Según McCormac y Csernak (2012), el acero como material estructural presenta ventajas frente al hormigón, haciendo referencia a su alta resistencia en comparación a su peso, facilidad de fabricación, durabilidad y otras propiedades. Sin embargo, en lugares con concentración de esfuerzos, sumado a las cargas que producen fatiga, se pueden presentar fracturas frágiles. Además, continúa afirmando que, los miembros de acero sometidos a compresión, cuanto más largos y esbeltos sean, mayor es el riesgo de pandeo. Por lo que, suelen necesitarse elementos adicionales para rigidizar la estructura, los cuales al ser del mismo material pueden presentar los inconvenientes antes mencionados y fallas en las conexiones.

Las conexiones son los componentes más importantes en los puentes, estas deben evitar las concentraciones de esfuerzos ya que la falla podría ocasionar el colapso parcial o total del mismo (Weiwei & Yoda, 2017). En este contexto, se pretende plantear como alternativa el uso de diafragmas de hormigón, pues, se ha demostrado su eficiencia frente a la compresión, siendo adecuado para soportar solicitaciones de este tipo (Troyano-Moreno, 2019).

Justificación

El análisis comparativo de aspectos técnicos y costos busca realizar una aportación al conocimiento del estado actual de la interacción entre vigas de acero y diafragmas, con la finalidad de optimizar recursos económicos, asegurar la geometría de las secciones, evitar las deformaciones y distorsiones que se pueden presentar en virtud del tipo de material que se emplee para la construcción de diafragmas. Dado que, los materiales que se van a utilizar para el proyecto en cuestión condicionan el comportamiento y vida útil de los puentes con vigas de acero.

Objetivos

Objetivo general

- Comparar de manera técnica, mediante una ingeniería de valor, y económica el comportamiento e interacción de los diafragmas de acero y hormigón en puentes con vigas de acero.

Objetivos específicos

- Revisar las alternativas de diafragmas en puentes con vigas de acero.
- Modelar diafragmas de acero y hormigón en puentes con vigas de acero.
- Efectuar un análisis comparativo entre las alternativas de diseño de diafragmas, para definir la opción técnica y económicamente recomendable.

Metodología

Las alternativas de diafragmas en puentes con vigas de acero se obtendrán a través de la recopilación de información referente a los tipos de diafragmas y las normas sobre el diseño para estos elementos estructurales. Además, se complementará con información sobre análisis y diseño de diafragmas en puentes mediante documentos académicos obtenidos de sitios web, libros y conocimiento del tutor y cotutor sugerido.

Se plantearán los modelos de puentes con vigas de acero que serán analizados. Así mismo, las condiciones iniciales en relación al uso de la estructura, estimación de cargas, camiones de diseño, entre otros. En base a lo establecido, con el apoyo del software CSI Bridge y hojas de cálculo de Excel, se ejecutará el prediseño de los diafragmas antes

definidos para que sean analizados estructuralmente y con ello ejecutar un diseño preliminar de los mismos en base al análisis realizado.

Con el diseño preliminar, se definirán los parámetros técnicos de los modelos planteados, en relación al comportamiento de los elementos estructurales del tablero (vigas y diafragmas) y se obtendrá la caracterización de las uniones viga-diafragma con materiales acero-acero y acero-hormigón. Finalmente, se aplicarán criterios de ingeniería de valor para la comparación técnica y económica de las variantes de los diafragmas planteados, para lo cual es necesario un análisis de precios unitarios y presupuesto.

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Estado del arte

Desde el inicio de los tiempos, los puentes se desarrollaron con la finalidad de salvar barreras que separan pueblos, acortando distancias para acelerar el transporte y facilitar el comercio, aligerando de esta manera la tarea de los hombres (Steinman et al., 1979). Esto refleja que, la construcción de un puente siempre ha buscado la comodidad de la comunidad y sus futuras generaciones. Por ende, más allá de ser una obra estructural es un bien común para la sociedad.

La evolución de los puentes se ha desarrollado con la comprensión de conceptos físicos y el comportamiento de los materiales, como el acero y posteriormente el hormigón, que aparecieron con el pasar de los años (Jaramillo & Villavicencio, 2022). Esto pone a prueba el ingenio y capacidad inventiva del hombre para combinar los mismos con las técnicas constructivas, manejando flexiones, tracciones y sumando una máxima economía de la estructura (Miquel i Solé, 2018).

El diseño y construcción de un puente requiere abordar disciplinas interrelacionadas para lograr una estructura segura, eficiente y funcional. Según Plasencia-Lozano (2014), desde la ingeniería estructural, para el cálculo del equilibrio de fuerzas y selección de materiales adecuados. La dinámica, al considerar las variaciones causadas por diferentes tipos de carga, mientras que la geotecnia se involucra al analizar el terreno de apoyo. Así mismo, aspectos hidráulicos que condicionan el diseño de pilas y sección del puente. Las consideraciones de tráfico y urbanísticas influyen en la elección del ancho y cantidad de carriles. Finalmente, afirma que, se convierte en un problema de organización de obra, donde la eficiencia económica y la gestión de plazos condicionan el método constructivo a emplear.

La norma vigente en Ecuador esta estipulada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOPE), la cual ha sido diseñada como una guía técnica para reducir las probabilidades de fallas en obras de la red vial y satisfaciendo las necesidades de los usuarios. Por otro lado, se empleará también la norma AASHTO LRFD, en la cual, la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO por sus siglas en inglés) plantea el diseño por factores de carga y resistencia.

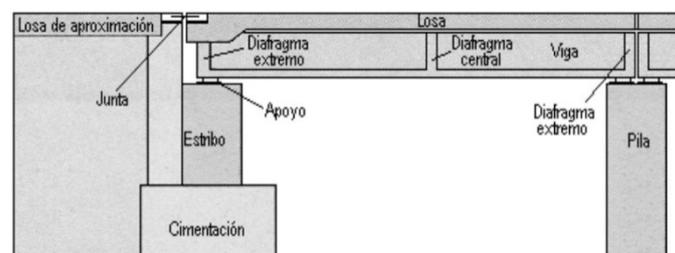
1.2 Conceptos fundamentales

Los puentes son estructuras que salvan un obstáculo, específicamente un río, para dar continuidad a una vía, los cuales tendrán como base de diseño las perturbaciones hidráulicas en la subestructura que originan las corrientes de agua (Gómez, 2015). Estarán destinados a garantizar la circulación cómoda y continua, por lo que, al estar sometida a cargas permanentes, móviles y además variables climáticas y geológicas, es de vital importancia el reforzamiento estructural para garantizar la seguridad del puente. Valorando esta situación, es imprescindible que las consideraciones de diseño y detallado de los elementos que lo conforman aseguren el correcto funcionamiento y transferencia de cargas desde la superestructura a la subestructura sin generar daños en el sistema general.

La subestructura es el soporte fundamental de todo el puente, ya que, sobre esta se asentarán los elementos de la superestructura. Está constituida por estribos, apoyos, pilares y cimientos como se puede observar en la Figura 1-1, en donde, tanto los estribos como pilares son los responsables de sostener directamente la parte superior del puente, con la diferencia que los estribos reciben también el empuje del terraplén de enfoque. Estos dos conducirán los esfuerzos hacia los cimientos, quienes los transmitirán al terreno, siendo este el destino final de la descarga.

La superestructura es el conjunto de elementos estructurales que se encuentran sobre los apoyos del puente, principalmente vigas, diafragmas y losa que se muestran en la Figura 1-1, ya sean de hormigón, metálicos o mixtos, que garantizan el adecuado funcionamiento del puente al evitar deflexiones en el mismo (Andrade, 2016). La losa es la encargada de recibir directamente las cargas, mientras que, los diafragmas deben asegurar el correcto manejo de las mismas sin perjudicar la interacción entre losa-viga-diafragma.

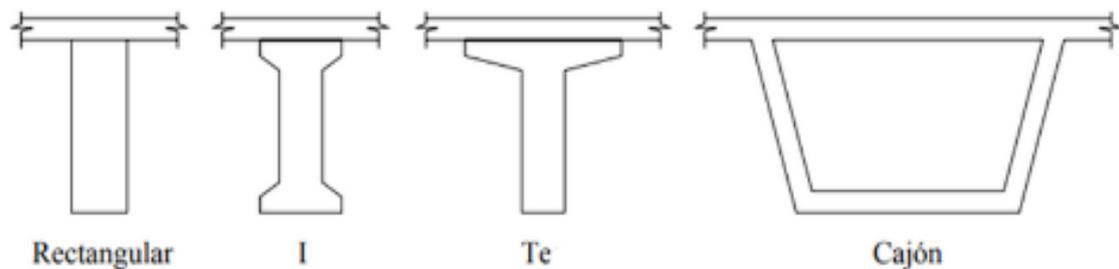
Figura 1-1: Partes de la subestructura y superestructura de un puente



Fuente: Reinoso (2000).

Las vigas son elementos portantes principales que soportan la losa y estarán ubicadas sobre los apoyos. Existen diferentes tipos de vigas, como se observa en la Figura 1-2 “según la forma de su sección transversal, las vigas pueden ser rectangulares, tee, I, cajón, etc. Según su material las vigas más comunes pueden ser de madera, concreto o acero” (Seminario, 2004, p. 22). Las vigas longitudinales de hormigón representan una propuesta económica para puentes de luces cortas, por el contrario, cuando las luces son mayores se recomienda usar vigas de acero estructural (Neira, 2018). Al enfocarse en aquellas de acero, estas suelen ser tipo I, y proporcionan fuerza y durabilidad, con una alta relación resistencia-peso que se manifiesta en estructuras livianas y confiables.

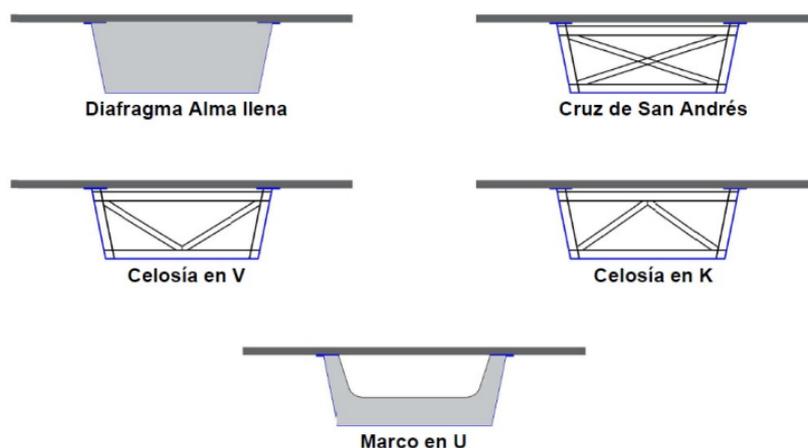
Figura 1-2: Tipos de vigas según su sección transversal



Fuente: Seminario (2004).

Por otro lado, los diafragmas son vigas transversales de diferentes tipos, que se diferencian en la Figura 1-3, que serán capaces de transmitir cargas y tienen como objetivo proporcionar rigidez lateral, así como, mantener la geometría de la sección. Estos elementos son fabricados tanto de hormigón como de acero y se ubican a lo largo del puente, en los extremos para conectar entre ellas a las vigas y la losa dando la rigidez antes mencionada, y en puntos intermedios del mismo para controlar el pandeo lateral y garantizar el funcionamiento a flexión (Reinoso, 2000).

Figura 1-3: Tipos de diafragmas



Fuente: Campo (2023).

En un puente típico de vigas I de acero, el refuerzo lo proporciona los diafragmas, que están espaciados a lo largo de la viga (Coletti & Grubb, 2016). En consecuencia, es imprescindible darle la importancia a las conexiones que debe existir entre estos elementos estructurales. Las conexiones son enlaces que se emplean para que, de acuerdo al caso, se impidan rotaciones o traslaciones (Beer et al., 2010). Las uniones deben ser dúctiles y proveer disipación de energía sin pérdida de capacidad, además, poseer suficiente resistencia para generar una respuesta favorable tanto de diafragmas como de vigas (Prieto & René, 2010).

2. INFORMACIÓN TÉCNICA REFERENTE

2.1 Filosofía de diseño

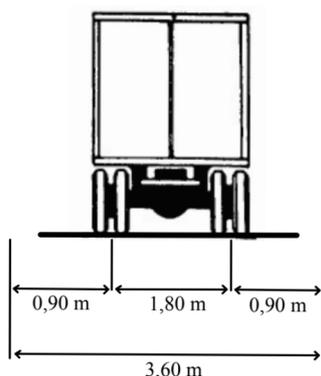
La presente investigación se regirá según lo especificado por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) en su Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12), misma que constituye las directrices para el desarrollo de un proyecto vial, específicamente su planteamiento, estudios ingenieriles y diseño. Según la NEVI-12 (2013), en Ecuador los puentes se diseñarán conforme las disposiciones contenidas en *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Edición 2010, y rectificaciones posteriores. Para esta investigación, se usará la Edición 2020 de la AASHTO LRFD.

Las especificaciones de esta normativa utilizan la metodología de Diseño de Factores de Carga y Resistencia (LRFD), la cual se fundamenta en la teoría de confiabilidad y se apoya en el conocimiento estadístico de cargas y comportamiento estructural para establecer sus disposiciones de diseño (AASHTO, 2020). Además, según Grubb et al. (2015), esta metodología logra niveles relativamente uniformes de seguridad dentro de la superestructura y subestructura, teniendo en cuenta la variabilidad tanto en la resistencia como en las cargas.

2.2 Carril de diseño

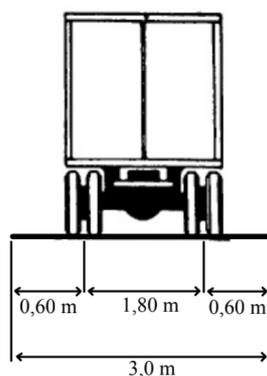
A menos que se determine lo contrario, según lo establecido en la normativa AASHTO LRFD (2020), el ancho de carril deberá ser de 3.60 m como se observa en la Figura 2-1. El número de carriles se tomará la parte entera de la relación $w/12.0$, donde w es el ancho libre de la calzada en pies entre bordillos, barreras o ambos. Por su parte, la NEVI-12 (2013), define un carril de diseño de 3 m visible en la Figura 2-2.

Figura 2-1: Carril de diseño AASHTO LRFD



Fuente: AASHTO (2020).

Figura 2-2: Carril de diseño NEVI-12



Fuente: AASHTO (2020).

2.3 Cargas

2.3.1 Cargas permanentes

Consiste en el peso de todos los componentes de la estructura, incluidas las vigas, losa, barandas, diafragmas, pilas, cabezales, tuberías, luminarias y otros servicios públicos (MTO, 2013).

DC= Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales.

DW= Peso propio de las superficies de rodamiento e instalaciones para servicios públicos.

EV= Presión vertical del peso propio del suelo de relleno.

El peso permanente de la estructura dependerá de las dimensiones y materiales de sus elementos, por lo que, se considerarán las densidades de la Tabla 2-1.

Tabla 2-1

Pesos específicos de materiales

Materiales	KN/m ³	kgf/m ³
Hormigón simple	22	2200
Hormigón armado	25	2500
Hormigón de pavimento	24	2400
Acero redondo	78.5	7850
Acero estructural	78.5	7850
Acero estructural en vigas (incluida soldadura)	80	8000
Maderas rojas (roble, coihue)	10	1000
Maderas moldaje (pino, álamo)	8	800
Rocas	25	2500
Material de relleno (variable)	18-22	1800-2200
Capa asfáltica	24	2400

Fuente: MTOP (2013).

2.3.2 Cargas vivas

Según el MTOP (2013), consiste en el peso de las cargas de tráfico vehicular y peatonal, además, se incluyen cargas de fluidos, de sismo, hielo, deformaciones y causadas por colisiones.

LL= Carga viva vehicular

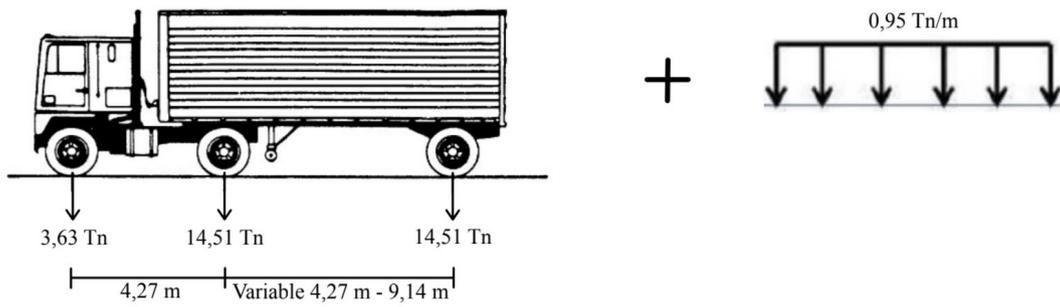
PL= Carga viva peatonal

IM= Tolerancia de carga dinámica vehicular

2.3.2.1 Camión de diseño

La AASHTO (2020) plantea una sobrecarga vehicular HL-93 con los pesos y espaciamientos de ejes y ruedas que se pueden observar en la Figura 2-3.

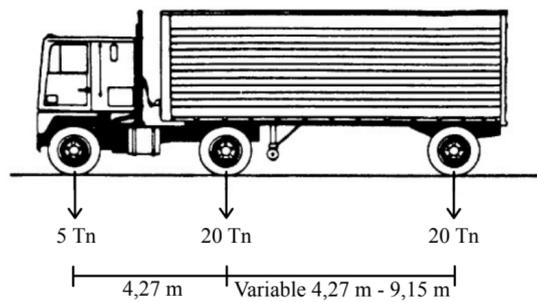
Figura 2-3: Camión de diseño AASHTO LRFD



Fuente: AASHTO (2020).

Por otro lado, la NEVI-12 define un camión de diseño denominado HS-MTOP con las características de la Figura 2-4.

Figura 2-4: Camión de diseño NEVI-12

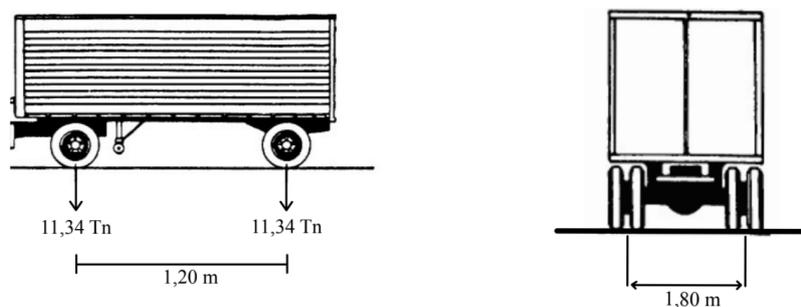


Fuente: AASHTO (2020).

2.3.2.2 Tándem de diseño

Según la AASHTO (2020), el tándem consistirá en un par de ejes de 11.34 Tn espaciados 1.20 m entre sí. Además, el espacio transversal de las ruedas será 1.80 m como se aprecia en la Figura 2-5.

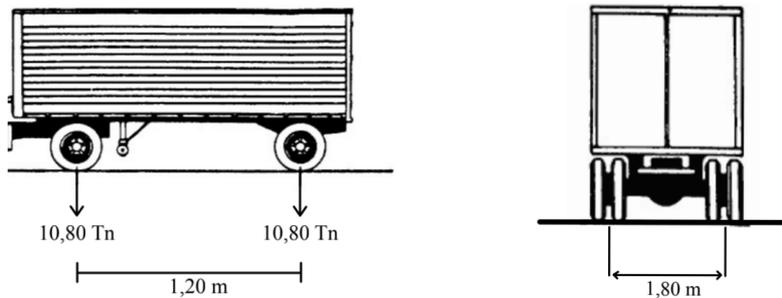
Figura 2-5: Tándem de diseño AASHTO LRFD



Fuente: AASHTO (2020).

En cambio, el MTOP (2013) define un par de ejes de 10.8 Tn con los mismos espaciamientos longitudinales y transversales antes mencionados, que se refleja en la Figura 2-6.

Figura 2-6: Tándem de diseño NEVI-12



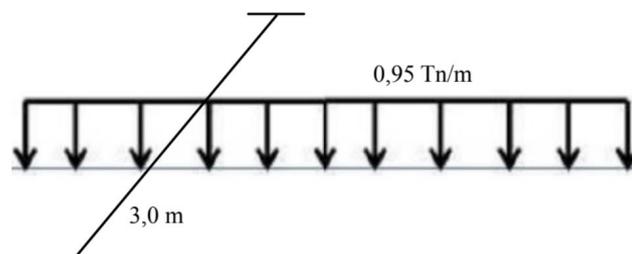
Fuente: AASHTO (2020).

Sin embargo, para el trabajo de investigación actual se usarán los camiones de diseño, pues, la NEVI-12 especifica que se debe usar ya sea el camión o el tándem de diseño.

2.3.2.3 Carga de carril de diseño

Para la AASHTO (2020), representa una carga de 0.95 Tn/m distribuida uniformemente de forma longitudinal y transversalmente se distribuirá en un ancho de 3 m como en la Figura 2-7. Por el contrario, resulta imprescindible mencionar que según el MTOP (2013), esta carga de carril de diseño no se toma en consideración al usar el camión de diseño HS-MTOP.

Figura 2-7: Carga de carril de diseño AASHTO LRFD



Fuente: Elaboración propia (2024).

2.3.3 Cargas de fatiga

Acorde al artículo 3.6.4.1 de la norma AASHTO LRFD, la carga de fatiga es el uso de un camión de diseño especificado, pero con una separación constante de 9.14 m entre los

ejes de 14.51 Tn. Además, Rodríguez (2022), afirma que se deberá aplicar un incremento por carga dinámica a dicha carga.

2.4 Combinaciones de carga

La sollicitación mayorada total se calculará mediante la Ecuación 2-1 como:

$$Q = \sum \eta_i * \gamma_i * Q_i \quad \text{Ecuación 2-1}$$

η_i = modificador de las cargas especificado en la Sección 2.5

Q_i = sollicitación

γ_i = factores de carga especificados en la Tabla 2-2

Los componentes y conexiones de un puente deberán satisfacer Ecuación 2-1 para las combinaciones aplicables de sollicitaciones extremas mayoradas según se especifica para cada uno de los estados límites (AASHTO, 2020).

2.5 Estados límites

La estructura debe satisfacer ciertas condiciones que abarcan criterios de capacidad última, restricciones de tensiones, deformaciones, fisuras y rango de esfuerzos, eventos climáticos y fenómenos geológicos (Delgado et al., 2018). Con el fin de lograr objetivos de constructibilidad, seguridad y capacidad de servicio la AASHTO (2020) plantea los siguientes estados límites:

- Resistencia I: Combinación de carga básica referente al uso vehicular normal del puente sin viento.
- Resistencia II: Combinación de carga que representa el uso del puente por vehículos de diseño especiales especificados por el propietario, vehículos de circulación restringida, o ambos, sin viento.
- Resistencia III: Combinación de carga que representa el puente expuesto a la velocidad del viento.
- Resistencia IV: Combinación de carga que representa los efectos de la carga muerta en la superestructura.

- Resistencia V: Combinación de carga relacionada al uso vehicular normal con una velocidad del viento según la AASHTO (2020) de 80 mph y según la NEC (2015) mínimo 75 km/h.
- Evento extremo I: Combinación de carga que incluye sismos.
- Evento extremo II: Combinación de carga que incluye carga de hielo, colisión de embarcaciones y vehículos, inundaciones y ciertos eventos hidráulicos.
- Servicio I: Combinación de carga que representa la operación normal de puente con un viento según la AASHTO (2020) de 70 mph y según la NEC (2015) mínimo 75 km/h y todas las cargas en sus valores nominales. También se relaciona con el control de las deflexiones de las estructuras metálicas enterradas, revestimientos de túneles y tuberías termoplásticas, para controlar el ancho de fisuración de las estructuras de hormigón armado.
- Servicio II: Combinación de carga para controlar la fluencia de las estructuras de acero y el deslizamiento en conexiones que provoca la carga viva vehicular.
- Servicio III: Combinación de carga relacionada para análisis longitudinal de tracción en superestructuras de hormigón pretensado para controlar fisuras y en almas de vigas segmentadas de hormigón.
- Servicio IV: Combinación de carga relacionada exclusivamente con la tracción en superestructuras de hormigón pretensado, cuyo objetivo es controlar el agrietamiento.
- Fatiga I: Combinación de carga de fatiga y fractura relacionada a una vida de fatiga infinita inducida por carga.
- Fatiga II: Combinación de carga de fatiga y fractura relacionada a una vida de fatiga finita inducida por carga.

De este modo, el diseño por factores de carga y resistencia requiere satisfacer la Ecuación 2-2.

$$\sum \eta_i * \gamma_i * Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad \text{Ecuación 2-2}$$

ϕ = factor de resistencia

R_n = Resistencia nominal

R_r = Resistencia mayorada

Para cargas para las cuales un valor máximo de γ_i es apropiado cumplir la Ecuación 2-3:

$$\eta_i = \eta_D * \eta_R * \eta_I \geq 0.95 \quad \text{Ecuación 2-3}$$

η_D = factor relacionado con la ductilidad

η_R = factor relacionado con la redundancia

η_I = factor relacionado con la importancia operativa

Para cargas para las cuales un valor mínimo de γ_i es apropiado cumplir la Ecuación 2-4:

$$\eta_i = \frac{1}{\eta_D * \eta_R * \eta_I} \geq 0.95 \quad \text{Ecuación 2-4}$$

2.6 Factores de carga

Las diferentes cargas que componen una combinación de cargas de diseño se deberán multiplicar por el factor de carga correspondiente, descritos en la Tabla 2-2 y el factor de presencia múltiple de la Tabla 2-3.

Tabla 2-2

Combinaciones y factores de carga

Combinación de cargas	DC DD DW EH EV LL ES IM EL CR PS BR CR PL SH LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	EQ	BL	IC	CT	CV	Usar solo por una vez		
														Y _P	Y _{SE}	
Resistencia I (a menos que se especifique lo contrario)	Y _P	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	Y _{TG}	Y _{SE}	-	-	-	-	-	-	-
Resistencia II	Y _P	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	Y _{TG}	Y _{SE}	-	-	-	-	-	-	-
Resistencia III	Y _P	-	1.00	1.00	-	1.00	0.50/1.20	Y _{TG}	Y _{SE}	-	-	-	-	-	-	-
Resistencia IV	Y _P	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Resistencia V	Y _P	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50/1.20	Y _{TG}	Y _{SE}	-	-	-	-	-	-	-
Evento extremo I	1.00	Y _{EQ}	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	-
Evento extremo II	1.00	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Servicio I	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00/1.20	Y _{TG}	Y _{SE}	-	-	-	-	-	-	-
Servicio II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Servicio III	1.00	Y _{LL}	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	Y _{TG}	Y _{SE}	-	-	-	-	-	-	-
Servicio IV	1.00	-	1.00	1.00	-	1.00	1.00/1.20	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-
Fatiga I-Solo LL, IM y CE	-	1.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fatiga II-Solo LL, IM y CE	-	0.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia (2024), adaptado de AASHTO (2020).

2.7 Factor de presencia múltiple

La carga máxima causada por la sobrecarga debe ser calculada tomando en cuenta todas las combinaciones posibles de carriles cargados y multiplicándolas por un factor de presencia múltiple apropiado. Esto permite considerar la probabilidad de que los carriles estén ocupados simultáneamente por la sobrecarga móvil de diseño (AASHTO, 2020).

Tabla 2-3

Factores de presencia múltiple

Número de carriles cargados	Factor de presencia múltiple, m
1	1.20
2	1.00
3	0.85
> 3	0.65

Fuente: Elaboración propia (2024), adaptado de AASHTO (2020).

2.8 Acero estructural

El acero es el resultado de una aleación entre hierro y carbono, a la cual se adiciona ciertos elementos que le otorgan características de resistencia, rigidez y ductilidad, convirtiéndolo en un material estructural. Además, es importante mencionar que la ductilidad antes mencionada es la que le permite tener deformaciones plásticas sin disminuir su resistencia (Crisafulli, 2018).

Según el MTOP (2013), los aceros estructurales utilizados para la construcción de puentes deben cumplir con lo planteado en la norma AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN, misma que define propiedades mecánicas mínimas para su diseño, las cuales se pueden observar en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4

Propiedades mecánicas mínimas del acero estructural por forma, resistencia y espesor

Designación AASHTO	Designación ASTM equivalente	Espesor de placas, in	Forma	Resistencia mínima a la tracción, F_u , ksi	Límite elástico mínimo especificado, F_y , ksi
M 270M/ M 270 Grado 36	A709/ A709M Grado 36	Hasta 4.0 incl.	Todos los grupos	58	36
M 270M/ M 270 Grado 50	A709/ A709M Grado 50	Hasta 4.0 incl.	Todos los grupos	65	50
M 270M/ M 270 Grado 50S	A709/ A709M Grado 50S	No aplica	Todos los grupos	65	50
M 270M/ M 270 Grado 50W	A709/ A709M Grado 50W	Hasta 4.0 incl.	Todos los grupos	70	50
M 270M/ M 270 Grado HPS 50W	A709/ A709M Grado HPS 50W	Hasta 4.0 incl.	N/A	70	50
M 270M/ M 270 Grado HPS 70W	A709/ A709M Grado HPS 70W	Hasta 4.0 incl.	N/A	85	70
M 270M/ M 270 Grado HPS 100W	A709/ A709M Grado HPS 100W	Hasta 2.5 incl.	N/A	110	100
		Más de 2.5 a 4.0 incl.	N/A	100	90

Fuente: Elaboración propia (2024), adaptado de AASHTO (2020).

Además, para todos los grados de acero estructural se tomará un módulo de elasticidad y coeficiente de expansión de 29000000psi (20000MPa) y 0.0000011 por °C, respectivamente (MTO, 2013).

En Ecuador, los aceros más comunes y accesibles son el A36, A572 y A588, de los cuales podemos ver sus características en la Tabla 2-5. Además, se recomienda el uso de aceros de grado 50 para la construcción de puentes.

Tabla 2-5

Propiedades a Tensión Especificadas por la Norma ASTM

Especificación ASTM	Esfuerzo de fluencia (F_y) (ksi)	Resistencia a la tensión (F_u) (ksi)
ASTM A36	36	58 – 80
ASTM A572 Gr 50	50	65
ASTM A588 Gr 50	50	70

Fuente: NEC (2015).

2.9 Longitud efectiva del tramo

La AASHTO (2020), estipula que la longitud del tramo será la distancia entre centro de apoyos o de otros puntos de soporte. Además, el MTOP (2013), agrega que para tramos continuos será la distancia entre los puntos de inflexión por carga muerta.

2.10 Relaciones de altura de viga/longitud del tramo

Según el MTOP (2013):

- Vigas: 1/25
- Vigas compuestas (incluye losa): 1/25
- Vigas compuestas (sola): 1/30
- Armaduras: 1/10

En cuanto al predimensionamiento de vigas de acero según la AASHTO (2020), se emplearán los criterios opcionales para relaciones entre luz y profundidad del alma que se encuentran en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6

Profundidades mínimas utilizadas tradicionalmente para superestructuras de profundidad constante

Superestructura		Profundidad mínima (incluyendo el tablero)	
		Si se utilizan elementos de profundidad variable, estos valores se pueden ajustar para considerar los cambios de rigidez relativa de las secciones de momento positivo y negativo.	
Material	Tipo	Tramos simples	Tramos continuos
Acero	Profundidad total de la viga I compuesta	0.040L	0.032L
	Profundidad de la porción de la viga I de una viga I compuesta	0.033L	0.027L
	Cerchas	0.100L	0.100L

Fuente: Elaboración propia (2024), adaptado de AASHTO (2020).

Además, para la sección transversal de las vigas se tomarán los límites de proporcionalidad entre sus componentes. El límite para controlar la esbeltez del alma sin rigidizadores longitudinales debe cumplir la Ecuación 2-5, la cual permite también ignorar el pandeo por flexión del alma.

$$\frac{D}{t_w} \leq 150$$

Ecuación 2-5

D = Altura – profundidad del alma

t_w = Espesor del alma

Acerca de las proporciones de los patines, la relación entre el ancho y espesor de los mismos deben satisfacer la Ecuación 2-6, con la finalidad de garantizar que el patín no se deformará excesivamente cuando se suelde el alma (AASHTO, 2020).

$$\frac{b_f}{2*t_f} \leq 12.0$$

Ecuación 2-6

b_f = Ancho de patín

t_f = Espesor de patín

Por otro lado, también se debe tomar en cuenta la relación de la Ecuación 2-7, la cual representa un parámetro que afecta las características de resistencia de las secciones (AASHTO, 2020).

$$b_f \geq \frac{D}{6}$$

Ecuación 2-7

Para garantizar que las alas proporcionen restricción contra el pandeo por cortante del alma y que las condiciones de contorno en la unión entre el alma y ala sean suficientes, es necesario cumplir con la Ecuación 2-8.

$$t_f \geq 1.1 * t_w$$

Ecuación 2-8

Finalmente, se debe comprobar la relación de inercias entre las alas conforme la Ecuación 2-9.

$$0.1 \leq \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \leq 10$$

Ecuación 2-9

I_{yc} = Inercia del ala comprimida con respecto al eje vertical en el plano del alma

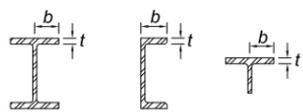
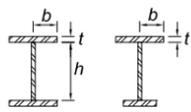
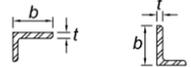
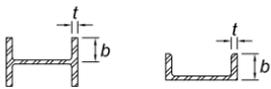
I_{yt} = Inercia del ala traccionada con respecto al eje vertical en el plano del alma

2.11 Secciones sísmicamente compactas

De acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) (2015), los elementos de un sistema resistente a cargas sísmicas deben mantener alas permanentemente unidas al alma, y las proporciones entre ancho-espesor de sus elementos sometidos a compresión no deben sobrepasar las relaciones máximas establecidas en la Tabla 2-7 y Tabla 2-8.

Tabla 2-7

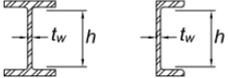
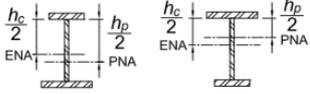
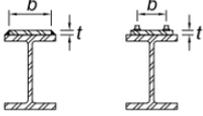
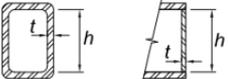
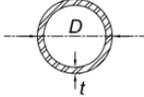
Máximas relaciones ancho-espesor para elementos no rigidizados a compresión (adoptado de AISC 360-22)

		Relación ancho-espesor: Elementos de compresión Miembros sometidos a flexión		
Tipo de elemento	Relación ancho-espesor	Límites		Ejemplo
		λ_p (Compacto/No compacto)	λ_r (No compacto/Esbelto)	
(1) Alas de perfiles "I" laminados. (2) Alas de canales. (3) Alas de vigas "T".		$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Elementos no rigidizados	Alas de perfiles "I" armados, doble y simplemente simétricos.	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95 \sqrt{\frac{k_c E}{F_L}}$	
	Patatas de ángulos simples.	$0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	Alas de perfiles "I" y canales en flexión alrededor del eje menor.	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Alma de perfiles "T"	d/t	$0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.52 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Fuente: Elaboración propia (2024), adaptado de AISC (2022).

Tabla 2-8

Máximas relaciones ancho-espesor para elementos rigidizados a compresión (adoptado AISC 360-22)

Tipo de elemento	Relación ancho-espesor	Relación ancho-espesor: Elementos de compresión Miembros sometidos a flexión		Ejemplo
		Límites		
		λ_p (Compacto/No compacto)	λ_r (No compacto/Esbelto)	
Almas de perfiles "I" y canales, doblemente simétricos.	h/t_w	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Almas de perfiles "I" individualmente simétricas.	h_c/t_w	$\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $\left(0.54 \frac{M_p}{M_y} - 0.09\right)^2 \leq \lambda_r$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Alas de HSS rectangulares.	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Placas de refuerzo de patín entre líneas de sujetadores o soldaduras.	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Almas de HSS rectangular y perfiles cajón.	h/t	$2.42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
HSS circular.	D/t	$0.07 \frac{E}{F_y}$	$0.31 \frac{E}{F_y}$	
Alas de perfiles cajón.	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Fuente: Elaboración propia (2024), adaptado de AISC (2022).

2.12 Diafragmas

Si en el modelo estructural utilizado para determinar los efectos de fuerza se incluyen diafragmas, estos se deberán diseñar para todos los estados límites aplicables para los efectos calculados y como mínimo para transferir cargas de viento según lo indicado en las especificaciones del Artículo 4.6.2.7 de la AASHTO (AASHTO, 2020).

Cuando las alas del diafragma no estén unidas directamente a las alas de la viga, se deberán tomar medidas para transferir la fuerza horizontal calculada en los diafragmas a las alas a través de placas de conexión, excepto en los casos en que la profundidad sea

inferior a la total. Para conectar diafragmas intermedios se utilizarán ángulos de extremo o placas de conexión de acuerdo al artículo 6.6.1.3.1 de la AASHTO. La excentricidad entre las alas del diafragma y las alas de la viga debe reconocerse en el diseño de las placas de conexión y su conexión al alma y al ala.

Para vigas laminadas y armadas, los diafragmas deberían tener la mayor profundidad posible, pero como mínimo 0,5 del canto de la viga para vigas laminadas y 0,75 del canto de la viga para vigas armadas.

La AASHTO (2020) afirma que los diafragmas de los extremos se diseñaran para las fuerzas y distorsiones transmitidas por la plataforma y la junta de la plataforma. Además, los momentos finales en los diafragmas se considerarán en el diseño de la conexión entre el componente longitudinal y el diafragma. Los diafragmas con relaciones luz-canto mayores o iguales a 4,0 pueden diseñarse como vigas.

En ediciones previas del AASHTO el espaciamiento máximo entre diafragmas es de 7,60 m. Sin embargo, el requisito ha sido reemplazado por uno de análisis racional que frecuentemente resultará en la eliminación de la vulnerabilidad a la fatiga (Prieto & René, 2010).

2.13 Deflexiones

Las deflexiones son distorsiones perpendiculares al eje longitudinal de la viga, como resultado de cargas verticales o de gravedad. Por lo que, estos elementos de acero deben curvarse durante la construcción para compensarlas (AASHTO, 2020).

Según McCormac (2012), se deben limitar valores máximos de deflexiones debido a que el exceso de las mismas puede generar daños en los materiales unidos o soportados por la viga, y se pierde confiabilidad y buena apariencia. Además, continúa afirmando que las limitaciones de las deflexiones se sitúan en el área de la capacidad de servicio y deberán calcularse para la carga viva de servicio.

Según la AASHTO (2020), se pueden considerar los siguientes límites de deflexión para puentes vehiculares de acero, aluminio y/o concreto:

- Carga vehicular, general $L/800$
- Cargas vehiculares y/o peatonales $L/100$

- Cargas vehiculares sobre voladizos $L/300$
- Cargas vehiculares y/o peatonales $L/375$

L = longitud del tramo

3. MODELAMIENTO DE VARIANTES DE TABLEROS CON VIGAS DE ACERO Y DIAFRAGMAS

El modelamiento de los puentes parte de la definición de materiales y secciones de las diferentes variantes, esto con ayuda del software de análisis CSi Bridge. Se toma en cuenta que serán puentes isostáticos, en donde, el inicio estará simplemente apoyado y articulado al final. Además, las consideraciones, relaciones y factores tomados para el dimensionamiento de los elementos que conforman la superestructura se mencionaron en el capítulo: INFORMACIÓN TÉCNICA REFERENTE.

3.1 Determinación de luces, prediseño de vigas y diafragmas

Previo a la modelación de las variantes de puentes determinamos las diferentes luces de los mismos, las cuales serán: 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m, 45m y 50m.

En cuanto al prediseño de vigas, se realizó para cada luz del puente y de acuerdo a la normativa AASHTO como se observa en la Tabla 3-1 y en base a la NEVI-12 con secciones compactas se puede apreciar en la Tabla 3-2. Sin embargo, para la investigación en curso se hará uso de las vigas obtenidas en el prediseño dictado por la AASHTO.

Tabla 3-1

Prediseño de vigas según la AASHTO (2020)

AASHTO (2020)							
Luz (m)	Profundidad mínima incluyendo tablero - Tramos simples D (mm)	Relación alma		Relaciones patín			
		$\frac{D}{t_w} \leq 150$	Constructivo (min 8mm)	$b_f \geq \frac{D}{6}$	Consideración constructiva (1/2-1/3)	$\frac{b_f}{2 * t_f} \leq 12.0$	Constructivo (min 8mm)
		t_w (mm)		b_f (mm)		t_f (mm)	
10	330	2,2	8	55	220	9,2	10
15	500	3,3	8	83,3	220	9,2	10
20	660	4,4	8	110	250	10,4	12
25	830	5,5	8	138,3	280	11,7	12
30	990	6,6	10	165	350	14,6	15
35	1160	7,7	12	193,3	400	16,7	18
40	1320	8,8	15	220	480	20	20
45	1490	9,9	18	248,3	550	22,9	25
50	1650	11	18	275	600	25	25

Fuente: Elaboracion propia (2024).

Tabla 3-2

Prediseño de vigas según la NEVI-12 (2013)

Luz (m)	NEVI-12 (2013)						
	Peralte de viga compuesta (L/25)	Relación alma			Relaciones patín		
		Secciones compactas		D/3 (min 300)		Secciones compactas	
	D (mm)	t _w (mm)	Constructivo	b _f (mm)	Constructivo	t _f (mm)	Constructivo
10	400	5,0	5	300	300	17	18
15	600	7,0	8	300	300	17	18
20	800	9,0	10	300	300	17	18
25	1000	12,0	12	333,3	335	19	20
30	1200	14,0	15	400	400	22	22
35	1400	16,0	18	466,7	470	26	28
40	1600	18,0	18	533,3	535	30	32
45	1800	20,0	20	600	600	33	38
50	2000	23,0	25	666,7	670	37	38

Fuente: Elaboracion propia (2024).

Para el dimensionamiento de diafragmas de acero, al emplear las mismas como secciones tipo viga I, se tomaron ciertas consideraciones de la AASHTO y se obtuvieron los valores de la Tabla 3-3. Además, para la unión entre vigas de acero y diafragmas de acero se emplearán placas del mismo material con el mismo espesor obtenido en el alma del diafragma.

Tabla 3-3

Dimensionamiento de diafragmas de acero

Luz (m)	D (mm) - 60% viga principal	Constructivo (mm)	Diafragmas de acero					
			Relación alma			Relaciones patín		
			$\frac{D}{t_w} \leq 150$		$b_f \geq \frac{D}{6}$		$\frac{b_f}{2 * t_f} \leq 12.0$	
			t _w (mm)	Constructivo (min 8 mm)	b _f (mm)	Consideración constructiva (1/2-1/3)	t _f (mm)	Constructivo (min 8 mm)
10	198	200	1,3	8	33,3	200	8,3	10
15	300	300	2	8	50	200	8,3	10
20	396	400	2,7	8	66,7	200	8,3	10
25	498	500	3,3	8	83,3	200	8,3	10
30	594	600	4	8	100	250	10,4	12
35	696	700	4,7	8	116,7	280	11,7	12
40	792	800	5,3	10	133,3	300	12,5	15
45	894	900	6	10	150	350	14,6	15
50	990	1000	6,7	12	166,7	400	16,7	18

Fuente: Elaboracion propia (2024).

Los diafragmas de hormigón fueron dimensionados en base a consideraciones constructivas que se observan en la Tabla 3-4 y se conectarán a las vigas principales a través de placas embebidas en el hormigón de sección igual a la del diafragma.

Tabla 3-4

Dimensionamiento de diafragmas de hormigón

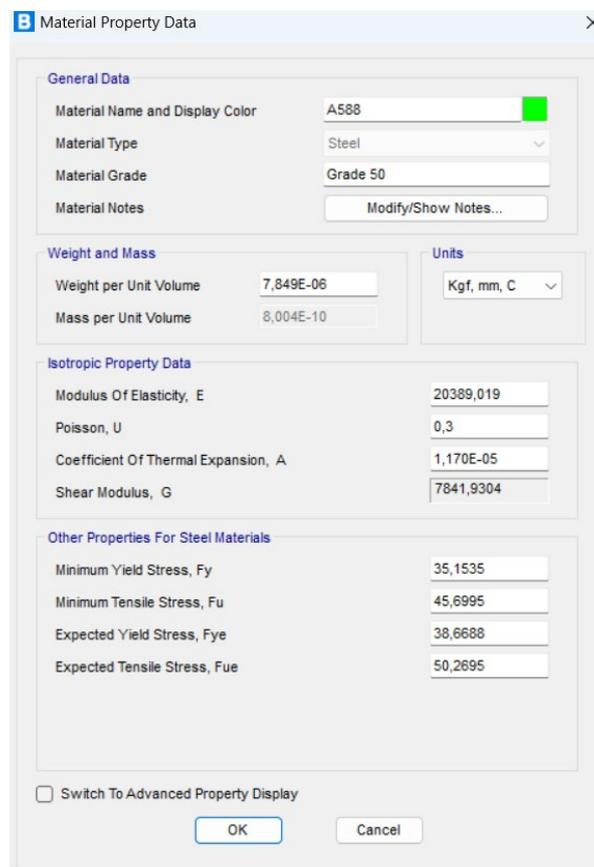
Diafragma de hormigón				
Luz (m)	Peralte viga principal (mm)	Peralte diafragma (mm) 70%-75%	Constructivo (mm)	Base (mm) 200mm-300mm
10	330	247,5	245	200
15	500	375	375	250
20	660	495	495	300
25	830	622,5	620	300
30	990	742,5	740	300
35	1160	870	870	300
40	1320	990	990	300
45	1490	1117,5	1115	300
50	1650	1237,5	1235	300

Fuente: Elaboracion propia (2024).

3.2 Determinación de materiales

El acero utilizado para la investigación en curso es el ASTM A588 de grado 50, que contiene las propiedades de la Figura 3-1.

Figura 3-1: Propiedades del acero ASTM A588 Gr50



Fuente: CSi Bridge (2024).

El hormigón que se tomó para el modelamiento del tablero y diafragmas del mismo material es aquel que posee una resistencia a la compresión $f'_c=300\text{kg/cm}^2$ y con propiedades que se observan en la Figura 3-2.

Figura 3-2: Propiedades del hormigón $f'_c=300\text{ kg/cm}^2$

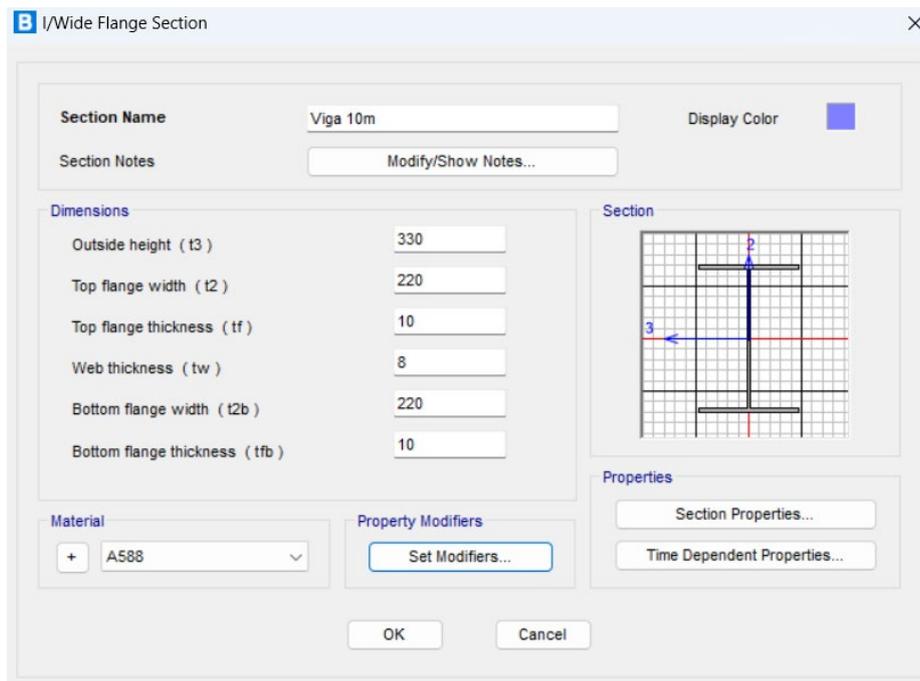
Section	Property	Value
General Data	Material Name and Display Color	fc 300
	Material Type	Concrete
	Material Grade	fc 4000 psi
	Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	Weight per Unit Volume	2,403E-03
	Mass per Unit Volume	2,450E-06
Isotropic Property Data	Modulus Of Elasticity, E	216506,35
	Poisson, U	0,2
	Coefficient Of Thermal Expansion, A	9,900E-06
	Shear Modulus, G	90210,98
Other Properties For Concrete Materials	Specified Concrete Compressive Strength, fc	300,
	Expected Concrete Compressive Strength	300,
	Lightweight Concrete	<input type="checkbox"/>
	Shear Strength Reduction Factor	

Fuente: CSi Bridge (2024).

3.3 Configuración de las secciones de vigas y diafragmas

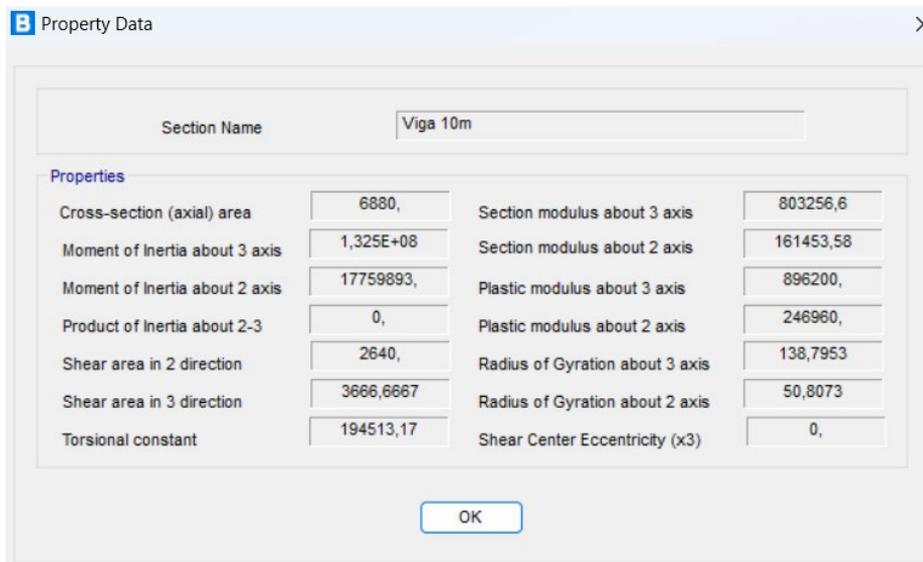
Para el puente de luz de 10m, se ingresó las dimensiones en mm de las vigas principales que se observa en la Figura 3-3, obteniendo las propiedades de la Figura 3-4. Los diafragmas de acero contienen las dimensiones en mm de la Figura 3-5 con las propiedades de la Figura 3-6. Finalmente, el tamaño en mm de los diafragmas de hormigón para esta variante se encuentra en la Figura 3-7 con las propiedades de la Figura 3-8.

Figura 3-3: Dimensiones de vigas principales para puente de 10m



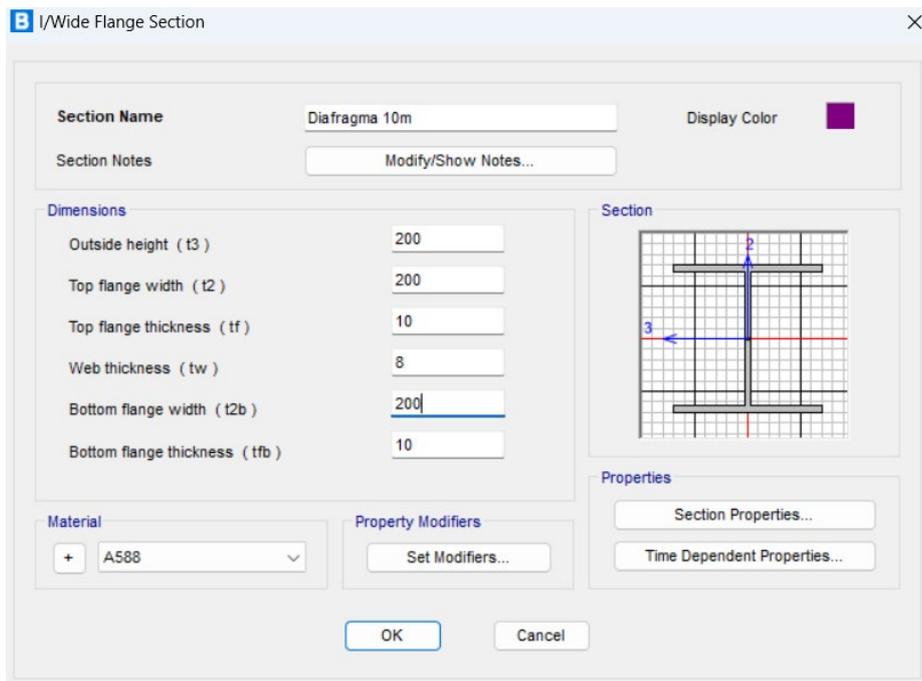
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-4: Propiedades de vigas principales para puente de 10m



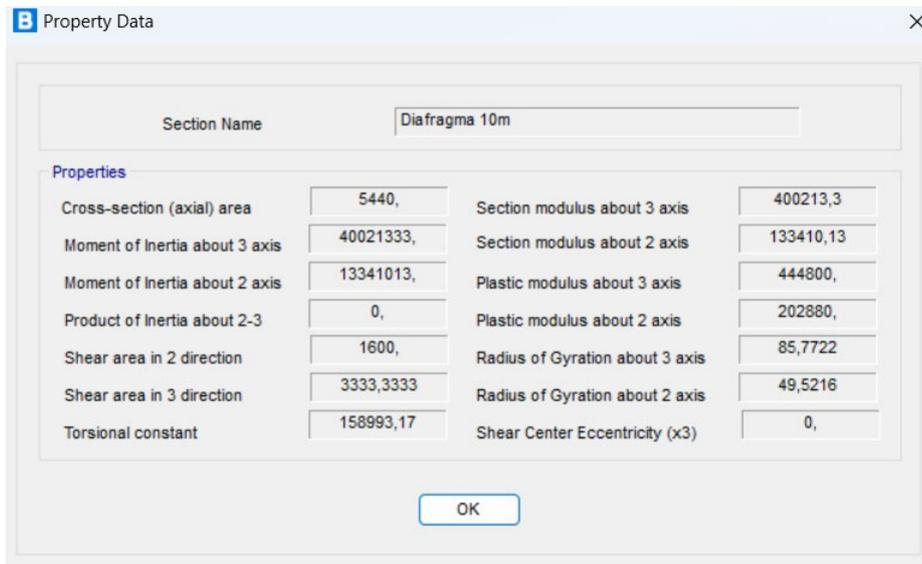
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-5: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 10m



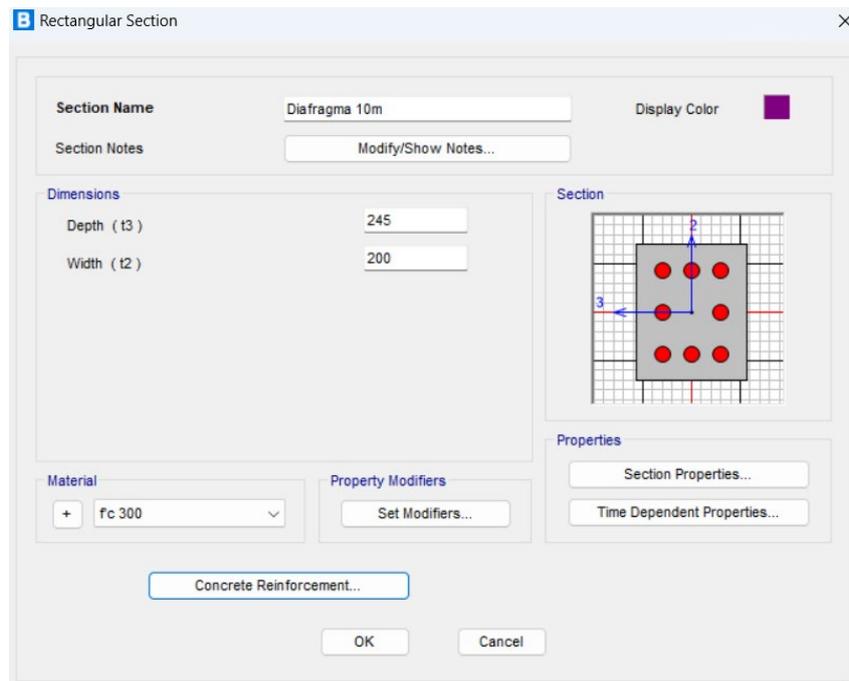
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-6: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 10m



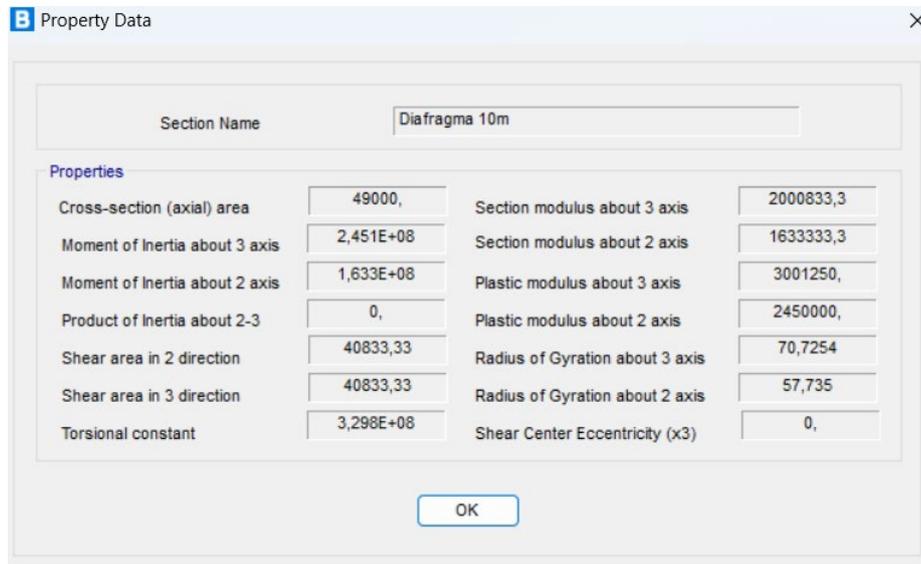
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-7: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 10m



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-8: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 10m

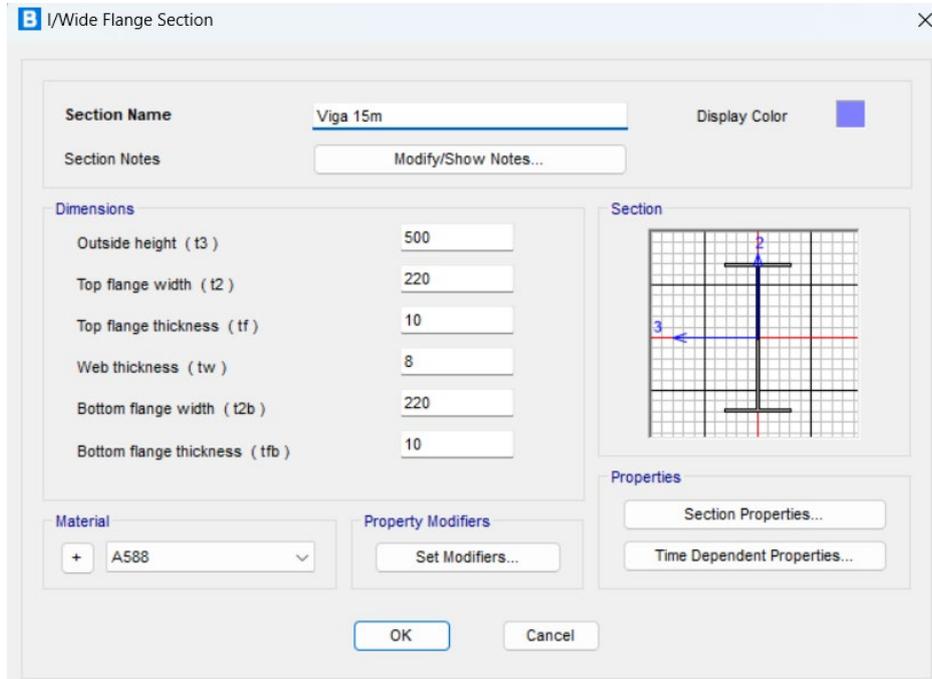


Fuente: CSi Bridge (2024).

Para el puente de luz de 15m, se ingresó las dimensiones en mm de las vigas principales que se observa en la Figura 3-9, obteniendo las propiedades de la Figura 3-10. Los diafragmas de acero contienen las dimensiones en mm de la Figura 3-11 con las propiedades de la Figura 3-12. Finalmente, el tamaño en mm de los diafragmas de

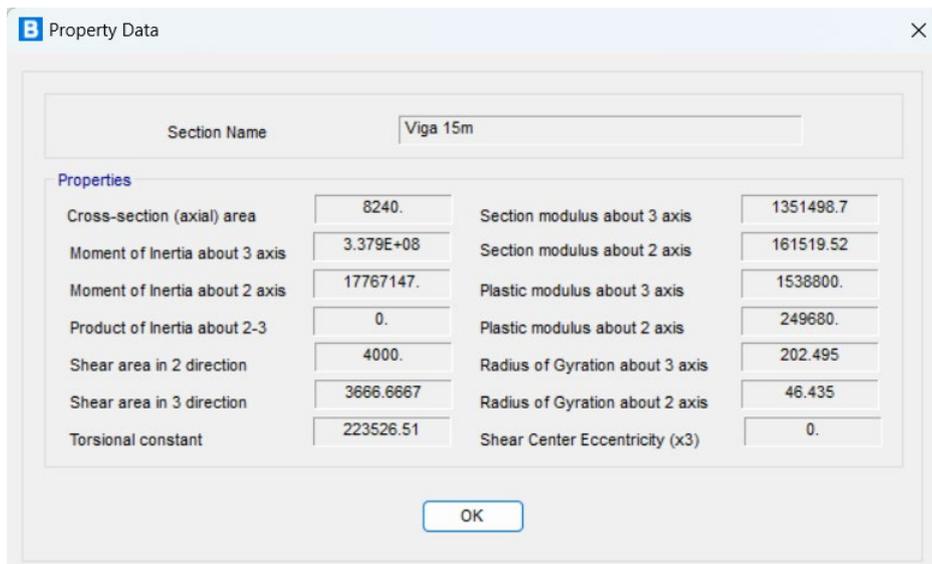
hormigón para esta variante se encuentra en la Figura 3-13 con las propiedades de la Figura 3-14.

Figura 3-9: Dimensiones de vigas principales para puente de 15m



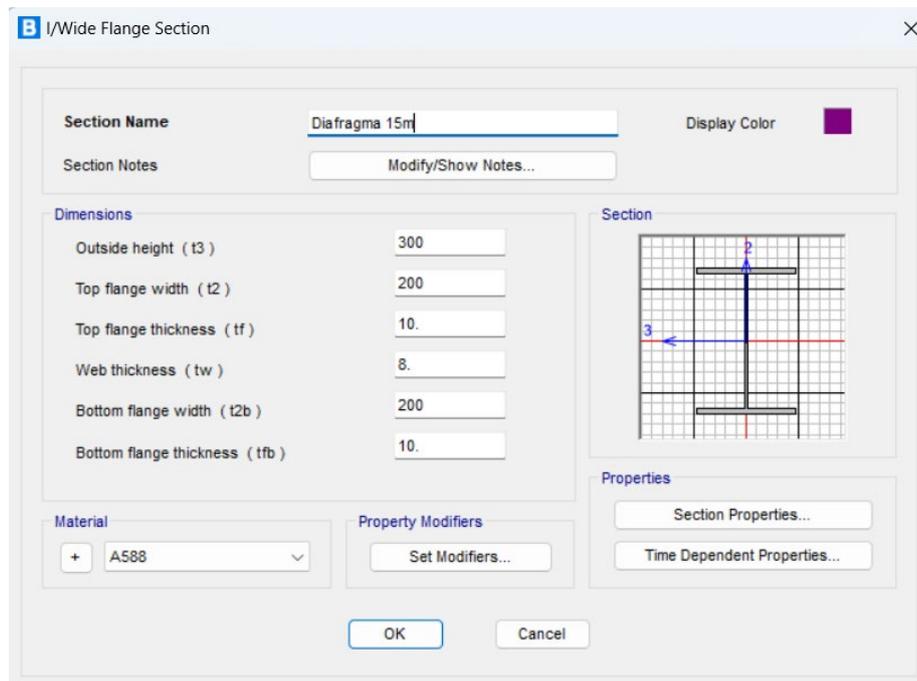
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-10: Propiedades de vigas principales para puente de 15m



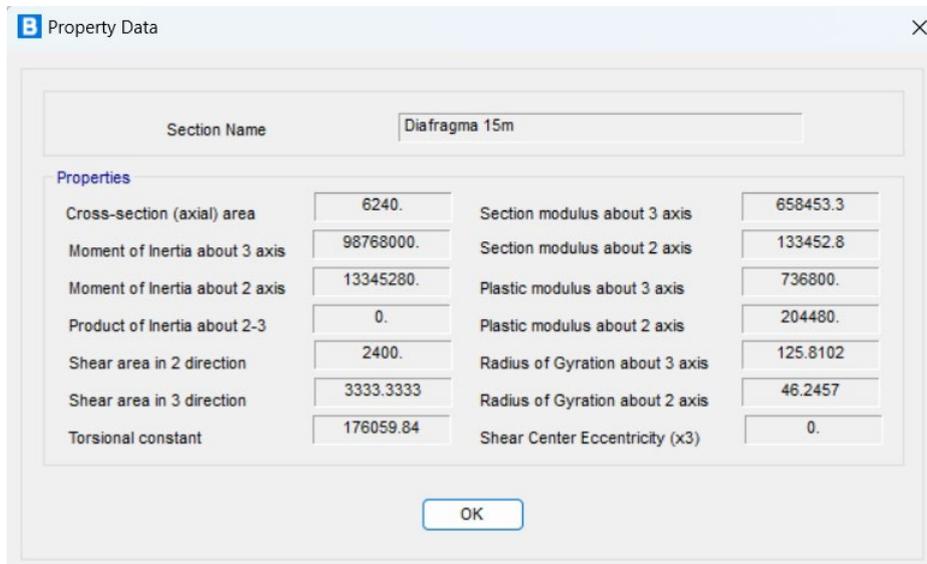
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-11: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 15m



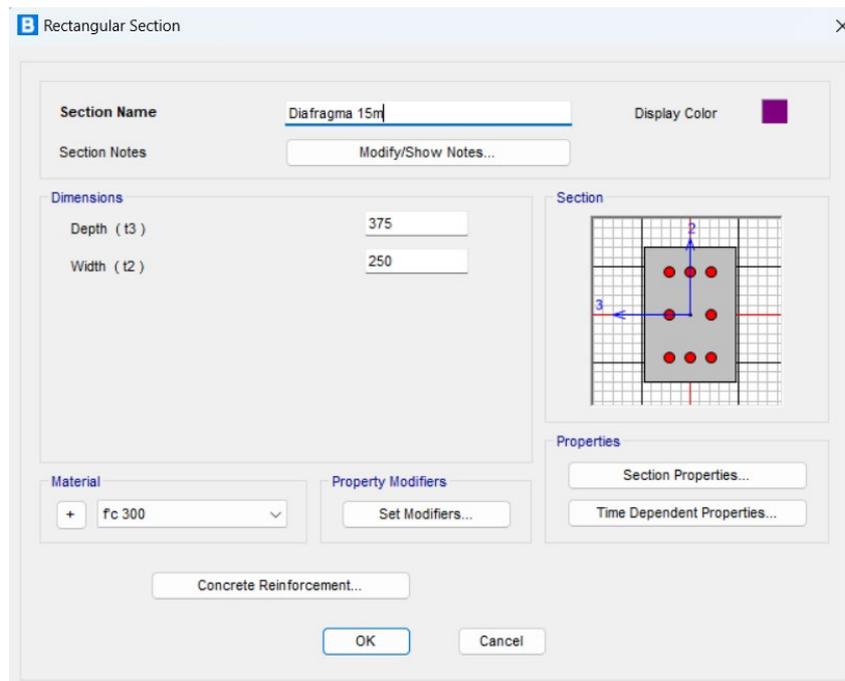
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-12: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 15m



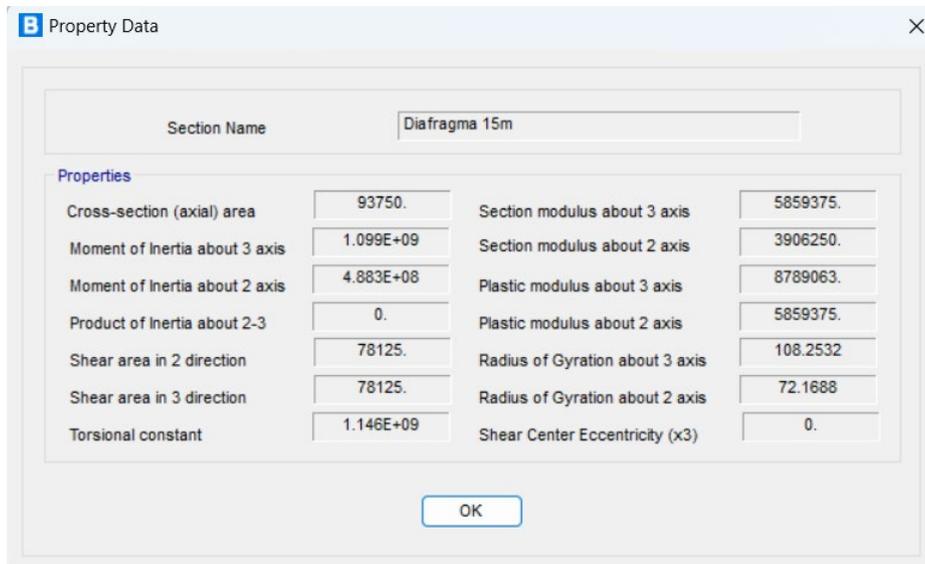
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-13: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 15m



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-14: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 15m

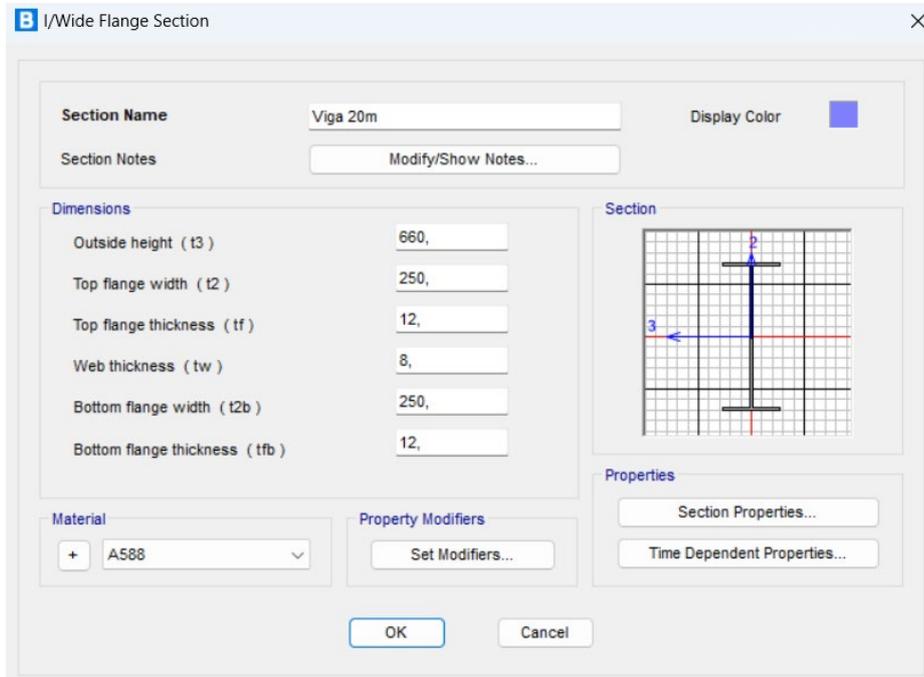


Fuente: CSi Bridge (2024).

Para el puente de luz de 20m, se ingresó las dimensiones en mm de las vigas principales que se observa en la Figura 3-15, obteniendo las propiedades de la Figura 3-16. Los diafragmas de acero contienen las dimensiones en mm de la Figura 3-17 con las propiedades de la Figura 3-18. Finalmente, el tamaño en mm de los diafragmas de

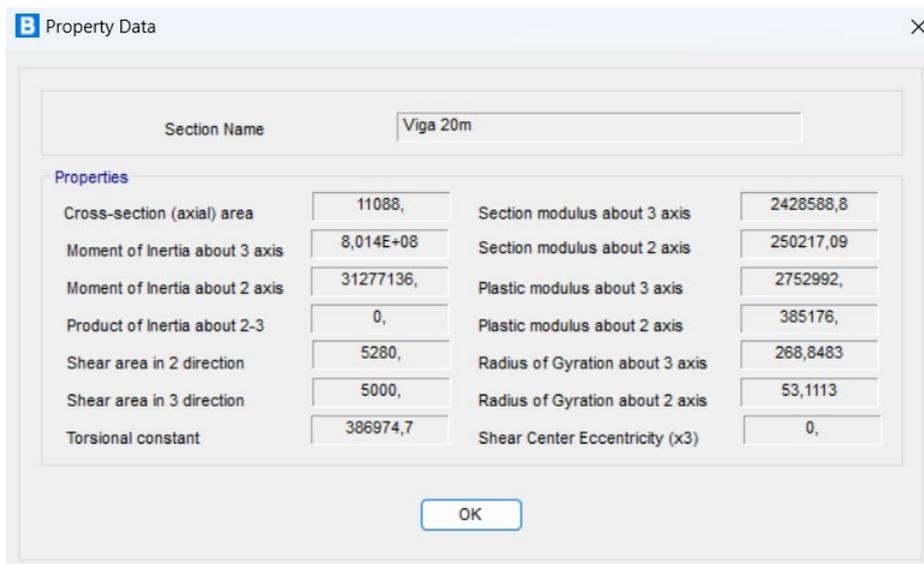
hormigón para esta variante se encuentra en la Figura 3-19 con las propiedades de la Figura 3-20.

Figura 3-15: Dimensiones de vigas principales para puente de 20m



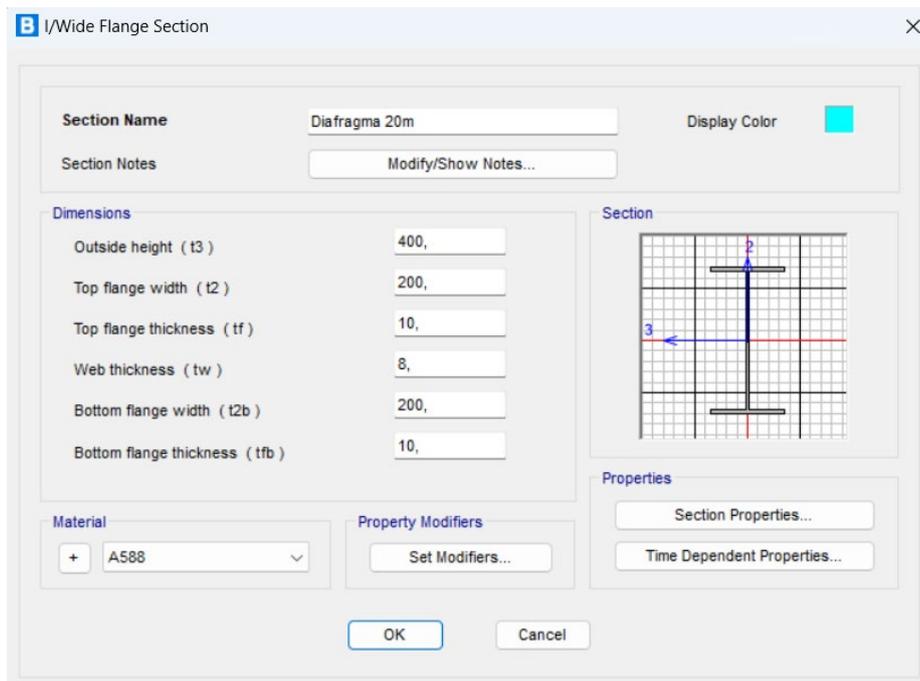
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-16: Propiedades de vigas principales para puente de 20m



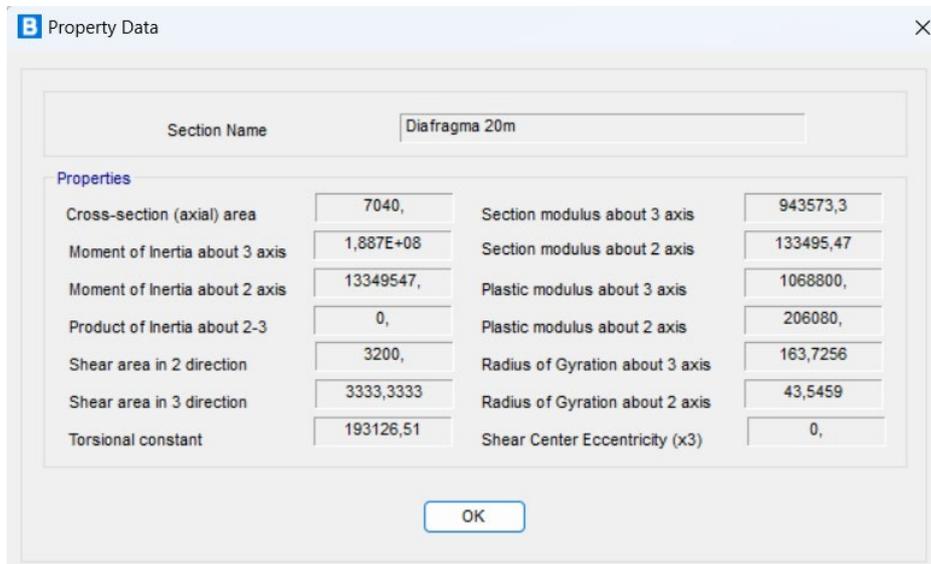
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-17: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 20m



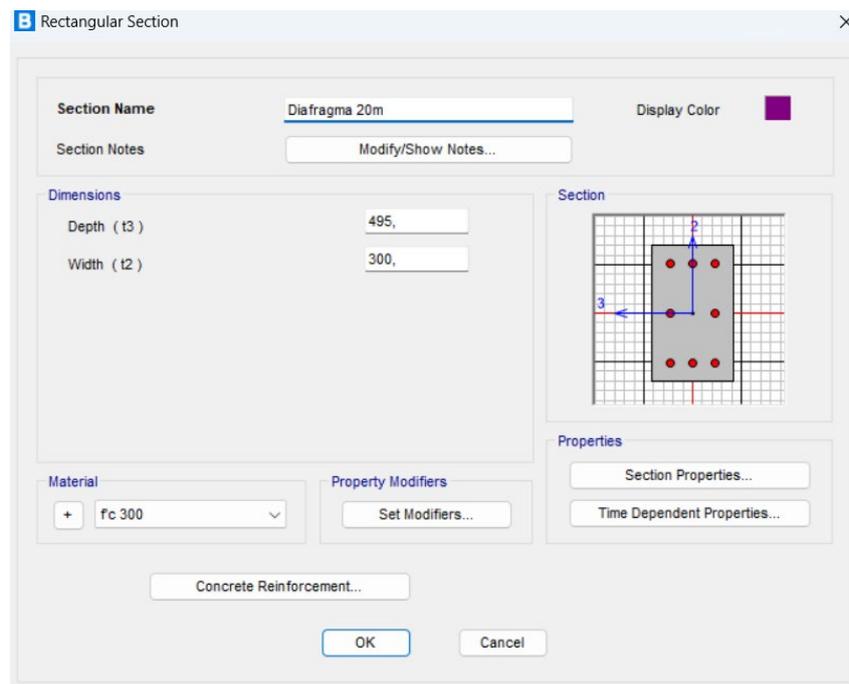
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-18: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 20m



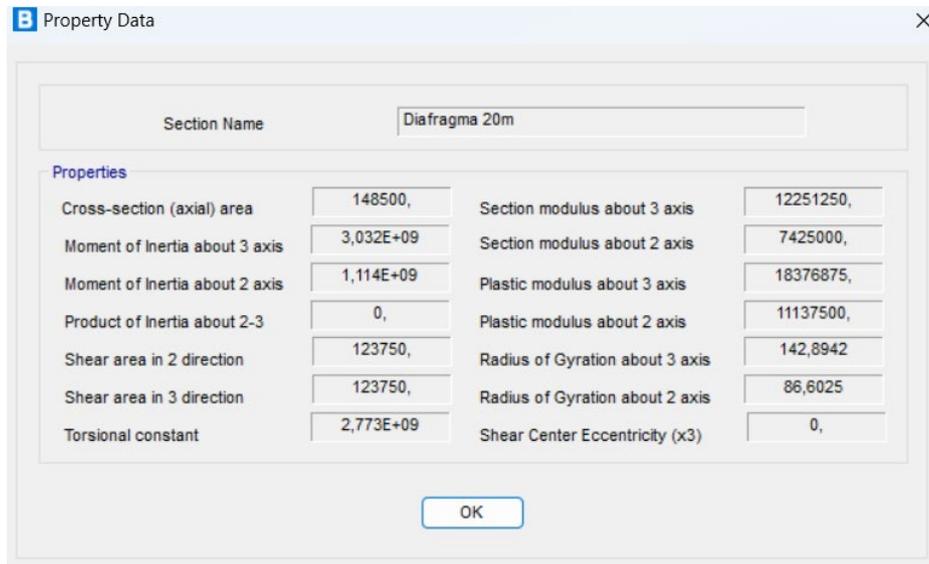
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-19: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 20m



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-20: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 20m

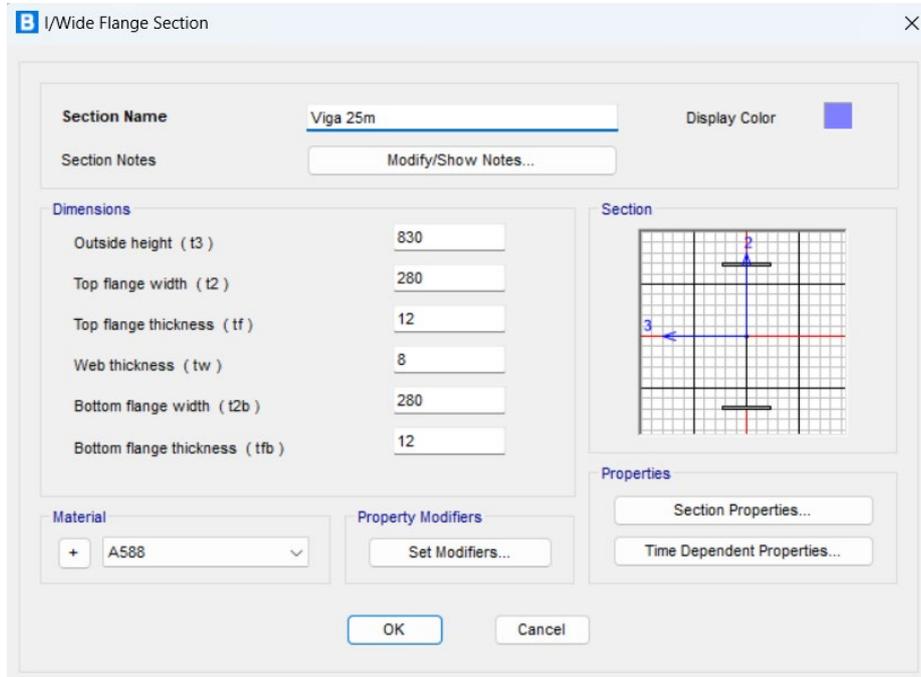


Fuente: CSi Bridge (2024).

Para el puente de luz de 25m, se ingresó las dimensiones en mm de las vigas principales que se observa en la Figura 3-21, obteniendo las propiedades de la Figura 3-22. Los diafragmas de acero contienen las dimensiones en mm de la Figura 3-23 con las propiedades de la Figura 3-24. Finalmente, el tamaño en mm de los diafragmas de

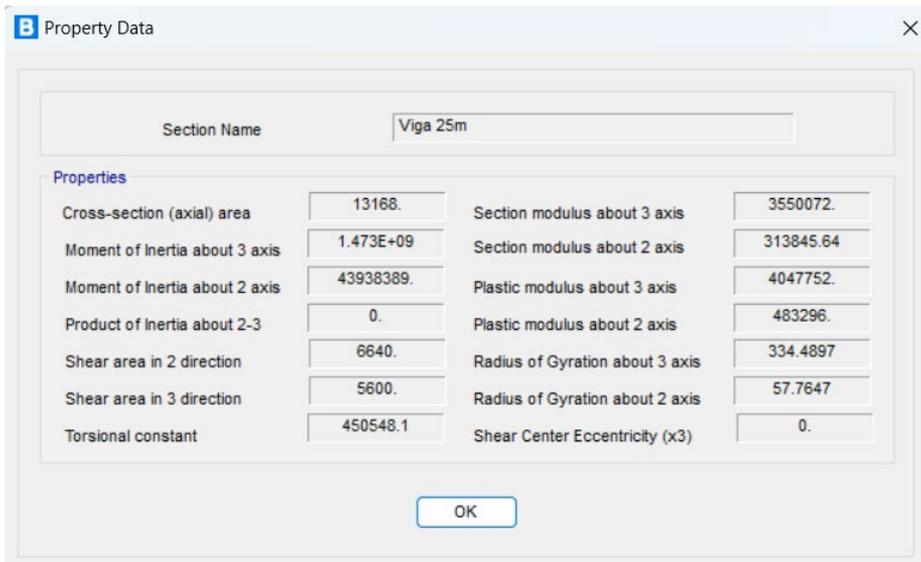
hormigón para esta variante se encuentra en la Figura 3-25 con las propiedades de la Figura 3-26.

Figura 3-21: Dimensiones de vigas principales para puente de 25m



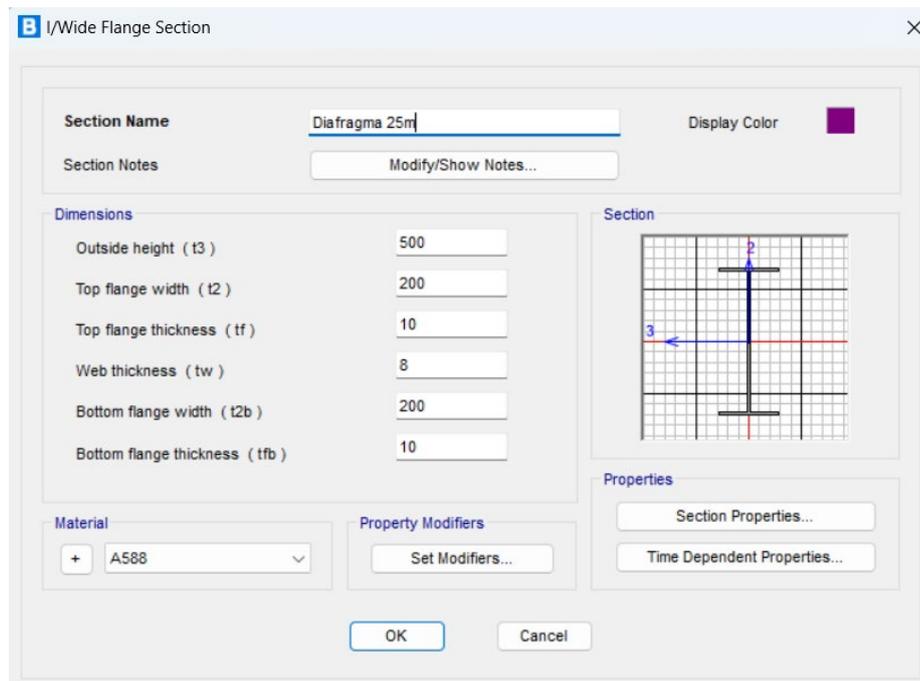
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-22: Propiedades de vigas principales para puente de 25m



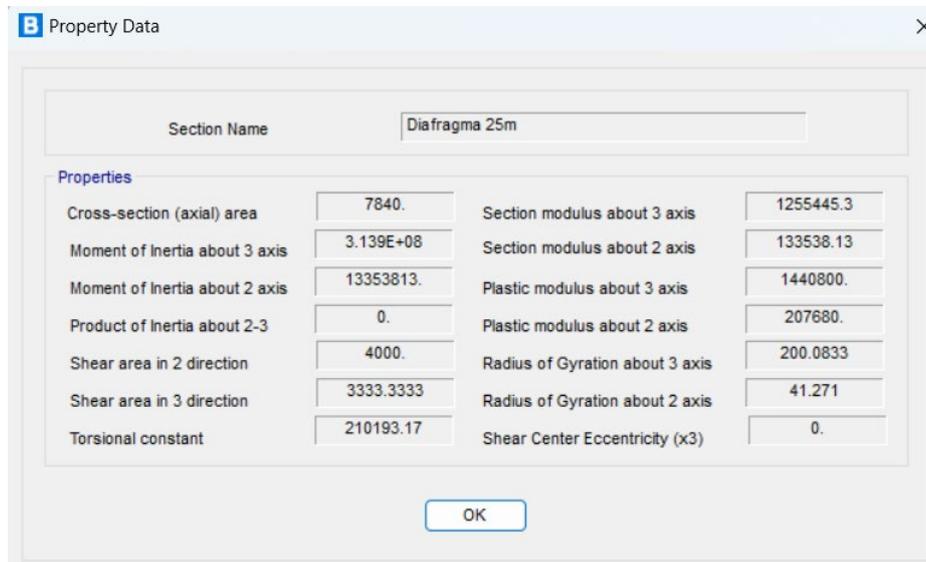
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-23: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 25m



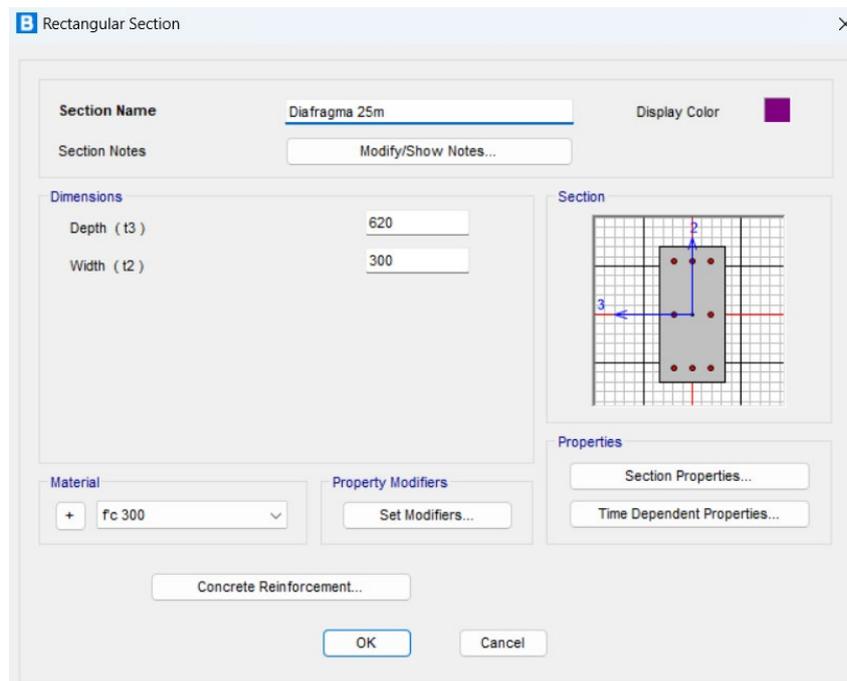
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-24: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 25m



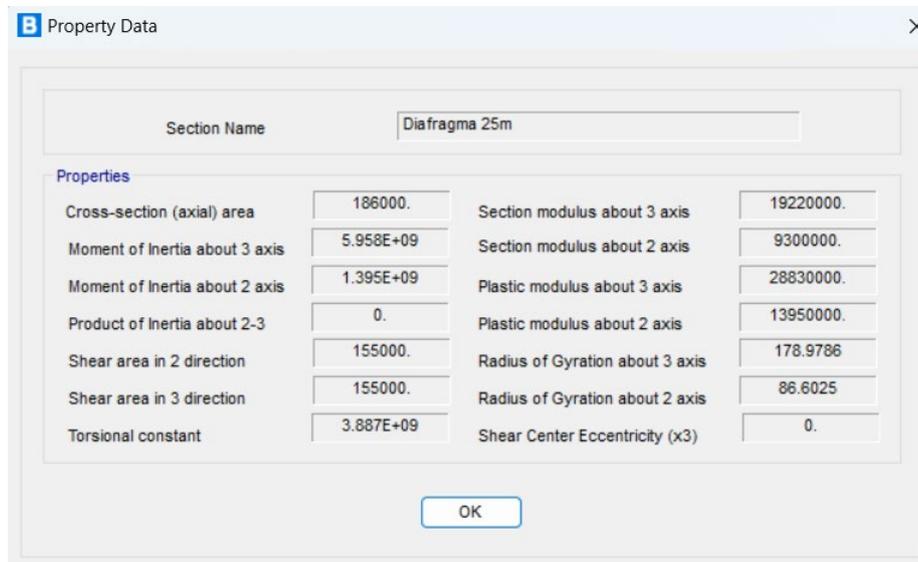
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-25: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 25m



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-26: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 25m

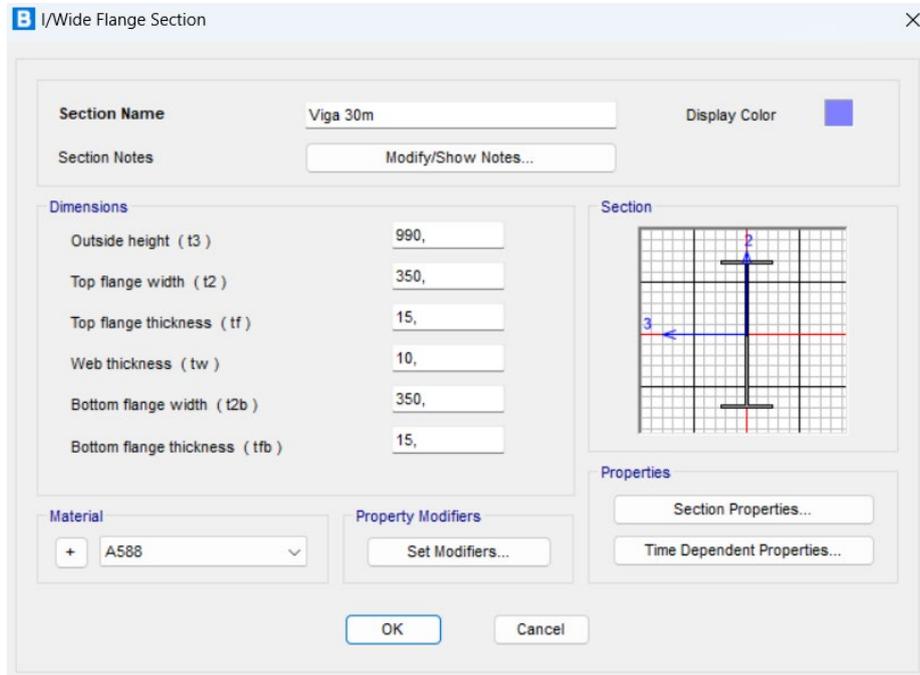


Fuente: CSi Bridge (2024).

Para el puente de luz de 30m, se ingresó las dimensiones en mm de las vigas principales que se observa en la Figura 3-27, obteniendo las propiedades de la Figura 3-28. Los diafragmas de acero contienen las dimensiones en mm de la Figura 3-29 con las propiedades de la Figura 3-30. Finalmente, el tamaño en mm de los diafragmas de

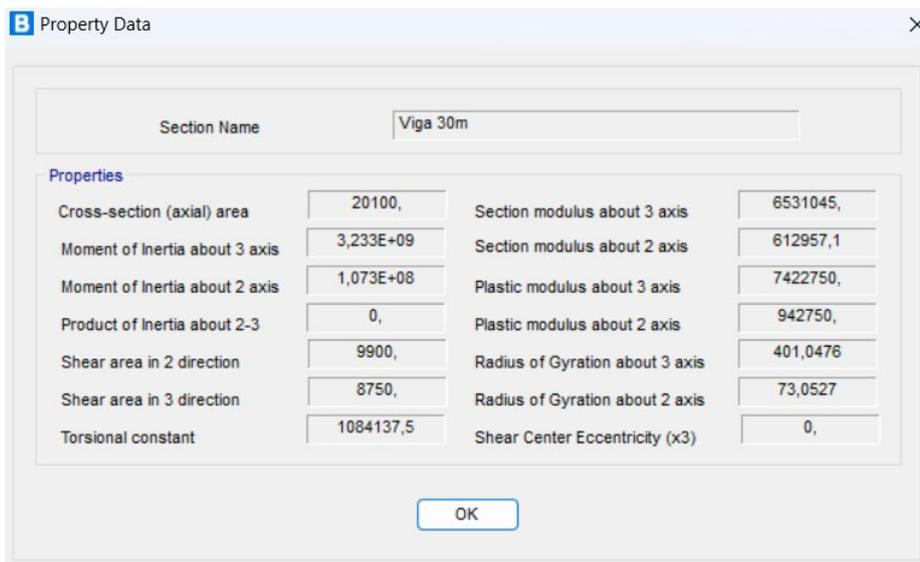
hormigón para esta variante se encuentra en la Figura 3-31 con las propiedades de la Figura 3-32.

Figura 3-27: Dimensiones de vigas principales para puente de 30m



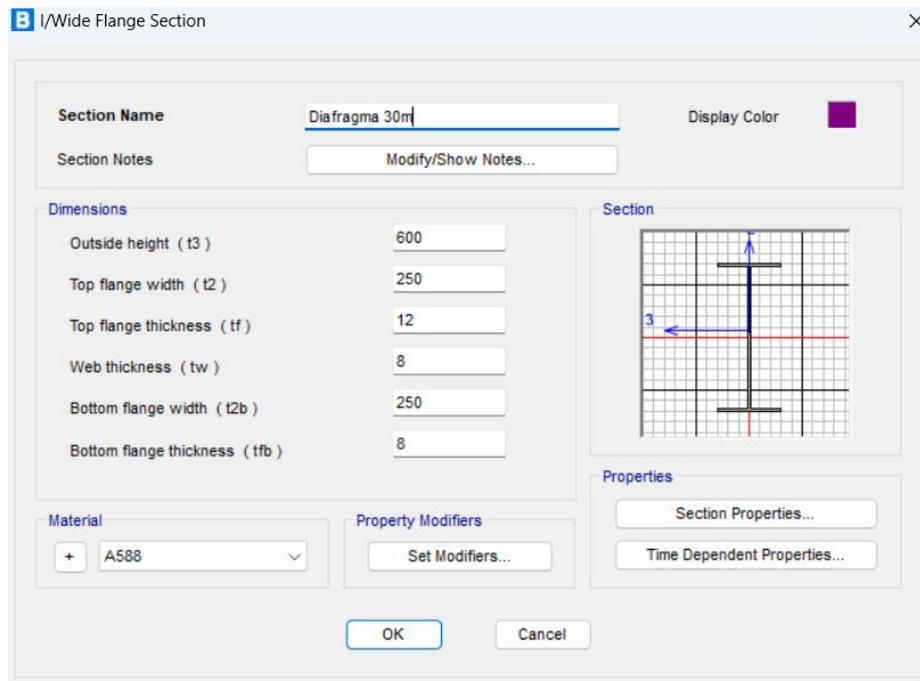
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-28: Propiedades de vigas principales para puente de 30m



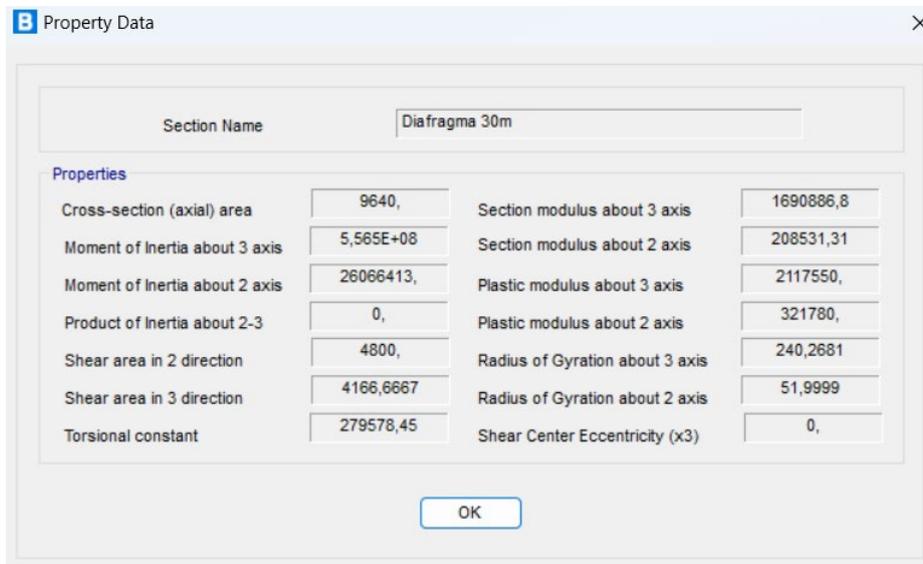
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-29: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 30m



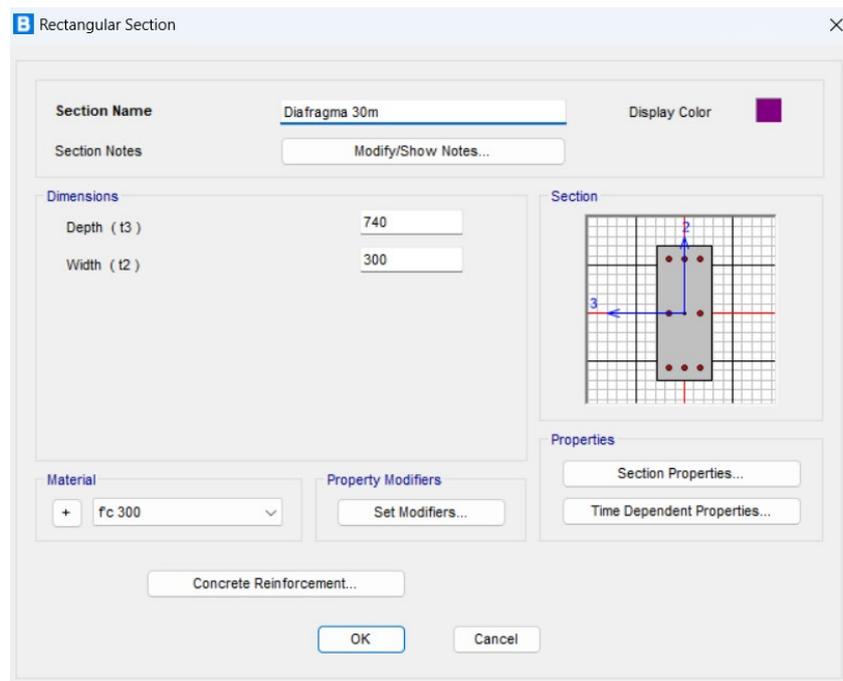
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-30: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 30m



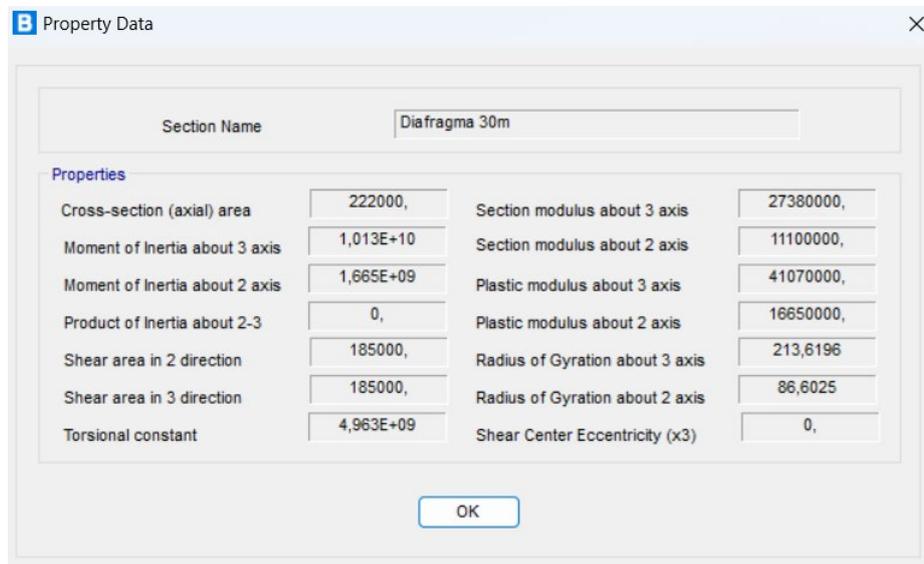
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-31: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 30m



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-32: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 30m

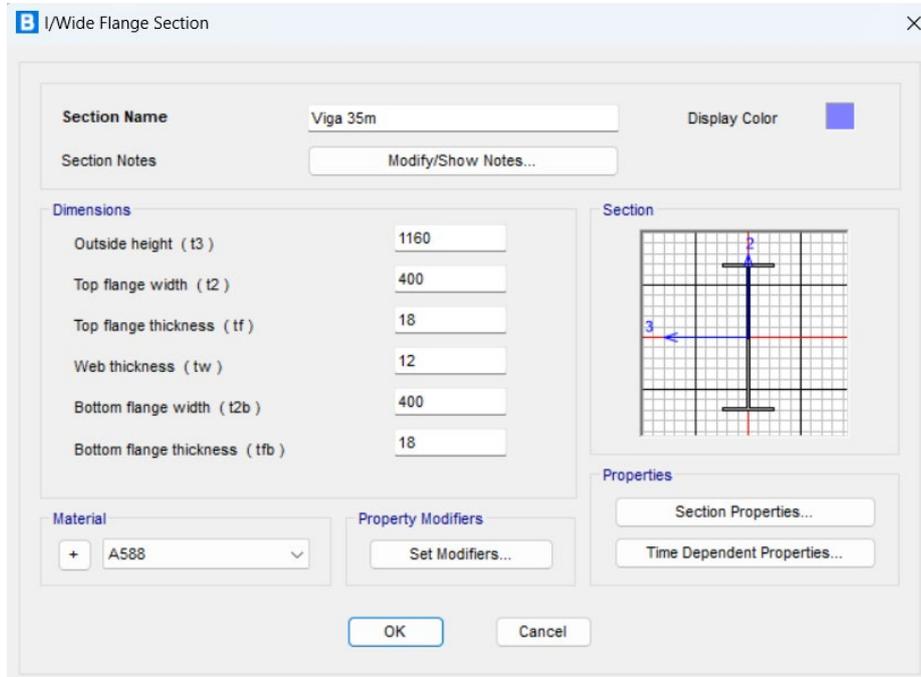


Fuente: CSi Bridge (2024).

Para el puente de luz de 35m, se ingresó las dimensiones en mm de las vigas principales que se observa en la Figura 3-33, obteniendo las propiedades de la Figura 3-34. Los diafragmas de acero contienen las dimensiones en mm de la Figura 3-35 con las propiedades de la Figura 3-36. Finalmente, el tamaño en mm de los diafragmas de

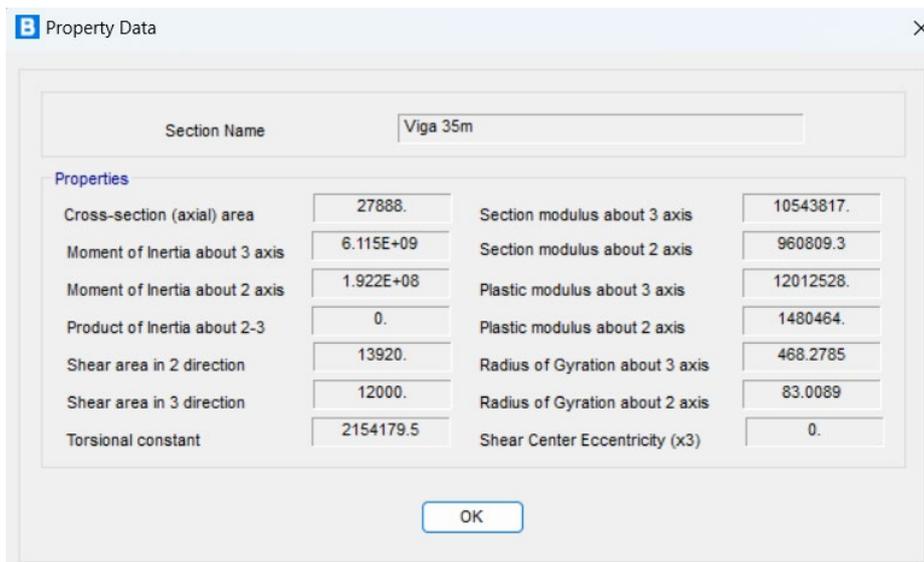
hormigón para esta variante se encuentra en la Figura 3-37 con las propiedades de la Figura 3-38.

Figura 3-33: Dimensiones de vigas principales para puente de 35m



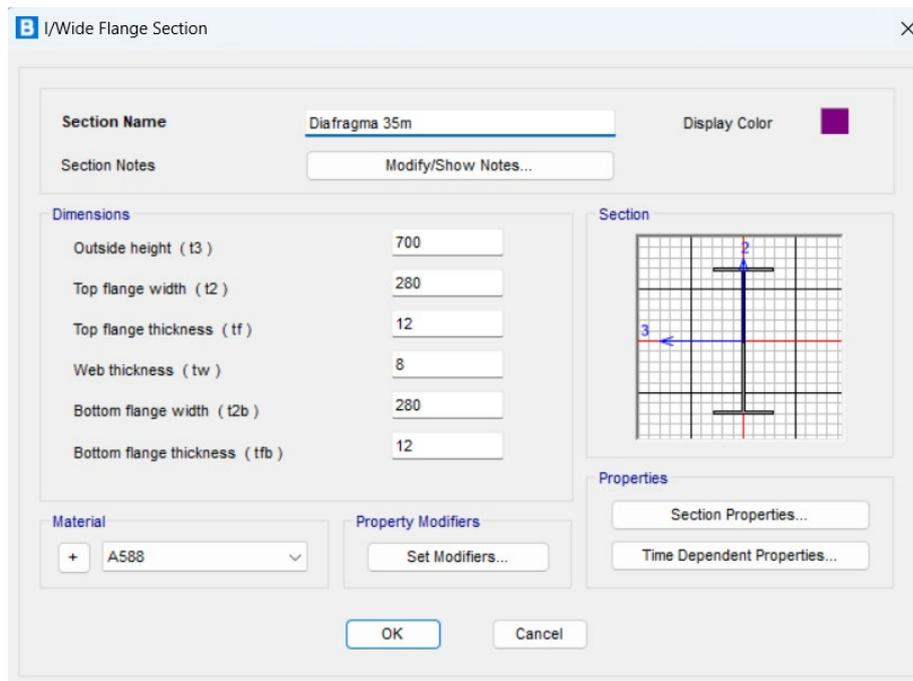
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-34: Propiedades de vigas principales para puente de 35m



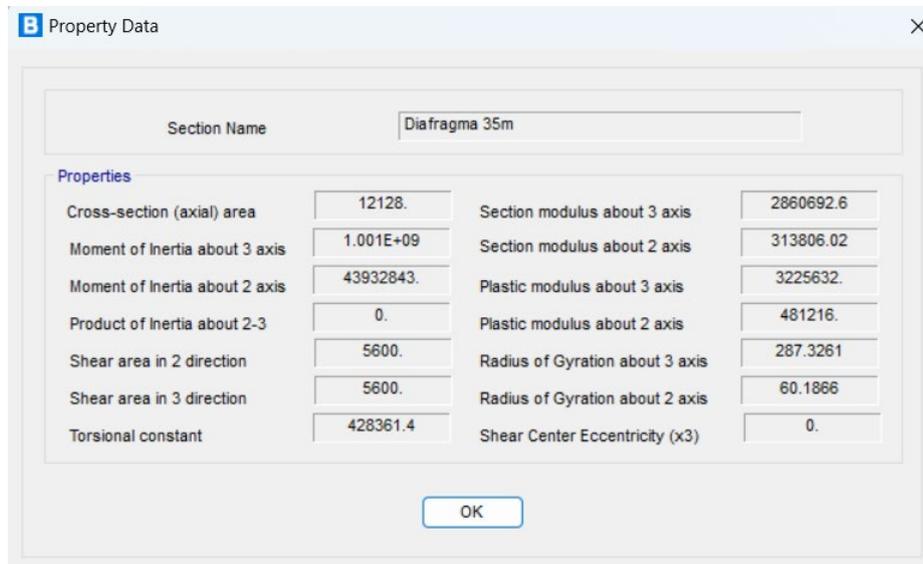
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-35: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 35m



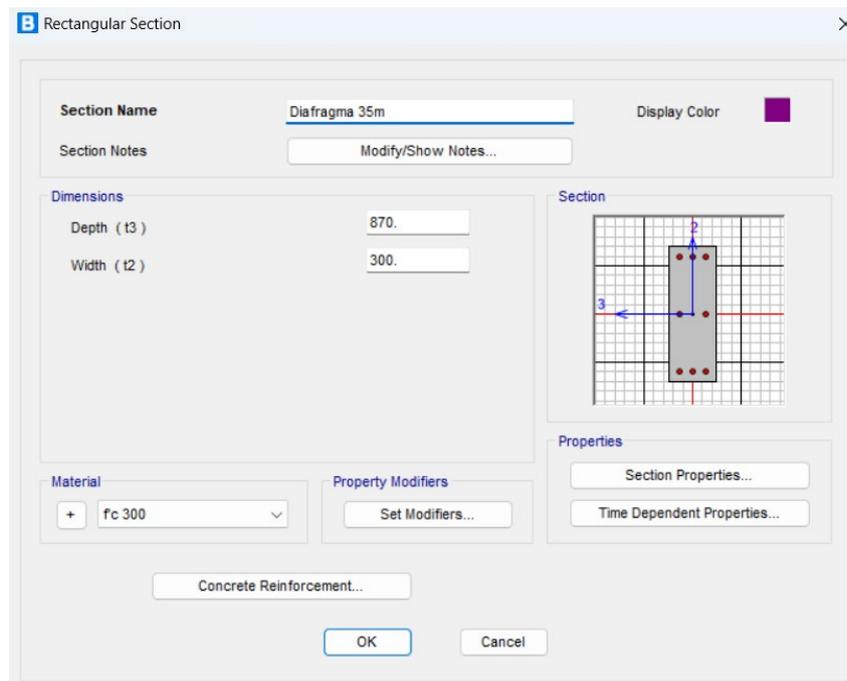
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-36: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 35m



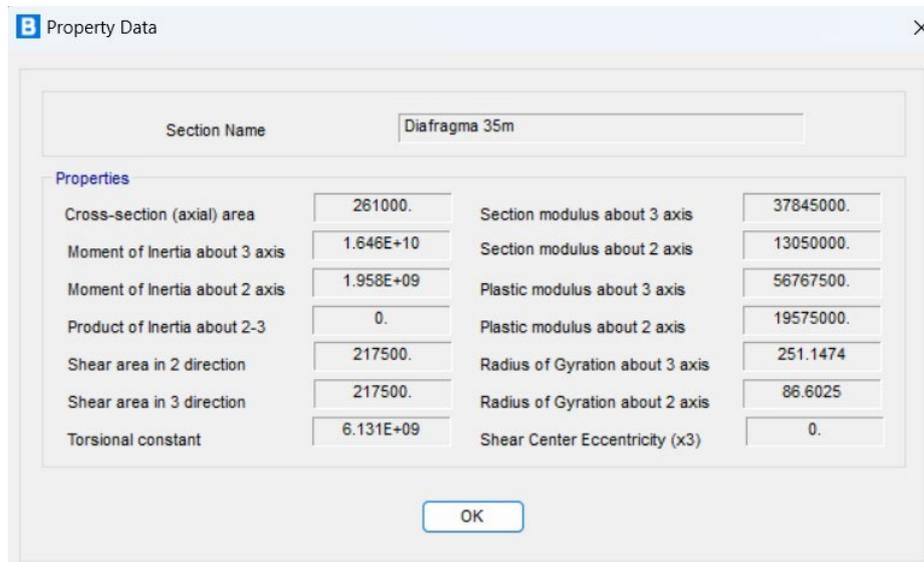
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-37: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 35m



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-38: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 35m

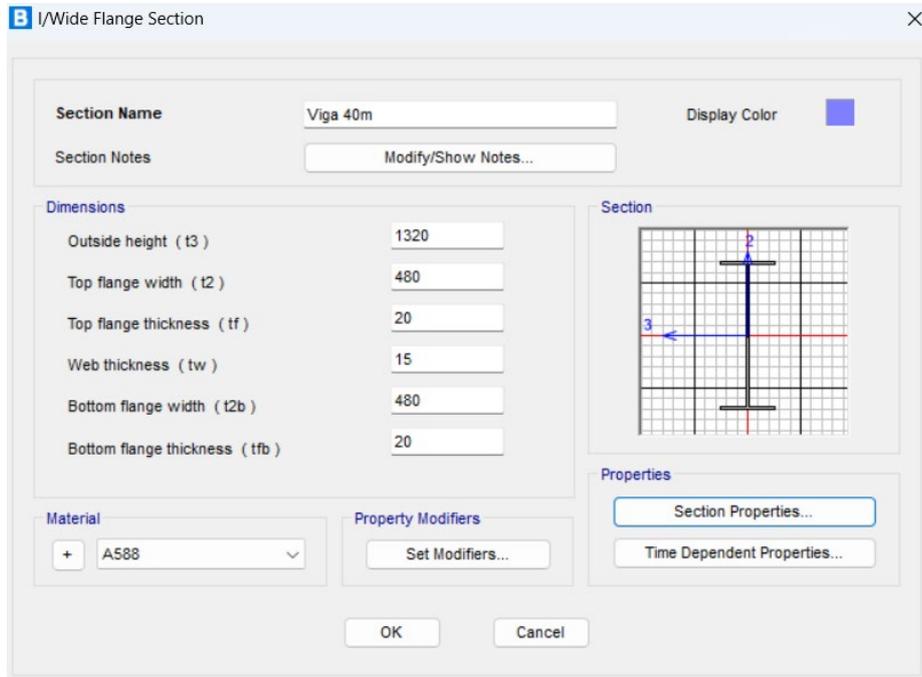


Fuente: CSi Bridge (2024).

Para el puente de luz de 40m, se ingresó las dimensiones en mm de las vigas principales que se observa en la Figura 3-39, obteniendo las propiedades de la Figura 3-40. Los diafragmas de acero contienen las dimensiones en mm de la Figura 3-41 con las propiedades de la Figura 3-42. Finalmente, el tamaño en mm de los diafragmas de

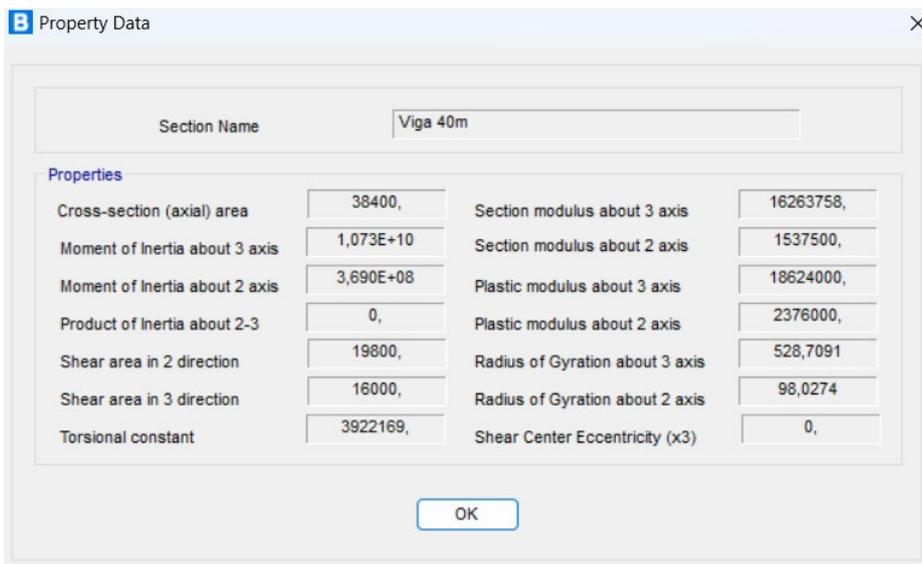
hormigón para esta variante se encuentra en la Figura 3-43 con las propiedades de la Figura 3-44.

Figura 3-39: Dimensiones de vigas principales para puente de 40m



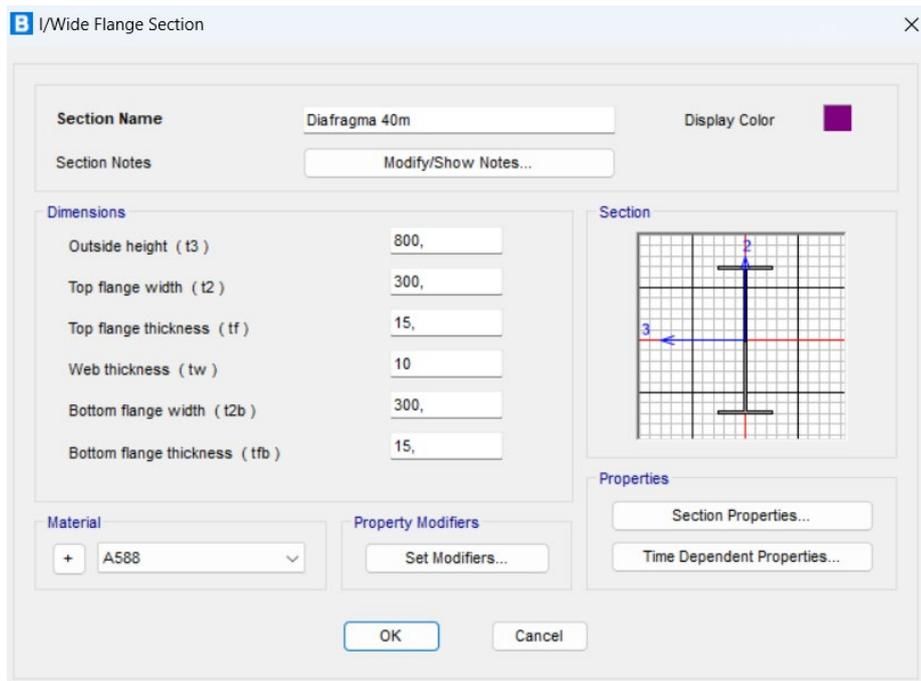
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-40: Propiedades de vigas principales para puente de 40m



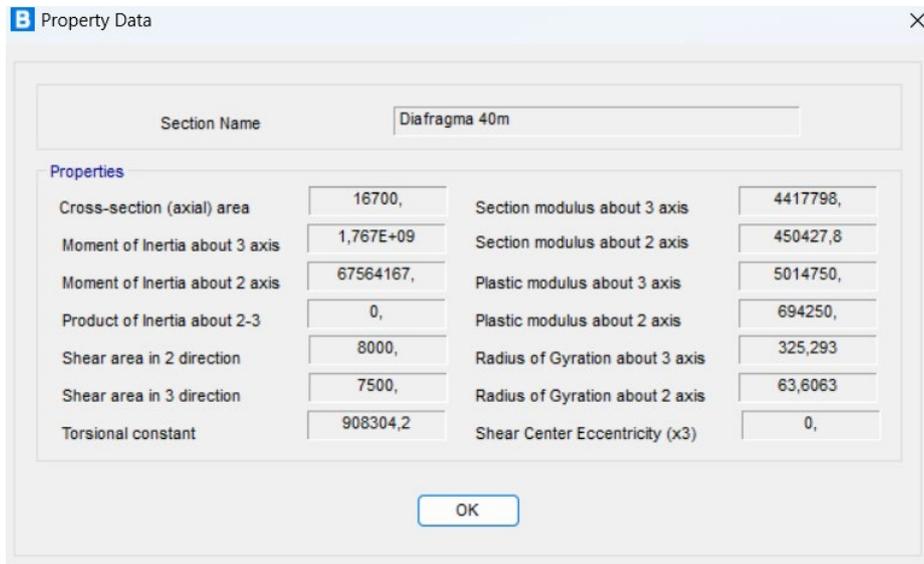
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-41: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 40m



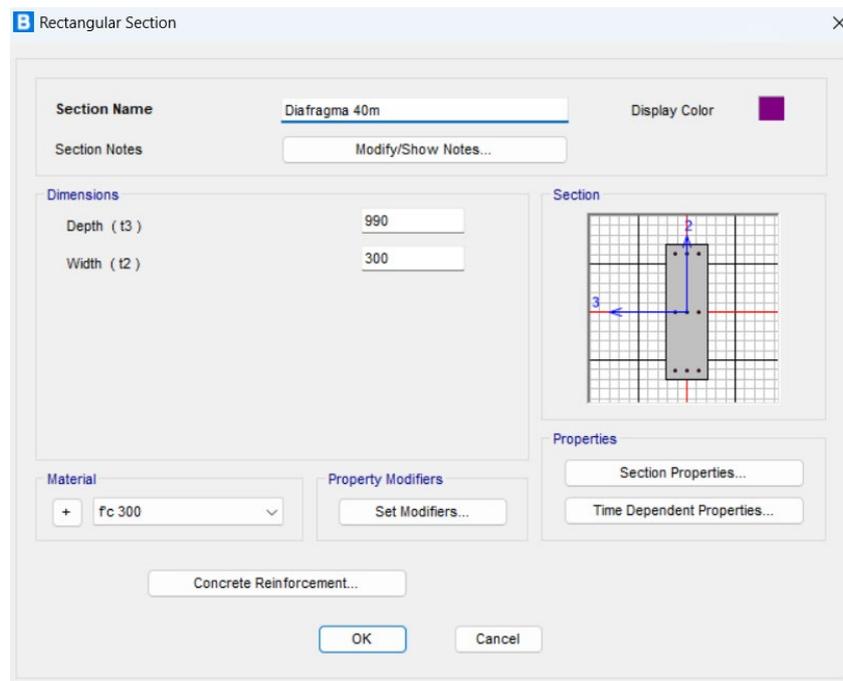
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-42: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 40m



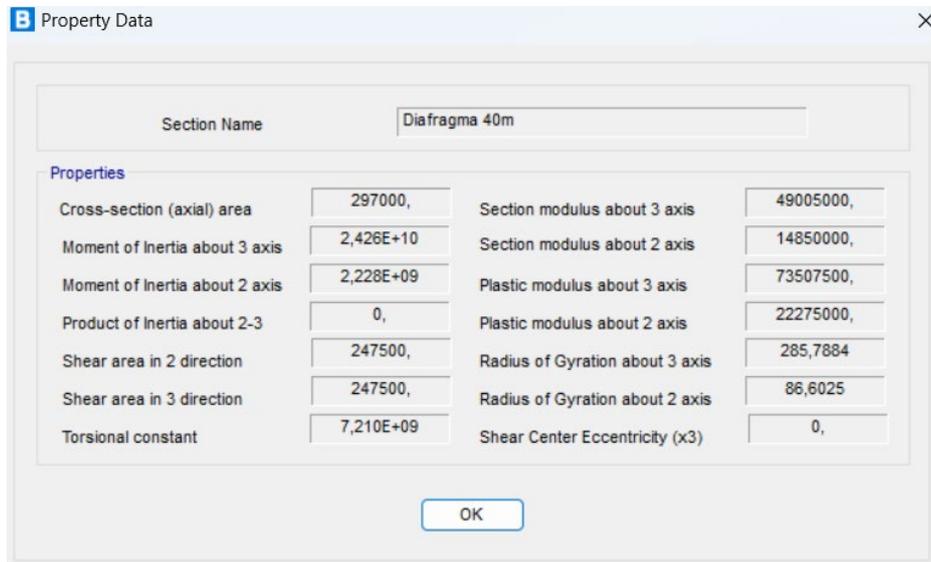
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-43: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 40m



Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-44: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 40m

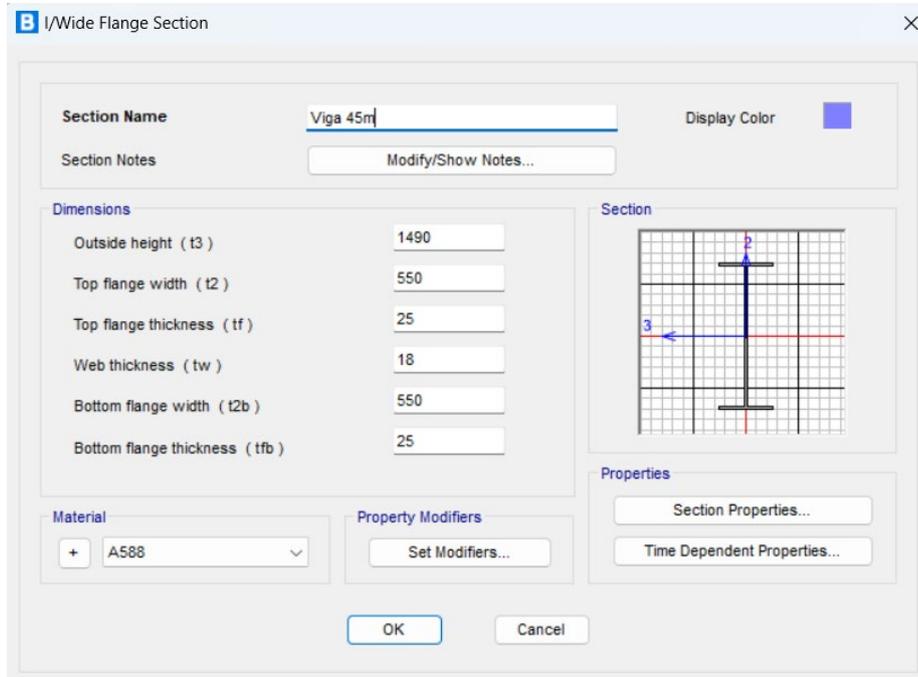


Fuente: CSI Bridge (2024).

Para el puente de luz de 45m, se ingresó las dimensiones en mm de las vigas principales que se observa en la Figura 3-45, obteniendo las propiedades de la Figura 3-46. Los diafragmas de acero contienen las dimensiones en mm de la Figura 3-47 con las propiedades de la Figura 3-48. Finalmente, el tamaño en mm de los diafragmas de

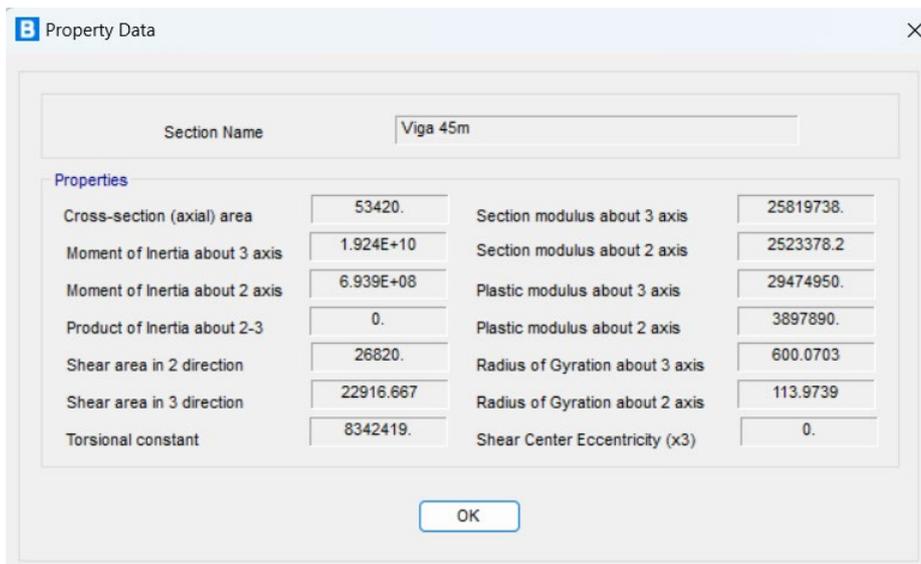
hormigón para esta variante se encuentra en la Figura 3-49 con las propiedades de la Figura 3-50.

Figura 3-45: Dimensiones de vigas principales para puente de 45m



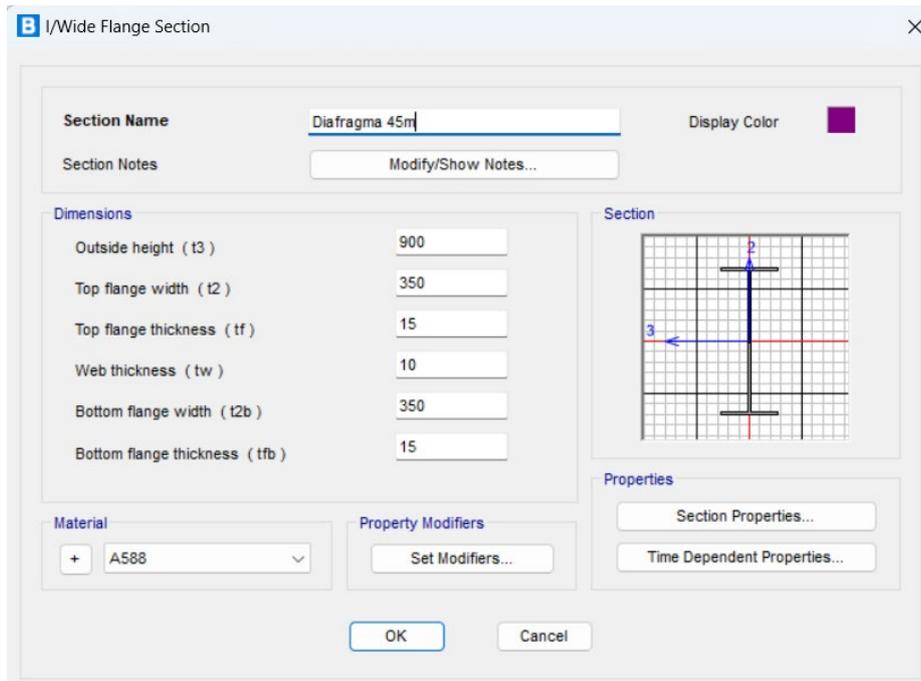
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-46: Propiedades de vigas principales para puente de 45m



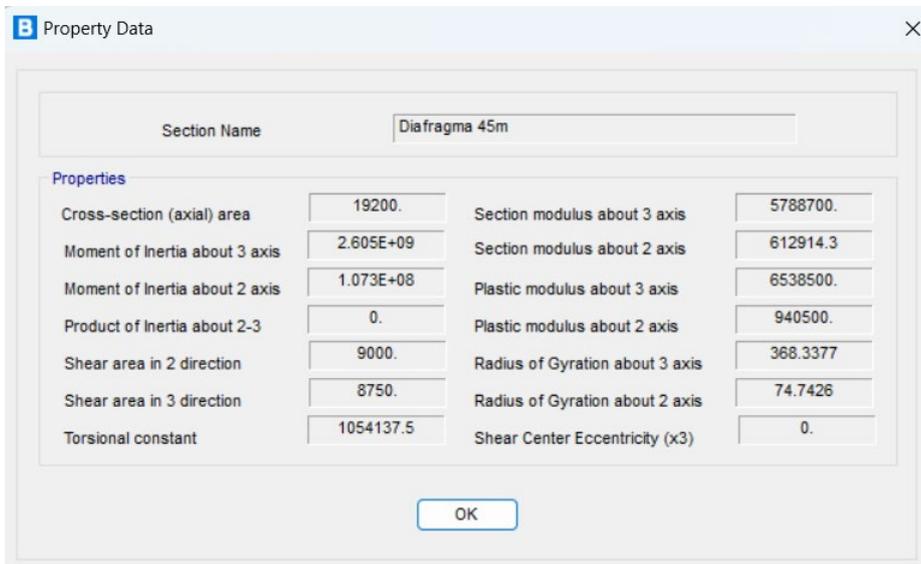
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-47: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 45m



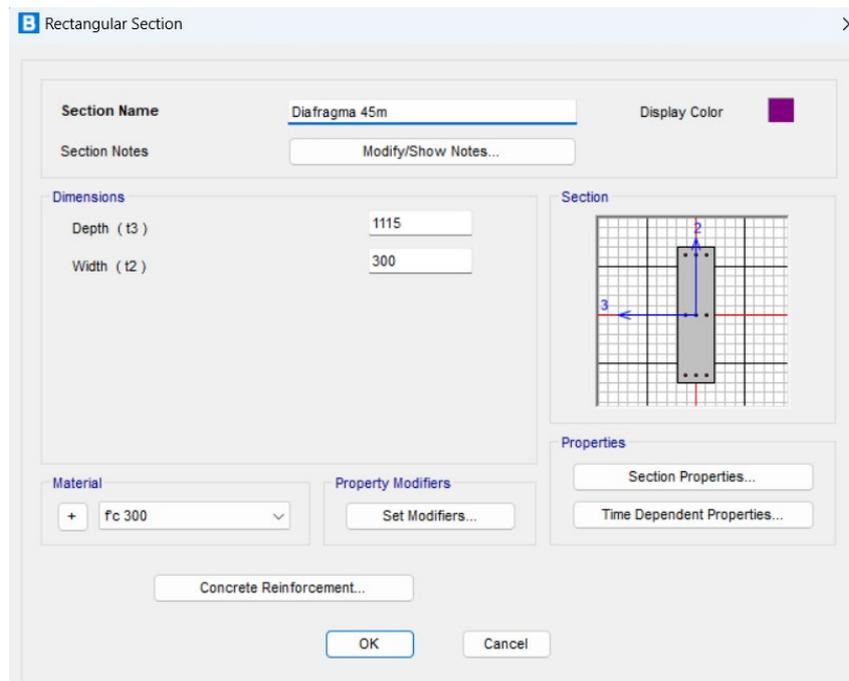
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-48: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 45m



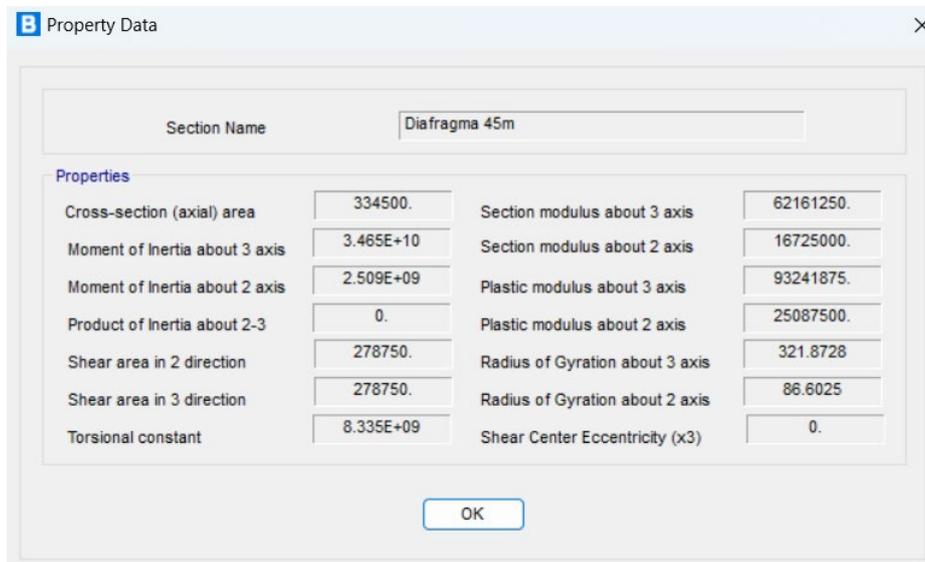
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-49: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 45m



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-50: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 45m

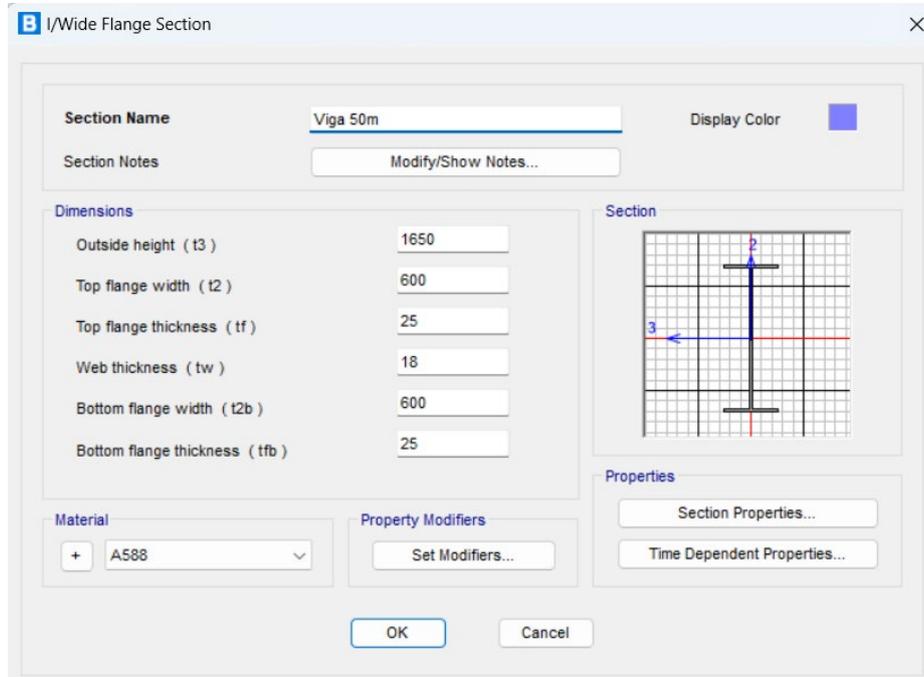


Fuente: CSi Bridge (2024).

Para el puente de luz de 50m, se ingresó las dimensiones en mm de las vigas principales que se observa en la Figura 3-51, obteniendo las propiedades de la Figura 3-52. Los diafragmas de acero contienen las dimensiones en mm de la Figura 3-53 con las propiedades de la Figura 3-54. Finalmente, el tamaño en mm de los diafragmas de

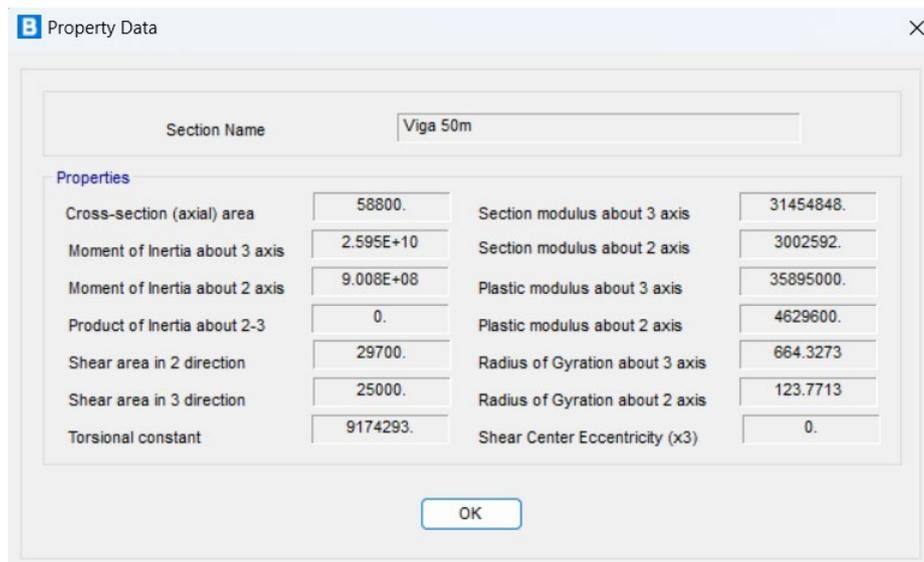
hormigón para esta variante se encuentra en la Figura 3-55 con las propiedades de la Figura 3-56.

Figura 3-51: Dimensiones de vigas principales para puente de 50m



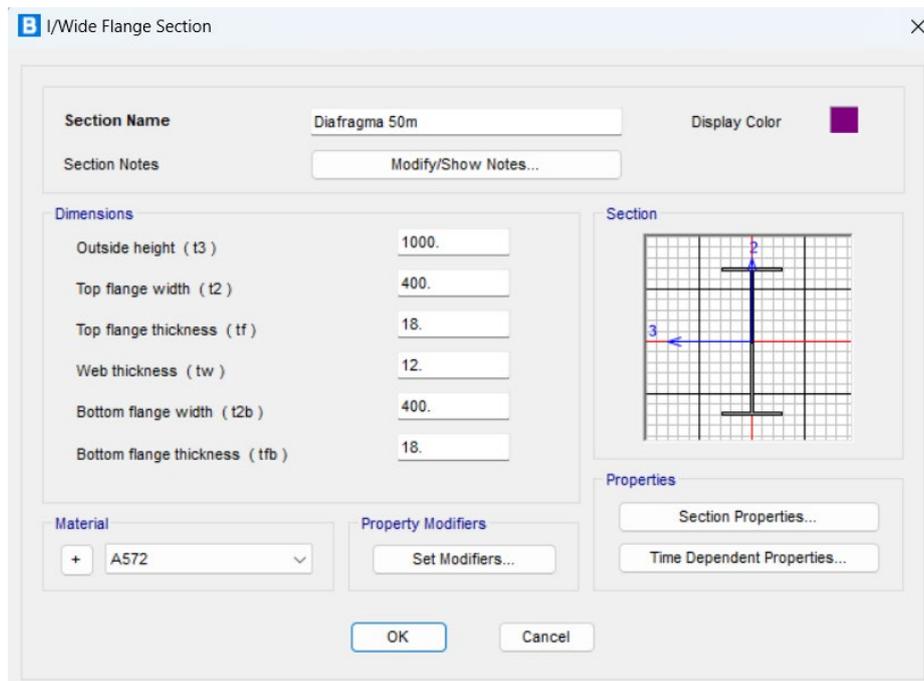
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-52: Propiedades de vigas principales para puente de 50m



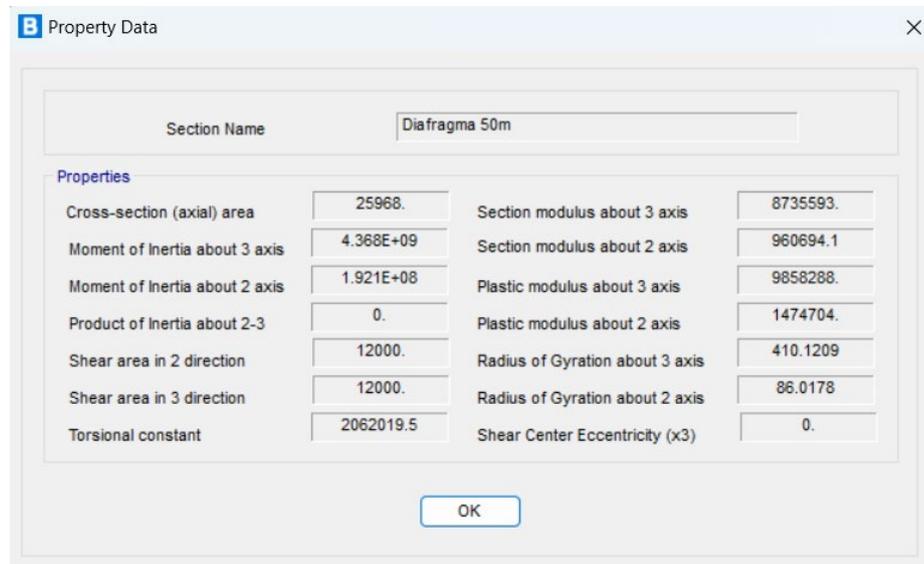
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-53: Dimensiones de diafragmas de acero para puente de 50m



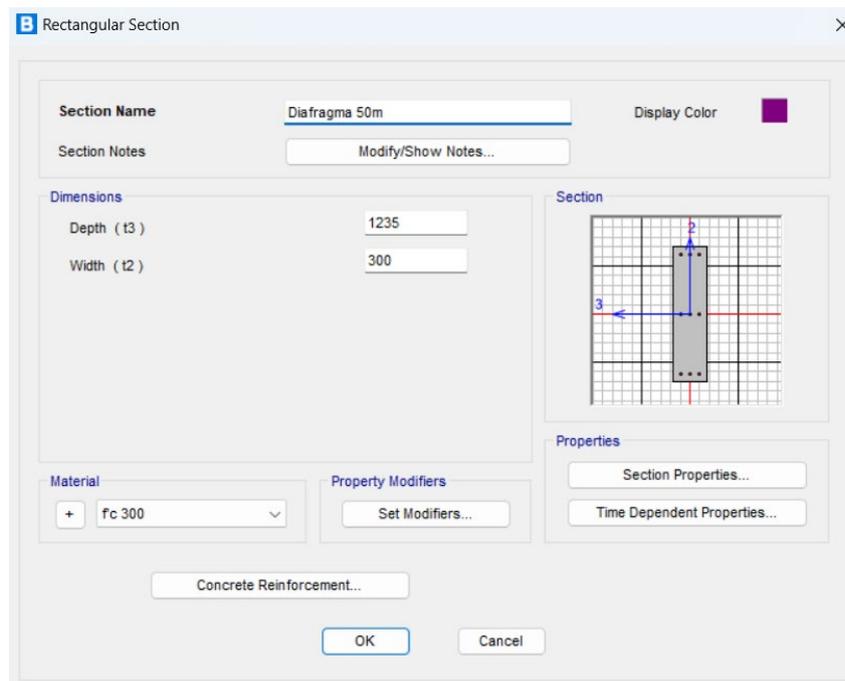
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-54: Propiedades de diafragmas de acero para puente de 50m



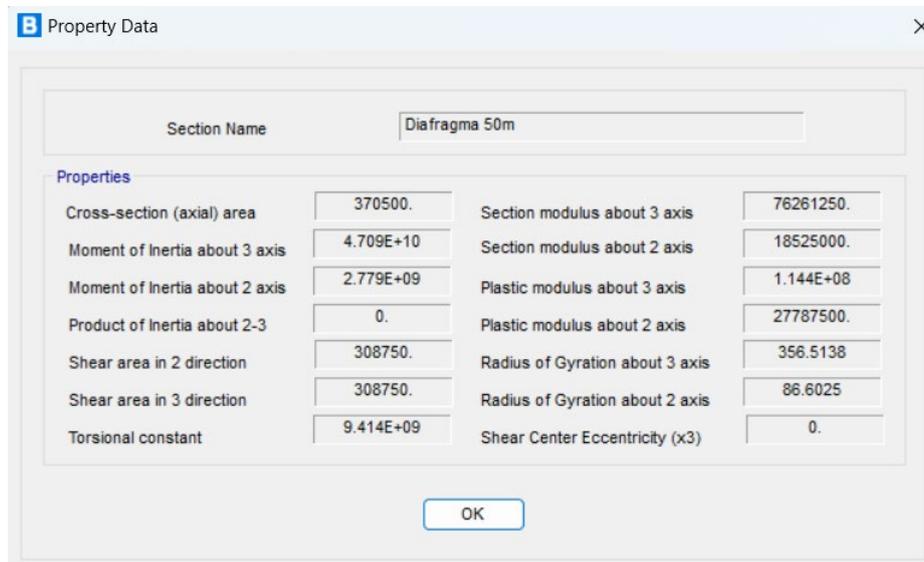
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-55: Dimensiones de diafragmas de hormigón para puente de 50m



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-56: Propiedades de diafragmas de hormigón para puente de 50m



Fuente: CSi Bridge (2024).

3.4 Configuración de vehículos de diseño

El ingreso de los vehículos HL-93 y HS-MTOP se evidencian en la Figura 3-57 y Figura 3-58, respectivamente, en base a las disposiciones de las normativas correspondientes.

Figura 3-57: Cargas del vehículo HL-93

Vehicle Data - Vertical Loading

Uniform Load Scale Factor: 1 Axle Load Scale Factor: 1,33

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		0,9524	Fixed Width	3,048	3,6287	Two Points	1,8288
Fixed Length	4,2672		0,9524	Fixed Width	3,048	14,515	Two Points	1,8288
Variable Length	4,2672	9,144	0,9524	Fixed Width	3,048	14,515	Two Points	1,8288
Trailing Load	Infinite		0,9524	Fixed Width	3,048			

Buttons: Add, Insert, Modify, Delete

Floating Axle Loads

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0	One Point	0,001
For Other Responses	0	One Point	0,001

Floating Axle Load Scale Factor: 1

Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Ignore Vertical Loads if Horizontal Centrifugal or Braking Loads are Defined

Buttons: OK, Cancel

Superelevation Effects

Adjust Vertical Loads for Superelevation

Axle Load Factor:

Uniform Load Factor:

Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-58: Cargas del vehículo HS-MTOP

Vehicle Data - Vertical Loading

Uniform Load Scale Factor: 1 Axle Load Scale Factor: 1

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Variable Length	4,27	9,15	0	Zero Width	0,001	20	Two Points	1,8
Leading Load	Infinite		0	Zero Width	0,001	5	Two Points	1,8
Fixed Length	4,27		0	Zero Width	0,001	20	Two Points	1,8
Variable Length	4,27	9,15	0	Zero Width	0,001	20	Two Points	1,8

Buttons: Add, Insert, Modify, Delete

Floating Axle Loads

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0	One Point	1
For Other Responses	0	One Point	1

Floating Axle Load Scale Factor: 1

Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Ignore Vertical Loads if Horizontal Centrifugal or Braking Loads are Defined

Buttons: OK, Cancel

Superelevation Effects

Adjust Vertical Loads for Superelevation

Axle Load Factor:

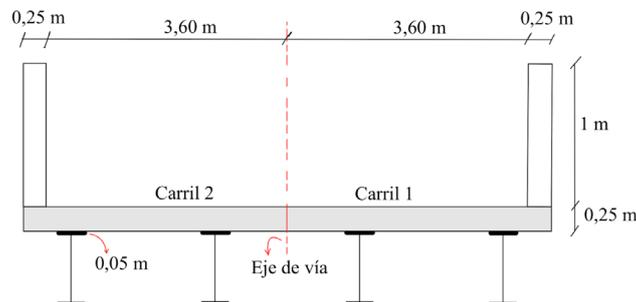
Uniform Load Factor:

Fuente: CSi Bridge (2024).

3.5 Conformación de la sección del puente

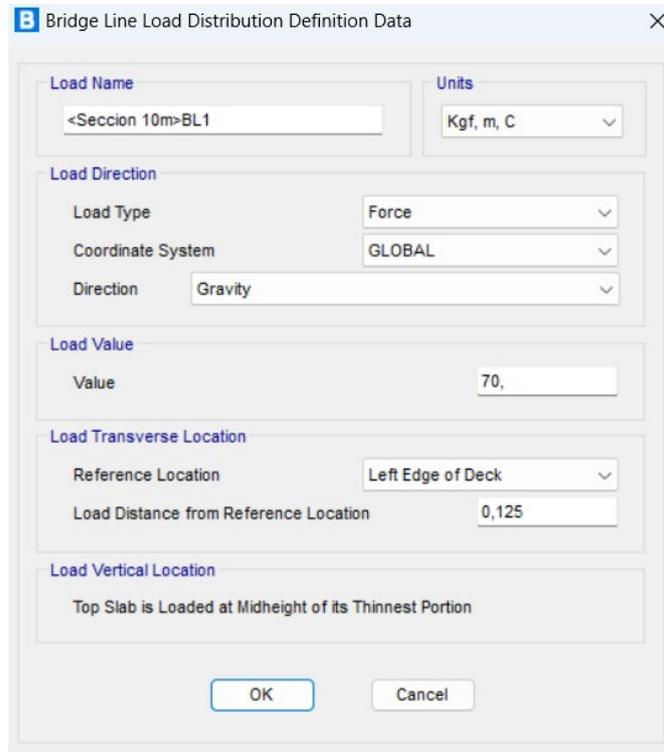
La sección que se observa en la Figura 3-59 se empleará para todas las variantes de puentes, teniendo en cuenta que se colocarán 4 vigas de acero con separaciones uniformes, en donde se asentará el tablero de hormigón con un espesor convencional de 25cm con sus respectivas barandas que representarán una carga lineal como se observa en la Figura 3-60 y la carpeta asfáltica que se representa en la Figura 3-61 como una carga de área.

Figura 3-59: Sección de puente para modelamiento en el software CSi Bridge



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 3-60: Carga lineal generada por barandas



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-61: Carga de área generada por la carpeta asfáltica

Bridge Area Load Distribution Definition Data

Load Name: Asfalto Units: Kgf, m, C

Load Direction

Load Type: Force

Coordinate System: GLOBAL

Direction: Gravity

Load Value

Left Edge Value: 165,

Right Edge Value: 165,

Load Transverse Location

Left Reference Location: Left Edge of Deck

Left Load Distance from Left Ref. Location: 0,25

Right Reference Location: Left Edge of Deck

Right Load Distance from Right Ref. Location: 7,45

Load Vertical Location

Top Slab is Loaded at Midheight of its Thinnest Portion

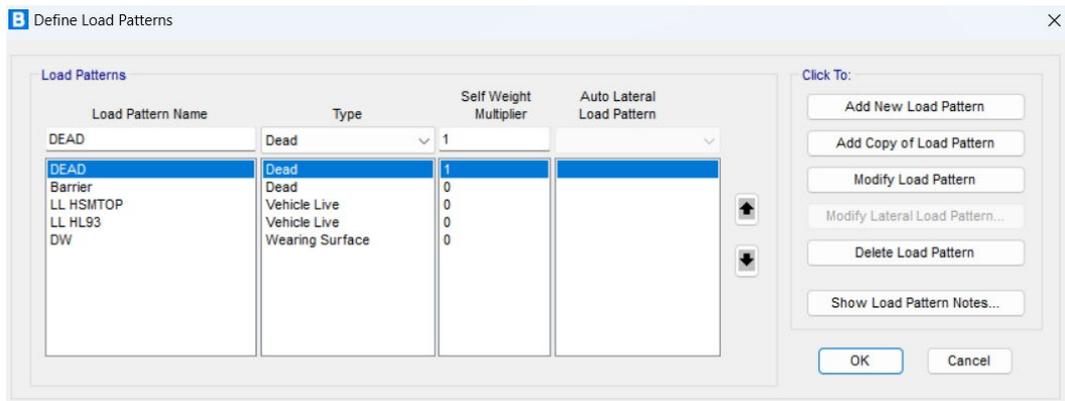
OK Cancel

Fuente: CSI Bridge (2024).

3.6 Definición de combinaciones de carga

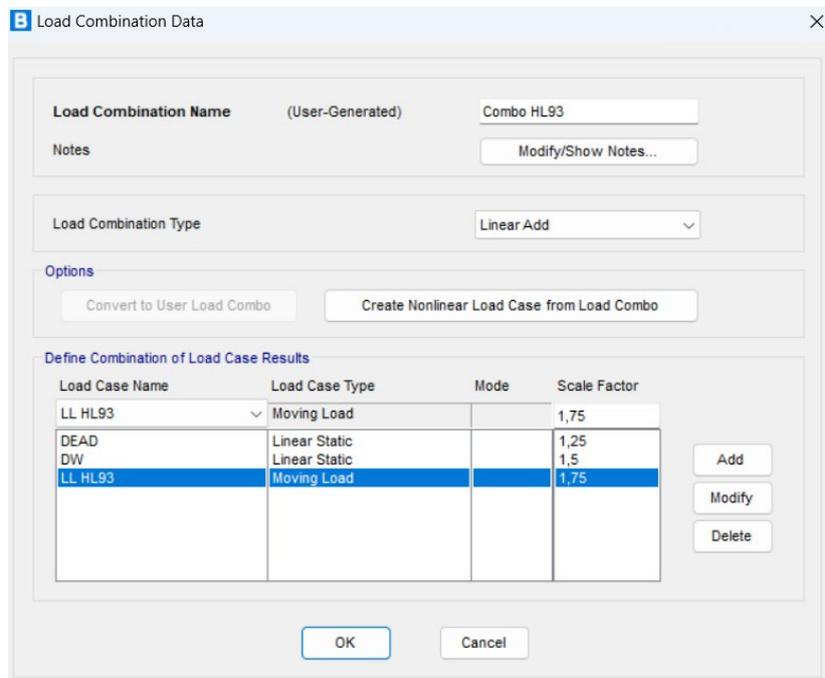
En base a la sección conformada y todos sus elementos, así como, los vehículos de diseño ingresados, se crearon patrones de carga correspondientes a la carga muerta, de superficie, de barandas y vehicular como se aprecia en la Figura 3-62, con las cuales se hicieron las combinaciones respectivas de la Figura 3-63 y Figura 3-64, utilizando los coeficientes de la Tabla 2-2.

Figura 3-62: Patrones de carga



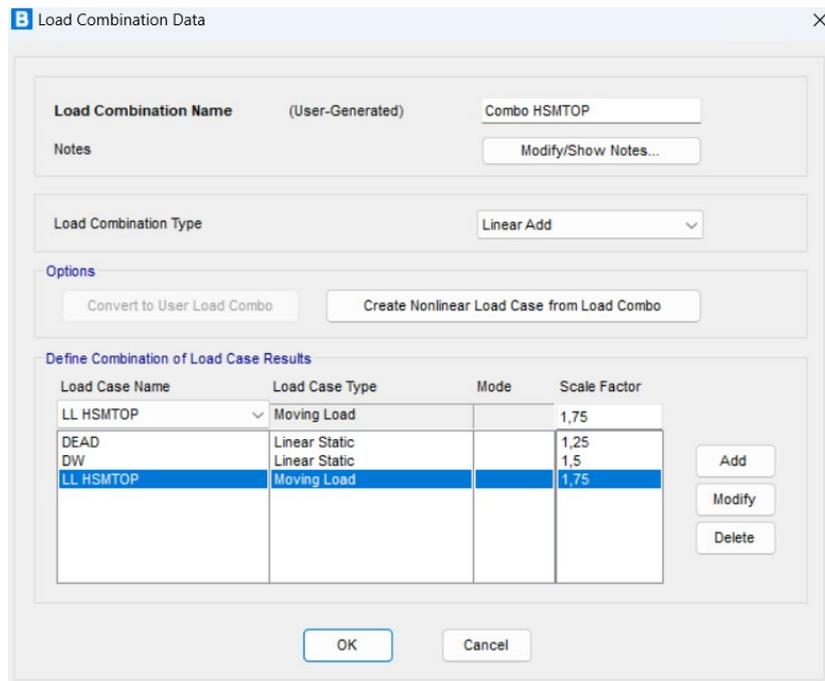
Fuente: CSI Bridge (2024).

Figura 3-63: Combinación de carga con el vehículo HL-93



Fuente: CSI Bridge (2024).

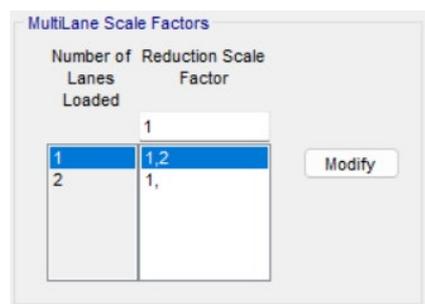
Figura 3-64: Combinación de carga con el vehículo HS-MTOP



Fuente: CSi Bridge (2024).

Se consideraron los factores de presencia múltiple de la Tabla 2-3 al existir 2 carriles en la sección de puente definida, esto se observa en la Figura 3-65.

Figura 3-65: Factor de presencia múltiple en el modelo



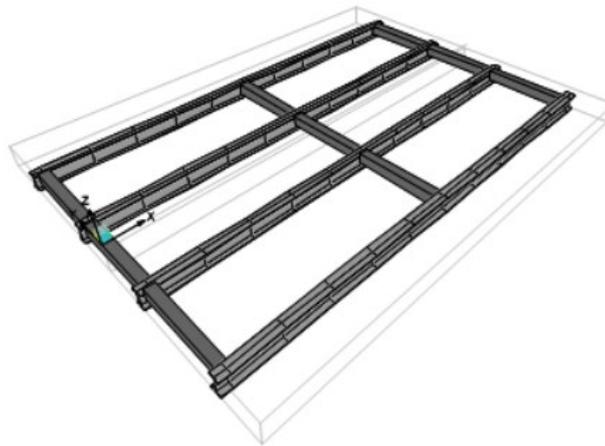
Fuente: CSi Bridge (2024).

Para lograr un correcto análisis y gracias a las herramientas prestadas por el software se modela mediante elementos finitos, en donde, las estructuras se componen de partes claramente distinguibles y conectadas en puntos específicos, formando una especie de malla o retícula (Celigüeta, 2011). Además, su característica principal es que su deformación puede ser precisamente definida usando un número limitado de parámetros, como las deformaciones en los puntos de conexión entre elementos. Por otro lado, los

diafragmas se colocaron a lo largo de las vigas principales conforme la normativa AASHTO, tomando espaciamientos máximos y teniendo en cuenta la obligatoriedad de los mismos en los extremos del puente.

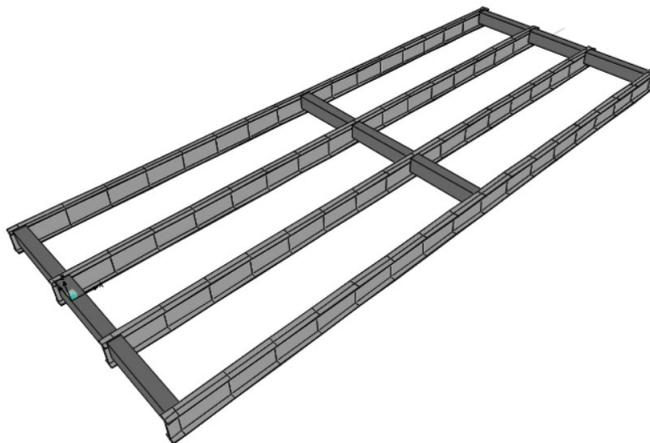
De este modo, obtuvimos el modelado del puente con una luz de 10m como se observa en la Figura 3-66, el modelo de 15m se aprecia en la Figura 3-67, el de 20m en la Figura 3-68, el de 25m en la Figura 3-69, el de 30m en la Figura 3-70, el de 35m en la Figura 3-71, el de 40m en la Figura 3-72, el de 45m en la Figura 3-73 y el de luz de 50m se encuentra en la Figura 3-74. Es importante resaltar que las figuras se han colocado sin el tablero con el fin de apreciar las vigas principales y diafragmas que son el objeto de esta investigación.

Figura 3-66: Puente de 10m modelado en CSi Bridge



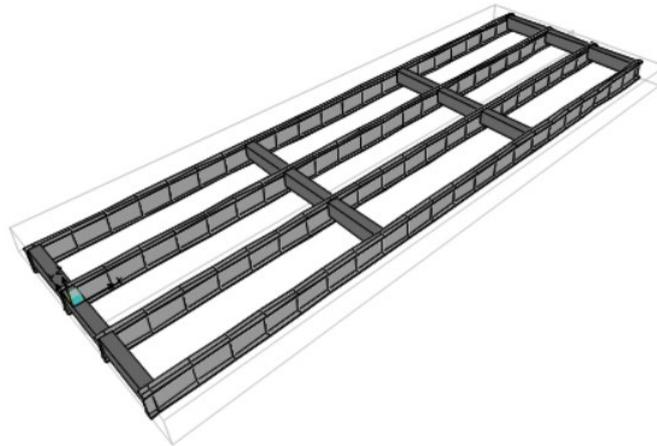
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-67: Puente de 15m modelado en CSi Bridge



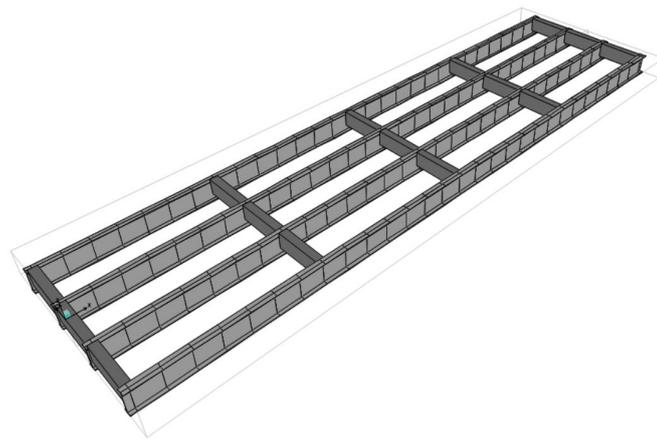
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-68: Puente de 20m modelado en CSi Bridge



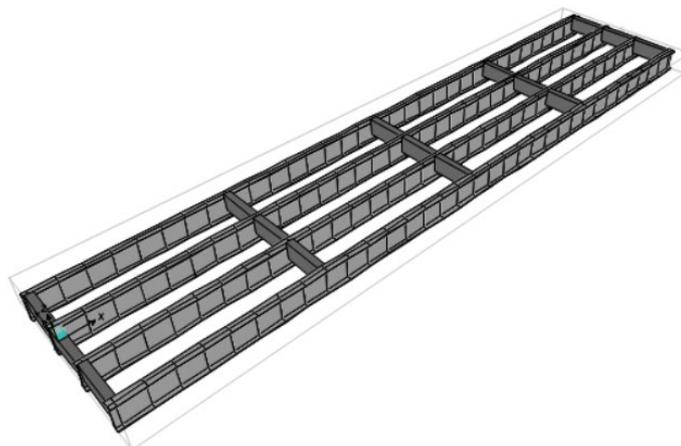
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-69: Puente de 25m modelado en CSi Bridge



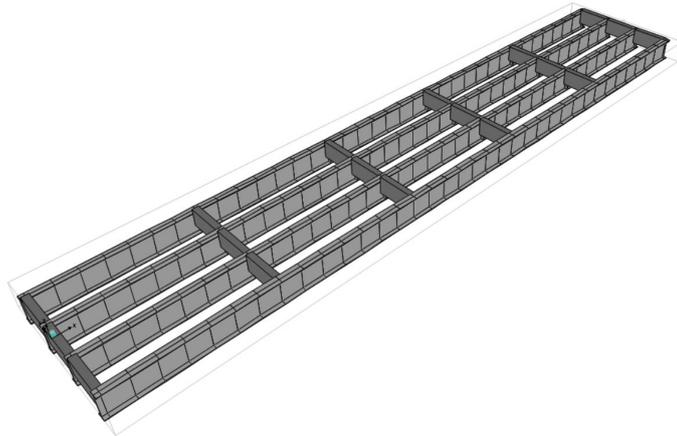
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-70: Puente de 30m modelado en CSi Bridge



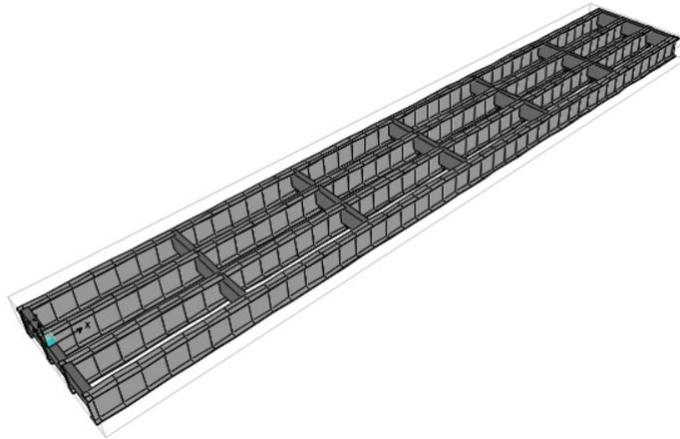
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-71: Puente de 35m modelado en CSi Bridge



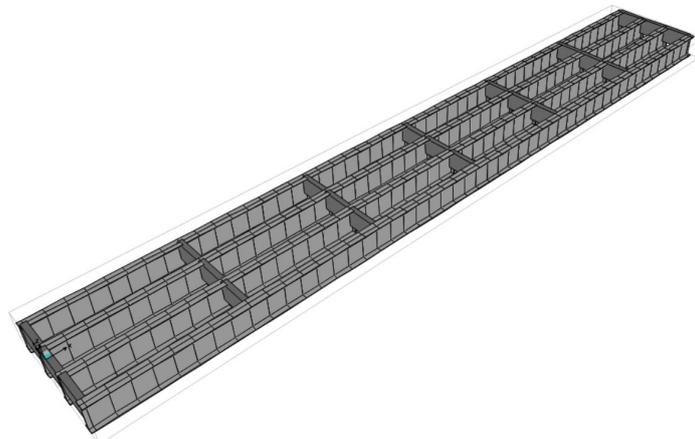
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-72: Puente de 40m modelado en CSi Bridge



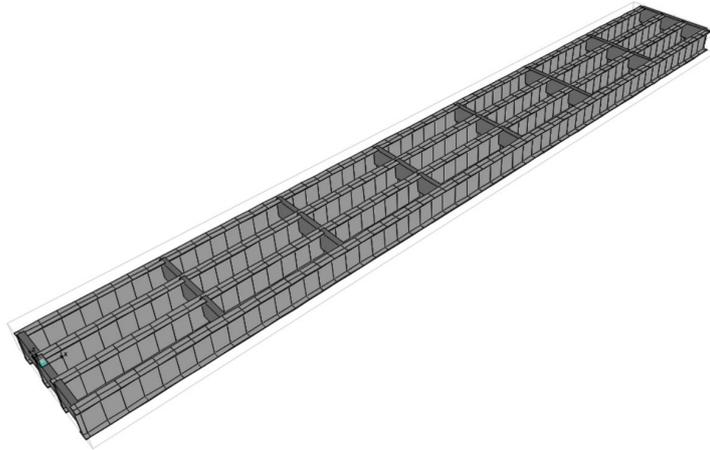
Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-73: Puente de 45m modelado en CSi Bridge



Fuente: CSi Bridge (2024).

Figura 3-74: Puente de 50m modelado en CSi Bridge



Fuente: CSi Bridge (2024).

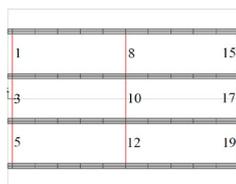
4. ANÁLISIS COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÓMICO

4.1 Obtención de las solicitaciones en diafragmas

Las solicitaciones axiales, cortantes y momentos se extrajeron del software CSi Bridge, tanto para diafragmas de acero como de hormigón para las diferentes luces de puentes. Además, según Jaramillo y Villavicencio (2022), se ha comprobado que las solicitaciones para puentes de hasta 20 metros se evalúan principalmente usando el camión HS-MTOP, y en el caso de puentes que superen dicha luz, predomina el camión HL-93 como carga viva de diseño.

La numeración de diafragmas para el puente de 10m se observa en la Figura 4-1 y sus respectivas solicitaciones se encuentran en la Tabla 4-1.

Figura 4-1: Numeración de diafragmas-Puente de 10m



Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-1

Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 10m

Diafragma	Puente 10m					
	Acero			Hormigón		
	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)
1	8,710	1,163	1,075	8,581	1,194	1,043
3	6,585	1,280	1,280	6,482	1,269	1,187
5	8,710	1,163	1,075	8,581	1,194	1,043
8	13,348	1,382	1,867	13,132	1,236	1,458
10	20,200	0,659	1,258	19,813	0,616	0,887
12	13,348	1,382	1,867	13,132	1,236	1,458
15	8,746	1,307	1,253	8,639	1,313	1,150
17	7,970	0,889	0,957	7,868	0,911	0,878
19	8,746	1,307	1,253	8,639	1,313	1,150

Fuente: Elaboración propia (2024).

La identificación de diafragmas de acero y hormigón para el puente de 15m se observa en la Figura 4-2 y sus respectivas solicitaciones se encuentran en la Tabla 4-2.

Figura 4-2: Numeración de diafragmas-Puente de 15m

1	8	15
3	10	17
5	12	19

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-2

Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 15m

Diafragma	Puente 15m			Hormigón		
	Axial-P (Tn)	Acero Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)
1	7,316	2,053	2,060	7,784	2,363	2,237
3	6,444	2,687	2,732	7,129	3,063	3,013
5	7,316	2,053	2,060	7,784	2,363	2,237
8	13,324	3,182	4,865	14,379	3,980	5,847
10	23,148	1,213	3,707	25,434	1,725	4,515
12	13,324	3,182	4,865	14,379	3,980	5,847
15	7,606	2,607	2,517	8,077	2,972	2,677
17	7,585	1,787	1,996	8,326	2,051	2,218
19	7,606	2,607	2,517	8,077	2,972	2,677

Fuente: Elaboración propia (2024).

La numeración de diafragmas para el puente de 20m se observa en la Figura 4-3 y sus respectivas solicitaciones se encuentran en la Tabla 4-3.

Figura 4-3: Numeración de diafragmas-Puente de 20m

1	8	15	22
3	10	17	24
5	12	19	26

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-3

Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 20m

Diafragma	Puente 20m					
	Acero			Hormigón		
	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)
1	8,696	2,849	2,978	9,524	3,559	3,612
3	7,214	3,719	3,780	8,317	4,628	4,677
5	8,696	2,849	2,978	9,524	3,559	3,612
8	13,765	4,690	7,256	14,733	7,178	11,143
10	23,265	1,963	5,674	25,288	3,449	9,327
12	13,765	4,690	7,256	14,733	7,178	11,143
15	14,657	5,091	7,884	15,610	7,716	12,025
17	25,311	1,960	6,115	27,351	3,434	10,012
19	14,657	5,091	7,884	15,610	7,716	12,025
22	9,362	3,425	3,318	10,165	4,164	4,078
24	8,174	2,629	3,081	9,732	3,361	4,016
26	9,362	3,425	3,318	10,165	4,164	4,078

Fuente: Elaboración propia (2024).

La identificación de diafragmas de acero y hormigón para el puente de 25m se observa en la Figura 4-4 y sus respectivas solicitaciones se encuentran en la Tabla 4-4.

Figura 4-4: Numeración de diafragmas-Puente de 25m



Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-4

Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 25m

Diafragma	Puente 25m					
	Acero			Hormigón		
	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)
1	6,615	3,214	3,170	7,199	3,876	3,698
3	5,500	4,440	4,458	6,649	5,517	5,416
5	6,615	3,214	3,170	7,199	3,876	3,698
8	9,649	4,192	6,532	9,716	6,907	10,819
10	16,681	1,650	5,408	16,585	3,194	9,668
12	9,649	4,192	6,532	9,716	6,907	10,819
15	11,460	5,127	8,045	11,263	8,188	13,036
17	19,889	1,645	6,718	19,227	3,162	11,750
19	11,460	5,127	8,045	11,263	8,188	13,036
22	10,618	4,709	7,368	10,532	7,598	12,011
24	18,684	1,665	6,003	18,269	3,193	10,600
26	10,618	4,709	7,368	10,532	7,598	12,011
29	7,575	4,248	4,069	8,095	5,189	4,976
31	6,484	2,715	3,204	7,623	3,370	4,132
33	7,575	4,248	4,069	8,095	5,189	4,976

Fuente: Elaboración propia (2024).

La numeración de diafragmas para el puente de 30m se observa en la Figura 4-5 y sus respectivas solicitaciones se encuentran en la Tabla 4-5.

Figura 4-5: Numeración de diafragmas-Puente de 30m

1	8	15	22	29
3	10	17	24	31
5	12	19	26	33

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-5

Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 30m

Diafragma	Puente 30m					
	Acero			Hormigón		
	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)
1	7,125	4,016	4,050	7,702	4,819	4,943
3	6,047	5,393	5,409	7,295	6,664	6,577
5	7,125	4,016	4,050	7,702	4,819	4,943
8	9,575	5,531	9,235	9,385	9,006	14,600
10	16,267	2,246	8,012	15,698	4,164	13,197
12	9,575	5,531	9,235	9,385	9,006	14,600
15	10,997	6,617	11,119	10,465	10,442	17,162
17	18,800	2,221	9,695	17,535	4,098	15,584
19	10,997	6,617	11,119	10,465	10,442	17,162
22	10,512	6,193	10,358	10,129	9,857	16,081
24	18,169	2,255	8,950	17,205	4,158	14,490
26	10,512	6,193	10,358	10,129	9,857	16,081
29	8,237	4,936	4,989	8,740	6,056	5,988
31	6,856	3,577	4,201	8,080	4,348	5,400
33	8,237	4,936	4,989	8,740	6,056	5,988

Fuente: Elaboración propia (2024).

La identificación de diafragmas de acero y hormigón para el puente de 35m se observa en la Figura 4-6 y sus respectivas solicitaciones se encuentran en la Tabla 4-6.

Figura 4-6: Numeración de diafragmas-Puente de 35m

1	8	15	22	29	36
3	10	17	24	31	38
5	12	19	26	33	40

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-6

Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 35m

Diafragma	Puente 35m					
	Acero			Hormigón		
	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)
1	8,149	4,783	5,035	8,708	5,709	6,178
3	7,345	6,313	6,390	8,487	7,649	7,763
5	8,149	4,783	5,035	8,708	5,709	6,178
8	9,128	6,453	10,966	8,463	9,672	16,003
10	14,668	2,899	9,725	14,971	5,015	14,866
12	9,128	6,453	10,966	8,463	9,672	16,003
15	10,270	7,903	13,592	9,031	11,392	19,241
17	16,676	2,875	12,160	16,022	4,929	18,001
19	10,270	7,903	13,592	9,031	11,392	19,241
22	10,433	8,002	13,768	9,127	11,470	19,388
24	16,978	2,851	12,310	16,050	4,901	18,132
26	10,433	8,002	13,768	9,127	11,470	19,388
29	10,244	7,408	12,591	9,300	10,791	17,975
31	16,853	2,971	11,134	15,833	5,076	16,644
33	10,244	7,408	12,591	9,300	10,791	17,975
36	9,565	5,602	5,871	10,034	6,766	7,003
38	7,953	4,263	5,258	9,058	5,174	6,588
40	9,565	5,602	5,871	10,034	6,766	7,003

Fuente: Elaboración propia (2024).

La numeración de diafragmas para el puente de 40m se observa en la Figura 4-7 y sus respectivas solicitaciones se encuentran en la Tabla 4-7.

Figura 4-7: Numeración de diafragmas-Puente de 40m

1	8	15	22	29	36	43
3*	10	17	24	31	38	45
5	12	19	26	33	40	47

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-7

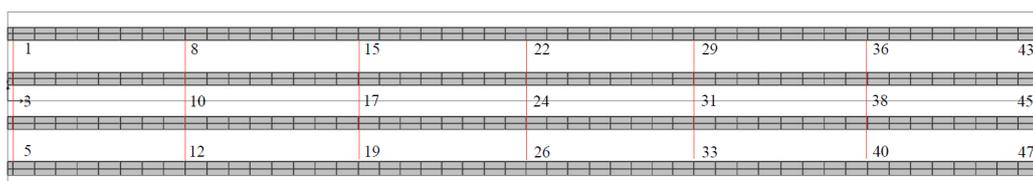
Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 40m

Diafragma	Puente 40m					
	Acero			Hormigón		
	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)
1	8,319	5,715	6,384	8,839	6,786	7,697
3	13,122	6,248	1,565	8,594	8,866	8,907
5	11,679	7,501	1,232	8,839	6,786	7,697
8	31,230	7,134	6,751	6,629	9,866	16,292
10	7,650	12,665	7,517	12,995	5,571	15,127
12	11,014	12,722	8,501	6,629	9,866	16,292
15	26,872	11,851	8,692	6,960	11,952	20,344
17	27,797	10,387	6,666	14,802	5,609	19,108
19	8,319	11,851	6,384	6,960	11,952	20,344
22	11,014	10,474	8,692	7,072	12,336	21,144
24	27,797	12,722	8,501	15,066	5,577	19,932
26	21,425	10,148	4,313	7,072	12,336	21,144
29	13,122	3,699	1,391	7,093	12,105	20,631
31	31,230	6,248	1,565	14,823	5,573	19,371
33	7,281	6,984	6,719	7,093	12,105	20,631
36	7,448	5,257	12,058	7,357	11,188	18,623
38	3,785	6,721	1,127	13,895	5,783	17,254
40	3,841	0,449	0,426	7,357	11,188	18,623
43	12,355	3,361	10,827	10,016	7,472	7,958
45	5,688	7,188	1,894	8,933	6,169	7,771
47	9,075	4,866	1,280	10,016	7,472	7,958

Fuente: Elaboración propia (2024).

La identificación de diafragmas de acero y hormigón para el puente de 45m se observa en la Figura 4-8 y sus respectivas solicitaciones se encuentran en la Tabla 4-8.

Figura 4-8: Numeración de diafragmas-Puente de 45m



Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-8

Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 45m

Diafragma	Puente 45m					
	Acero			Hormigón		
	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)	Axial-P (Tn)	Cortante-V2 (Tn)	Momento-M3 (Tn-m)
1	8,806	6,763	7,948	9,248	7,892	9,332
3	8,175	8,523	8,874	8,944	10,009	10,365
5	8,806	6,763	7,948	9,248	7,892	9,332
8	6,844	8,483	15,246	6,619	11,317	19,279
10	13,326	4,154	14,134	13,884	6,314	18,262
12	6,844	8,483	15,246	6,619	11,317	19,279
15	7,569	10,398	19,146	7,938	13,355	23,523
17	15,469	4,257	17,985	16,197	6,408	22,555
19	7,569	10,398	19,146	7,938	13,355	23,523
22	7,751	10,661	19,760	8,198	13,632	24,196
24	15,736	4,212	18,644	16,616	6,345	23,303
26	7,751	10,661	19,760	8,198	13,632	24,196
29	7,604	10,598	19,516	7,948	13,508	23,819
31	15,538	4,224	18,319	16,219	6,366	22,830
33	7,604	10,598	19,516	7,948	13,508	23,819
36	7,742	9,813	17,644	7,112	12,735	21,875
38	14,370	4,386	16,328	14,733	6,583	20,674
40	7,742	9,813	17,644	7,112	12,735	21,875
43	9,879	6,820	7,907	10,271	8,108	9,163
45	8,491	5,891	7,685	9,215	7,095	9,188
47	9,879	6,820	7,907	10,271	8,108	9,163

Fuente: Elaboración propia (2024).

La numeración de diafragmas para el puente de 50m se observa en la Figura 4-9 y sus respectivas solicitaciones se encuentran en la Tabla 4-9.

Figura 4-9: Numeración de diafragmas-Puente de 50m

1	8	15	22	29	36	43	50
3	10	17	24	31	38	45	52
5	12	19	26	33	40	47	54

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-9

Mayores solicitaciones en diafragmas-Puente de 50m

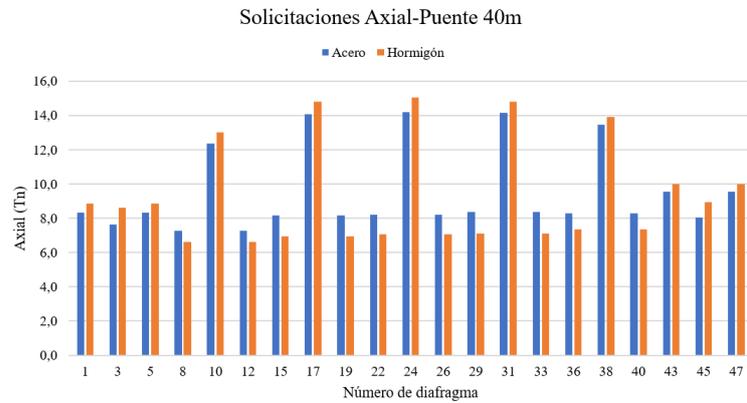
Diafragma	Puente 50m					
	Acero			Hormigón		
	Axial-P (Tn)	Cortante- V2 (Tn)	Momento- M3 (Tn-m)	Axial-P (Tn)	Cortante- V2 (Tn)	Momento- M3 (Tn-m)
1	10,509	8,054	10,585	10,951	9,332	11,694
3	10,204	10,080	11,037	10,919	11,459	12,586
5	10,509	8,054	10,585	10,951	9,332	11,694
8	6,871	9,655	17,364	7,297	11,681	19,690
10	13,951	4,834	16,263	14,799	6,682	18,574
12	6,871	9,655	17,364	7,297	11,681	19,690
15	8,662	11,623	21,822	9,220	13,671	24,290
17	16,980	4,938	20,864	18,056	6,778	23,405
19	8,662	11,623	21,822	9,220	13,671	24,290
22	9,308	12,096	23,071	9,974	14,186	25,664
24	18,019	4,896	22,258	19,284	6,724	24,953
26	9,308	12,096	23,071	9,974	14,186	25,664
29	9,312	12,108	23,090	9,981	14,196	25,678
31	18,009	4,884	22,278	19,279	6,712	24,968
33	9,312	12,108	23,090	9,981	14,196	25,678
36	8,691	11,860	22,264	9,234	13,864	24,660
38	17,022	4,904	21,272	18,076	6,740	23,747
40	8,691	11,860	22,264	9,234	13,864	24,660
43	7,423	10,953	19,797	7,810	12,996	22,164
45	14,897	5,070	18,528	15,658	6,952	20,894
47	7,423	10,953	19,797	7,810	12,996	22,164
50	11,785	7,729	9,671	12,182	9,023	11,151
52	10,410	6,699	9,723	11,095	7,857	10,875
54	11,785	7,729	9,671	12,182	9,023	11,151

Fuente: Elaboración propia (2024).

4.2 Análisis de las solicitaciones de los modelos

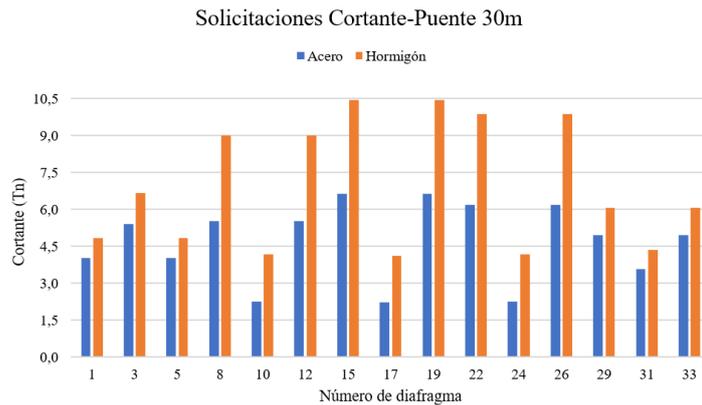
Los gráficos comparativos, resultado de las solicitaciones de axial, cortante y momento de todas las variantes de puentes analizadas, citados en la sección 4.1 Obtención de las solicitaciones en diafragmas, se encuentran adjuntados en el apartado A.1 Comparación de solicitaciones en diafragmas de acero y hormigón. Sin embargo, se extrajeron algunos de estos de manera aleatoria para indicar que el comportamiento de diafragmas de hormigón y acero son similares tanto en axial como se observa en la Figura 4-10, en cortante que se evidencia en la Figura 4-11 y momento que se muestra en la Figura 4-12.

Figura 4-10: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 40m



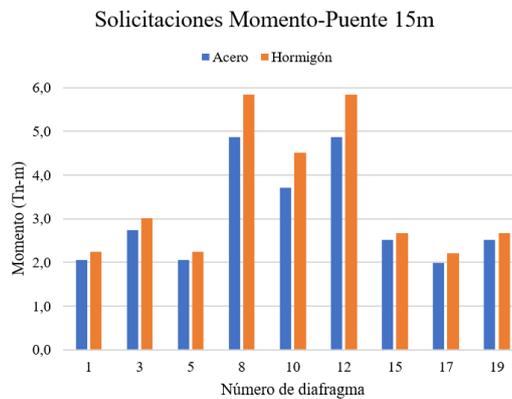
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 4-11: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 30m



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 4-12: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 15m



Fuente: Elaboración propia (2024).

Por otro lado, se ha resuelto analizar los esfuerzos de los diafragmas en extremos y puntos intermedios de los diferentes puentes. De este modo, se tomaron las solicitaciones de la sección 1 del diafragma extremo y de una sección de un diafragma localizado en el medio de las variantes para obtener la Tabla 4-10.

Tabla 4-10

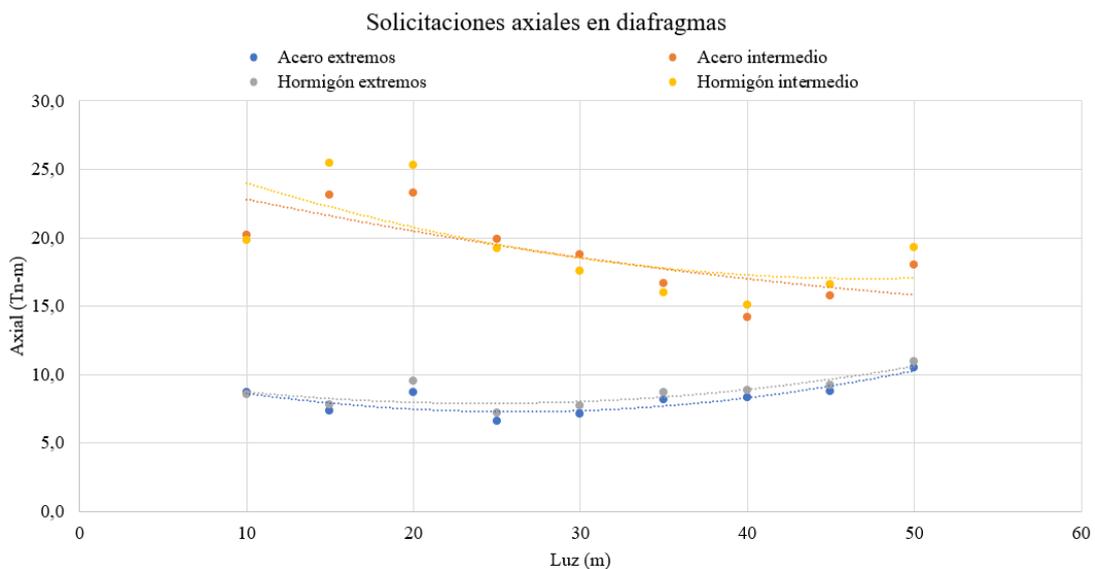
Solicitaciones máximas de diafragmas extremos e intermedios

Luz (m)	Acero						Hormigón					
	Axial-P (Tn)		Cortante-V2 (Tn)		Momento-M3 (Tn-m)		Axial-P (Tn)		Cortante-V2 (Tn)		Momento-M3 (Tn-m)	
	Extremo	Intermedio	Extremo	Intermedio	Extremo	Intermedio	Extremo	Intermedio	Extremo	Intermedio	Extremo	Intermedio
10	8,710	20,200	1,163	0,659	1,075	1,258	8,581	19,813	1,194	0,616	1,043	0,887
15	7,316	23,148	2,053	1,213	2,060	3,707	7,784	25,434	2,363	1,725	2,237	4,515
20	8,696	23,265	2,849	1,963	2,978	5,674	9,524	25,288	3,559	3,449	3,612	9,327
25	6,615	19,889	3,214	1,645	3,170	6,718	7,199	19,227	3,876	3,162	3,698	11,750
30	7,125	18,800	4,016	2,221	4,050	9,695	7,702	17,535	4,819	4,098	4,943	15,584
35	8,149	16,676	4,783	2,875	5,035	12,160	8,708	16,022	5,709	4,929	6,178	18,001
40	8,319	14,198	5,715	3,420	6,384	14,813	8,839	15,066	6,786	5,577	7,697	19,932
45	8,806	15,736	6,763	4,212	7,948	18,644	9,248	16,616	7,892	6,345	9,332	23,303
50	10,509	18,019	8,054	4,896	10,585	22,258	10,951	19,284	9,332	6,724	11,694	24,953

Fuente: Elaboración propia (2024).

La luz de las variantes de puentes en estudio vs los valores de solicitaciones axiales de la Tabla 4-10 se graficaron para obtener la Figura 4-13. Analizando la misma, se dedujo que los valores mencionados tienden a crecer en diafragmas extremos y a disminuir en los intermedios conforme aumenta la luz, tanto en hormigón como en acero. Además, estas solicitaciones son mayores en puntos intermedios al compararlos con los extremos.

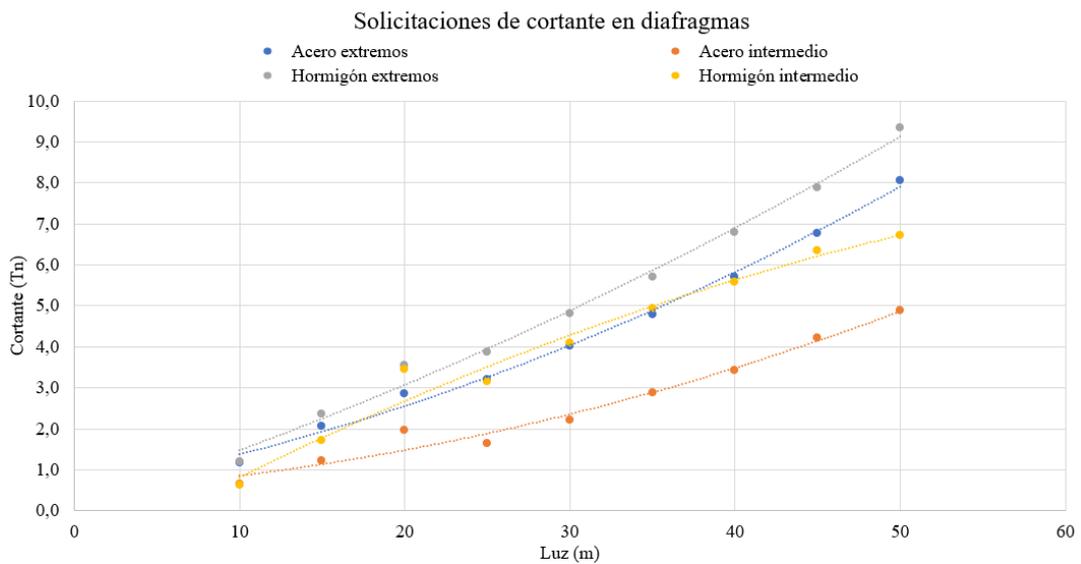
Figura 4-13: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas extremos e intermedios



Fuente: Elaboración propia (2024).

Las solicitaciones de cortante de la Tabla 4-10 se graficaron en sus respectivas luces, obteniendo la Figura 4-14. Comparando los valores mencionados, se infiere que en los mismos tienden a crecer mientras la luz también lo hace. Por otro lado, es claro que las solicitaciones son mayores en diafragmas extremos en relación con los intermedios y esta diferencia, aunque no proporcionalmente, aumenta conforme la luz crece.

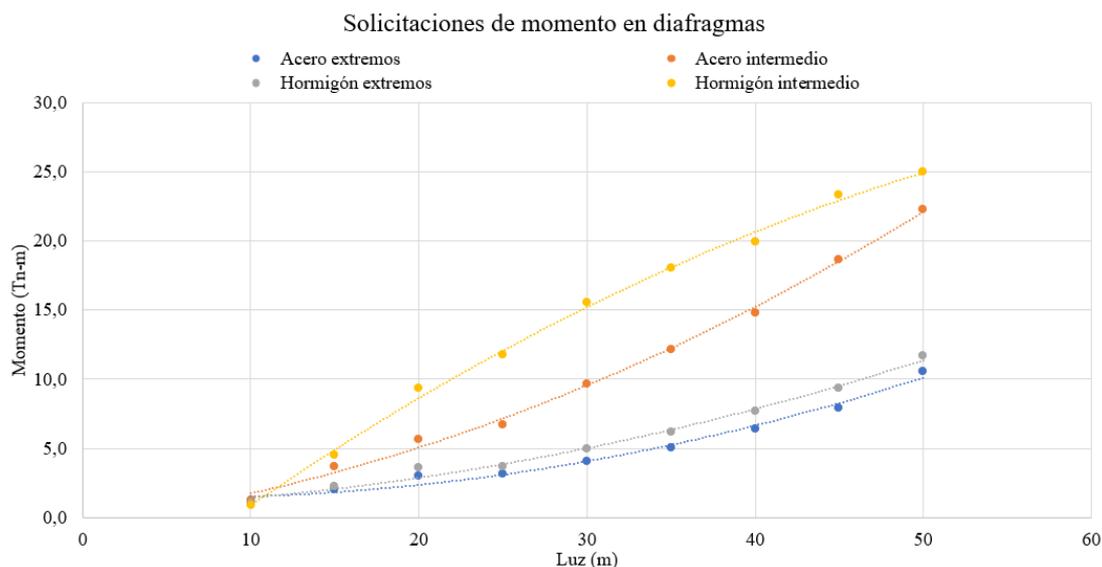
Figura 4-14: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas extremos e intermedios



Fuente: Elaboración propia (2024).

La Figura 4-15 ilustra la luz de los puentes vs las solicitaciones de momento de la Tabla 4-10. Los valores indicados tienden a crecer conforme la luz aumenta. Además, así como en axial, las solicitaciones son mayores en puntos intermedios en comparación con los extremos.

Figura 4-15: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas extremos e intermedios



Fuente: Elaboración propia (2024).

En el diseño y análisis de un puente, las solicitaciones de momento son críticas porque representan las fuerzas que pueden causar fallas estructurales (Chen & Duan, 2014). Por ello, para obtener la Tabla 4-11, se calculó el promedio de momentos de todas las secciones de los diafragmas tanto en acero como hormigón, de todas las variantes de puentes. Los valores obtenidos se grafican en la Figura 4-16 y si tomamos el crecimiento de las solicitaciones como una tendencia lineal, los momentos en diafragmas de acero aumentan en un 41% y los de hormigón en un 48%, aproximadamente, en relación a la luz.

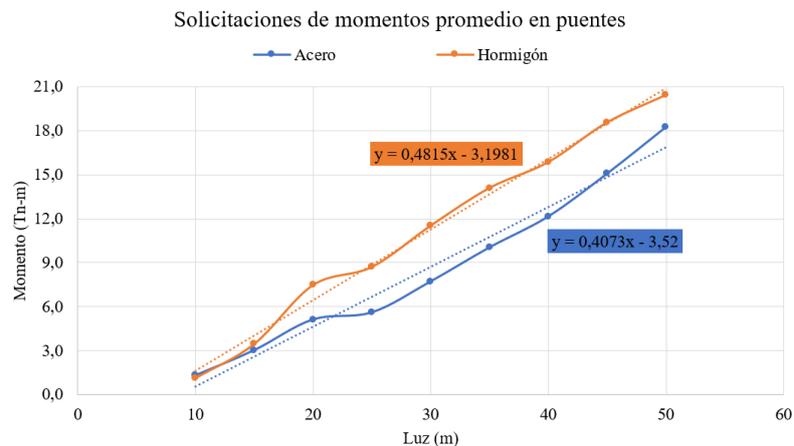
Tabla 4-11

Promedio de solicitaciones de momento en diafragmas

Luz (m)	Acero	Hormigón	Porcentaje de incremento
	Momento-M3 (Tn-m)	Momento-M3 (Tn-m)	
Promedio			
10	1,320	1,139	14%
15	3,035	3,474	13%
20	5,127	7,479	31%
25	5,611	8,710	36%
30	7,718	11,520	33%
35	10,035	14,087	29%
40	12,143	15,850	23%
45	15,062	18,550	19%
50	18,231	20,416	11%

Fuente: Elaboración propia (2024).

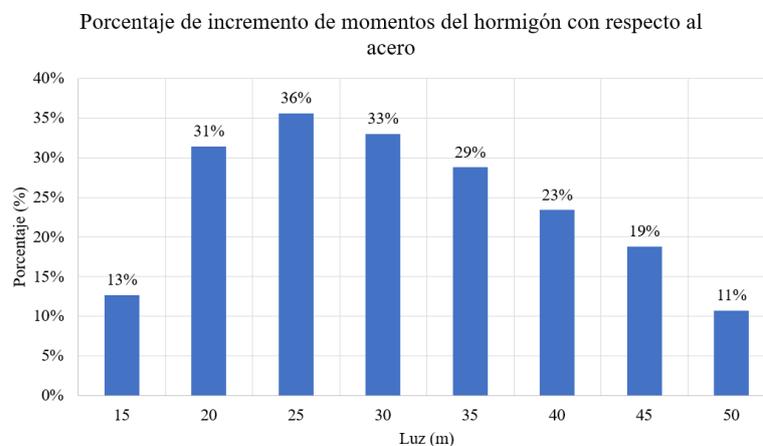
Figura 4-16: Promedio de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón



Fuente: Elaboración propia (2024).

En la sección A.1 Comparación de solicitaciones en diafragmas de acero y hormigón, observando las figuras comparativas de las solicitaciones axiales, cortantes y momentos de diafragmas del puente de 10m, es evidente que los valores correspondientes al acero son mayores frente al hormigón, no así en las otras variantes de puentes. Por ello, la última columna de la Tabla 4-11, indica cuanto por ciento son más grandes las solicitaciones promedio de momentos del hormigón con respecto al acero, dichos porcentajes se grafican en la Figura 4-17, en donde, se observa que el porcentaje de crecimiento del hormigón vs acero aumenta hasta los puentes de 25m y luego empieza a decrecer, sin perder de vista que, las solicitaciones de hormigón son mayores.

Figura 4-17: Porcentaje de incremento de solicitaciones de momento en diafragmas de hormigón respecto a acero



Fuente: Elaboración propia (2024).

4.3 Estimación del valor económico de las variantes de diafragmas

La estimación del valor económico parte del planteamiento de 3 variantes de diafragmas: diafragmas de acero, diafragmas de hormigón fabricado in situ y diafragmas de hormigón prefabricado. Por lo que, el presupuesto definido abarcará solamente estos elementos estructurales.

En primera instancia, es necesario el cálculo de las cantidades de obra que se evidencia en la Tabla 4-12 para diafragmas de acero, en la Tabla 4-13 para aquellos de hormigón elaborado in situ y en la Tabla 4-14 para diafragmas de hormigón prefabricado, todos con sus respectivos elementos de conexión.

Tabla 4-12

Cantidades de obra-Diafragmas de acero

Luz (m)	Diafragmas de acero		
	Acero diafragmas (Kg)	Acero placas (Kg)	Total de acero (Kg)
10	736,70	37,14	773,85
15	845,05	57,51	902,57
20	1271,20	115,99	1387,19
25	1769,58	206,52	1976,10
30	2391,93	307,47	2699,40
35	3278,12	492,98	3771,10
40	5258,42	979,08	6237,50
45	6035,88	1262,88	7298,77
50	9329,81	2105,26	11435,06

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-13

Cantidades de obra-Diafragmas de hormigón in situ

Luz (m)	Diafragmas de hormigón in situ			
	Hormigón diafragmas (m3)	Acero placas (Kg)	Refuerzo (Kg)	Encofrado (m2)
10	0,85	55,39	101,45	11,90
15	1,62	105,98	194,10	17,25
20	3,42	223,82	409,93	29,68
25	5,35	350,42	641,81	44,28
30	6,38	522,81	765,23	51,13
35	8,99	885,10	1078,47	70,25
40	11,91	1468,81	1429,52	91,45
45	13,40	1985,12	1607,49	101,32
50	16,96	2512,88	2034,85	126,78

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-14

Cantidades de obra-Diafragmas de hormigón prefabricado

Luz (m)	Diafragmas de hormigón prefabricado		
	Hormigón diafragmas unidad (m3)	Acero placas (Kg)	Refuerzo (Kg)
10	0,09	6,15	10,8
15	0,18	11,78	21,6
20	0,28	18,65	33,6
25	0,36	23,36	43,2
30	0,43	34,85	51,6
35	0,5	49,17	60
40	0,57	69,94	68,4
45	0,64	94,53	76,8
50	0,71	104,70	85,2

Fuente: Elaboración propia (2024).

Finalmente, se calcula el presupuesto de las variaciones de diafragmas en las diferentes luces de puentes en base a los análisis de precios unitarios (APUs) correspondientes. La Tabla 4-15, Tabla 4-16, Tabla 4-17, Tabla 4-18, Tabla 4-19, Tabla 4-20, Tabla 4-21, Tabla 4-22 y Tabla 4-23 muestra los rubros y con ello la valoración económica de cada variante.

Tabla 4-15

Presupuesto de diafragmas para puente de 10m

Puente 10m						
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total	
Diafragmas de acero						
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	773,85	3,8		2940,62
					Total	2940,62
Diafragmas de hormigón						
Diafragmas de hormigón fabricado in situ						
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	55,39	3,8		210,48
02	Hormigón simple f'c 300kg/cm2	m3	0,85	145		122,58
03	Acero de refuerzo Fy 4200kg/cm2	Kg	101,45	2,4		243,47
04	Encofrado de madera en altura 2 usos	m2	11,90	25		297,61
					Total	874,14
Diafragmas de hormigón prefabricado						
01	Elemento diafragma 0,20*0,245 prefabricado S/E	U	9	78,29		704,58
					Total	704,58

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-16

Presupuesto de diafragmas para puente de 15m

Puente 15m					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Diafragmas de acero					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	902,57	3,8	3429,75
					3429,75
Diafragmas de hormigón					
Diafragmas de hormigón fabricado in situ					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	105,98	3,8	402,71
02	Hormigón simple f'c 300kg/cm2	m3	1,62	145	234,53
03	Acero de refuerzo Fy 4200kg/cm2	Kg	194,10	2,4	465,83
04	Encofrado de madera en altura 2 usos	m2	17,25	25	431,33
					Total
					1534,4
Diafragmas de hormigón prefabricado					
01	Elemento diafragma 0,20*0,245 prefabricado S/E	U	9	154,55	1390,91
					Total
					1390,91

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-17

Presupuesto de diafragmas para puente de 20m

Puente 20m					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Diafragmas de acero					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	1387,19	3,8	5271,32
					Total
					5271,32
Diafragmas de hormigón					
Diafragmas de hormigón fabricado in situ					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	223,82	3,8	850,51
02	Hormigón simple f'c 300kg/cm2	m3	3,42	145	495,33
03	Acero de refuerzo Fy 4200kg/cm2	Kg	409,93	2,4	983,84
04	Encofrado de madera en altura 2 usos	m2	29,68	25	741,88
					Total
					3071,56
Diafragmas de hormigón prefabricado					
01		U	12	241,68	2900,11
					Total
					2900,11

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-18

Presupuesto de diafragmas para puente de 25m

Puente 25m					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Diafragmas de acero					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	1976,10	3,8	7509,18
					Total
					7509,18
Diafragmas de hormigón					
Diafragmas de hormigón fabricado in situ					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	350,42	3,8	1331,61
02	Hormigón simple f'c 300kg/cm2	m3	5,35	145	775,52
03	Acero de refuerzo Fy 4200kg/cm2	Kg	641,81	2,4	1540,35
04	Encofrado de madera en altura 2 usos	m2	44,28	25	1107,07
					Total
					4754,55
Diafragmas de hormigón prefabricado					
01	Elemento diafragma 0,20*0,245 prefabricado S/E	U	15	308,37	4625,61
					Total
					4625,61

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-19

Presupuesto de diafragmas para puente de 30m

Puente 30m					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Diafragmas de acero					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	2699,40	3,8	10257,72
				Total	10257,72
Diafragmas de hormigón					
Diafragmas de hormigón fabricado in situ					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	522,81	3,8	1986,68
02	Hormigón simple f'c 300kg/cm2	m3	6,38	145	924,66
03	Acero de refuerzo Fy 4200kg/cm2	Kg	765,23	2,4	1836,56
04	Encofrado de madera en altura 2 usos	m2	51,13	25	1278,26
				Total	6026,16
Diafragmas de hormigón prefabricado					
01	Elemento diafragma 0,20*0,245 prefabricado S/E	U	15	394,75	5921,18
				Total	5921,18

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-20

Presupuesto de diafragmas para puente de 35m

Puente 35m					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Diafragmas de acero					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	3771,10	3,8	14330,17
				Total	14330,17
Diafragmas de hormigón					
Diafragmas de hormigón fabricado in situ					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	885,10	3,8	3363,39
02	Hormigón simple f'c 300kg/cm2	m3	8,99	145	1303,15
03	Acero de refuerzo Fy 4200kg/cm2	Kg	1078,47	2,4	2588,33
04	Encofrado de madera en altura 2 usos	m2	70,25	25	1756,13
				Total	9011,00
Diafragmas de hormigón prefabricado					
01	Elemento diafragma 0,20*0,245 prefabricado S/E	U	18	491,86	8853,39
				Total	8853,39

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-21

Presupuesto de diafragmas para puente de 40m

Puente 40m					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Diafragmas de acero					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	6237,50	3,8	23702,49
				Total	23702,49
Diafragmas de hormigón					
Diafragmas de hormigón fabricado in situ					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	1468,81	3,8	5581,49
02	Hormigón simple f'c 300kg/cm2	m3	11,91	145	1727,34
03	Acero de refuerzo Fy 4200kg/cm2	Kg	1429,52	2,4	3430,85
04	Encofrado de madera en altura 2 usos	m2	91,45	25	2286,27
				Total	13025,95
Diafragmas de hormigón prefabricado					
01	Elemento diafragma 0,20*0,245 prefabricado S/E	U	21	613,49	12883,19
				Total	12883,19

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-22

Presupuesto de diafragmas para puente de 45m

Puente 45m					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Diafragmas de acero					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	7298,77	3,8	27735,31
				Total	27735,31
Diafragmas de hormigón					
Diafragmas de hormigón fabricado in situ					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	1985,12	3,8	7543,47
02	Hormigón simple f'c 300kg/cm2	m3	13,40	145	1942,38
03	Acero de refuerzo Fy 4200kg/cm2	Kg	1607,49	2,4	3857,97
04	Encofrado de madera en altura 2 usos	m2	101,32	25	2532,97
				Total	15876,79
Diafragmas de hormigón prefabricado					
01	Elemento diafragma 0,20*0,245 prefabricado S/E	U	21	749,61	15741,87
				Total	15741,87

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 4-23

Presupuesto de diafragmas para puente de 50m

Puente 50m					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Diafragmas de acero					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	11435,06	3,8	43453,24
				Total	43453,24
Diafragmas de hormigón					
Diafragmas de hormigón fabricado in situ					
01	Acero estructural ASTM A588 Gr50	Kg	2512,88	3,8	9548,94
02	Hormigón simple f'c 300kg/cm2	m3	16,96	145	2458,77
03	Acero de refuerzo Fy 4200kg/cm2	Kg	2034,85	2,4	4883,63
04	Encofrado de madera en altura 2 usos	m2	126,78	25	3169,43
				Total	20060,77
Diafragmas de hormigón prefabricado					
01	Elemento diafragma 0,20*0,245 prefabricado S/E	U	24	830,97	19943,34
				Total	19943,34

Fuente: Elaboración propia (2024).

4.4 Comparación económica

La Tabla 4-24 resume los resultados del apartado 4.3 Estimación del valor económico de las variantes de diafragmas, con la finalidad de plantear un gráfico comparativo de las mismas.

Tabla 4-24

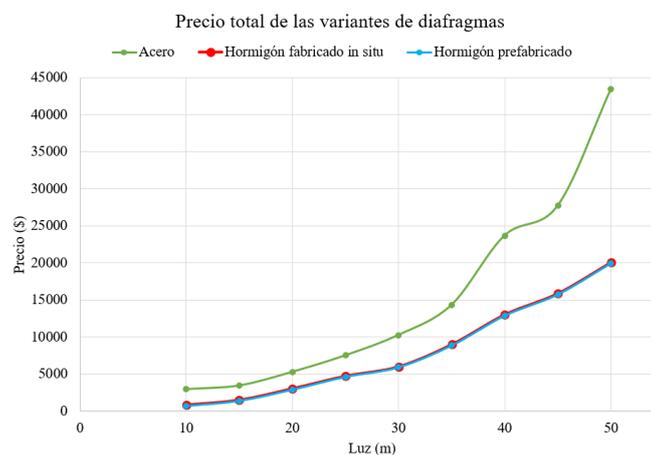
Resumen de presupuestos para las variantes de diafragmas

Luz (m)	Precio (\$)		
	Diafragmas de acero	Diafragmas de hormigón fabricado in situ	Diafragmas de hormigón prefabricado
10	2940,62	874,14	704,58
15	3429,75	1534,4	1390,91
20	5271,32	3071,56	2900,11
25	7509,18	4754,55	4625,61
30	10257,72	6026,16	5921,18
35	14330,17	9011,00	8853,39
40	23702,49	13025,95	12883,19
45	27735,31	15876,79	15741,87
50	43453,24	20060,77	19943,34

Fuente: Elaboración propia (2024).

La Figura 4-18 muestra la luz de los puentes vs el precio de cada tipo de diafragma. Es evidente que los valores económicos de los diafragmas de hormigón tanto fabricado in situ y prefabricado, presentan una variación similar conforme la luz aumenta, y la diferencia de los precios de estas dos variantes es mínima. Además, el precio de diafragmas de acero es notablemente más alto que los de hormigón y a partir de la luz de 30m, en donde el incremento pierde su tendencia lineal, la diferencia de precios se eleva considerablemente, hasta llegar alrededor de \$24000 en el puente de 50m de luz.

Figura 4-18: Comparación de presupuestos de las variantes de diafragmas



Fuente: Elaboración propia (2024).

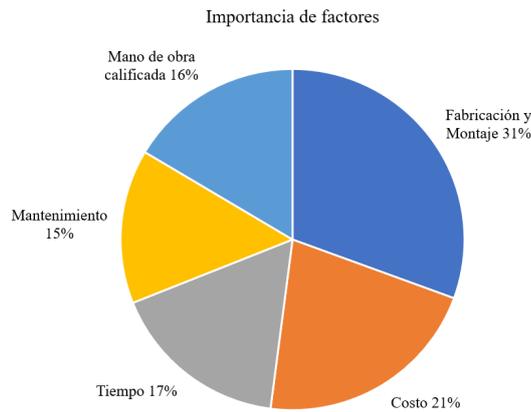
4.5 Aplicación de ingeniería de valor

La ingeniería de valor en el proyecto abarcará una evaluación exhaustiva a través de una consulta de expertos destinada a identificar mejoras en todas las etapas del proceso

constructivo, mediante el planteamiento de ciertos parámetros para analizar: fabricación y montaje, costo, tiempo, mantenimiento y requerimiento de mano de obra calificada.

La Figura 4-19 refleja los resultados de la consulta a 11 expertos que proporcionó los porcentajes de importancia de los factores mencionados anteriormente. Los mismos se utilizarán como coeficientes para la formulación de la ecuación de ingeniería de valor en cada método de construcción de diafragmas.

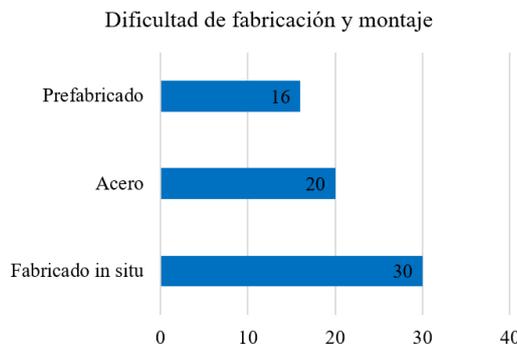
Figura 4-19: Importancia de factores en diafragmas



Fuente: Elaboración propia (2024).

La perspectiva acerca de la dificultad de fabricación y montaje de las diferentes maneras de construcción de diafragmas, como se observa en la Figura 4-20, resultó en que, los prefabricados representan menor complicación en este parámetro, por lo que, se le asignará el 100% del coeficiente correspondiente de la Figura 4-19, mientras que, al acero y fabricado in situ, les corresponderá el 80% y 65%, respectivamente.

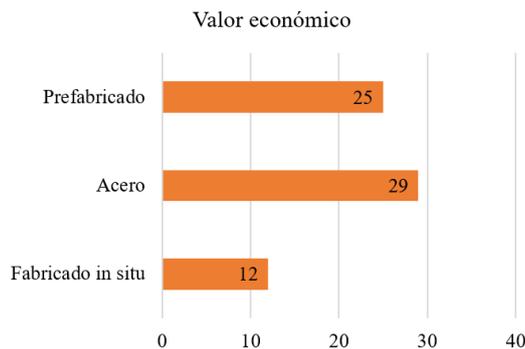
Figura 4-20: Comparación de dificultad de fabricación y montaje de las variantes de diafragmas



Fuente: Elaboración propia (2024).

La postura acerca del factor costo examinado en la Figura 4-21, ha resultado en que los diafragmas fabricados in situ son los más económicos. Sin embargo, para la asignación de coeficientes, se tomará en cuenta los resultados de la sección 4.4 Comparación económica, en donde los diafragmas con menor valor económico son los prefabricados, mismos que tendrán el 100% del porcentaje correspondiente al parámetro costo de la Figura 4-19, los fabricados in situ obtendrán el 80% y los de acero el 65%.

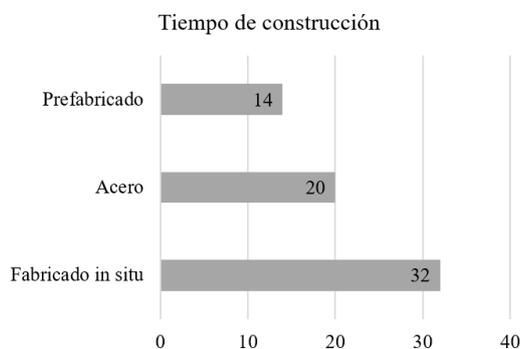
Figura 4-21: Comparación del valor económico de las variantes de diafragmas



Fuente: Elaboración propia (2024).

La Figura 4-22 indica los resultados obtenidos para el tiempo de construcción de los diferentes diafragmas, en ella se muestra que el método más rápido es el prefabricado, por lo que, su coeficiente será el equivalente al 100% del 17% (coeficiente correspondiente al parámetro tiempo), en segundo lugar está el acero con el 80% y finalmente el fabricado in situ con el 65%.

Figura 4-22: Comparación del tiempo de construcción de las variantes de diafragmas

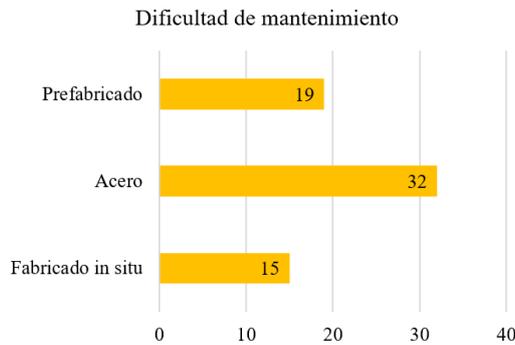


Fuente: Elaboración propia (2024).

La dificultad de mantenimiento de diafragmas ilustrada en la Figura 4-23 indica que, de acuerdo a la perspectiva de los especialistas, el fabricado in situ es el más simple de

mantener, debido a esto, se le asignará el 100% del coeficiente correspondiente a este parámetro, seguido del prefabricado y finalmente el acero, con el 80% y 65%, respectivamente.

Figura 4-23: Comparación de la dificultad de mantenimiento de las variantes de diafragmas



Fuente: Elaboración propia (2024).

El criterio acerca de la mano de obra calificada se enfoca en la dificultad para acceder a la misma en el mercado. En este contexto, la Figura 4-24 refleja que existe menor desafío al momento de requerir expertos en la técnica de fabricación in situ, la misma que tendrá el 100% del coeficiente respectivo de la Figura 4-19, mientras que, al prefabricado se le asignará el 80% y al acero el 65%.

Figura 4-24: Comparación de la dificultad para conseguir mano de obra calificada en las diferentes técnicas de construcción



Fuente: Elaboración propia (2024).

Luego de la tabulación y evaluación de los resultados de la consulta a expertos, así como, la ponderación, ya mencionada anteriormente, de los coeficientes de los diferentes factores analizados para las variantes de diafragmas, se conformó la Tabla 4-25, la misma

que emplea la Ecuación 4-1 para la calificación final de cada una. En donde, al realizar la sumatoria de los coeficientes tanto para prefabricado, acero y fabricado in situ, la opción óptima recae en diafragmas prefabricados de hormigón armado, con un valor del 93,80%.

$$I_v = \alpha_0 A + \alpha_1 B + \alpha_2 C + \alpha_3 D + \alpha_4 E \quad \text{Ecuación 4-1}$$

I_v = Ingeniería de valor

A = Coeficiente correspondiente a fabricación y montaje = 0,31

B = Coeficiente correspondiente a costo = 0,21

C = Coeficiente correspondiente a tiempo = 0,17

D = Coeficiente correspondiente a mantenimiento = 0,15

E = Coeficiente correspondiente a mano de obra calificada = 0,16

α_n = Porcentaje asignado a cada variante de diafragma dependiendo el parámetro (100%,80% y 65%)

Tabla 4-25

Aplicación de la ingeniería de valor

Tipo de diafragma	Coeficientes					Ingeniería de valor	
	Fabricación y Montaje	Costo	Tiempo	Mantenimiento	Mano de obra calificada		
	0,310	0,210	0,170	0,150	0,160		
Prefabricado	0,310	0,210	0,170	0,120	0,128	0,938	93,8 %
Acero	0,248	0,137	0,136	0,098	0,104	0,722	72,2 %
Fabricado in situ	0,202	0,168	0,111	0,150	0,160	0,790	79 %

Fuente: Elaboración propia (2024).

CONCLUSIONES

Los modelos de las diferentes variantes de diafragmas se han realizado con éxito, tanto en acero como en hormigón, para puentes con vigas de acero de luz desde 10m hasta 50m, con incrementos de 5m en la luz de los mismos.

Luego de un análisis exhaustivo de cada puente y la obtención de las solicitaciones de los diafragmas, se concluyó lo siguiente:

- Las solicitaciones axiales en hormigón y acero crecen en los extremos de los puentes y disminuye en los puntos intermedios conforme la luz del mismo aumenta.
- Las solicitaciones de cortante en diafragmas de hormigón y acero, mientras incrementa la luz del puente, crecen tanto en extremos como en puntos intermedios. Además, estas son mayores en los extremos en comparación con los intermedios y la diferencia entre las mismas aumenta, pero no proporcionalmente.
- Las solicitaciones de momento tienden a aumentar acorde la luz del puente también lo hace, tanto en puntos extremos como intermedios. De igual manera, en estos últimos son mayores las solicitaciones en comparación con los extremos.

Sabiendo que, las solicitaciones de momento definen la estabilidad estructural y resistencia del puente, se infiere que, al considerar una tendencia lineal, las mismas incrementan según la luz también lo hace. En este contexto, los momentos en diafragmas de hormigón y acero aumentan en un 48% y 40%, respectivamente.

En las diferentes longitudes de puentes, las demandas sobre el hormigón son generalmente superiores a las del acero, a excepción del caso de puentes con una luz de 10m, donde se invierte esta tendencia.

El valor económico de las variantes de diafragmas aumenta acorde a la luz del puente debido al incremento del número requerido de los mismos.

Los diafragmas de hormigón fabricado in situ y prefabricado tienen una variación mínima de precio, siendo esta un valor promedio de \$140. Sin embargo, la diferencia de costos entre diafragmas de acero y hormigón es relevante, considerando que, a partir de luces de 30m esta incrementa considerablemente en relación a aquellos de hormigón.

Mediante la ingeniería de valor, con la ayuda de varios parámetros (fabricación y montaje, costo, tiempo, mantenimiento y mano de obra calificada), se determinó que la solución óptima son los diafragmas de hormigón prefabricado, seguidos de los fabricados in situ y finalmente los de acero.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar y profundizar la investigación con el objetivo de alcanzar un diseño definitivo de los diafragmas. Por otro lado, se sugiere analizar el comportamiento de las vigas principales al interactuar con las variantes de diafragmas planteadas.

Además, resultaría importante plantear y examinar la interacción de puentes con diafragmas combinados, es decir, hormigón en puntos extremos y acero en puntos intermedios, o viceversa, con el fin de evaluar cómo diferentes configuraciones de diafragmas afectan el comportamiento estructural y la capacidad de disipación de energía del puente.

Se propone realizar investigaciones sobre el comportamiento sísmico de los diafragmas en puentes para determinar cómo afectan la capacidad del mismo para resistir fuerzas sísmicas y cómo pueden mejorar la capacidad de disipación de energía y la estabilidad estructural durante movimientos telúricos.

Finalmente, examinar casos de estudio de puentes, a nivel nacional e internacional, donde los diafragmas hayan desempeñado un papel importante en su diseño, tecnologías de construcción o mantenimiento, analizando los éxitos y desafíos enfrentados en cada caso para extraer recomendaciones prácticas para futuros proyectos.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2020). *American Association of State Highway and Transportation LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS*. Washington: AASHTO.
- AISC. (2022). *Specification for structural steel buildings ANSI/AISC 360-22*. Chicago: AISC.
- Andrade, J. (2016). *Diseño de la superestructura de un puente entre la Av. 27 de Febrero y la calle Paseo Río Cuenca*. Cuenca: Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/5352/1/11713.pdf>
- Beer, F., Johnston, R., Mazurek, D., & Eisenberg, E. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros* (Novena ed.). México: McGRAW-HILL.
- Celigüeta, J. (2011). *Método de los elementos finitos para análisis estructural*. España: UNICOPIA C.B.
- Chen, W.-F., & Duan, L. (2014). *Bridge Engineering Handbook*. Washington D.C.: CRC Press.
- Coletti, D., & Grubb, M. (2016). Practical Implementation of Stability Bracing Strength and Stiffness Guidelines for Steel I-Girder Bridges [Implementación práctica de directrices de resistencia y rigidez de arriostramiento de estabilidad para puentes de vigas I de acero]. *Transportation Research Record*, 2592(1), 9-16.
- Crisafulli, F. (2018). *Diseño sismorresistente de construcciones de acero*. Santiago de Chile: Asociación Latinoamericana del Acero-Alacero.
- Delgado, C., Rodríguez, R., & Verá, W. (2018). Propuesta de puente aplicando el método de diseño AASHTO LRFD para la ciudad de Manta. *Dominio de las Ciencias*, IV(3), 189-210.
- Gómez, J. (2015). *Puentes*. Plaza de la Revolución, Cuba: Empresa Editorial Poligráfica Félix Varela.

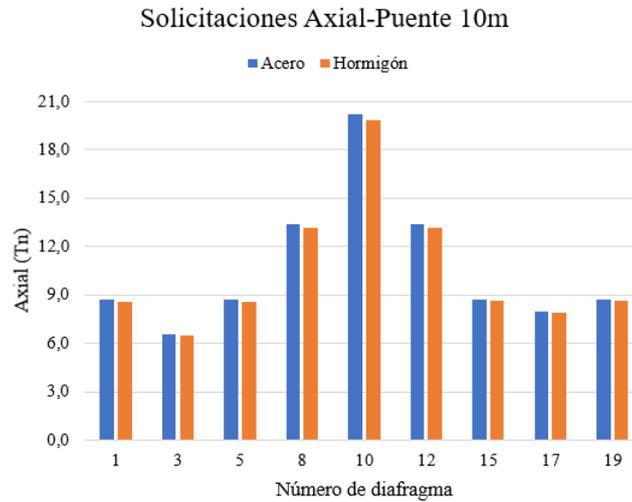
- Grubb, M., Wilson, K., White, C., & Nickas, W. (2015). *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Superstructures - Reference Manual* (No. FHWA-NHI-15-047 ed.). National Highway Institute (US).
- Jaramillo, J., & Villavicencio, F. (2022). *Determinación de las solicitaciones de superestructuras de puentes comparando su comportamiento ante la acción de los camiones de diseño AASHTO HL-93 y HS-MTOP*. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Macas, F. (2018). *Estudio del comportamiento de un puente de 40 metros sobre el Río Amarillo conformado por vigas metálicas con alma compacta y trabajando como sección compuesta con la losa del tablero*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Manterola, J. (1984). Evolución de los puentes en la historia reciente. *Informes de la Construcción*, 35(359-360), 5-35.
- McCormac, J., & Csernak, S. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero* (Quinta ed.). México: Alfaomega.
- Miquel i Solé, L. (2018). *El arte del ingenio. Evolución del diseño estructural de la bóveda de cáscara desde la perspectiva del ingeniero civil*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- MTOP. (2013). *NEVI-12*. Quito: MTOP.
- Neira, K. (2018). *ANÁLISIS COMPARATIVO ESTRUCTURAL ENTRE VIGAS SIMPLEMENTE APOYADAS DE HORMIGÓN POSTENSADO EN SITIO Y VIGAS DE ACERO ESTRUCTURAL PARA UN PUENTE DE 45m DE LUZ EN LA CIUDAD DE ESMERALDAS*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). *Cargas (No sísmicas) (NEC-SE-CG)*. Norma, Quito.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). *Estructuras de Acero (NEC-SE-AC)*. Norma, Quito.
- Plasencia-Lozano, P. (2014). Puentes, sociedad e ingeniería. *Informes de la Construcción*, 66(535), e032-e032.

- Prieto, J., & René, T. (2010). *Diseño definitivo comparativo del puente de 60.0 m. de luz sobre el rio Toachi en base a las normas AASHTO estandar y LRFD*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Reinoso, E. (2000). Manual de Diseño de Estructuras Prefabricadas y Presforzadas. Mexico. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54631911/Manual-de-Diseno-de-Estructuras-Prefabricadas-y-Presforzadas-libre.pdf?1507215377=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DManual_de_Diseno_de_Estructuras_Prefabri.pdf&Expires=1695738172&Signature=J
- Rodríguez, A. (2022). *PUENTES Con ASHTO LRFD 2020* (Novena ed.). Lima.
- Seminario, E. (2004). *GUÍA PARA EL DISEÑO DE PUENTES CON VIGAS Y LOSAS*. Piura: Universidad de Piura. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1364/ICI_112.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Steinman, D., & Watson, S. A. (1979). *Puentes y sus constructores*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Troyano-Moreno, M. (19 de Febrero de 2019). *Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga*. Obtenido de Introducción a las estructuras de hormigón: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/17342>
- Weiwei, L., & Yoda, T. (2017). *Bridge Engineering: Classifications, Design Loading, and Analysis Methods*. Butterworth-Heinemann.

A. ANEXOS

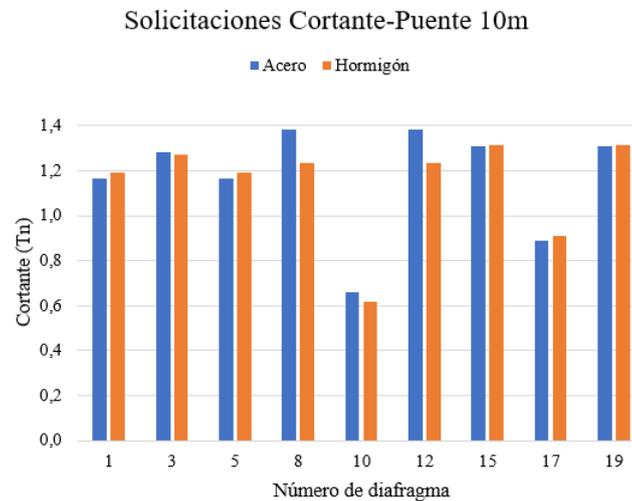
A.1 Comparación de solicitaciones en diafragmas de acero y hormigón

Figura A-1: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 10m



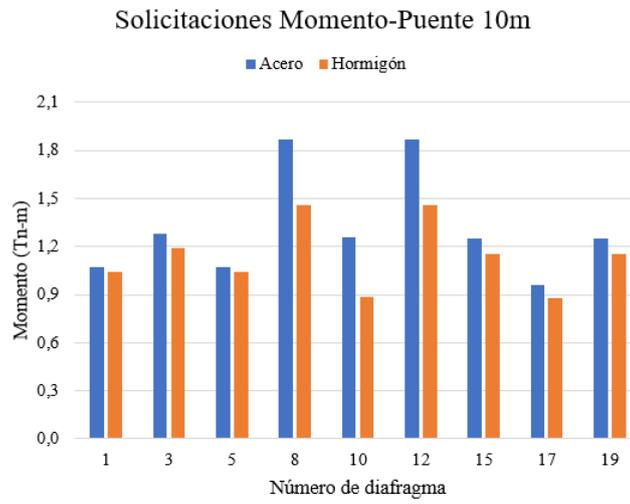
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-2: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 10m



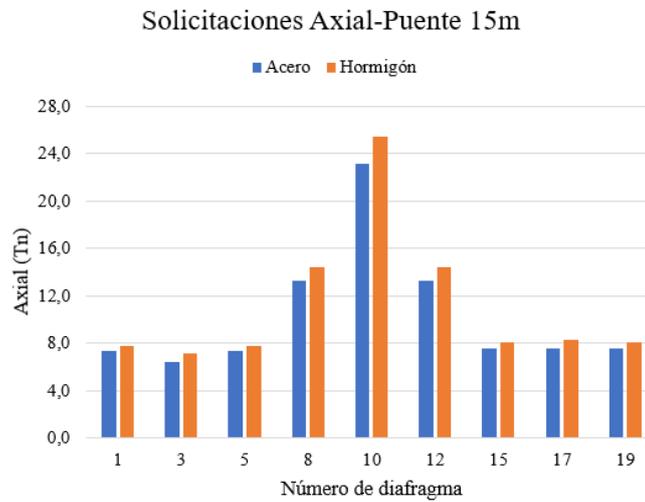
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-3: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 10m



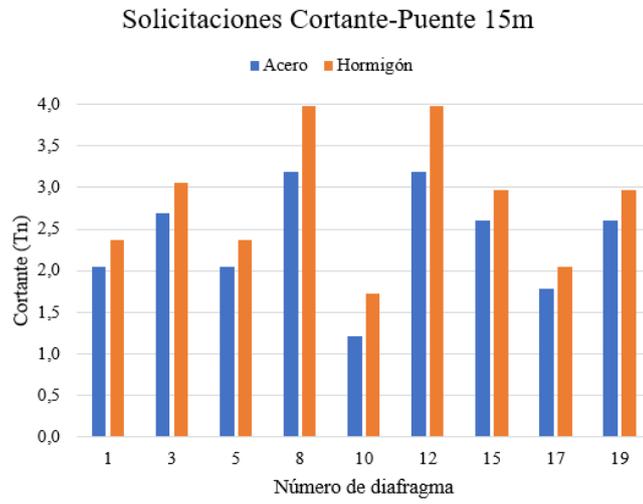
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-4: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 15m



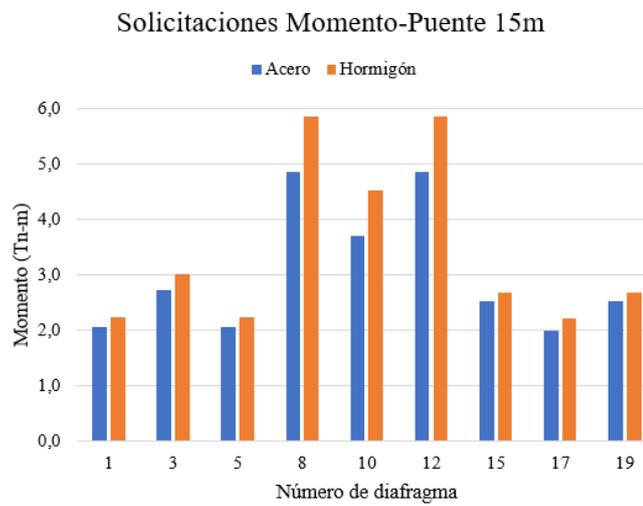
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-5: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 15m



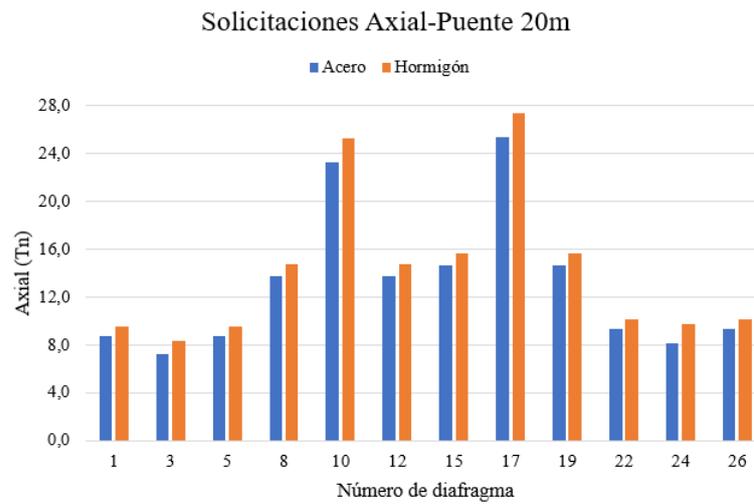
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-6: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 15m



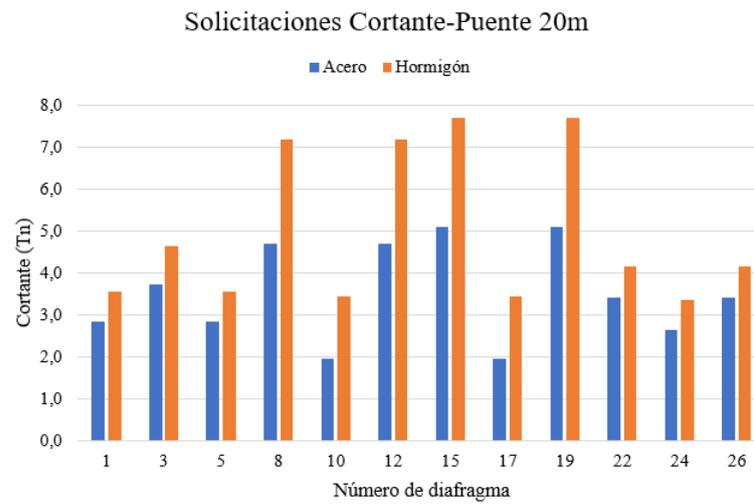
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-7: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 20m



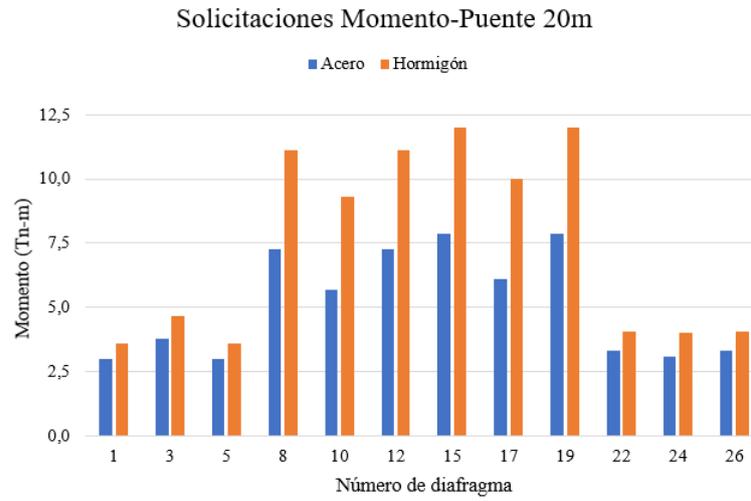
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-8: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 20m



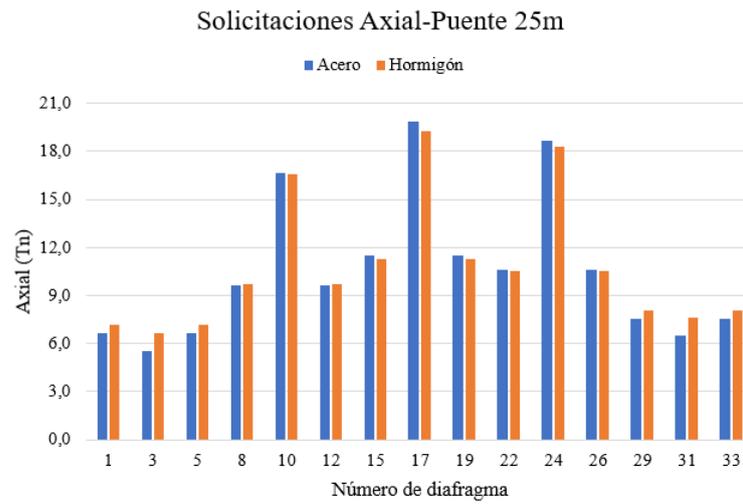
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-9: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 20m



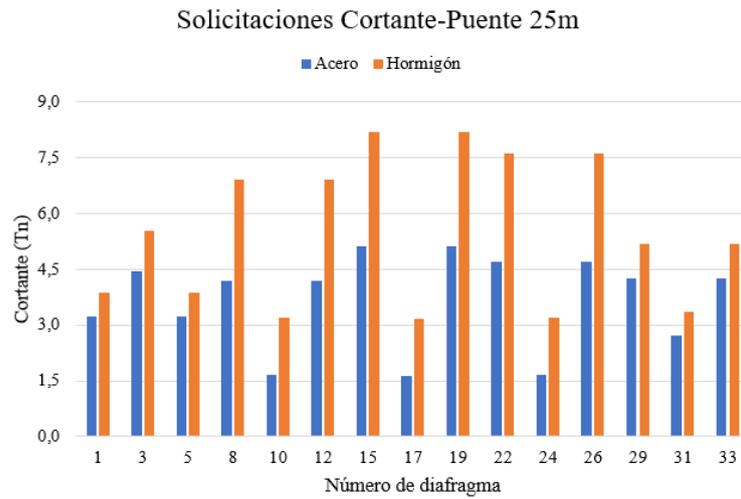
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-10: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 25m



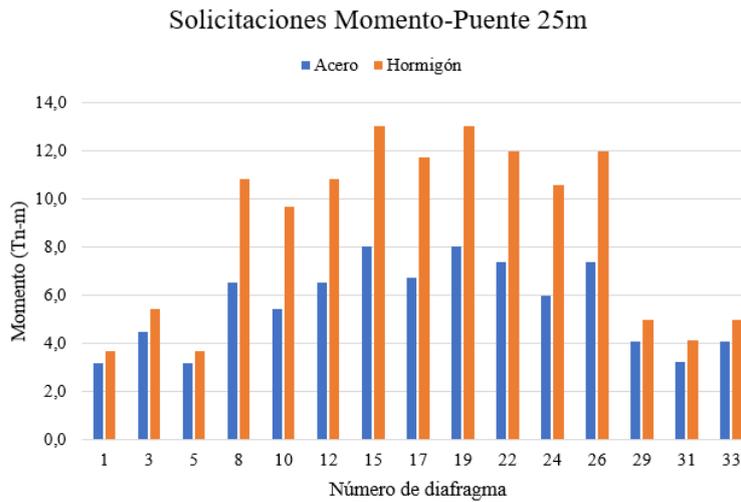
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-11: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 25m



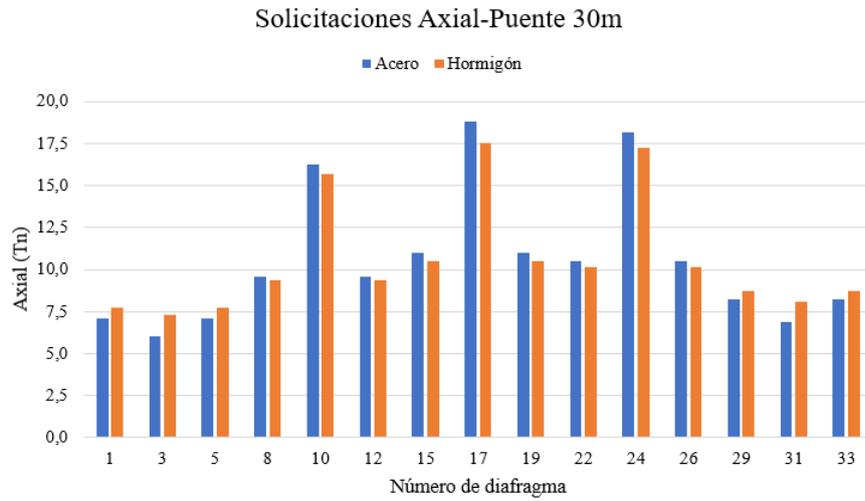
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-12: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 25m



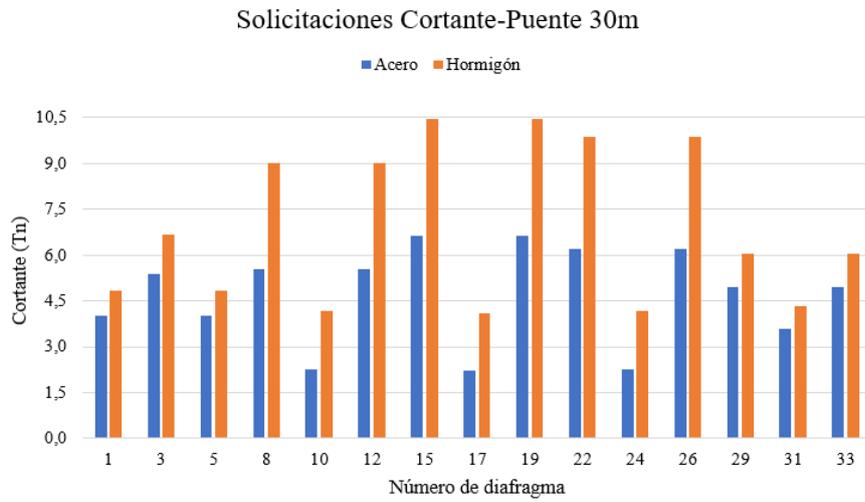
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-13: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 30m



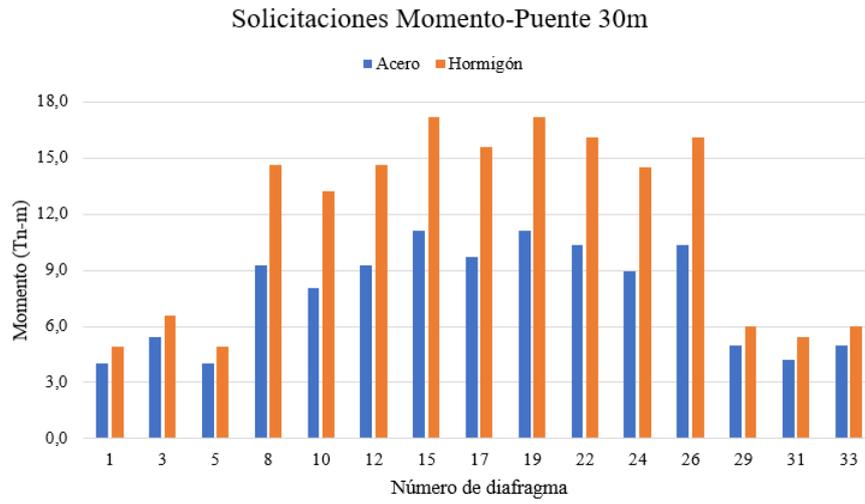
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-14: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 30m



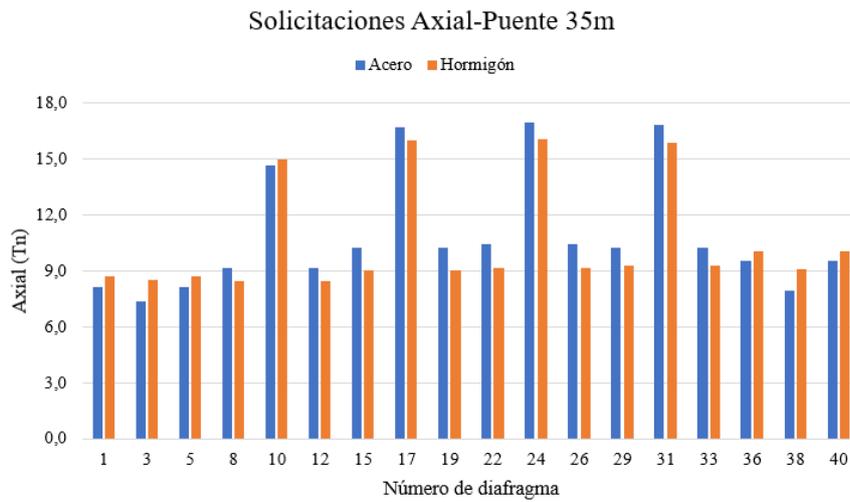
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-15: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 30m



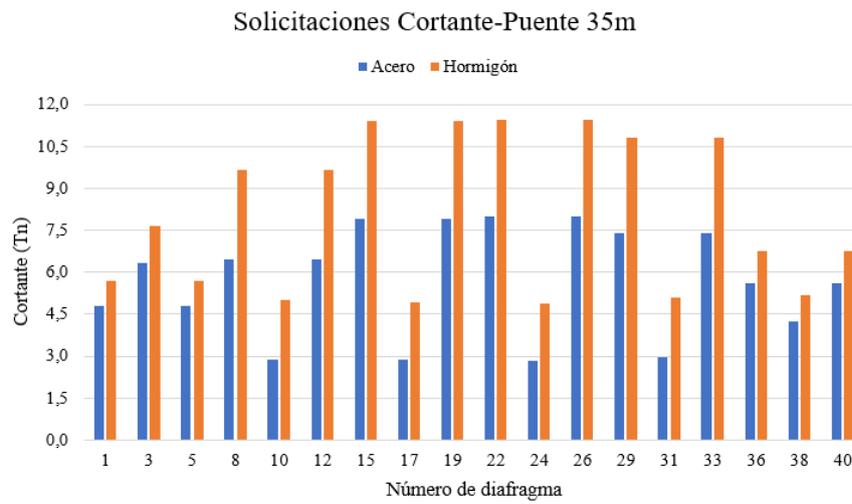
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-16: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 35m



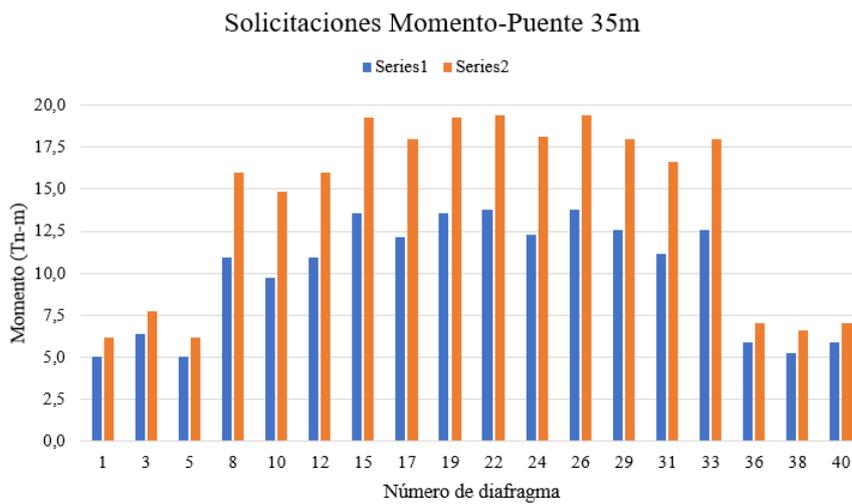
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-17: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 35m



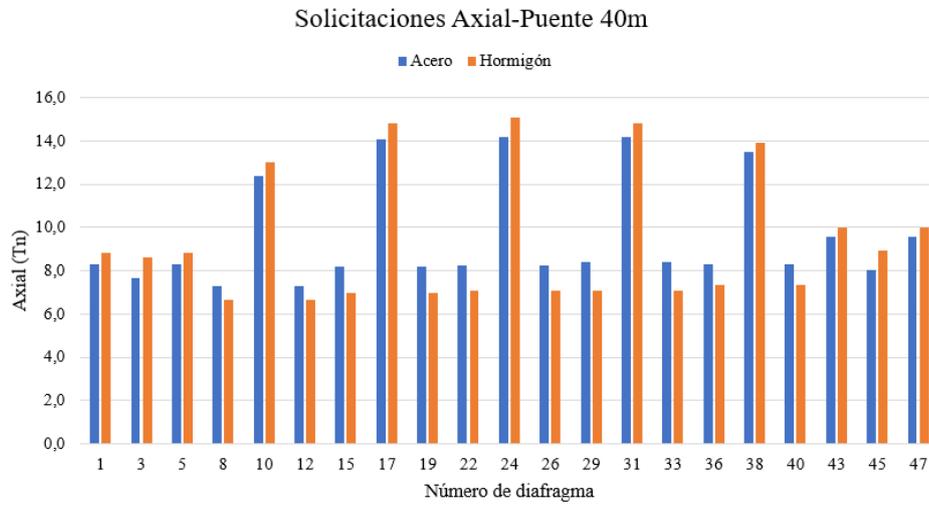
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-18: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 35m



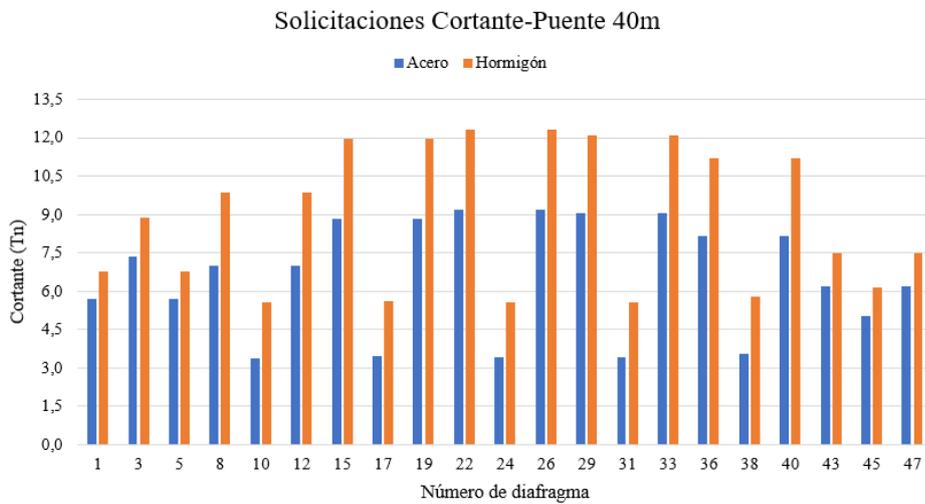
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-19: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 40m



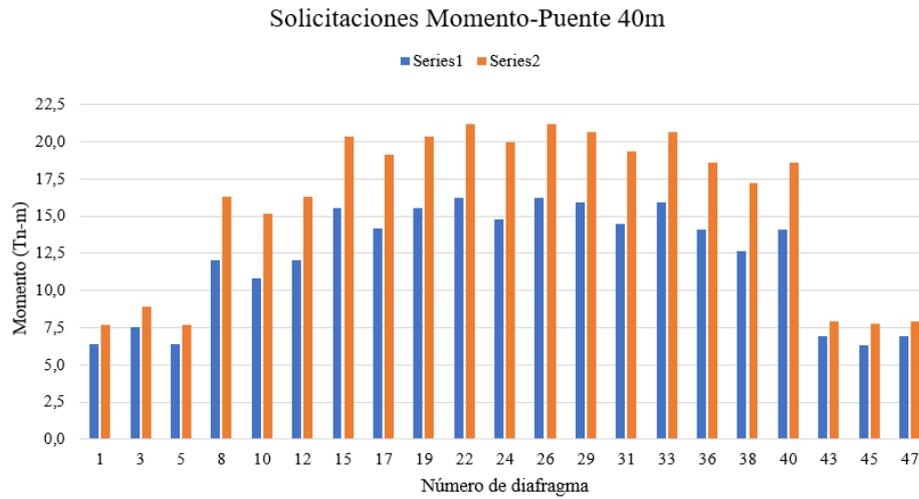
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-20: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 40m



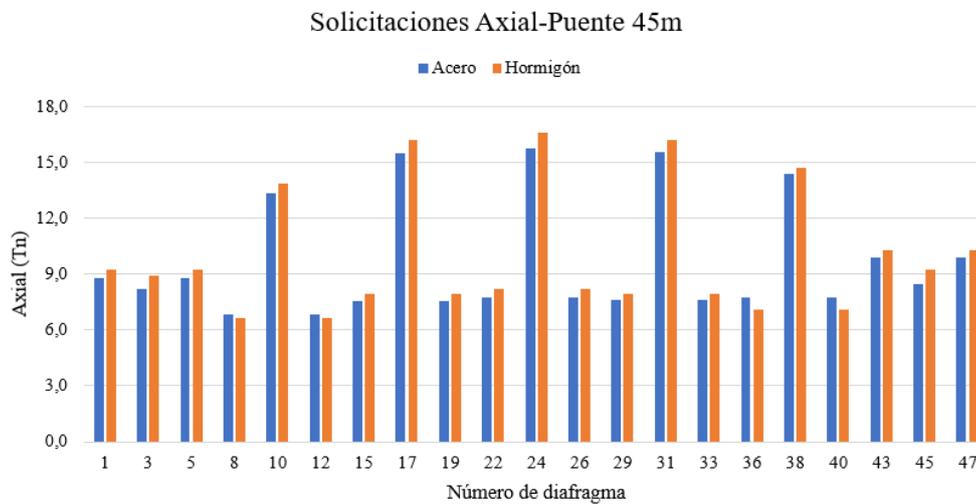
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-21: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 40m



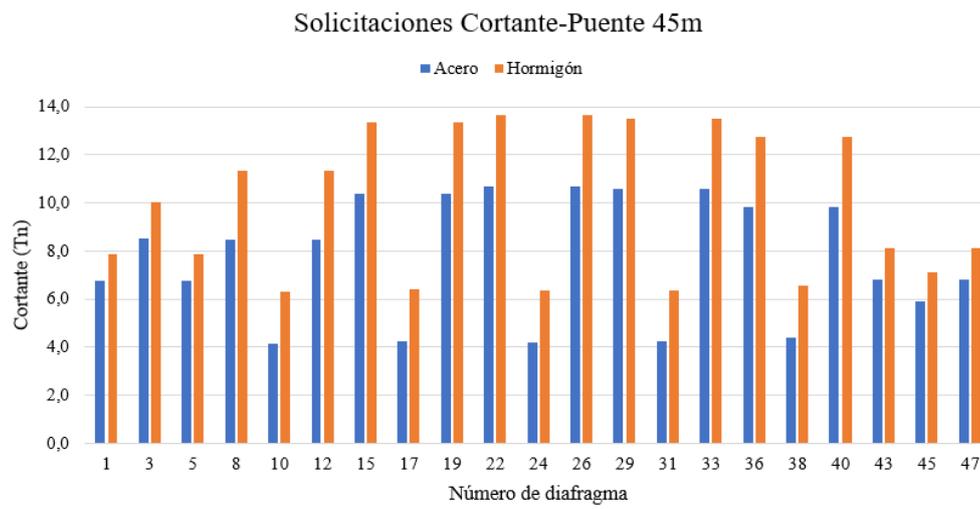
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-22: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón-Puente 45m



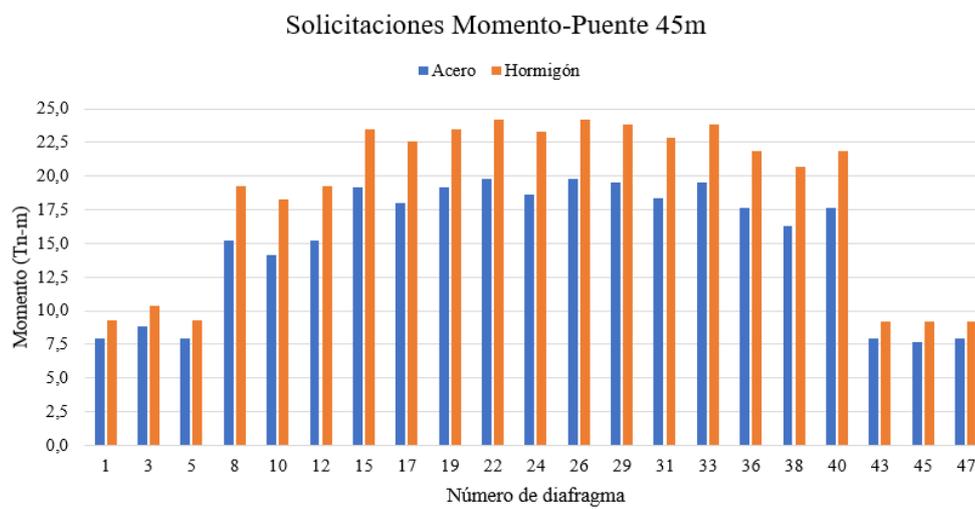
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-23: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 45m



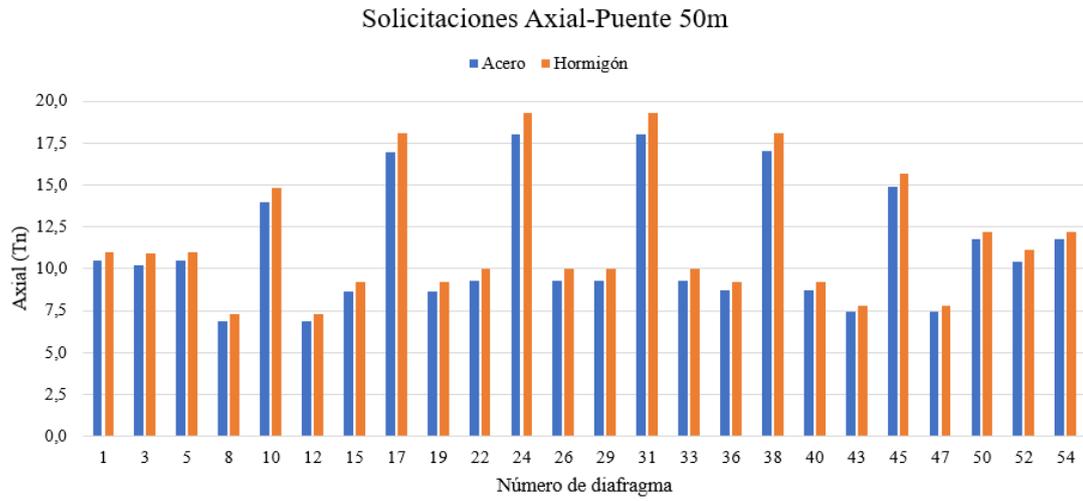
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-24: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 45m



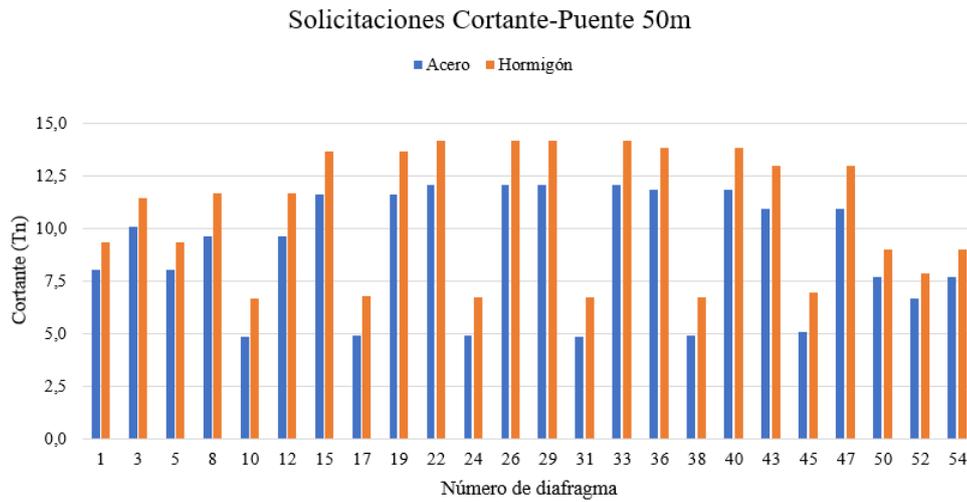
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-25: Comparación de solicitaciones axiales en diafragmas de acero y hormigón- Puente 50m



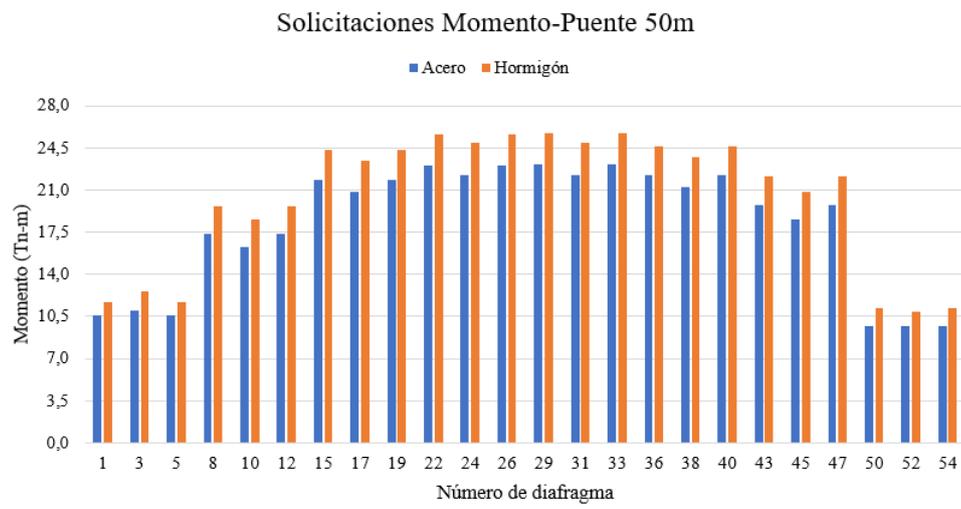
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-26: Comparación de solicitaciones de cortante en diafragmas de acero y hormigón-Puente 50m



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura A-27: Comparación de solicitaciones de momento en diafragmas de acero y hormigón-Puente 50m



Fuente: Elaboración propia (2024).