



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PUENTE MODULAR CON  
CONEXIONES DE RÁPIDO ENSAMBLE PARA CAMINOS DE ACCESO EN LA  
INDUSTRIA PETROLERA**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

PRESENTA:

**ING. JUAN ANTONIO RAMOS SÁNCHEZ**

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

**DR. SERGIO ALBERTO DÍAZ ALVARADO**

EN CODIRECCIÓN:

**DR. RENÉ SEBASTIÁN MORA ORTIZ**

CUNDUACÁN, TABASCO, OCTUBRE DE 2024

## Declaración de autoría y originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, el día 21 del mes octubre del año 2024, el que suscribe Juan Antonio Ramos Sánchez alumno del Programa de Maestría en Ingeniería Estructural con número de matrícula 222D29005, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del grado de maestro en ingeniería estructural y titulada ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PUENTE MODULAR CON CONEXIONES DE RÁPIDO ENSAMBLE PARA CAMINOS DE ACCESO EN LA INDUSTRIA PETROLERA dirigida por el Dr. Sergio Alberto Díaz Alvarado y el Dr. René Sebastián Mora Ortiz.

### DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 21 de octubre de 2024.



Ing. Juan Antonio Ramos Sánchez



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2024  
Felipe Carrillo  
PUERTO  
RECONOCIMIENTO  
NACIONAL  
CONSEJO NACIONAL  
DE CULTURA

## DIRECCIÓN

**OFICIO:** DAIA/DIR/2215/2024  
**FECHA:** 17 de octubre de 2024  
**ASUNTO:** Autorización de  
impresión definitiva

**ING. JUAN ANTONIO RAMOS SÁNCHEZ**  
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL  
**PRESENTE**

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

**"Análisis y diseño estructural de un puente modular con conexiones de rápido ensamble para caminos de acceso en la industria petrolera"**

Para obtener el grado de **Maestro en Ingeniería Estructural** y en el cual ha tenido como Director de Tesis al Dr. Sergio Alberto Díaz Alvarado.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envió un afectuoso saludo.

**ATENTAMENTE**

**DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
**DIRECTORA**

c.c.p. Archivo

DRA'DMFM / MCA'RACT



**DIRECCIÓN**

## Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 21 de octubre de 2024.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PUENTE MODULAR CON CONEXIONES DE RÁPIDO ENSAMBLE PARA CAMINOS DE ACCESO EN LA INDUSTRIA PETROLERA.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra literaria en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

### COLABORADORES

EGRESADO

  
Ing. Juan Antonio Ramos Sánchez

DIRECTORES

  
Dr. Sergio Alberto Díaz Alvarado

  
Dr. René Sebastián Mora Ortiz

TESTIGOS

  
M.I. Rodelmár Pérez Torres

  
M.I. Gabriel Polanco Sotomayor

## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Dios, por darme la salud y sabiduría para cumplir este objetivo que parecía que no podría alcanzar.

A mis padres Leo, Evelio y a Pita, para los cuales solo tengo palabras de agradecimiento por todo su apoyo y dedicación que han tenido conmigo durante toda mi vida. Sé que sin respaldo no hubiera podido conseguir este logro.

A mi esposa Lore, que me ha dado palabras de aliento, inspiración y motivación para terminar este trabajo.

A mi hermana Yanet, y mis pequeños sobrinos Paula y Javier, por estar siempre presentes en mi vida y apoyarme.

A Tecnosolum y al Ing. Gabriel Polanco mi más alto agradecimiento, por estar siempre a favor de la preparación académica. Muchas gracias por darme el tiempo para poder culminar mis estudios.

Al Dr. Sergio Alberto Díaz Alvarado, que siempre ha estado dispuesto a compartir conmigo sus experiencias de vida y conocimientos, y que me alienta a conseguir grandes cosas.

A los profesores de la maestría que con su profesionalismo y cátedra nos llenaron de todo el conocimiento posible en las aulas.

Al Arq. Villanueva, por su apoyo en la construcción de los prototipos.

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, por aceptarme dentro de la primera generación de la maestría en ingeniería estructural.



## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>4</b>
<b>1. RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
<b>2. ABSTRACT.....</b>	<b>10</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
4.1. Estado del arte.....	13
4.1.1. Antecedentes.....	13
4.1.2. Innovación en la estructuración de puentes. ....	16
4.2. Tipologías y sistemas de puentes modulares. ....	20
4.2.1. Tipologías usuales.....	20
4.3. Definición de acciones.....	22
4.4. Filosofías y códigos de diseño en México y en el mundo. ....	27
4.5. Combinaciones de carga.....	30
4.6. Estructuración de puentes tipo armadura. ....	32
4.7. Conexiones modulares.....	33
4.8. Modelación mediante método de elementos finitos. ....	35
4.8.1. Modelamiento computacional mediante MEF.....	36
4.8.2. Simulación.....	38
<b>5. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>38</b>
<b>6. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>39</b>
<b>7. HIPOTESIS.....</b>	<b>39</b>
<b>8. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>39</b>
<b>9. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>39</b>
<b>10. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>39</b>
<b>11. METODOLOGÍA.....</b>	<b>40</b>
11.1. Análisis y diseño estructural de puente modular. ....	40



11.1.1.	Evaluación de variables de estructuración. ....	40
11.1.2.	Definición de las cargas vivas vehiculares. ....	42
11.1.3.	Preevaluación del comportamiento optimo.....	42
11.1.4.	Evaluación estructural de la propuesta óptima. ....	47
11.1.4.1.	Definición de elementos estructurales para diseño. ....	49
11.1.4.2.	Asignación de cargas al modelo estructural. ....	50
11.1.4.3.	Casos de carga estudiados. ....	57
11.1.4.4.	Diseño estructural de la tipología. ....	58
11.1.4.5.	Revisión de desplazamientos verticales.....	60
11.1.5.	Dimensionamiento de miembros de la armadura. ....	61
<b>12.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>63</b>
12.1.	Diseño por el método de elementos finitos (MEF). ....	63
12.1.1.	Diseño de cuerda superior, inferior y diagonales.....	64
12.1.2.	Diseño de conexión.....	73
12.2.	Modelo físico.....	79
12.2.1.	Impresora 3D.....	80
12.2.2.	Corte con láser. ....	82
<b>13.</b>	<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>84</b>
13.1.	Características geométricas del puente y de los elementos.....	85
13.2.	Propuesta de apoyo del puente. ....	88
13.3.	Costo preliminar del puente. ....	89
<b>14.</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN</b> . ....	<b>90</b>
<b>15.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> . ....	<b>92</b>
<b>16.</b>	<b>REFERENCIAS CITADAS</b> . ....	<b>94</b>
<b>17.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>97</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes y factores de carga según metodología LRFD.....	32
Tabla 2. Clasificación de carreteras respecto a sus características geométricas..	41
Tabla 3. Dimensiones del puente en estudio.....	42
Tabla 4. Valores característicos del espectro sísmico para estructuras tipo B.....	53
Tabla 5. Fuerzas de frenaje aplicado como un momento.....	56
Tabla 6. Factor de seguridad.....	73
Tabla 7. Peso de la superestructura del puente modulable. ....	89



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas de puentes modulares (Russell & Thrall, 2013). .....	15
Figura 2. Vista general del puente (Bianconi-Bailez et al., 2015).....	17
Figura 3. Conexión del puente (Bianconi-Bailez et al., 2015).....	17
Figura 4. Perspectiva general del puente ( Viuda de Sainz, s/f).....	18
Figura 5. Conexión del puente (Viuda de Sainz, s/f). .....	18
Figura 6. Validación del modelo a escala real (Estruch i Tena, 2016).....	19
Figura 7. Modelo matemático de elementos finitos (Estruch i Tena, 2016).....	19
Figura 8. Sistema constructivo PBU (Fort Miller Company, 2016). .....	21
Figura 9. Perfil transversal de sistema de armadura tridimensional (Kuehl, 2018). .....	22
Figura 10. Modelo de carga viva vehicular IMT 66.5 para análisis longitudinal de puentes con claros iguales o mayores a 30 m (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001). .....	24
Figura 11. Modelo de carga viva vehicular IMT 66.5 para análisis longitudinal de puentes con claros menores a 30 m (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001). .....	25
Figura 12. Modelo de carga viva vehicular IMT 20.5 para análisis longitudinal de puentes con claros iguales o mayores a 15 m (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001). .....	25
Figura 13. Modelo de carga viva vehicular IMT 20.5 para análisis longitudinal de puentes con claros menores a 15 m (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001). .....	25
Figura 14. Modelo de carga viva vehicular IMT 60.5 para análisis transversal o tridimensional de puentes (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001).....	26
Figura 15. Modelo de carga viva vehicular IMT 20.5 para análisis transversal o tridimensional de puentes (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001).....	26
Figura 16. Elementos de un puente tipo armadura y fuerzas axiales actuantes (Tomada de Lin & Yoda, 2017). .....	33
Figura 17. Sistema modular para estructuras planas (Tomada de Dechkova Tumbeva, 2021). .....	34



Figura 18. Modelamiento matemático de componente estructural: a) Modelo real, b) Modelo dividido en elementos finitos (discretizado).....	35
Figura 19. Clasificación oficial de carreteras en México (Imagen tomada de (Cuevas & Cadengo, 2020).....	41
Figura 20 Modelo estructural <b>tipología 1</b> . a) Vista en 3D y b) Perfil principal de armadura.....	43
Figura 21 Modelo estructural <b>tipología 2</b> . a) Vista en 3D y b) Perfil principal de armadura.....	44
Figura 22 Modelo estructural <b>tipología 3</b> . a) Vista en 3D y b) Perfil principal de armadura.....	44
Figura 23 Modelo estructural <b>tipología 4</b> . a) Vista en 3D y b) Perfil principal de armadura.....	45
Figura 24. Imagen de la distribución de esfuerzos en elementos estructurales de armadura (Tipología 1).....	46
Figura 25. Distribución de esfuerzos en armadura crítica de la <b>tipología 1</b> .....	46
Figura 26. Distribución de esfuerzos en armadura crítica de la <b>tipología 2</b> .....	46
Figura 27. Distribución de esfuerzos en armadura crítica de la <b>tipología 3</b> .....	47
Figura 28. Distribución de esfuerzos en armadura crítica de la <b>tipología 4</b> .....	47
Figura 29. Vista en isométrico para la evaluación estructural del puente modulado. .....	48
Figura 30. Vista en isométrico para la evaluación estructural del puente modulado. .....	49
Figura 31. Vista lateral de puente modulado (armadura). ....	49
Figura 32. Asignación de perfiles estructurales al modelo del puente modulado.	50
Figura 33. Definición del modelo de carga IMT 20.5 .....	51
Figura 34. Definición del modelo de carga IMT 66.5 .....	52
Figura 35. Espectro de diseño sísmico. ....	53
Figura 36. Asignación de fuerzas por sismo en dirección X.....	54
Figura 37. Asignación de fuerzas por sismo en dirección Y.....	54
Figura 38. Asignación de cargas de viento ( $V_E$ ). ....	55
Figura 39. Asignación de cargas de viento sobre carga viva ( $V_{cv}$ ). ....	55



Figura 40. Asignación de cargas de viento ( $V_E$ ).....	56
Figura 41. Fuerza de frenaje 1 carril.....	57
Figura 42. Fuerza de frenaje 2 carriles.....	57
Figura 43. Combinaciones de cargas.....	57
Figura 44. Relación de demanda/capacidad (D/C) de elementos de armadura (diagonales).....	58
Figura 45. Relación de demanda/capacidad (D/C) de elementos de armadura (cuerda superior e inferior).....	59
Figura 46. Relación de demanda/capacidad (D/C) de vigas transversales.....	59
Figura 47. Relación de demanda/capacidad (D/C) de vigas longitudinales.....	60
Figura 48. Desplazamiento máximo vertical.....	61
Figura 49. Sección equivalente. Cuerda superior e inferior.....	62
Figura 50. Sección equivalente. Diagonal.....	62
Figura 51. Sección equivalente. Cuerda superior e inferior.....	63
Figura 52. Sección equivalente. Diagonal.....	63
Figura 53. Vista en isométrico de diagonales.....	64
Figura 54. Máximas solicitaciones en diagonales.....	64
Figura 55. Vista en isométrico de cuerda superior e inferior.....	65
Figura 56. Máximas solicitaciones en cuerda superior e inferior.....	65
Figura 57. Características mecánicas de los materiales empleados (cuerdas y diagonales).....	65
Figura 58. Condiciones de frontera o contorno. Diagonales.....	66
Figura 59. Condiciones de frontera o contorno. Cuerda superior e inferior.....	66
Figura 60. Asignación de fuerzas al modelo. Diagonales. a) Compresión, b) Tensión.....	67
Figura 61. Asignación de fuerzas al modelo. Cuerda superior e inferior. a) Compresión, b) Tensión.....	67
Figura 62. Mallado de diagonales.....	68
Figura 63. Mallado de cuerda superior e inferior.....	68
Figura 64. Esfuerzos de Von Mises en diagonales. a) Compresión, b) Tensión... ..	69



Figura 65. Esfuerzos de Von Mises en cuerda superior e inferior. a) Compresión, b) Tensión. ....	69
Figura 66. Desplazamientos en diagonales debido a fuerzas de compresión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm). ....	70
Figura 67. Desplazamientos en diagonales debido a fuerzas de tensión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm). ....	70
Figura 68. Desplazamientos en cuerda superior e inferior debido a fuerzas de compresión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm). ....	71
Figura 69. Desplazamientos en cuerda superior e inferior debido a fuerzas de tensión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm). ....	71
Figura 70. Mapa de factor de seguridad de diagonales. a) Compresión, b) Tensión. ....	72
Figura 71. Mapa de factor de seguridad de cuerda superior e inferior. a) Compresión, b) Tensión. ....	72
Figura 72. Fuerzas actuantes en nodo de estudio (unidades en t).....	73
Figura 73. Características mecánicas de los materiales empleados (cuerdas y diagonales).....	74
Figura 74. Asignación de restricción a conexión.....	75
Figura 75. Asignación de conectores tipo pasador a conexión. ....	75
Figura 76. Asignación de fuerzas al modelo debido a diagonales.....	75
Figura 77. Asignación de fuerzas al modelo debido a cuerda superior.....	76
Figura 78. Mallado de conexión. ....	76
Figura 79. Esfuerzos de Von Mises.....	77
Figura 80. Desplazamientos de conexión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm). ....	78
Figura 81. Mapa de factor de seguridad de conexión. ....	79
Figura 82. Impresión de conexión (escala 1:10).....	80
Figura 83. Impresión de conexión (escala 1:10).....	80
Figura 84. Impresión de conexión, diagonales y cuerdas. ....	81
Figura 85. Impresión de conexión, diagonales y cuerdas. ....	81
Figura 86. Corte de acrílico para fabricación de conexión. ....	82



Figura 87. Corte de acrílico para fabricación de conexión. ....	82
Figura 88. Corte de secciones de acrílico para fabricación de conexión.....	83
Figura 89. Ensamble de unión de armadura. ....	83
Figura 90. Ensamble de armadura de prototipo. ....	83
Figura 91. Ensamble de puente de prototipo.....	83
Figura 92. Vista en isométrico del ensamble del puente modulable generada en software SolidWorks.....	85
Figura 93. Plano de dimensionamiento de elemento diagonal.....	86
Figura 94. Plano de dimensionamiento de elemento diagonal.....	87
Figura 95. Plano de dimensionamiento de conexión.....	88
Figura 96. Propuesta de apoyo del puente. ....	89

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.



## 1. RESUMEN.

La industria petrolera es una de las principales actividades económicas que se desarrollan en el sureste del país. Por lo anterior, su presencia en estas regiones es amplia, lo que origina la necesidad de crear infraestructura para poder realizar la operación de la industria esta región.

Dentro de la infraestructura necesaria se encuentran los puentes vehiculares los cuales permiten el acceso a los sitios de trabajo, sin embargo, debido a la logística propia de la industria, los puentes no son aprovechados al máximo de su vida útil, ya que cada vez que se desarrolla un proyecto, se requiere la construcción de nueva infraestructura.

Este trabajo se realizó con el propósito de analizar y diseñar un puente vehicular modulado de acero que permitiera una instalación sencilla en obra y un posible reúso en diversos proyectos, siendo una opción válida para aprovechar al máximo los recursos disponibles.

Para lograr este objetivo, se realizó el estudio de diversas tipologías para definir el sistema estructural y seleccionar la mejor propuesta, así mismo se analizó particularmente cada componente del puente mediante el método de elementos finitos.

Este proceso permitió establecer un sistema estructural de tipo armadura para el puente modulado, así como definir las características de los elementos y conexiones o nodos de la armadura. Así mismo se elaboró un modelo físico del puente modulado con la finalidad de verificar el proceso de ensamble de la estructura.

**Palabras clave:** *Puente modulado, ensamble, estructuras de acero, método de elementos finitos, armaduras.*



## 2. ABSTRACT.

The oil industry is one of the primary economic activities in the southeastern region of the country. Consequently, its extensive presence in these areas necessitates the development of infrastructure to support industrial operations. Among this required infrastructure are vehicular bridges, which provide access to work sites. However, due to the logistical nature of the industry, these bridges are not utilized for their full-service life, as new infrastructure is needed for each new project.

This study was conducted with the aim of analyzing and designing a modular steel vehicular bridge that allows for easy installation on-site and potential reuse across various projects, thereby optimizing resource utilization. To achieve this goal, a study of various typologies was carried out to define the optimal structural system. Once the best proposal was selected, the bridge components were analyzed specifically using the finite element method.

This process enabled the establishment of a truss-type structural system for the modular bridge and defined the characteristics of the elements and connections or nodes of the truss. Additionally, a physical model of the modular bridge was developed to verify the assembly process of the structure.

**Keywords:** *Modular bridge, assembly, steel structure, finite element method, trusses.*



### 3. INTRODUCCIÓN.

La industria petrolera en Tabasco constituye una de las principales actividades económicas que se desarrollan dentro de la entidad; de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI), en 2020 la actividad petrolera representó el 50.1% del producto interno bruto, posicionando al estado como el segundo mayor productor de petróleo a nivel nacional, después de Campeche (SEDEC, 2022).

Petróleos Mexicanos (Pemex) informó en su evaluación de las reservas de hidrocarburos del 1 de enero de 2021, la incorporación de nuevos yacimientos a sus reservas de los cuales siete de los más importantes se localizan en la región sur (Tabasco y Veracruz), (Pemex, 2021).

En general, la exploración petrolera terrestre en el sureste del país se realiza en comunidades rurales cuya infraestructura carretera es limitada e inadecuada para recibir el tránsito de vehículos pesados; para lo cual Pemex requiere la construcción de obras civiles para poder realizar los trabajos de perforación de los pozos. Dentro de estas obras se encuentran los caminos de acceso, plataformas de trabajo o localizaciones, estructuras de drenaje y puentes vehiculares.

Una vez construida la infraestructura requerida, el equipo de perforación y maquinaria es trasladada al sitio de exploración. Al término de los trabajos, el pozo puede arrojar tres resultados: a) que se encuentre la producción esperada y por ende determinar un éxito la perforación, b) determinar inviable la explotación de la reserva o c) en el peor de los casos no encontrar los hidrocarburos esperados. En el primer caso, la infraestructura construida servirá para permitir el acceso de los vehículos y personal para las etapas posteriores de exploración, por otra parte, en el segundo y tercer escenario, la infraestructura es abandonada y expuesta al vandalismo.

Una de las obras civiles más importantes dentro de las actividades de exploración petrolera, son los puentes vehiculares, ya sean los construidos especialmente para la perforación del pozo o los existentes en los caminos de las comunidades aledañas. En el caso de los puentes existentes, en muchas ocasiones



se encuentran en mal estado debido a la falta de mantenimiento y prolongado tiempo de vida, además, sumado a la carga vehicular que implica la industria petrolera y a las intensas condiciones climatológicas, se generan afectaciones que comprometen su seguridad estructural, representando principalmente un riesgo para la población civil que transita por la zona, sumado a la interrupción de las vías de comunicación.

Un ejemplo de la vulnerabilidad de las estructuras en zonas petroleras es lo ocurrido en septiembre de 2022, donde la estructura del puente el Naranjeño ubicado en la comunidad del mismo nombre en el municipio de Cárdenas, Tabasco, colapsó debido a las lluvias torrenciales registradas en esos días, dejando incomunicadas a las comunidades de la zona y poniendo en riesgo la vida de las personas que transitan por el mismo (Tabasco Hoy, 2022).

La infraestructura carretera es primordial para el desarrollo de los proyectos de exploración petrolera y la comunicación de las poblaciones, particularmente los puentes vehiculares toman gran relevancia para alcanzar los objetivos deseados.

Con lo expuesto anteriormente, se requiere contar con infraestructura adecuada para las necesidades de la industria, así como recortar los tiempos de construcción y minimizar las pérdidas económicas que representa una exploración fallida, y por otra parte responder de manera inmediata a las situaciones de emergencia como el colapso de un puente.

Contar con un puente modulado ayudaría a optimizar los tiempos de construcción y a aumentar la viabilidad de los proyectos de exploración petrolera terrestre. Además, ofrecería una solución inmediata a las eventualidades que pudieran presentarse en las estructuras existentes debido al uso, falta de mantenimiento y/o fenómenos naturales.



## 4. MARCO TEÓRICO.

### 4.1. Estado del arte.

#### 4.1.1. Antecedentes.

Un puente modulado se define como aquella estructura que está compuesta por un conjunto de componentes estructurales prefabricados, donde sus partes son construidas en ambientes controlados como plantas de construcción de acero o plantas de elaboración de concreto prefabricado, los cuales son llevados hasta el punto final para su instalación. Estos puentes pueden ser diseñados para cumplir una función temporal o permanente; típicamente por su estructuración se emplean para cubrir funciones temporales dentro de áreas urbanas que por cuestiones ambientales o topográficas son inaccesibles para optar por sistemas constructivos que involucren técnicas de construcción habituales (Bowser, 2010).

La modularización estructural de puentes es una técnica de construcción versátil, la cual maximiza su eficacia en comunidades rurales de acceso complicado o en ambientes urbanos densamente poblados, donde las soluciones tradicionales de estructuración y construcción de puentes no son viables o que derivado del tiempo de ejecución de obra se generan una problemática adicional de movilidad entre la población aledaña.

Este concepto resulta realmente interesante debido a que es posible emplear componentes prefabricados con un estricto control de calidad y con producción en masa, así mismo resultan de fácil transportación y rápido ensamble en obra. Del mismo modo, los módulos estructurales representan mayor versatilidad y capacidad para cubrir diferentes claros y soportar distintos niveles de carga (Dechkova Tumbeva, 2021a).

Los primeros puentes modulares que se conocen fueron diseñados para ser ensamblados y colocados en su posición final por medios manuales y cuyos inicios datan de inicios del siglo pasado durante la primera guerra mundial; estos puentes tuvieron como primer propósito cuestiones de operaciones militares y posteriormente se les dio una utilidad para situaciones de desastres naturales y postconflicto. Como ejemplo de estos puentes se encuentran el puente Callender-



Hamilton (1930) y el Puente Bailey (1941); posteriormente surgieron los puentes Acrow (1973), puente de vigas medianas (1971), Acrow (1973), puente Mabey y Jhonson (1987) que surgieron como mejoras de los primeros desarrollos (Figura 1).

El puente Callendar Hamilton (Figura 1a) se estructura como una armadura tipo Warren formando paneles triangulares con cordones y diagonales conectadas mediante placas atornilladas. Los módulos de cada panel miden 3.05 m de largo y 3.05 m de alto y pueden salvar un claro de 39.6 m en configuración sencilla, o existe la posibilidad de realizar un ensamble vertical de módulos que permita alcanzar claros superiores.

Probablemente el puente más conocido y citado por diversos autores es el denominado puente Bailey (Figura 1b), el cual fue desarrollado por el ingeniero británico Donald Bailey en 1941, cuya principal mejora respecto de su predecesor (Puente Callender-Hamilton) fue el de emplear paneles que podían ser conectados por pasadores simples a través de agujeros previamente perforados, en lugar de conexiones atornilladas; esta estructura emplea una configuración rectangular de paneles de acero de dimensiones de 3.05 m de largo por 1.52 m de alto. Estos pueden ser ensamblados transversalmente y/o verticalmente para recibir cargas mayores o claros de hasta 67.1 m. (Dechkova Tumbeva, 2021a; Russell & Thrall, 2013).

El puente de vigas medianas (Figura 1c) es empleado en operaciones militares desde 1971; debido a su bajo peso y a la facilidad de ensamble por medio manuales. Esta estructura es complementaria al sistema estructural Bailey, debido a que su función principal es para cuestiones tácticas, cuando su objetivo se ha sido cumplido puede ser reemplazado por el puente Bailey. Similar a su antecesor, el puente de vigas medianas consiste en paneles de cubierta prefabricados en configuración sencilla o doble dependiendo de las demandas. Poseen elementos de refuerzo que pueden ser colocados por debajo de las vigas para aumentar la altura y la capacidad del sistema (Russell & Thrall, 2013)

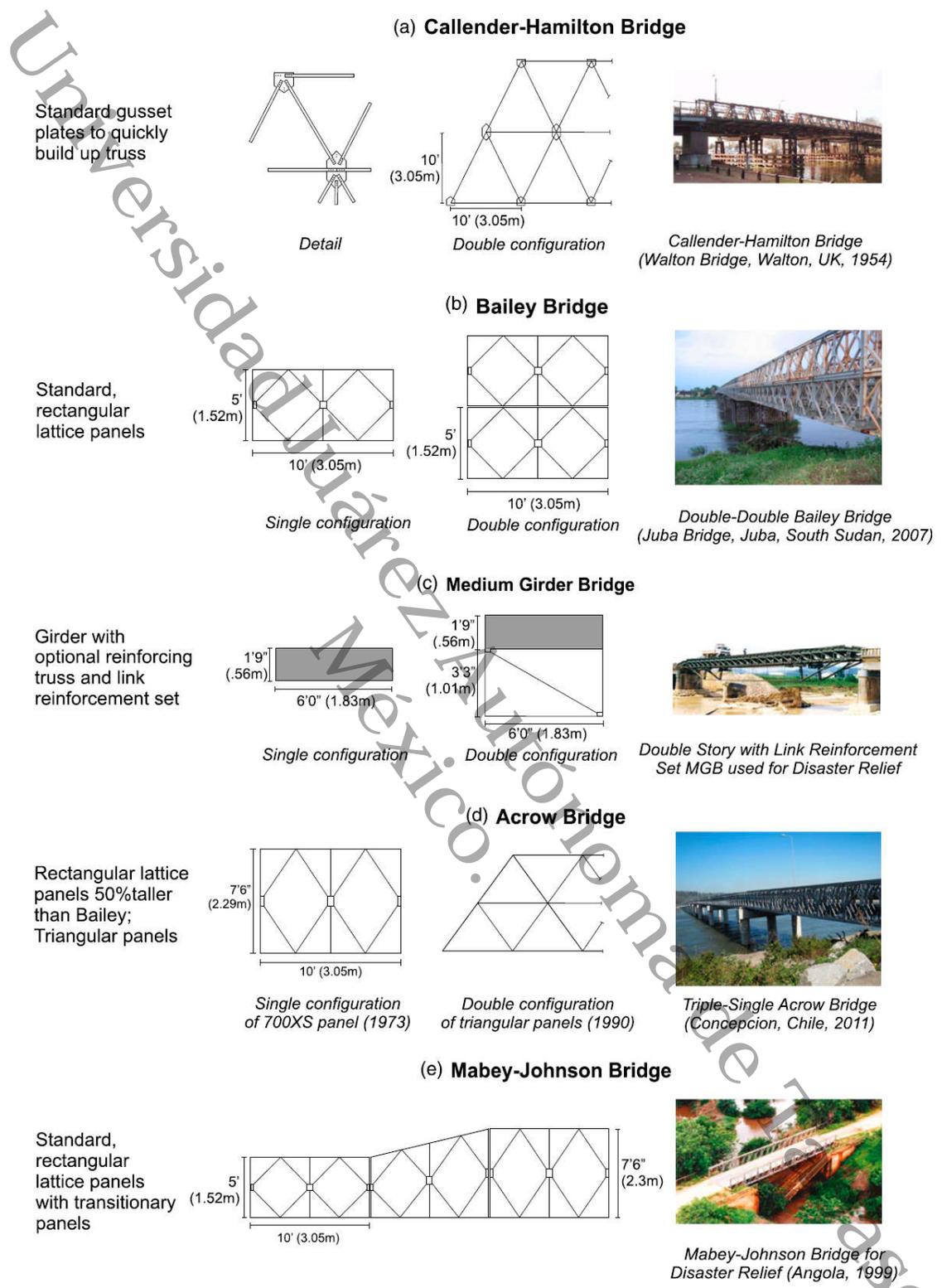


Figura 1. Sistemas de puentes modulares (Russell & Thrall, 2013).



Los sistemas de puentes modulares fueron mejorados posteriormente por Acrow y Mabey-Jhonson (Figura 1d y Figura 1e, respectivamente). El sistema Acrow propone dos tipos de puentes, la primera patente fue registrada en 1973, y la principal diferencia respecto a los puentes Bailey es que emplea elementos estructural compuestos por materiales de acero de grado superior y por ende es más resistente y ligero. La segunda patente fue registrada en 1990, con un arreglo de paneles triangulares en comparación con los sistemas rectangulares usados tradicionalmente hasta esa fecha. Esta configuración estructural permitió resolver los principales problemas en el diseño del puente Bailey: i) las deflexiones excesivas debido a las deformaciones elásticas y a las tolerancias de las conexiones por medio de pasadores) y ii) el acomodo en doble configuración genera un exceso de acero en el eje neutro de la sección, debido a que las cuerdas superior e inferior de los paneles se unen mediante tornillos (Russell & Thrall, 2013).

Similar a Acrow, Mabey and Jhonson registró dos patentes, en 1987 y 2003 (Figura 1e). Este sistema fue propuesto con la concepción original de los puentes Bailey, estructura en celosía rectangular, pero de peralte variable, la cual guarda relación con el diagrama de momentos flexionantes de una viga convencional. La adición de los paneles de transición aligera el peso propio del sistema incrementando su eficiencia (Russell & Thrall, 2013).

#### **4.1.2. Innovación en la estructuración de puentes.**

En el mundo existen diferentes investigaciones y propuestas de puentes modulares; resulta interesante mencionar por su funcionalidad, la realizada por Bianconi-Bailez et al., 2015, donde se propone un puente portátil peatonal desmontable para emergencias; el cual tiene por finalidad dar respuesta a una necesidad que surge después de los desastres naturales donde se ven afectadas las vías de comunicación y en particular los puentes. El diseño del puente es modulado en secciones de un metro pudiendo salvar un claro de hasta diez metros; se estructura principalmente por dos armaduras laterales conformada por elementos de madera y conexiones de metal con tornillos de alta resistencia; el sistema de piso es de tablas del mismo material (Figura 2 y Figura 3). Debido a que

sus componentes principales son muy ligeros, resulta fácil de transportar e instalar por la población civil sin que se requiera experiencia previa. El puente es capaz de cumplir su función y cumple con los requisitos de seguridad de la normativa aplicable, sin embargo, resulta un tanto incomodo debido a las vibraciones que se generan durante su uso, por lo que la estructura aún puede ser mejorada.

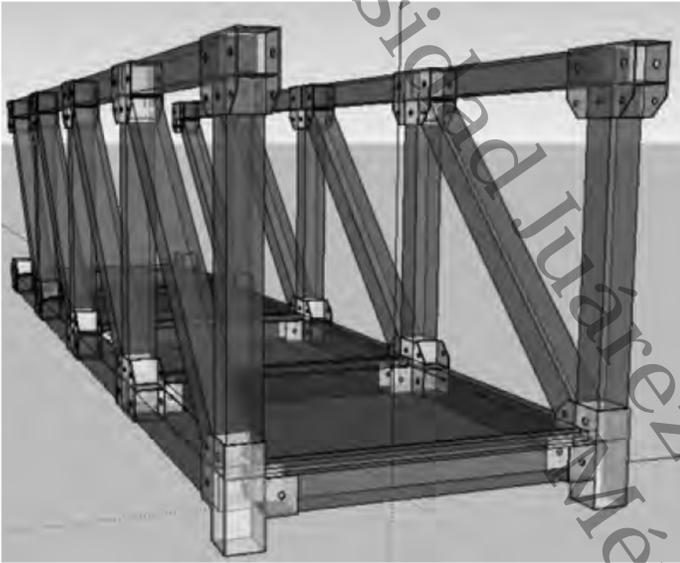


Figura 2. Vista general del puente (Bianconi-Bailez et al., 2015).

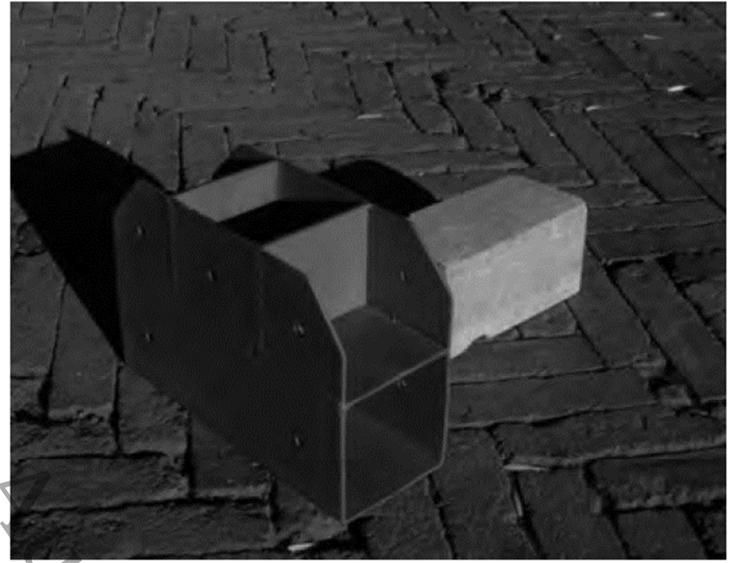


Figura 3. Conexión del puente (Bianconi-Bailez et al., 2015).

Otro ejemplo de un puente modulado vehicular es el desarrollado por la empresa Viuda de Sainz, S.A. el cual surgió a partir de la necesidad de construir un camino provisional durante la ejecución de la obra de una autopista que ocasionara la menor afectación posible al tráfico de la carretera existente. El puente está conformado por dos armaduras metálicas laterales unidas por montantes intermedios, el tablero del puente lo conforma losas de concreto simplemente apoyadas en la estructura ligadas con cables tensores. Cuenta con dos carriles de 3.5 m cada uno y permite salvar un claro de aproximadamente 17 m, sus conexiones son de un sistema de machihembrado con tornillería de alta resistencia (Figura 4 y Figura 5). Las conexiones del puente fueron evaluadas mediante análisis de elemento finito para garantizar su correcto comportamiento estructural y posteriormente se realizó una validación a escala real del comportamiento del

puede ser sometido a cargas reales, que permitieron evaluar que los esfuerzos y deformaciones se encuentran dentro de valores estimados (Viuda de Sainz, s/f).

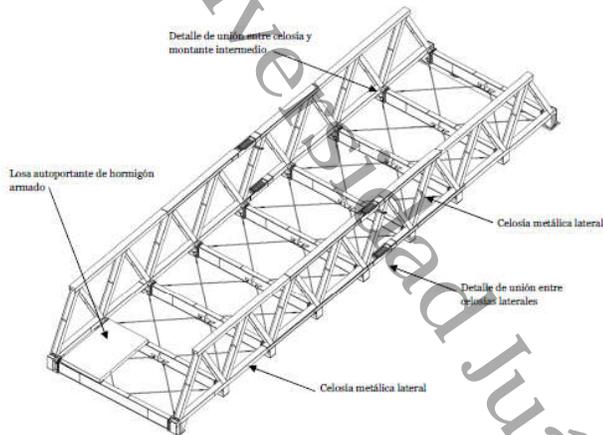


Figura 4. Perspectiva general del puente ( Viuda de Sainz, s/f).



Figura 5. Conexión del puente (Viuda de Sainz, s/f).

Un proyecto novedoso es el denominado Air Bridge, desarrollado por la empresa BuildAir y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), el cual se posiciona como uno de los puentes vehiculares más ligeros del mundo con 5 t de peso y una capacidad de carga de vehículos de 30 t. La estructura está formada por cuatro componentes principales: dos vigas inflables de 14 m de longitud y 1.7 m de ancho de material textil recubierto con PVC, elementos de compresión (paneles y perfiles de plástico fibroreforzado) que a su vez forman los tableros del puente, eslingas que aportan tensión a la estructura y los apoyos de vigas metálicas que unen a los elementos de compresión y tensión. Una característica que resalta de esta estructura es el poco espacio que requiere para su transportación, así mismo su instalación requiere de poco personal y en ocasiones de ningún equipo mecánico (Estruch i Tena, 2016).

Este proyecto se realizó mediante modelos matemáticos computacionales y su validación y aceptación fue realizada mediante prototipos a escala reducida y tamaño natural (Figura 6 y Figura 7); con esto se pudo verificar que los resultados obtenidos en las modelaciones computacionales correspondían a los que se obtuvo en los ensayos experimentales de los modelos.



Figura 6. Validación del modelo a escala real (Estruch i Tena, 2016).

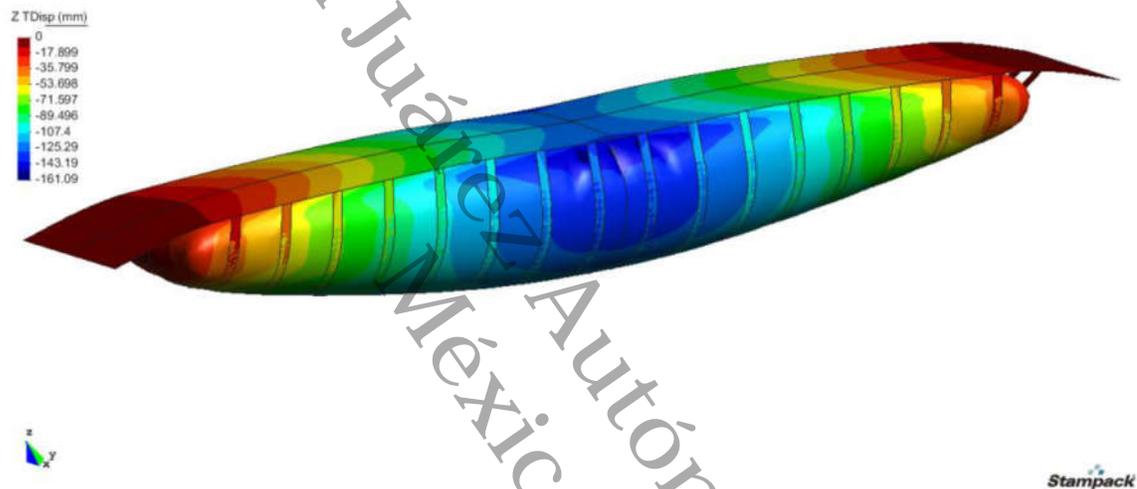


Figura 7. Modelo matemático de elementos finitos (Estruch i Tena, 2016).

Este proyecto plantea continuar con etapas de investigación subsecuentes donde se tiene por objetivo diferentes aspectos de mejora, como el diseño de los apoyos, estabilidad en el comportamiento ante cargas permanentes y accidentales, incremento del claro libre, y mejoras en el proceso de instalación, retiro y traslado.

Este proyecto ejemplifica el proceso de diseño y optimización de un proyecto innovador, donde de manera general el proceso consiste en desarrollar esquemas conceptuales a partir de ideas del comportamiento del puente, posteriormente realizar los modelos matemáticos que describan el comportamiento de la estructura, para después validarlos mediante modelos físicos a escala que permitan ratificar los valores obtenidos en la modelación numérica; el proceso de validación del modelo



matemático permite acercarse al comportamiento real de la estructura en un tiempo menor del que tomaría solo si se hicieran modelos numéricos.

## 4.2. Tipologías y sistemas de puentes modulares.

### 4.2.1. Tipologías usuales.

Las estructuras modulares cobran gran importancia cuando se trata de sistemas eficientes y con programas de ejecución de obra limitados. A continuación, se describen alguno de estos sistemas y tipologías que ejemplifican los sistemas más usados.

#### Puentes tipo armadura

Como se mencionó anteriormente, históricamente los puentes tipo armadura han sido una opción viable para la construcción de estructuras temporales y de rápida construcción; el puente Bailey es el pionero en esta clase de estructuras. Hoy en día existen empresas, principalmente en Estados Unidos de América que se encargan de comercializar puentes tipo Bailey y algunos derivados de este sistema. Algunas compañías dedicadas a la comercialización de puentes modulares se encuentran: Mabey bridge company, Acrow Corporation of America, Ameco USA, Bridge Brothers, Canam-Bridges, entre otros.

#### Sección laminada de ala ancha.

Este sistema modular prefabricado se conforma por vigas de sección "I" con cubierta de concreto compuesto. Es conocido comercialmente como unidades de puente prefabricado, PBU (Prefabricated Bridge Units por sus siglas en inglés) y está patentado por la compañía Fort Miller Company (Kuehl, 2018).



Figura 8. Sistema constructivo PBU (Fort Miller Company, 2016).

De acuerdo con la página oficial del propietario del sistema, se menciona que se han fabricado puentes con claros de hasta 126 ft (38 m). Los puentes se instalan normalmente sobre apoyos o en algunos casos en cojinetes.

Una característica particular de este puente es el procedimiento de colado de la losa de superficie, ya que se realiza de manera invertida para evitar esfuerzos en el patín inferior e inducir tensión en el lecho superior de la losa, lo que se traduce en un aumento de la eficiencia del sistema estructural cuando se requieren claros de mediana longitud (Kuehl, 2018).

### **Armaduras tridimensionales.**

Otro tipo de sistema que fue desarrollado durante varios años por el departamento de carretas francés, fueron las armaduras espaciales las cuales buscaron reducir el peso de los componentes estructurales y el cual resultó conveniente para claros de entre 50 y 150 ft (15.24 y 45.72 m). Este sistema estructural fue el primero en combinar armaduras tridimensionales con paneles de losa de concreto presforzado.

De acuerdo con Kuehl, 2018, el sistema estructural resistente de la armadura tridimensional se compone de una cuerda inferior de forma hexagonal formada por dos placas dobladas y unidas mediante soldadura longitudinal, cuatro diagonales unidas a rigidizadores conectados a la cuerda inferior las cuales forman una armadura tipo Warren. Las diagonales son soldadas a las vigas transversales de sección "I" (de piso) las cuales están colocadas a cada 13 ft (3.96 m) de separación en dirección longitudinal. Los módulos de la estructura son fabricados en taller y ensamblados en sitio en secciones de 13 ft (3.96 m) e incluye un tramo de cuerda inferior, cuatro diagonales y una viga de piso. Los miembros inclinados de la armadura se extienden sobre las vigas transversales de piso y hacia las juntas de las losas para formar nodos rígidos.

Los paneles de losa tienen dimensiones de 40 ft (12.2 m) de ancho y 12 ft – 4 in (3.76 m) de largo y son presforzados en la dirección longitudinal, así mismo se aplica postensión mediante cables de acero en ambos lados de la viga de piso después de realizar el colado de las juntas. En la Figura 9 se muestra la configuración transversal del sistema constructivo.

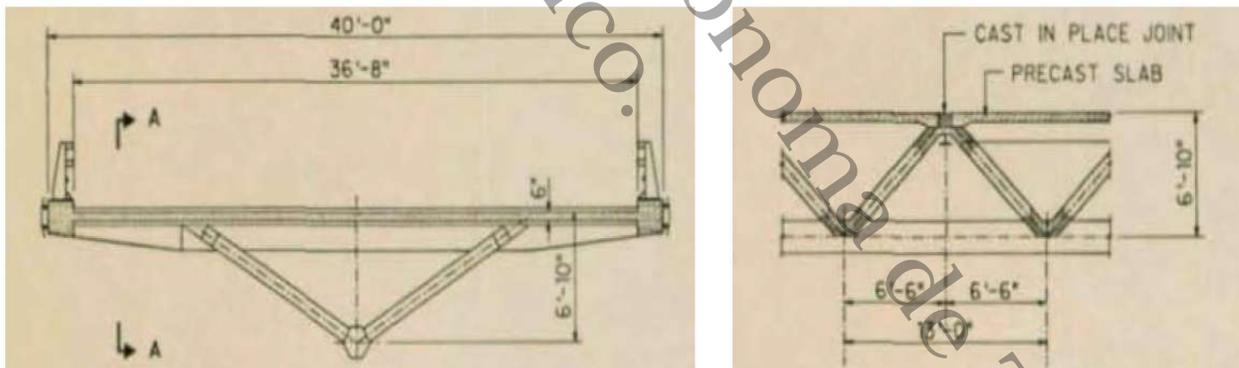


Figura 9. Perfil transversal de sistema de armadura tridimensional (Kuehl, 2018).

#### 4.3. Definición de acciones.

Dentro de la etapa de diseño de cualquier estructura, es de suma importancia la evaluación de las cargas que actuarán, ya que esto definirá las características de



los elementos estructurales que se unirán para garantizar la estabilidad durante la construcción y primordialmente durante la vida su vida útil.

La normativa mexicana de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (S.I.C.T.) define tres tipos de cargas las cuales deben ser evaluadas: cargas permanentes, variables y eventuales (N PRY CAR 6 01 003/01, 2001).

Las cargas permanentes, son aquellas cuya intensidad no varía significativamente con el tiempo, dentro de esta clasificación se encuentra las cargas muertas debido al peso propio de los elementos estructurales y las cargas adicionales que tendrán una posición fija dentro de la estructura (como la superficie de rodamiento, o el balasto en vías férreas), el empuje de tierras y empujes hidrostáticos; las cargas variables son definidas como aquellas cuya variación en magnitud es importante y que además tienen una probabilidad alta de ocurrencia, dentro de esta clasificación se pueden encontrar las cargas vivas, de impacto y fuerza centrífuga; finalmente las cargas eventuales son las que pueden presentarse en la estructura de manera eventual, en este grupo se pueden encontrar las debidas a: viento, sismo, frenado, fricción, variación de temperatura, empuje dinámico del agua, subpresión, oleaje, etc.

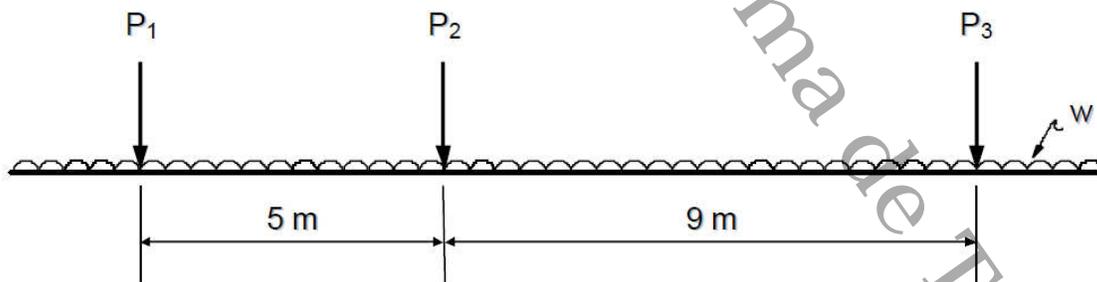
Las cargas vivas tienen una importancia particular en el diseño de los puentes vehiculares, es por ello que la S.I.C.T. elaboró estudios para desarrollar un vehículo de proyecto que generará las mayores demandas (momentos y cortantes) a la estructura de puentes simplemente apoyados dentro de valores de seguridad y economía aceptables, para ello se tomó en cuenta los pesos y dimensiones de los vehículos reales que transitan en las carreteras mexicanas, así como los datos estadísticos de aforos vehiculares en varios puntos de México. Históricamente en nuestro país, para el diseño estructural de los puentes se han empleado cargas vivas correspondientes al vehículo de diseño de la normativa americana AASHTO, o configuración de vehículos reales que transitan sobre las vías mexicanas, en algunos casos combinando ambos vehículos de diseño, sin embargo, esta práctica puede conducir a demandas que están muy por debajo de las reales (disminuyendo

la seguridad estructural) o incluso por encima de las reales (sobredimensionando los elementos resistentes).

El vehículo de proyecto para cargas vehiculares desarrollado por el instituto mexicano del transporte (IMT) y reglamentado en las normas de la SICT, cubre las demandas a las que estará sometida una estructura de México al tránsito de vehículos reales considerando siempre los pesos, dimensiones y posición de estos sobre la estructura.

De acuerdo con la norma mexicana de la S.I.C.T. existen dos modelos de cargas vivas vehiculares aplicables a puentes que son definidas en función a la clasificación del tipo de camino al que corresponden para realizar los análisis longitudinales de puentes vehiculares.

- a) Modelo IMT 66.5 (Figura 10 y Figura 11). Aplicable para estructuras que se proyectan para carreteras tipo ET, A, B y C de acuerdo con el Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal, así como para las autopistas, que son carreteras de los tipos ET y A, con accesos controlados (N-PRY CAR 6 01 003/01, (SICT, 2001).



$$\begin{aligned} P_1 &= 49 \text{ kN (5 t)} \\ P_2 &= 235 \text{ kN (24 t)} \\ P_3 &= 368 \text{ kN (37.5 t)} \end{aligned}$$

Para claros iguales o mayores de 90 m  $w=10 \text{ kN/m (1 t/m)}$

Para claros entre 30 y 90 m  $w=10(L-30)/60 \text{ (kN/m)}$

Donde:  $w$ = Carga uniformemente distribuida (kN/m)

$L$ = Longitud del claro (m).

Figura 10. Modelo de carga viva vehicular IMT 66.5 para análisis longitudinal de puentes con claros iguales o mayores a 30 m (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001).

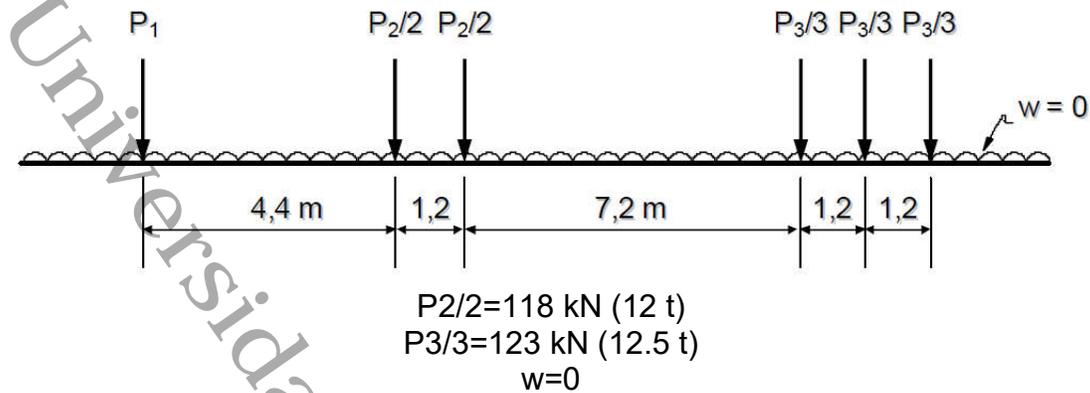


Figura 11. Modelo de carga viva vehicular IMT 66.5 para análisis longitudinal de puentes con claros menores a 30 m (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001).

b) Modelo IMT 66.5 (Figura 12Figura 13). Aplicable a estructuras que se proyectan sobre carreteras tipo D, de acuerdo con el reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad.

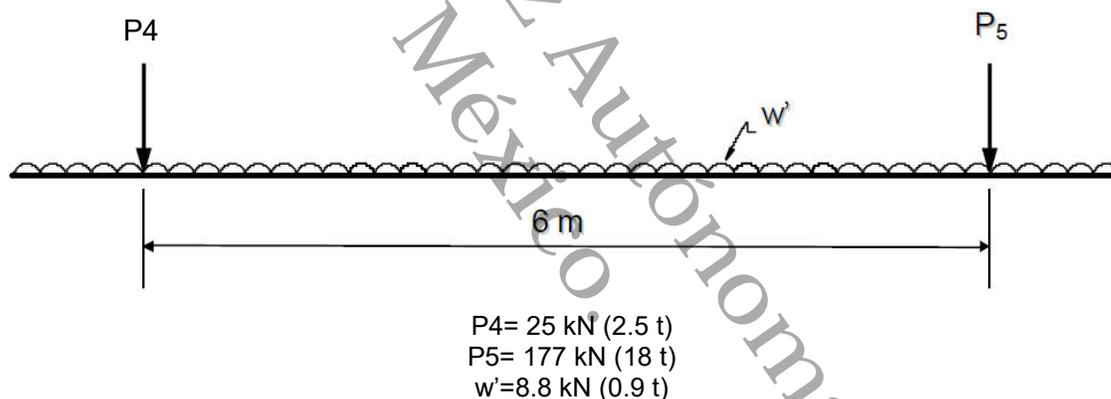
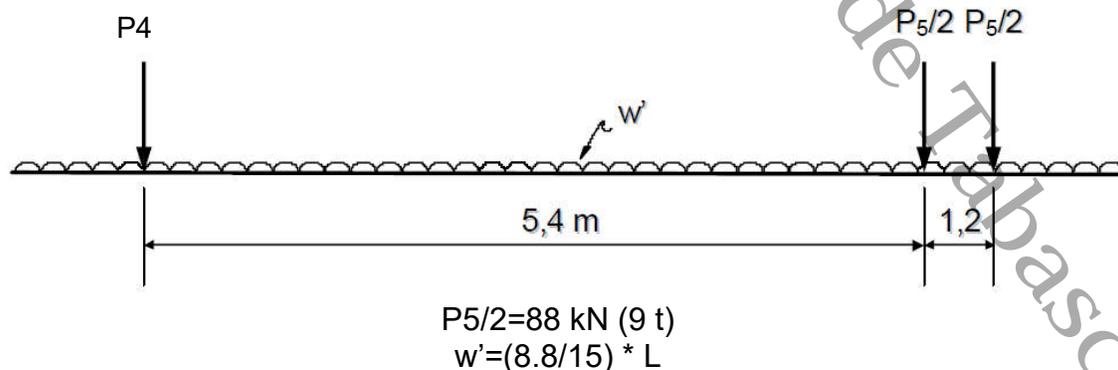


Figura 12. Modelo de carga viva vehicular IMT 20.5 para análisis longitudinal de puentes con claros iguales o mayores a 15 m (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001).



Donde:  $w'$  = Carga uniformemente distribuida (kN/m)  
 $L$  = Longitud del claro (m).

Figura 13. Modelo de carga viva vehicular IMT 20.5 para análisis longitudinal de puentes con claros menores a 15 m (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001).

Existe también modelos de cargas vivas vehiculares para los análisis transversales o tridimensionales para los vehículos de proyecto IMT 66.5 y 20.5 (Figura 14 y Figura 15). En estos modelos las cargas  $w$  y  $w'$ , en caso de que apliquen, empleadas en el modelo de cargas para análisis longitudinal se reparte en un ancho de 3m. Las cargas mostradas en la Figura 14 y Figura 15 se consideran concentradas en el centro de las áreas sombreadas.

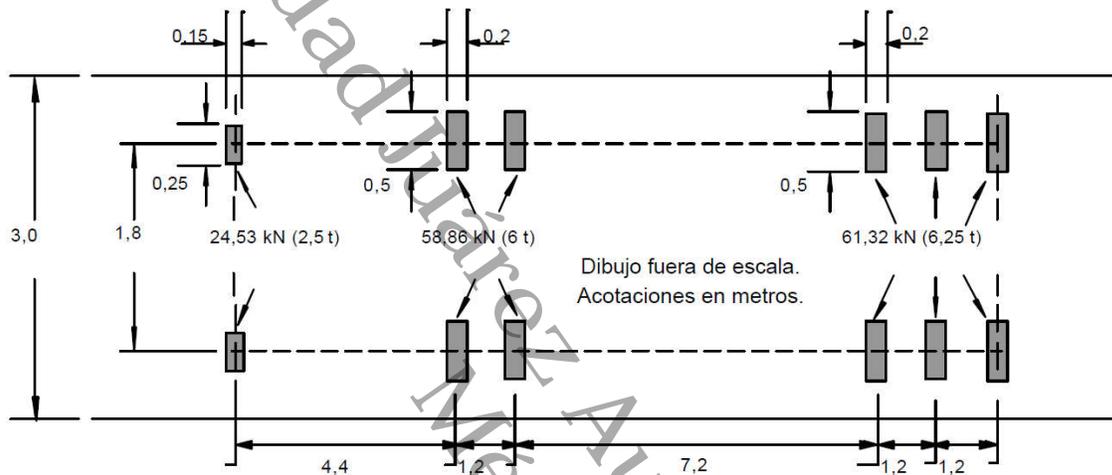


Figura 14. Modelo de carga viva vehicular IMT 60.5 para análisis transversal o tridimensional de puentes (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001).

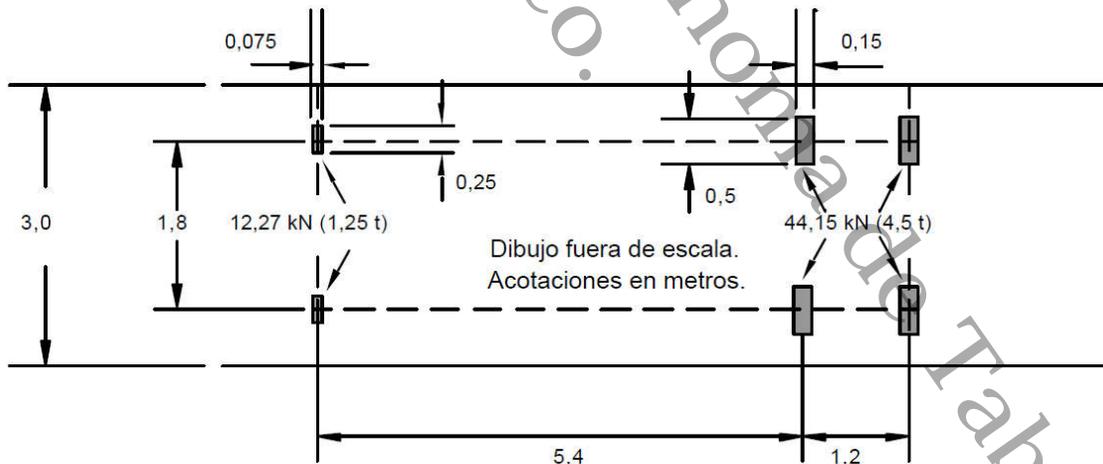


Figura 15. Modelo de carga viva vehicular IMT 20.5 para análisis transversal o tridimensional de puentes (N-PRY CAR 6 01 003/01, SICT, 2001).

Los modelos de cargas mostrados anteriormente, ya sea para análisis longitudinal o transversal, son usados para conocer las máximas solicitaciones a las cuales estará sometida la estructura; para considerar el efecto de ocupación de



múltiples carriles y la probabilidad de que esto ocurra simultáneamente, se toma en cuenta el factor de reducción en carriles múltiples, el cual reduce la sollicitación por carga viva con factores que van de 1 a 0.55, para uno y seis o más carriles cargados.

Una vez determinadas las cargas móviles, es necesario evaluar el efecto que tienen estas cargas. Para ello se requiere determinar la magnitud de las acciones que las cargas vivas generan en distintos puntos de aplicación del miembro analizado, con la finalidad de determinar el valor máximo que permita diseñar el elemento en cuestión. En estos casos se recurre al concepto de líneas de influencia, la cual permite obtener para una o varias secciones, cual es el valor del momento flexionante y de fuerza cortante correspondiente a los distintos puntos de aplicación de la carga móvil (González, 2002).

#### 4.4. Filosofías y códigos de diseño en México y en el mundo.

En la actualidad existen dos filosofías de diseño de puentes que son internacionalmente aceptadas: diseño por esfuerzos permisible (Allowable Stress Design, ASD) y diseño por factores de carga y resistencia (Load and Resistance Factor Design, LRFD). El diseño por esfuerzos permisibles fue la metodología de diseño de muchas de las estructuras que hoy en día existen alrededor del mundo, por su parte, el método de diseño por factores de carga y resistencia ha venido ganando popularidad a partir de 1970 (Tonias & Zhao, 2006).

Una de las diferencias entre ambos enfoques de diseño radica en que cuando se emplea la metodología ASD se comparan los esfuerzos; por su parte en la metodología LRFD se contrasta la resistencia, ambos enfoques afectan y modifican la resistencia nominal de cada elemento para posteriormente compararla contra la resistencia admisible o de diseño (Crespo et al., 2014). Este criterio puede describirse a través de las siguientes expresiones.



- Método LRFD

$$R_u \leq \phi R_n$$

Donde:

$R_u$  = Resistencia requerida (LRFD).

$R_n$  = Resistencia nominal.

$\phi$  = Factor de resistencia.

$\phi R_n$  = Resistencia de diseño.

- Método ASD

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega}$$

Donde:

$R_a$  = Resistencia requerida (ASD).

$R_n$  = Resistencia nominal.

$\Omega$  = Factor de resistencia.

$R_n / \Omega$  = Resistencia admisible.

El uso y aplicación de los factores, es quizá la principal diferencia entre ambos enfoques. La metodología LRFD, toma en consideración la variabilidad de las cargas a través de factores de carga, definidos según el estado límite que sea determinado (servicio y resistencia); mientras que la incertidumbre implícita en las características de los materiales se toma en cuenta en los factores de resistencia. Por su parte, el método ASD toma en cuenta ambos factores a través de un solo factor de seguridad.

En la metodología ASD, la resistencia requerida depende del elemento mecánico de diseño que se considere dentro del análisis, por ejemplo, la flexión en vigas o la resistencia al pandeo en columnas, por su parte la resistencia admisible quedará definido entonces según esta filosofía, como una fracción de los esfuerzos de falla del material. El diseño bajo esta metodología de elementos estructurales tiene como principio el comportamiento de los materiales dentro del rango elástico.

La contraparte de la filosofía de diseño mencionada anteriormente es el diseño por estados límite. Este método de diseño incluye factores de resistencia para considerar la variabilidad de las acciones externas a las que está sometida la



estructura. La distinción de este método con respecto al método de esfuerzos permisibles es considerar esta variación de cargas externas, definiéndolos como estados límite de falla y de servicio.

El estado límite de falla procura la seguridad durante la operación y el correcto funcionamiento de la estructura, por su parte el estado límite de servicio rige el comportamiento de la estructura en términos de deflexiones, vibraciones, fatiga, etc., bajo cargas nominales.

En la literatura técnica relativa a diseño de puentes se pueden encontrar diversos nombres que se le han asignados a las filosofías de diseño que se explicaron anteriormente; dicho nombre depende de la publicación, literatura o especificación técnica que se consulte. Entre los nombres más comunes están:

- Diseño por esfuerzos permisibles (ASD por sus siglas en inglés, Allowable Stress Design).
- Diseño por cargas de servicio. Nombre designado por la sociedad americana de oficiales de carreteras estatales y transportes (AASHTO por sus siglas en inglés) al diseño por esfuerzos de trabajo.
- Diseño por factores de resistencia. En la especificación AASHTO es usado para definir el diseño por resistencia.
- Diseño por resistencia. El instituto americano del concreto (ACI, por sus siglas en inglés) y el AASHTO se refieren a este método como diseño por resistencia.
- Resistencia última. En versiones anteriores del código ACI se menciona este término para referencia a los métodos de resistencia ultima.
- Diseño por factores de carga y resistencia (LRFD, Load and Resistance Factor Design). Esta designación es usada por la AASHTO y AISC (American Institute of Steel Construction) y emplea la filosofía de diseño para cumplir con los estados límite de falla y de servicio.

Actualmente dentro de la normativa mexicana no existen una especificación que delimite completamente los aspectos de un diseño estructural de puentes, sin

embargo, en la práctica se observa el manual de diseño de puentes de la AASHTO como guía de diseño en México.

#### 4.5. Combinaciones de carga.

El diseño de los elementos estructurales de los puentes se contempla con las máximas solicitaciones que pudiera provocar una combinación de cargas de distintos tipos (permanentes, variables y eventuales), las cuales se combinan para considerar su potencial ocurrencia en la estructura.

Los elementos estructurales incluida la cimentación sobre la que apoya la estructura, debe ser diseñada para cumplir con la condición de seguridad incluyendo las combinaciones de carga que apliquen para la estructura, tomando en cuenta las condiciones particulares de la zona sobre la que se desplanta la estructura.

Conforme a lo comentado anteriormente, la normativa N-PRY CAR 6 01 003/01 (SICT, 2016) establece las combinaciones de carga a usarse para la etapa de análisis y diseño estructural, según la norma, se establece una serie de grupos donde se combinan las cargas expuestas anteriormente donde se pueden discretizar de la siguiente manera:

Para el grupo N:  $CP_N + CV_N + CE_N$

Donde:

N = Denota el número del grupo que se considere.

$CP_N$  = Combinación de cargas permanentes para el grupo N.

$CV_N$  = Combinación de cargas variables para el grupo N.

$CE_N$  = Combinación de cargas eventuales para el grupo N.

Cada combinación de carga que se trate involucra diferentes acciones como las que se denotan a continuación.

a) Combinación de cargas permanentes ( $CP_N$ )

$$\beta_{CM} * CM + \beta_{ET} * ET$$

b) Combinación de cargas variables.

$$\beta_V * (V + I) + \beta_{FC} * FC$$

c) Combinación de cargas eventuales ( $CE_N$ ).

$$\beta_{VE} * VE + \beta_{VCV} * VCV + \beta_S * S + \beta_{FL} * FL + \beta_{ACT} * (A + C + T) + \beta_{PL} * PL + \beta_{SP} * SP$$



Donde:

CM= Carga muerta.

ET = Empuje de tierra.

V = Carga viva.

I = Impacto.

FC = Fuerza centrífuga.

VE = Viento sobre la estructura.

VCV = Viento sobre la carga viva.

S = Sismo.

FL = Frenaje.

A = Acostamiento de arcos.

C = Efecto de la contracción por fraguado.

T = Efecto de la temperatura.

PL = Empuje dinámico del agua.

SP = Subpresión.

Los coeficientes  $\beta$  contenidos en las ecuaciones anteriores son factores que toman en cuenta que la probabilidad de ocurrencia de las cargas sea simultánea; los valores que puede tomar este coeficiente para cada grupo y tipo de carga, según la metodología de diseño LRFD, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Coeficientes y factores de carga según metodología LRFD.

Grupo	Permanentes		Variables		Eventuales							Fc
	$\beta_{CM}$	$\beta_{ET}$	$\beta_V$	$\beta_{FC}$	$\beta_{VE}$	$\beta_{VCV}$	$\beta_S$	$\beta_{FL}$	$\beta_{ACT}$	$\beta_{PL}$	$\beta_{SP}$	$\gamma$
I	[2]	[1]	1.5 <sup>[3]</sup>	1	0	0	0	0	0	1	1	1.30 <sup>[4]</sup>
II	[2]	[1]	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1.30
III	[2]	[1]	1.2	1	0.3	1	0	1	0	1	1	1.30
IV	[2]	[1]	1.2	1	0	0	0	0	1 <sup>[5]</sup>	1	1	1.25
V	[2]	[1]	0	0	1	0	0	0	1 <sup>[5]</sup>	1	1	1.25
VI	[2]	[1]	1.2	1	0.3	1	0	1	1 <sup>[5]</sup>	1	1	1.25
VII	[2]	[1]	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1.30

Fc= Factor de carga.

<sup>[1]</sup>Coeficiente igual a 1.0, en la mayoría de los casos y 0.5 para elementos de marcos rígidos donde el empuje de tierras sea favorable. Para empujes laterales de tierras en muros de contención y en marcos rígidos, excepto alcantarillas rígidas, se tomará un coeficiente  $\beta_{ET}$  de 1.3, para empujes laterales de tierras en reposo, se tomará un coeficiente de 1.15; por su parte para empujes verticales de tierra y para alcantarillas rígidas un coeficiente de 1.0; y finalmente para alcantarillas flexibles  $\beta_{ET}$  de 1.5.

<sup>[2]</sup>El coeficiente se toma igual a uno para efectos de flexión y tensión en miembros. Para columnas a flexocompresión se toman dos opciones: con coeficiente igual a 1.0 al verificar columnas con carga axial máxima y momento mínimo, y con factor de 0.75 para columna en condición de cargar axial mínima y momento máximo.

<sup>[3]</sup>Cuando en el grupo I, se diseñe la losa de calzada considerando una carga de rueda actúa sobre la banqueta a una distancia de 30 cm de la cara del parapeto o de la guarnición del lado de la calzada, la carga viva incluyendo carga de impacto se aplica un coeficiente de 1.0, en lugar del mostrado en la tabla.

<sup>[4]</sup>Para el grupo I, en el diseño de vigas exteriores de una calzada, se revisarán dos combinaciones de carga viva: la carga viva vehicular mas impacto con un factor de 1.3 o la combinación de carga viva sobre banqueta mas la carga viva vehicular con impacto, con un factor de carga de 1.25, tomando el valor mas desfavorable.

<sup>[5]</sup> Este factor incluye los efectos de variación de la temperatura ambiental y gradiente térmico.

#### 4.6. Estructuración de puentes tipo armadura.

Los puentes tipo armadura están formados por miembros en arreglo triangular. Esta clase de puentes son los más antiguos históricamente y se han venido usando cada vez menos debido a sus costos de mantenimiento; sin embargo, siguen siendo útiles debido a que son construibles fácilmente.

Para simplificar su análisis y diseño, la interacción entre sus miembros se concibe como articulada. Sus componentes se conforman por la cuerda superior, cuerda inferior y diagonales (Figura 16), las cuales están sometidas únicamente a fuerzas de tensión y compresión, debido a la conceptualización de su análisis (Lin & Yoda, 2017).

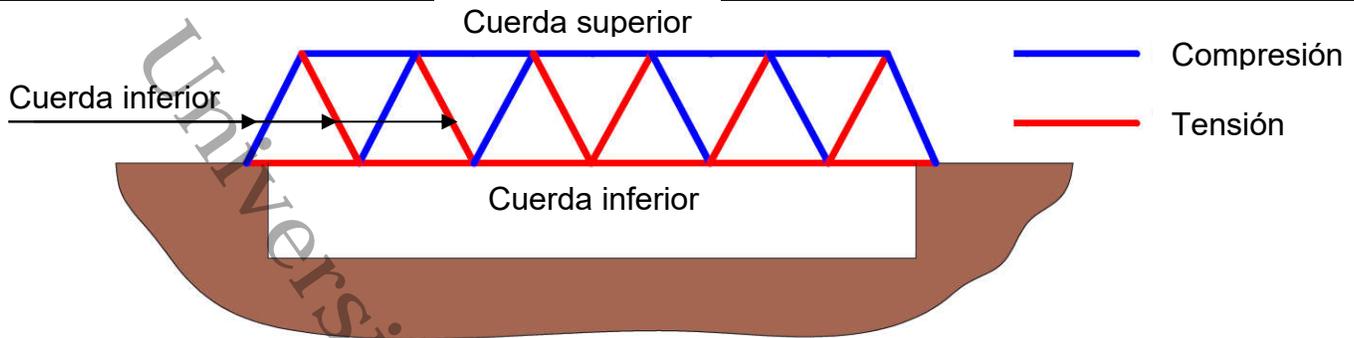


Figura 16. Elementos de un puente tipo armadura y fuerzas axiales actuantes (Tomada de Lin & Yoda, 2017).

Para simplificar su análisis y diseño, la interacción entre sus miembros se concibe como articulada. Sus componentes se conforman por la cuerda superior, cuerda inferior y diagonales (Figura 16), los cuales están sometidas únicamente a fuerzas de tensión y compresión debido a la conceptualización de su análisis (Lin & Yoda, 2017).

Los puentes tipo armadura que se usan hoy en día, emplean como elemento de unión entre sus componentes placas de conexión, que pueden estar soldadas, remachadas o atornilladas; en la realidad este tipo de unión genera flexión y cortante en la conexión, las cuales para ser correctamente evaluadas deben de modelarse a través de software que empleen el método de elementos finitos.

Como se mencionó anteriormente las fuerzas de compresión o tensión gobiernan el comportamiento de la estructura; este criterio es bastante adecuado ya que no se ocasiona errores significativos que difieran del comportamiento real de la estructura. En ocasiones, los miembros de la armadura están sometidos a fuerzas de tensión y compresión, cuando la estructura está sometida a fuerzas dinámicas (como sismo y el viento) (Lin & Yoda, 2017).

#### 4.7. Conexiones modulares.

Uno de los mayores desafíos para el diseño y construcción de puentes convencionales y modulares, son las uniones o juntas entre sus componentes. Las también llamadas conexiones permiten dar la forma geométrica de la estructura, a la vez que permiten que el flujo de la carga sea distribuido eficientemente entre sus componentes principales, es por ello que las uniones representan un punto crítico

de especial atención. Tradicionalmente un diseño convencional consiste en conceptualizar la forma estructural y posteriormente diseñar las conexiones que unirán a los componentes de la estructura. Este proceso de diseño en ocasiones trae como resultados conexiones muy particulares que pueden resultar complicadas al momento de la ejecución en la obra.

En el trabajo realizado por Dechkova Tumbeva, 2021, se presenta una línea de investigación interesante donde se aborda un nuevo método de fabricación y construcción de estructuras de acero por medio de conexiones modulares 2D para estructuras planas (por ejemplo, puentes) y juntas modulares 3D para estructuras espaciales (por ejemplo, cascarones). En ambos casos las conexiones modulares son prefabricadas, a base de conectores de nodo de acero unidos por soldadura o secciones armadas por alma y patín que incluyen un segmento inicial de los miembros a conectar.

Para fines de este trabajo, resulta importante destacar las conexiones modulares 2D las cuales consisten en un alma soldada a patines de placa doblados en frío (Figura 17).

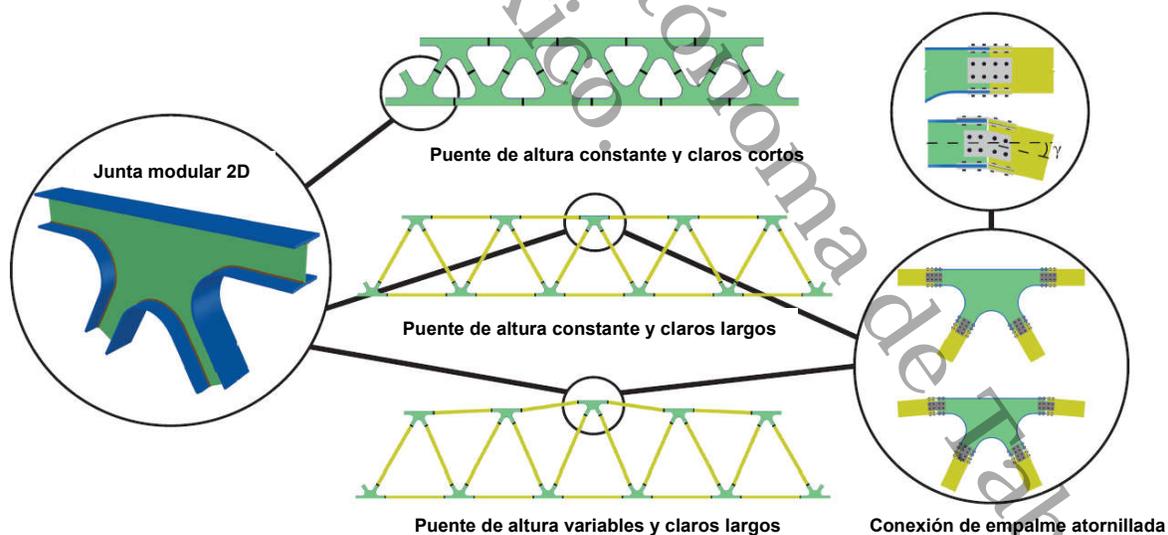


Figura 17. Sistema modular para estructuras planas (Tomada de Dechkova Tumbeva, 2021).

Las conexiones modulares mostradas en la Figura 17 se conforman por almas de sección abierta las cuales se orientan en su eje más fuerte y son

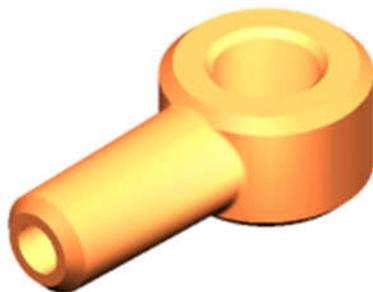
conectadas con placas de empalme atornilladas a doble cortante. Este sistema genera una unión rígida resistente a momento, la cual tiene la capacidad de transmitir flexión, así mismo puede tolerar la pérdida de un miembro gracias a la orientación de su eje fuerte.

El sistema modular propuesto puede ser empleado para estructuras planas y espaciales permanentes, así como para estructuras temporales necesarias para desastres naturales u operaciones militares.

#### 4.8. Modelación mediante método de elementos finitos.

La técnica ampliamente usada para resolver sistemas estructurales con condiciones de frontera y cargas es el denominado método de elementos finitos (MEF). Este método es empleado para resolución de problemas con materiales de comportamiento elástico y lineal, en condición estática y/o dinámica. Se caracteriza por plantear un modelo matemático que divide (discretiza) la estructura en pequeñas divisiones denominadas elementos finitos, que a su vez se encuentran interconectadas entre sí por medio de puntos conocidos como nodos; las divisiones de los elementos finitos ajustan a la estructura real para aproximarla geoméricamente tanto como sea posible, para volver el problema real, de infinitos grados de libertad, a un problema de un número finito de grados de libertad. Posteriormente, la solución al problema matemático planteado cae en el campo de los métodos matriciales, cuya aproximación dependerá del grado de refinamiento de los elementos finitos.

a)



b)

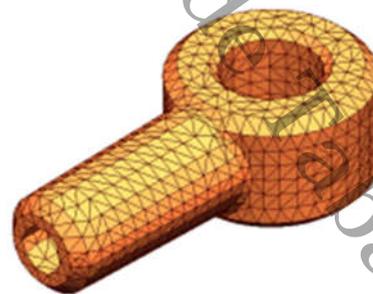


Figura 18. Modelamiento matemático de componente estructural: a) Modelo real, b) Modelo dividido en elementos finitos (discretizado).



Las estructuras o componentes se dividen para su estudio en discretas o reticulares y continuas. Las primeras están formadas por componentes definidos y diferenciados unos de otros conectado entre si por nodos, formando una retícula; Las deformaciones en los nodos está definido por un numero finito, por tal motivo el estado de equilibrio de la estructura puede representarse mediante ecuaciones en los puntos de unión. Por su parte, los sistemas continuos no son separables por elementos claramente definidos, por lo tanto, no son aplicables los métodos de solución de sistemas discretos. Los sistemas continuos son altamente frecuentes en ingeniería; como piezas de máquinas, vehículos, estructuras tipo losa de edificios, conexiones estructurales de acero. Para la solución de sistemas continuos se emplean el MEF (Celigüeta, 2011).

#### 4.8.1. Modelamiento computacional mediante MEF.

El comportamiento de una estructura depende fundamentalmente de su geometría o dominio del sistema, el medio (las propiedades del material constituyente, las condiciones de frontera, iniciales y de carga. En ingeniería, es común encontrar estructuras cuya geometría y condiciones de contorno son complejas, y por ende la solución de las ecuaciones diferenciales que gobiernan su comportamiento en términos de fuerzas y desplazamiento, es complicado para ser resuelto por métodos analíticos. Es entonces casos, la discretización del dominio o geometría que se propone en el MEF es la mejor herramienta que puede emplearse. Liu & Quek, 2014 mencionan que el modelamiento computacional usando el MEF de manera general consiste en cuatro pasos que se describen a continuación:

- 1) Modelamiento de la geometría.** En esta parte del proceso de modelamiento, se requiere que el ingeniero tenga la capacidad de simplificar el modelo real que en ocasiones resulta complejo. Las partes curvas de los elementos son aproximadas mediante pequeñas líneas rectas o áreas planas, cuando se usan elementos lineales. La precisión en la representación de partes curvas naturalmente resulta de dividir en piezas más pequeñas los elementos. Desafortunadamente, un mayor número de elementos trae consigo costos computacionales muy altos. Es por ello que la discretización minuciosa solo debe realizarse en casos



donde la precisión sea obligada, de lo contrario pueden realizarse aproximaciones del mallado que no afecten los resultados finales.

Actualmente existen numerosos softwares computacionales de dibujo asistido por computadora, CAD (por sus siglas en inglés, Computer Aided Design) que son capaces de simular las características geométricas de los elementos estructurales. Sin embargo, a pesar de que el modelado de las geometrías es preciso, se requiere de simplificaciones geométricas a la hora del mallado.

- 2) **Mallado.** El proceso de mallado corresponde a la etapa de discretización de la estructura en pequeñas piezas llamadas elementos o celdas. Este paso es muy importante para la actividad de preprocesamiento, ya que de un correcto mallado dependerá la calidad de los resultados que se obtenga. Para el proceso de mallado es común emplear formas triangulares ya que son las más flexibles y representan bien la geometría deseada, sin embargo, la calidad de los resultados puede ser un poco menor que usar elementos tipo cuadriláteros. La desventaja de los cuadriláteros es la complejidad de auto mallado que presentan los softwares.
- 3) **Propiedades de los materiales o medio.** Los sistemas estructurales pueden estar compuestos por más de un material. Las propiedades estructurales son definidas para un elemento o un grupo si las condiciones del problema lo requieren. Para algunos de los problemas de ingeniería, se requiere definir el módulo de Young y el módulo de cortante cuando se trata de encontrar los esfuerzos en los sólidos y estructuras, mientras que para el análisis de conductividad se requiere el coeficiente de expansión térmico. Para definir las propiedades de los materiales es aconsejable obtener los datos de experimentaciones confiables para que los resultados sean adecuados.
- 4) **Condiciones de contorno, inicial y de carga.** Estas condiciones son predominantes para la solución de la simulación. La definición de estos aspectos en los softwares comerciales es tarea relativamente sencilla



debido a la interactividad con la que se establecen en el entorno gráfico, sin embargo, definir qué tipo de condiciones de carga, iniciales y de contorno emplear no trivial, se requiere de un buen juicio ingenieril para definir cómo actúan en el modelo.

#### 4.8.2. Simulación.

Una vez mallado el elemento, se establecen ecuaciones simultaneas discretas las cuales pueden ser establecidas conforme a distintas aproximaciones. La primera, se basa en los principios de energía, como el principio de Hamilton, el principio de mínimo potencial de energía, entre otros. El método de elementos finitos (MEF) utiliza los enfoques anteriores. El segundo fundamento es el método residual ponderado, el cual también es usado para establecer las ecuaciones del MEF del modelado de diversos fenómenos físicos; el tercer enfoque está basado en series de Taylor, el cual permite establecer las ecuaciones del llamado método de diferencias finitas (MDF). El cuarto enfoque está basado en las leyes de conservación en el dominio de volumen finito. El método de volumen finito (MVF) usa este principio. En la ingeniería practica se usan los primeros dos principios para modelar estructuras y sólidos.

### 5. JUSTIFICACIÓN.

La infraestructura carretera es primordial para el desarrollo de los proyectos de exploración petrolera y la comunicación de las poblaciones, particularmente los puentes vehiculares toman gran relevancia para alcanzar los objetivos deseados.

Con lo expuesto anteriormente, se requiere contar con infraestructura adecuada para las necesidades de la industria, así como recortar los tiempos de construcción y minimizar las pérdidas económicas que representa una exploración fallida, y por otra parte responder de manera inmediata a las situaciones de emergencia como el colapso de un puente.

Contar con un puente modulable ayudaría a optimizar los tiempos de construcción y a aumentar la viabilidad de los proyectos de exploración petrolera terrestre. Además, ofrecería una solución inmediata a las eventualidades que



podieran presentarse en las estructuras existentes debido al uso, falta de mantenimiento y/o fenómenos naturales.

## 6. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.

¿El diseño de un puente modular, conduce a tener secciones y sistema de conexiones estructuralmente razonables?

## 7. HIPOTESIS.

El diseño del puente modular será un modelo de utilidad que proveerá de una estructura capaz de cumplir con su función principal de manera segura y que, además, por su estructuración y geometría, será de fácil y rápida instalación, permitiendo la posibilidad de reusarse en situaciones estratégicas o de emergencia según las necesidades de los usuarios.

## 8. OBJETIVO GENERAL.

La finalidad de esta tesis es la realización del análisis y diseño estructural de un puente vehicular modular de acero mediante conexiones de rápido ensamble que por sus características sea de fácil transportación e instalación, tomando como referencia las nuevas tendencias para el diseño y construcción de puentes metálicos a nivel mundial.

## 9. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Analizar y diseñar un puente modular que permita garantizar un comportamiento estructural local y global óptimo, de sus conexiones y en conjunto respectivamente, empleando modelos computacionales con elementos finitos.
- Elaborar un prototipo a escala del puente modular (fabricado en impresora 3D o en piezas fabricadas en taller) que permita validar el comportamiento de la estructura obtenida en los modelos matemáticos.

## 10. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.

Esta investigación plantea la concepción (análisis y diseño estructural) de un puente modular de acero estructural que principalmente funcione como una



alternativa de solución para las necesidades de la industria petrolera de exploración terrestre, y que alternativamente pueda ser empleado en situaciones de emergencia derivado de las condiciones del entorno para donde se propone emplear este tipo de puentes.

Así mismo este trabajo de tesis permitirá conocer los principales aspectos a considerar dentro del diseño de puentes innovadores, partiendo de las investigaciones que se están realizando en la actualidad a nivel internacional.

## 11. METODOLOGÍA

### 11.1. Análisis y diseño estructural de puente modulado.

#### 11.1.1. Evaluación de variables de estructuración.

De acuerdo con los objetivos de esta tesis, se propone el diseño y modelamiento matemático de un puente modulado de acero empleando secciones estructurales y conexiones que resulten fácil de instalar, teniendo la posibilidad de reúso en las diversas circunstancias de los proyectos de exploración terrestre de la industria petrolera.

Primeramente, se inicia con la evaluación de las variables que intervienen en la estructuración del puente, para ello se debe conocer las dimensiones mínimas que debe cumplir el puente para que sea transitable por los vehículos que se requieren en la industria petrolera y población en general. Tomando como referencia al estado de Tabasco y en general la región sureste del país, es común que los campos de exploración petrolera se ubiquen en localidades rurales, por lo que se requiere tener estructuras acordes al tipo de camino para el cual se proyecta.

El reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte establece la clasificación de los caminos de acuerdo con su geometría y jurisdicción (Figura 19).

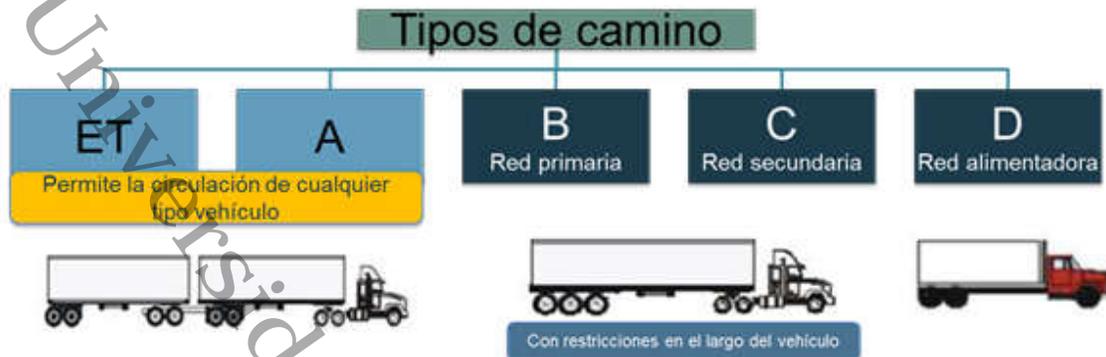


Figura 19. Clasificación oficial de carreteras en México (Imagen tomada de (Cuevas & Cadengo, 2020).

En esta clasificación se puede observar que se tienen carreteras de altas especificaciones ET y A, y carreteras B, C y D que corresponden a la red primaria, secundaria y de la red alimentadora como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 2. Clasificación de carreteras respecto a sus características geométricas.

TIPO DE CARRETERA	NOMENCLATURA
Carretera de cuatro carriles	A4
Carretera de dos carriles	A2
Carretera de cuatro carriles, red primaria	B4
Carretera de dos carriles, red primaria	B2
Carretera de dos carriles, red secundaria	C
Carretera de dos carriles, res alimentadora	D

La estructura planteada en el presente escrito corresponde al grupo de la red primaria, secundaria y carreteras alimentadoras, donde como mínimo se requieren dos carriles de circulación (Tabla 2). Estos carriles deberán tener un ancho de 3.5 m.

Así mismo, conforme a las entrevistas realizadas a personal que desarrolla proyectos de ingeniería para la industria petrolera se estima que el largo entre dos apoyos de un puente oscila entre 10 y 12 m, lo cual se consideran dimensiones apropiadas para establecer la geometría inicial de la estructura.

Finalmente, para el puente en estudio se presentan las dimensiones finales con las que se analizará la estructura.

Tabla 3. Dimensiones del puente en estudio.

Característica:	Dimensión
No. De Carriles	2
Ancho de carriles	3.5 m
Ancho total	7.0 m
Largo entre apoyos	10.0 m

### 11.1.2. Definición de las cargas vivas vehiculares.

Como se explicó en el capítulo anterior, las cargas vivas vehiculares son determinantes para conocer los elementos mecánicos que actúan en los elementos de un puente, es por ello por lo que se recurre a la normativa local mexicana de la SICT para conocer las características del vehículo necesario para el modelamiento estructural. El modelo de cargas vivas vehiculares está definido en la normativa N-PRY CAR 6 01 003/01 (SICT, 2001b) donde se especifica que para carreteras tipos ET, A, B y C se emplee el modelo de cargas IMT 66.5 (Figura 10 y Figura 11), mientras que para las carreteras tipo D se recomienda el empleo del modelo de cargas IMT 20.5 (Figura 12 y Figura 13).

Para este estudio se emplean los dos modelos de cargas, dado que la carretera sobre la cual se proyecta el puente pertenece a ambas clasificaciones de cargas vehiculares. Además, para tomar en cuenta el hecho que los vehículos más pesados que transitan sobre la estructura transitan con sobrecargas, se consideran dos condiciones de análisis:

- i) el vehículo de proyecto IMT 66.5 actuando sobre un solo carril de circulación y,
- ii) el vehículo de proyecto IMT 20.5 actuando en ambas direcciones del carril de circulación.

### 11.1.3. Preevaluación del comportamiento optimo.

Conforme a la investigación realizada sobre el estado del arte de los puentes modulares, se encontró que las estructuras modulares que se han propuesto son las compuestas por armaduras; esto se entiende debido al mecanismo estructural de repartición de cargas, donde las uniones de sus miembros son consideradas

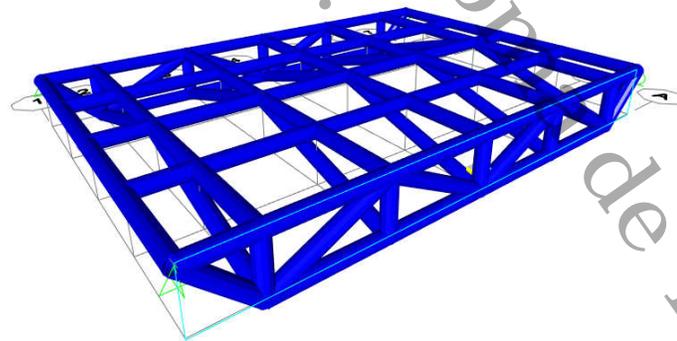
articulados y sus miembros resistentes son sometidos solo a fuerzas de tensión y compresión.

Para fines de este trabajo y a la luz de la información recopilada en la elaboración de este trabajo, se selecciona un mecanismo de trabajo de las cargas a base de armaduras. Para evaluar la mejor propuesta de armadura en términos de distribución de esfuerzos internos en sus elementos, se estudiaron cuatro tipologías de un sistema estructural a base de armaduras sometidas a peso propio y al efecto de las cargas vivas, tal como se describió en el apartado 5.2 de este documento.

Las secciones estructurales empleadas provienen del análisis de las tipologías estructurales de puentes diseñados y construidos para caminos de acceso de la industria petrolera, donde típicamente son usados perfiles OC 273 x 9.5 mm acero ASTM A-53 Grado B para claros similares al propuesto para el puente modular. El análisis estructural fue realizado en el programa estructural SAP 2000, ya que dentro de sus funciones permite evaluar cargas móviles a través de cargas de carril por el método de las líneas de influencia.

A continuación de la Figura 20 a la Figura 23, se presentan las cuatro tipologías de puentes armadura estudiadas.

a)



b)

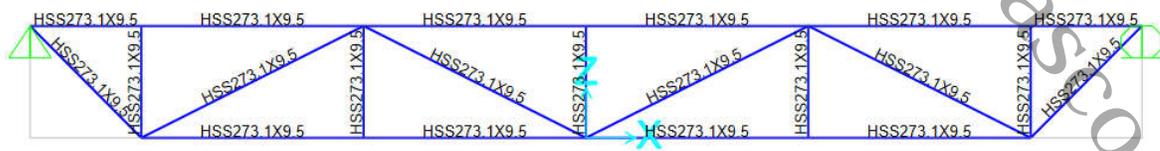
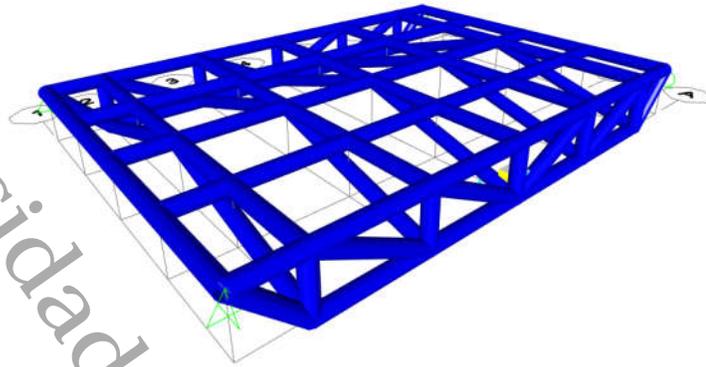


Figura 20 Modelo estructural **tipología 1**. a) Vista en 3D y b) Perfil principal de armadura.

a)



b)

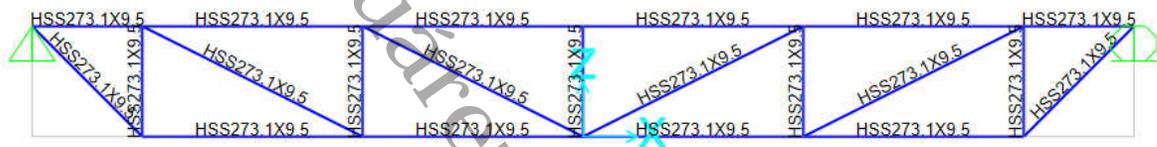
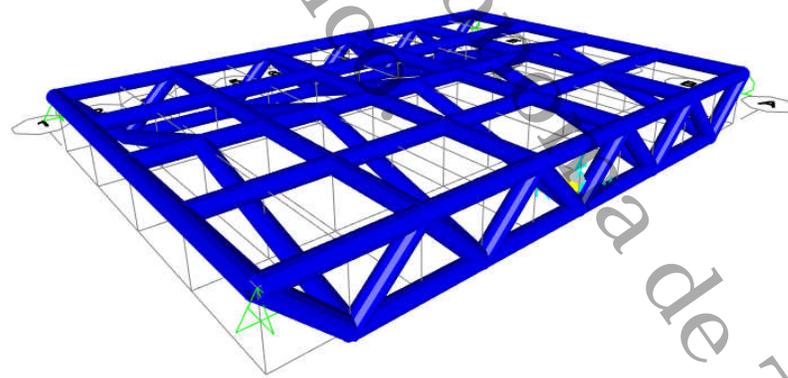


Figura 21 Modelo estructural **tipología 2**. a) Vista en 3D y b) Perfil principal de armadura.

a)



b)

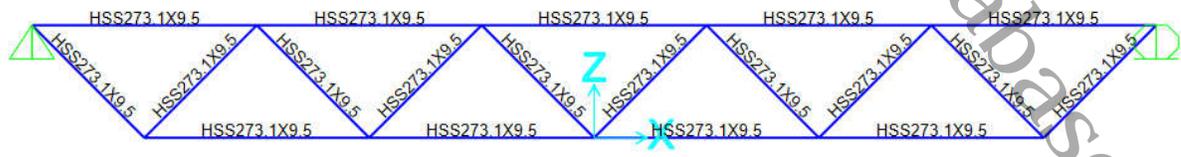
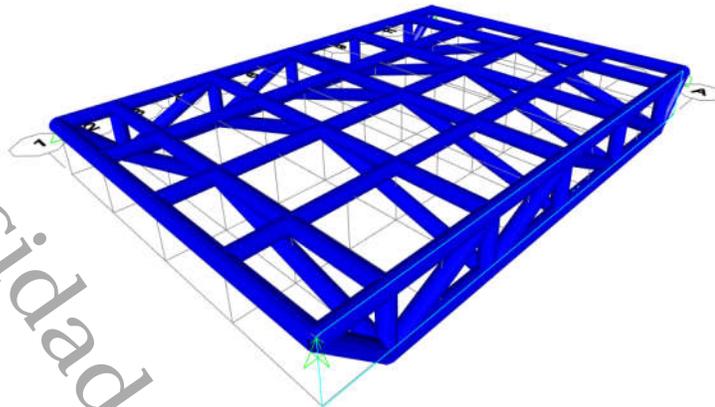


Figura 22 Modelo estructural **tipología 3**. a) Vista en 3D y b) Perfil principal de armadura.

a)



b)

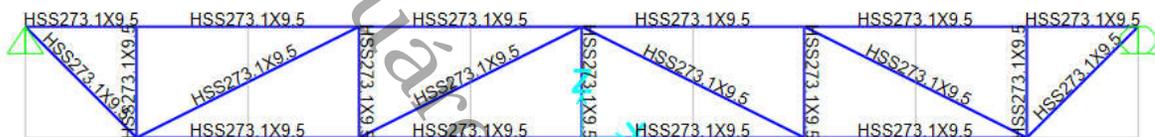


Figura 23 Modelo estructural **tipología 4**. a) Vista en 3D y b) Perfil principal de armadura.

Las cuatro geometrías estudiadas fueron sometidas a la acción de la carga viva producto del tránsito de los vehículos de diseño para obtener las máximas solicitaciones y así evaluar la mejor distribución de esfuerzos internos a los elementos principales. Para evaluar la mejor distribución se empleó la metodología de líneas de influencia que se mencionó en el capítulo anterior. Con apoyo del programa SAP 2000 (Computers and Structures, 2022) se realizó el modelo estructural, construyendo la geometría propuesta, y asignando las restricciones en los apoyos al modelo, en este caso se modeló como una estructura simplemente apoyada y se asignó el carril sobre el cual actuará la carga móvil. Posteriormente se ejecutaron los análisis correspondientes obteniendo para cada tipología su distribución de esfuerzos para cada instante donde se posiciona la carga de carril. Esta distribución de esfuerzos fue posible visualizarla por medio de un video generado a través del software estructural; la captura de pantalla de un instante de carga de la distribución de esfuerzos de una tipología se muestra en la siguiente figura.

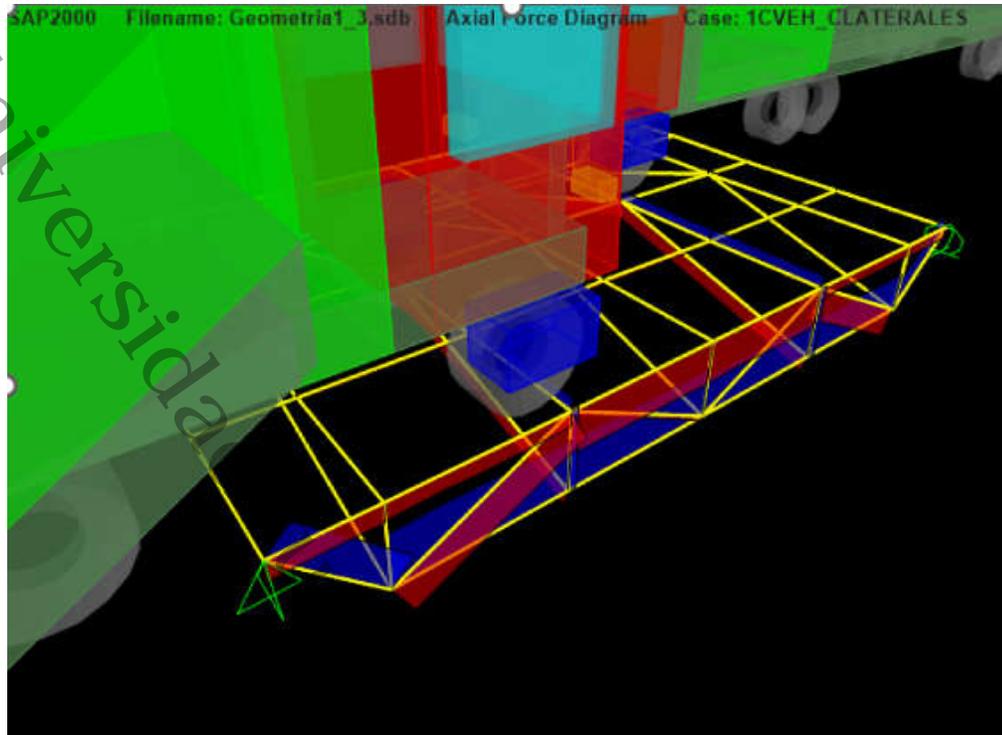
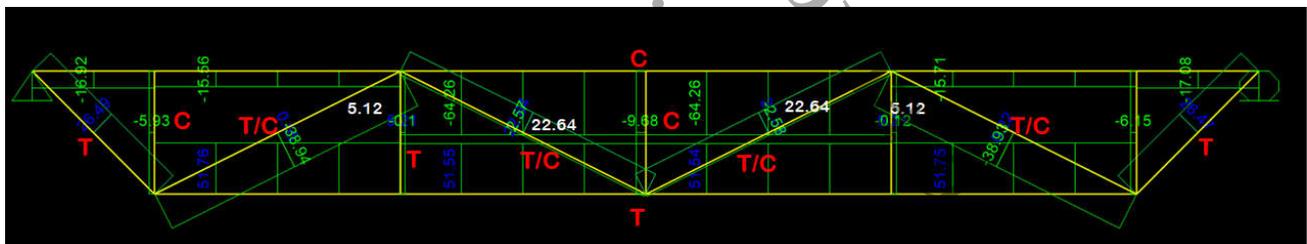


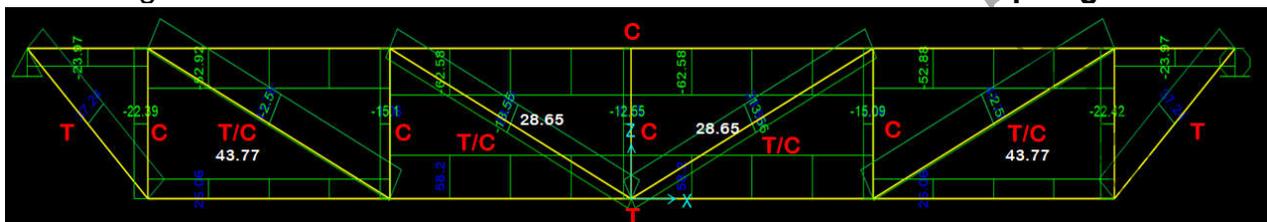
Figura 24. Imagen de la distribución de esfuerzos en elementos estructurales de armadura (Tipología 1).

En las Figura 25 a la Figura 28 se muestra la envolvente de esfuerzos en los elementos estructurales de las armaduras de cada tipología que se analizarán para seleccionar la más adecuada.



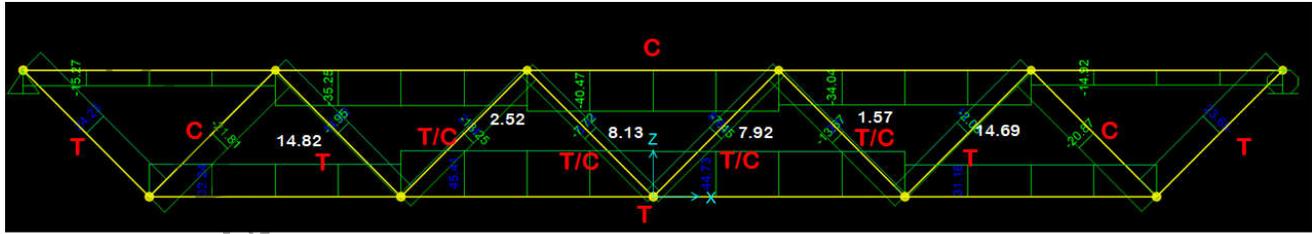
Unidades en toneladas.

Figura 25. Distribución de esfuerzos en armadura crítica de la **tipología 1**.



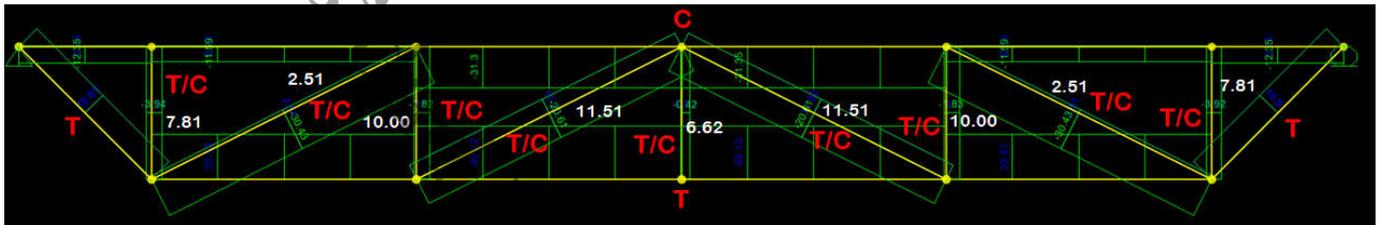
Unidades en toneladas.

Figura 26. Distribución de esfuerzos en armadura crítica de la **tipología 2**.



Unidades en toneladas.

Figura 27. Distribución de esfuerzos en armadura crítica de la **tipología 3**.



Unidades en toneladas.

Figura 28. Distribución de esfuerzos en armadura crítica de la **tipología 4**.

En las figuras anteriores la letra "T" y el color azul denota tensión y la letra "C" y el color verde compresión.

Conforme se puede apreciar en los diagramas de esfuerzos de las armaduras, la tipología 3 presenta la mejor distribución de esfuerzos, ya que la cuerda superior e inferior y las diagonales trabajan con valores de tensión y compresión mejor distribuidas entre sus elementos que las demás propuestas, lo que resulta conveniente para los fines del puente ya que se aprovechará la capacidad estructural en un porcentaje mayor, además que, por su configuración geométrica, resulta con la menor cantidad de pieza lo que indica la posibilidad de poder cambiar su posición dentro de la armadura cuando se requiera.

#### 11.1.4. Evaluación estructural de la propuesta óptima.

Como se mencionó en el punto anterior, se selecciona la tipología 3 como configuración básica de la armadura del puente modular; con la finalidad de reducir la longitud del claro entre armaduras y disminuir las solicitaciones de carga a los miembros estructurales de la misma, se decide incluir una armadura en la parte central del puente considerando un apoyo adicional que permitirá una mejor distribución de cargas en los elementos. Así mismo se observó que con la geometría propuesta y la sección de los elementos de la armadura, se obtenían miembros pequeños en comparación con su sección transversal, lo que resultaría con un

ensamble complicado durante el procedimiento constructivo, por lo anterior se decide modificar la longitud del puente a 12m y la altura de la armadura a 1.2 m. La geometría finalmente estudiada se muestra a continuación en las Figura 29 a la Figura 31:

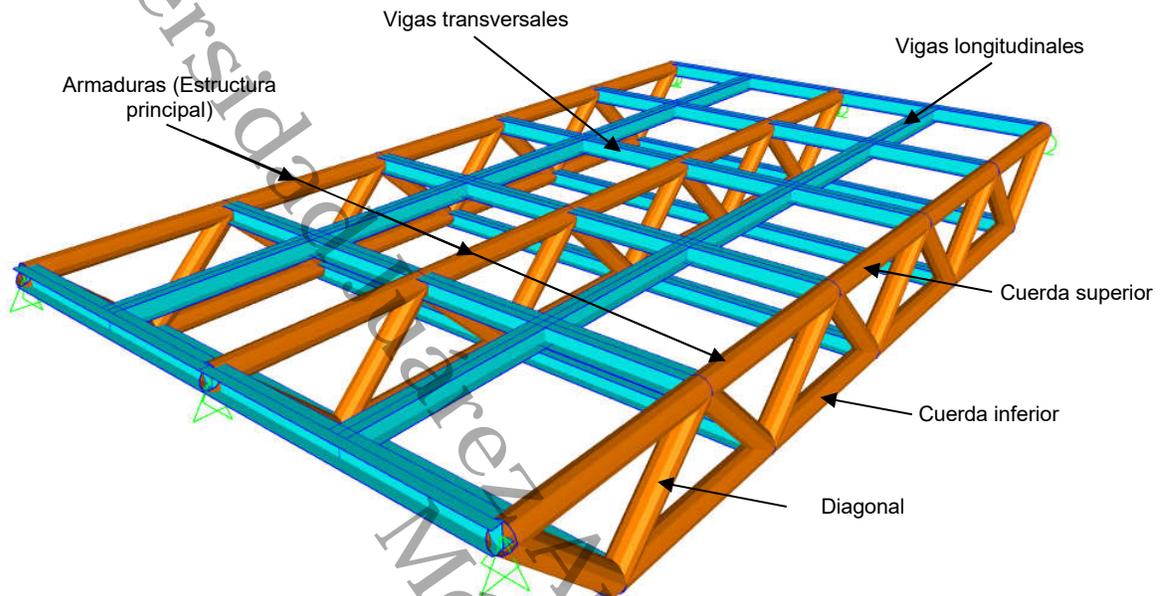


Figura 29. Vista en isométrico para la evaluación estructural del puente modular.

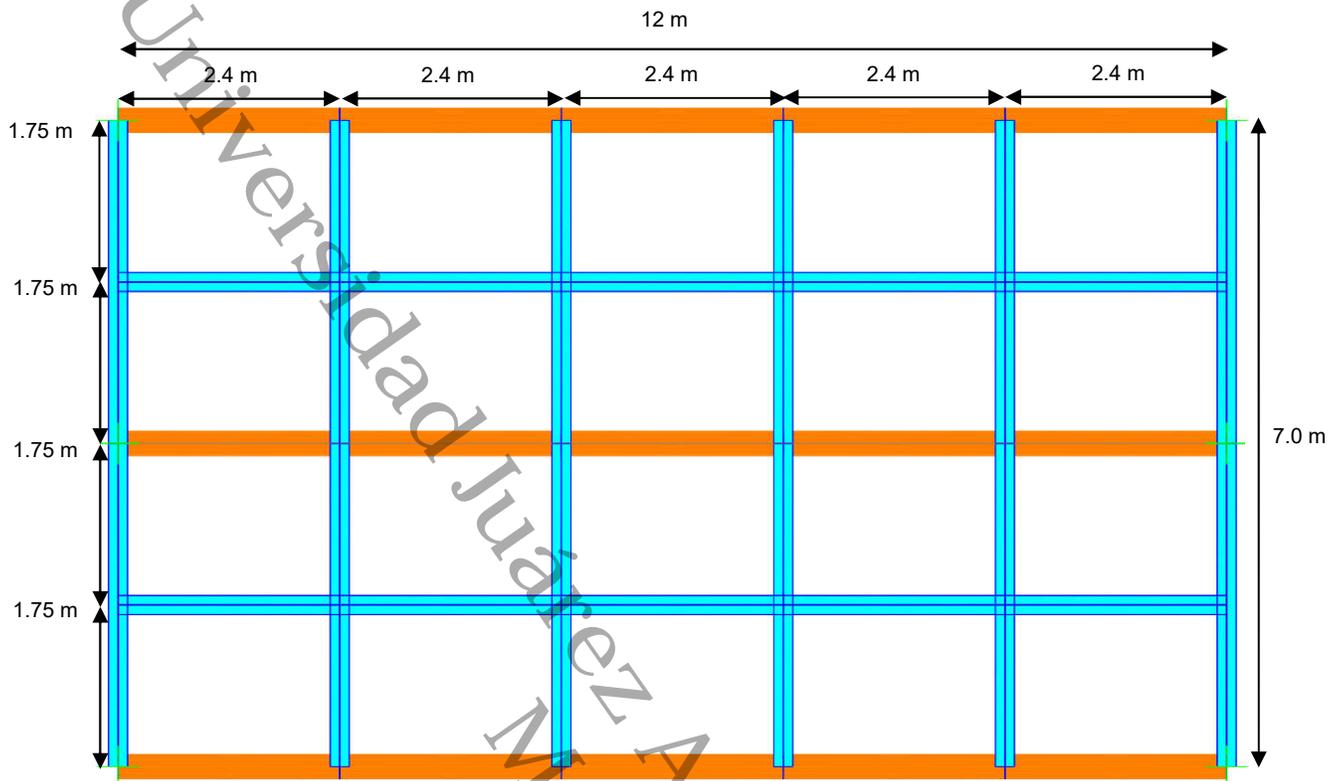


Figura 30. Vista en isométrico para la evaluación estructural del puente modular.

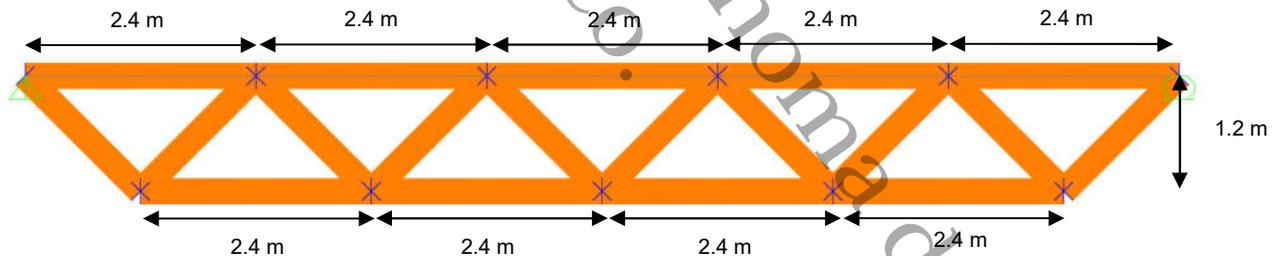


Figura 31. Vista lateral de puente modular (armadura).

#### 11.1.4.1. Definición de elementos estructurales para diseño.

Conforme al predimensionamiento estudiado en las tipologías presentadas en el punto 3.3 de este trabajo, se propone que la armadura estará compuesta por secciones tubulares OC 273mm x 9.5 mm acero ASTM A-53 Grado B, mientras que para las traveses longitudinales y transversales se propone emplear perfiles "I" 200mm x 71 kg/m acero ASTM A709 Grado 50. Dicha configuración estructural puede

apreciarse en la figura siguiente. Para esta etapa del diseño y revisión se optó por emplear el programa CSI Bridge (Computers and Structures, 2023), ya que este programa permite modelar la influencia de cargas móviles en el sentido transversal al puente dentro del carril de diseño, lo que implica que obtiene de mejor forma la distribución de esfuerzos dentro de los elementos mecánicos.

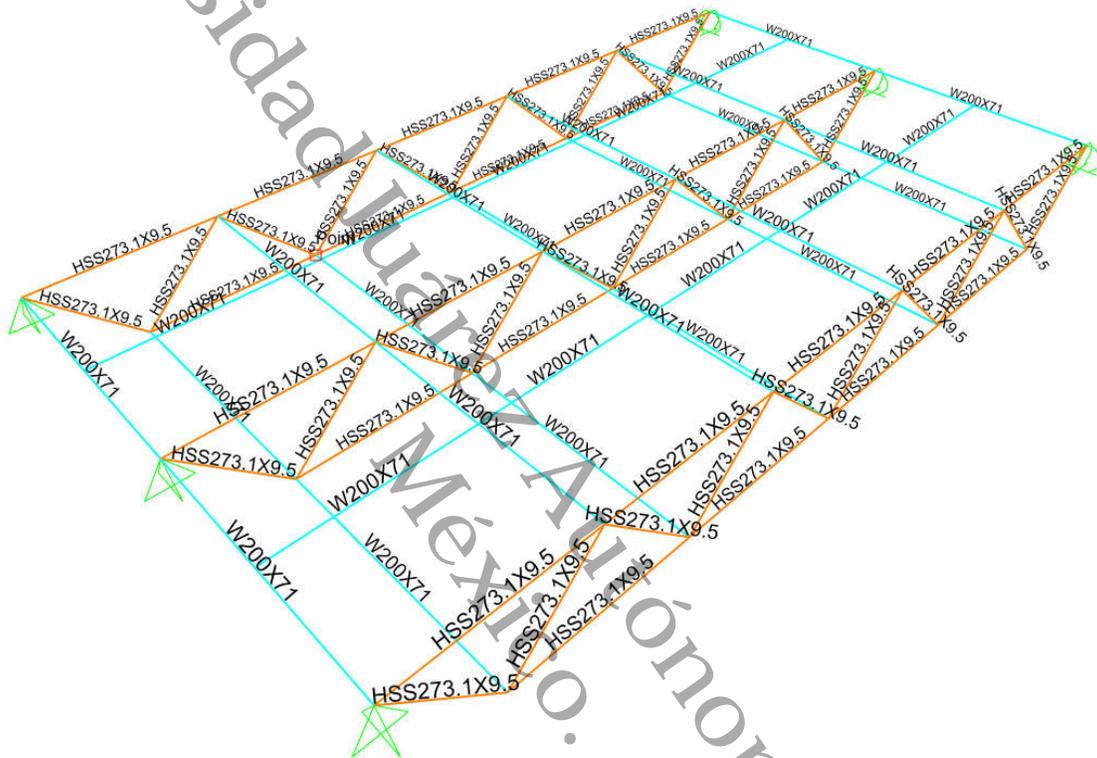


Figura 32. Asignación de perfiles estructurales al modelo del puente modular.

#### 11.1.4.2. Asignación de cargas al modelo estructural.

- **Carga por peso propio.**

La carga por peso propio de los elementos estructurales fue considerada por el programa tomando en cuenta el área y longitud de la sección y el peso volumétrico del material constituyente.

- **Carga muerta.**

Se consideró una carga por peso propio, correspondiente a la losa de rodamiento de la estructura. Preliminarmente se considera que la superficie de rodamiento estará compuesta por una losa de concreto reforzado de 10 cm de espesor estará simplemente apoyada sobre las vigas transversales. Esta losa representa una carga de  $0.10 \text{ m} \times 2400 \text{ kg/m}^3 = 240 \text{ kg/m}^2$  (considerando el peso volumétrico del concreto). En este caso la losa fue modelada como un elemento membrana la cual no aporta rigidez a la estructura del puente, sin embargo, si transmite cargas verticales a los elementos estructurales.

- **Carga viva.**

La carga viva empleada corresponde al modelo vehicular de carga viva vehicular para diseño propuesto por el instituto mexicano del transporte de la S.I.C.T., donde se establecen dos tipos de vehículos conforme al tipo de camino para el cual se diseñe, en este caso se emplearon ambos modelos de carga para considerar dos carriles cargados con el vehículo IMT 20.5 (Figura 33) y un carril cargado con el vehículo IMT 66.5 (Figura 34). El modelo de cargas fue repartido en el ancho de carril de diseño, variando la posición del vehículo en el sentido transversal y longitudinal.

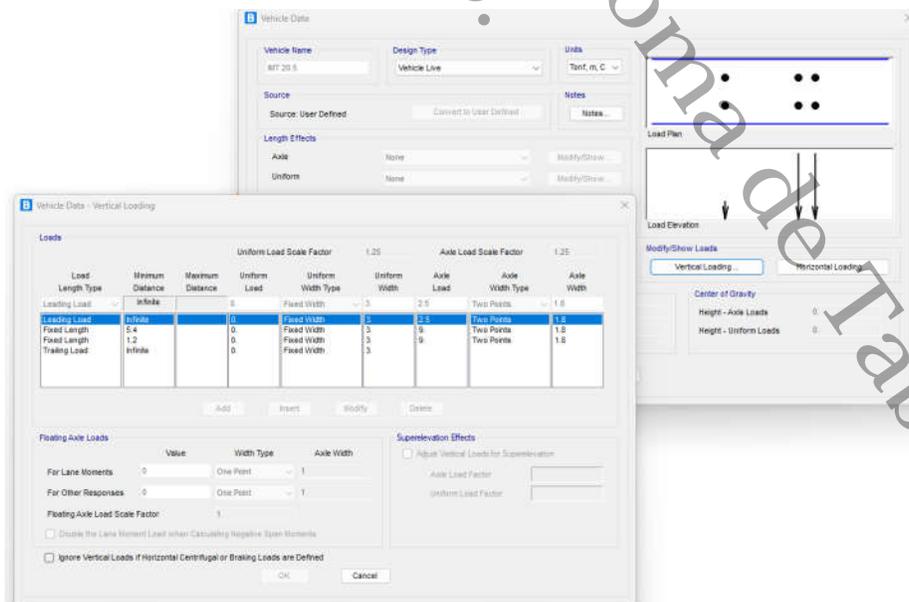


Figura 33. Definición del modelo de carga IMT 20.5

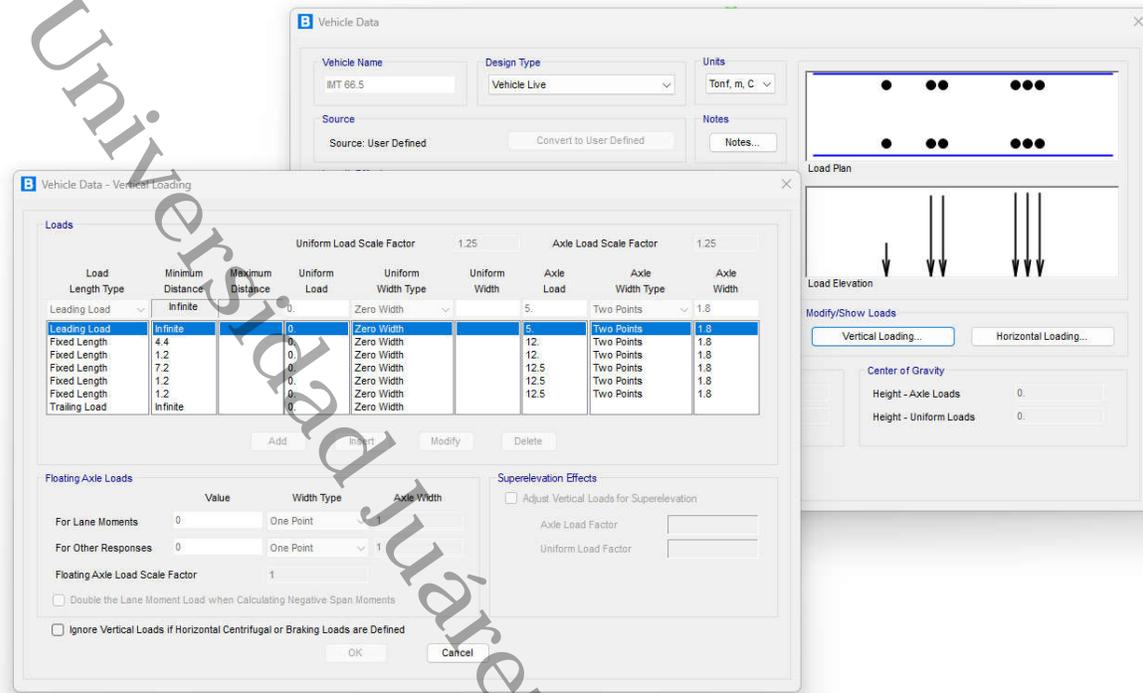


Figura 34. Definición del modelo de carga IMT 66.5

- **Cargas por sismo.**

La determinación de la fuerza sísmica de diseño se realizó conforme a la normativa N-PRY CAR 6 01 005/01 (SICT, 2001c). De acuerdo con esta norma el puente modulado se clasifica como tipo B conforme a su importancia, ya que pertenece a una vía de dos carriles del tipo ET2, A2, B2, C y D. Así mismo se ubica dentro de las estructuras tipo 1s debido a su comportamiento sísmico, donde se clasifica como una estructura regular donde la superestructura está formada por tramos libremente apoyados o continuos. Así mismo para fines de este trabajo se ubica a la estructura en la zona sísmica C, ya que una zona del estado de Tabasco se localiza en esta zona sísmica, donde se tienen ordenadas espectrales más desfavorables. El tipo de terreno considerado corresponde al tipo III formado suelos finos blandos, donde se tienen amplificaciones sísmicas mayores.

Para el tipo de estructuras 1s, la normativa N-PRY CAR 6 01 005/01 (SICT, 2001c) indica que puede emplearse un método simplificado para obtener las fuerzas sísmicas de diseño, para ello el análisis se realiza en dos direcciones ortogonales horizontales, considerando para cada una de ellas el efecto de una fuerza horizontal equivalente (s). La fuerza horizontal se determina conforme a la expresión siguiente.

$$S = \frac{c}{Q} W$$

Donde:

S= Fuerza horizontal equivalente.

c = Ordenada máxima del espectro sísmico correspondiente a la zona sísmica donde se ubica la estructura y al tipo de suelo que se desplanta.

Q = Factor de comportamiento sísmico.

W = Peso de la estructura.

El factor de comportamiento sísmico Q, se toma de la tabla 2 de la norma N-PRY CAR 6 01 005/01(SICT, 2001c), donde se toma un **Q = 4** de acuerdo con las características de la estructura.

De la clasificación de la estructura, del tipo de terreno y de la clasificación de la zona sísmica, se obtiene las características del espectro de diseño sísmico (Tabla 4) y la representación gráfica del mismo (Figura 35).

Tabla 4. Valores característicos del espectro sísmico para estructuras tipo B.

Zona sísmica	Tipo de suelo	a0	c	Ta (s)	Tb (s)	r
C	III	0.16	0.64	0.6	1.9	1

r = Exponente adimensional.

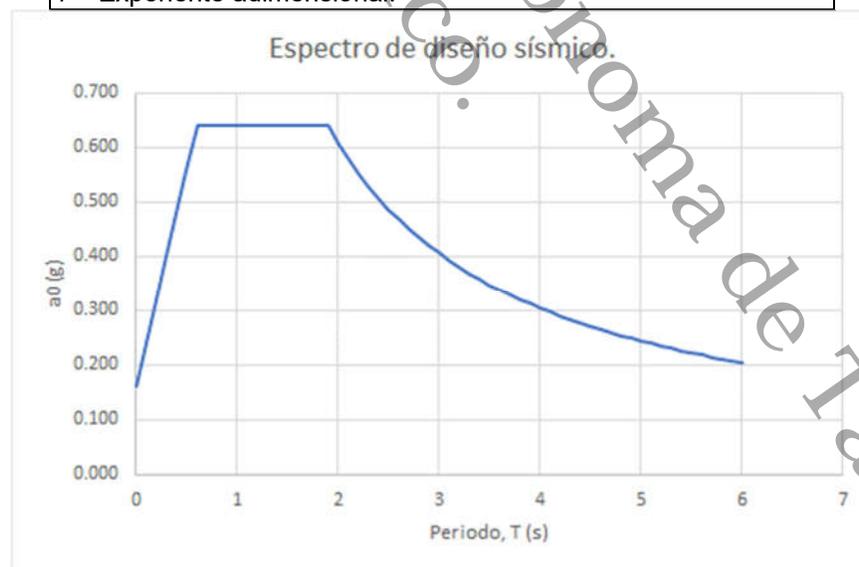


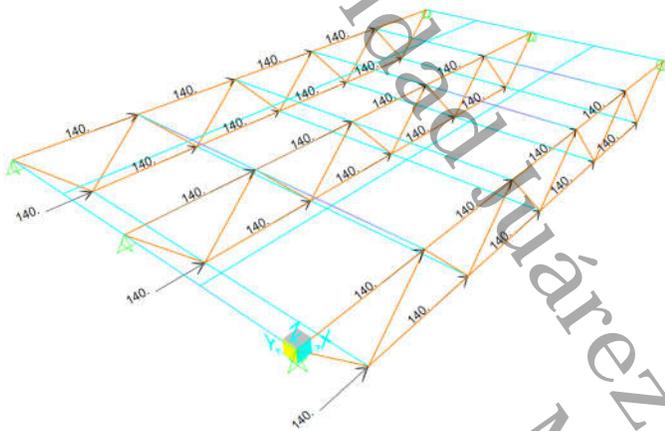
Figura 35. Espectro de diseño sísmico.

De los datos anteriormente expuestos, se tiene que la fuerza sísmica **S**, toma un valor de:

$$S = \frac{0.64}{4} * 23.55t = 3.77t$$

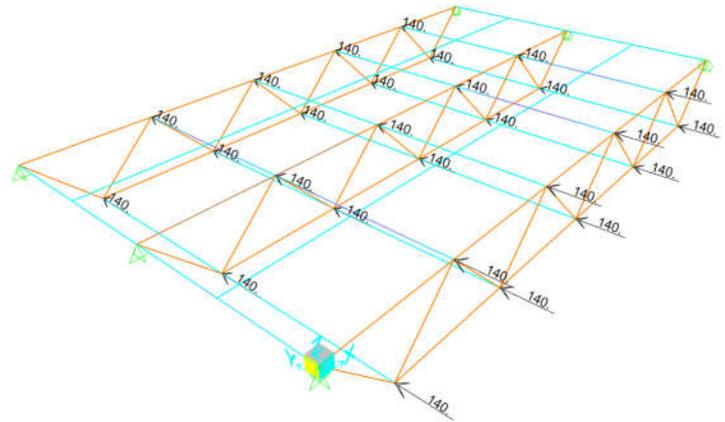
Esta fuerza sísmica se divide entre el número de nodos de la estructura (25 nodos) dando como resultado una carga sísmica aplicada de **139.56 kg**.

Finalmente, en las siguientes figuras se muestra la fuerza sísmica asignada a cada nodo.



\*Fuerzas en kg.

Figura 36. Asignación de fuerzas por sismo en dirección X.



\*Fuerzas en kg.

Figura 37. Asignación de fuerzas por sismo en dirección Y.

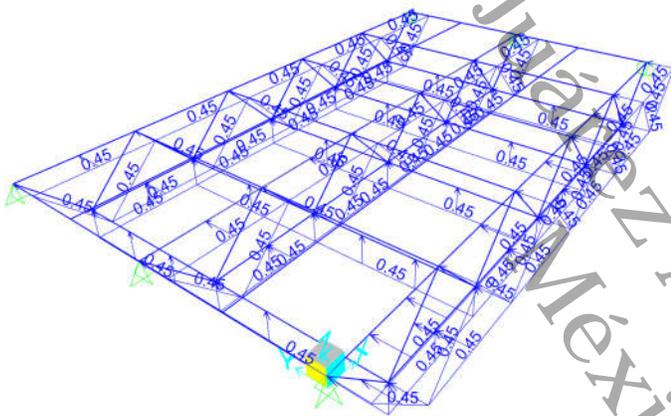
- **Cargas por viento.**

Las cargas por viento fueron definidas conforme a la norma N-PRY CAR 6 01 004/01 (SICT, 2001d). De acuerdo con dicha norma la estructura se clasifica como tipo B de acuerdo con el tipo de camino para el cual es diseñado; por otra parte, respecto a la acción del viento, la estructura se clasifica como tipo 1v, ya que se cataloga como una estructura poco sensible a los efectos de la ráfaga del viento como puentes rígidos, armaduras simples o continuas, arcos, losas planas, entre otros. Así mismo la relación de aspecto, es decir, el cociente entre el claro máximo horizontal y la menor dimensión perpendicular no excede 30 m ( $12m/7m = 1.7 < 30$ ).

De acuerdo con la clasificación del tipo de estructura (estructura común tipo 1v), es aplicable el método simplificado, puesto que la estructura no está soportada por cables, su altura de rasante respecto al nivel más bajo del terreno no excede los

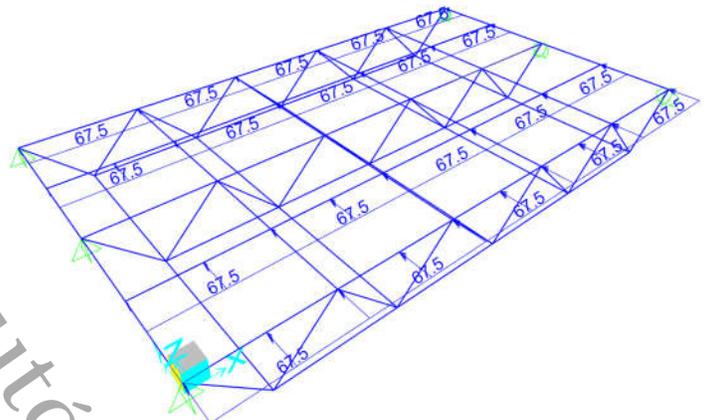
10m y no tiene un claro mayor a 50 m, además que como se mencionó en el párrafo anterior la relación de aspecto no excede 30.

La carga por viento según el método simplificado será de 375 kg/m<sup>2</sup> para armaduras, así mismo se indica que la fuerza del viento no será menor que 450 kg/m en el plano de la cuerda de barlovento (Figura 38). En este caso rige una carga de 450 kg/m. Así mismo se considera una carga de viento actuando en la carga viva donde se añade una carga de 150 kg/m actuando horizontalmente a noventa grados respecto al eje longitudinal de la estructura y a una altura de 1.8 m sobre la rasante (Figura 39).



\*Fuerzas en kg-m.

Figura 38. Asignación de cargas de viento ( $V_E$ ).

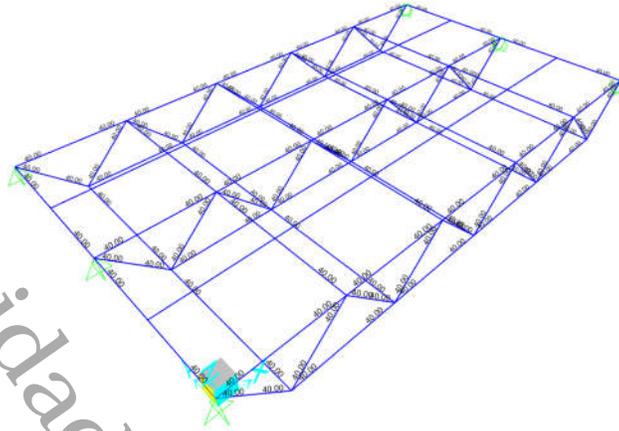


\*Fuerzas en kg-m/m.

Figura 39. Asignación de cargas de viento sobre carga viva ( $V_{cv}$ ).

- **Cargas por temperatura.**

La carga por temperatura se tomó en cuenta en el programa CSI Bridge para cada elemento de la estructura tomando una temperatura máxima de 40°C (Figura 40).



\*Unidades en grados.

Figura 40. Asignación de cargas de viento ( $V_E$ ).

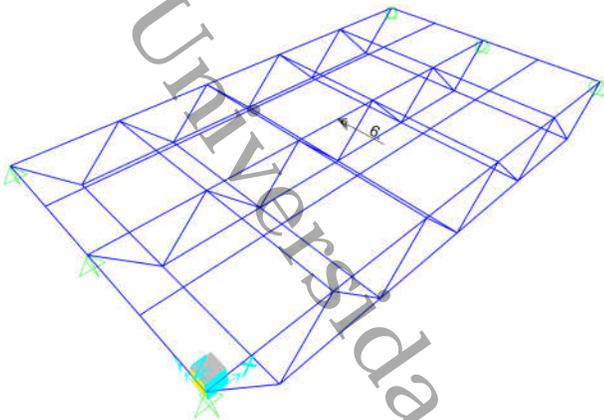
- **Cargas por frenaje.**

La carga de frenado de los vehículos se tomará como una fuerza en horizontal actuando en sentido longitudinal de la estructura, la cual se aplica a 1.8m de altura sobre la rasante. El valor de la carga de frenado será de 5% de la carga viva vehicular actuando sobre todos los carriles con el tránsito en la misma dirección, sin incluir fuerzas de impacto y de fuerza centrífuga, pero aplicando los factores de reducción (SICT, 2001a).

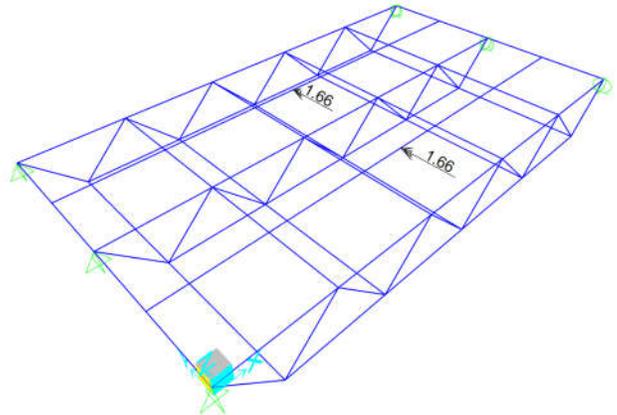
En la Tabla 5 se presenta el resumen de cálculo de la fuerza por frenado aplicado como un momento a la estructura. En la Figura 41 y Figura 42 se muestra la asignación de dichas cargas al modelo.

Tabla 5. Fuerzas de frenaje aplicado como un momento.

Vehículo	Peso (t)	% F. F.	F. red.	Alt. (m)	M.A. (t-m)
IMT 66.5	66.5	5%	1	1.8	5.99
IMT 20.5	20.5	5%	0.9	1.8	1.66



\*Fuerza de frenaje en t-m.  
Figura 41. Fuerza de frenaje 1 carril.



\*Fuerza de frenaje en t-m.  
Figura 42. Fuerza de frenaje 2 carriles.

### 11.1.4.3. Casos de carga estudiados.

De lo expuesto en el punto 2.5 de este trabajo, se evaluó la respuesta del puente combinando las acciones mencionadas en los apartados anteriores; para esto se tomó como referencia la metodología LRFD y los factores de carga y resistencia mostrados en la Tabla 1. En total se evaluaron siete grupos de carga y un grupo adicional para evaluar la condición de servicio de la estructura. En la siguiente figura se muestra la combinación de cargas introducidas al software estructural.

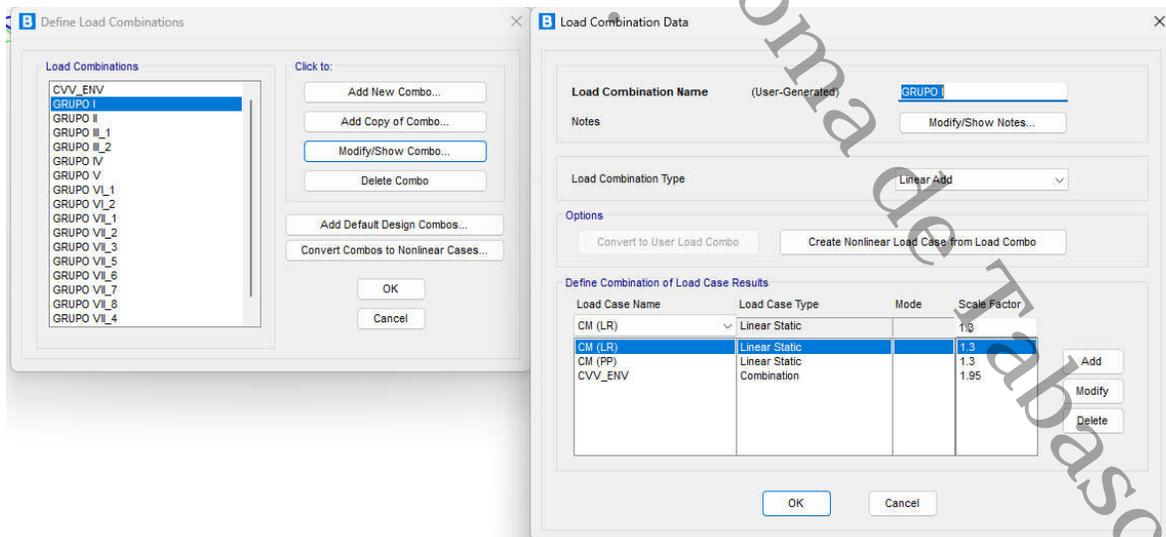


Figura 43. Combinaciones de cargas.

#### 11.1.4.4. Diseño estructural de la tipología.

El diseño de estructural de los miembros de la estructura se realizó con ayuda del programa CSIBridge (Computers and Structures, 2023) y conforme a la especificación para construcciones de acero (Specification for Structural Steel Buildings, 2016, en inglés) de la AISC (American Institute of Steel Construction, en inglés). Conforme a esta especificación se revisa la relación de demanda capacidad (D/C) de los elementos a diseñar. En esta relación se revisa la interacción entre la demanda de miembros con doble simetría sometidos a flexión y compresión. Se requiere que la relación de cargas a compresión y momento sea menor que uno.

A continuación, se muestra de manera gráfica los resultados obtenidos para la relación de demanda/capacidad de los distintos elementos del puente.

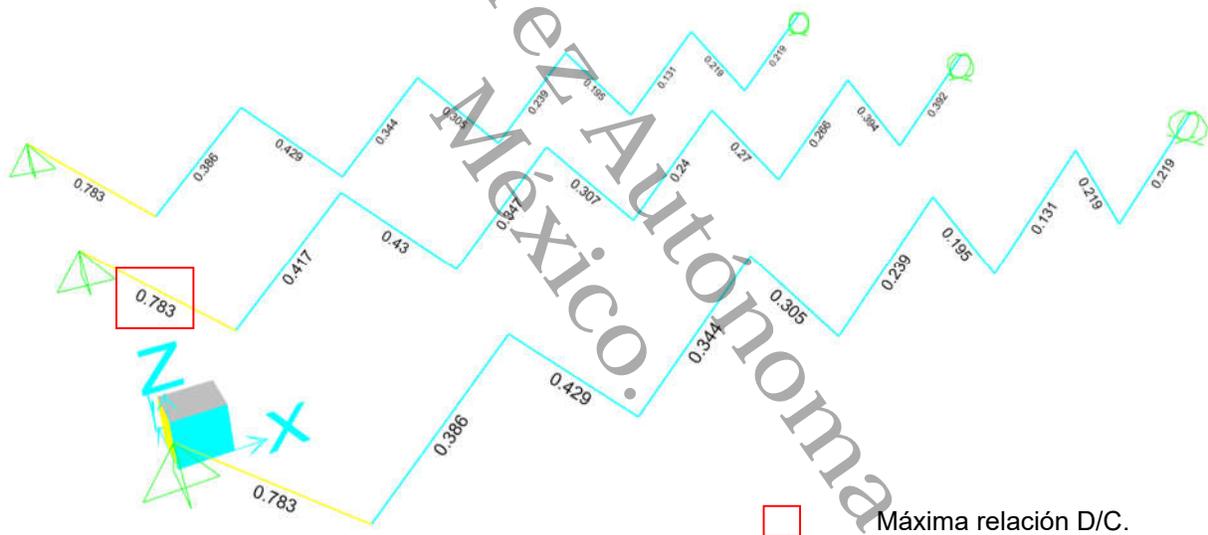
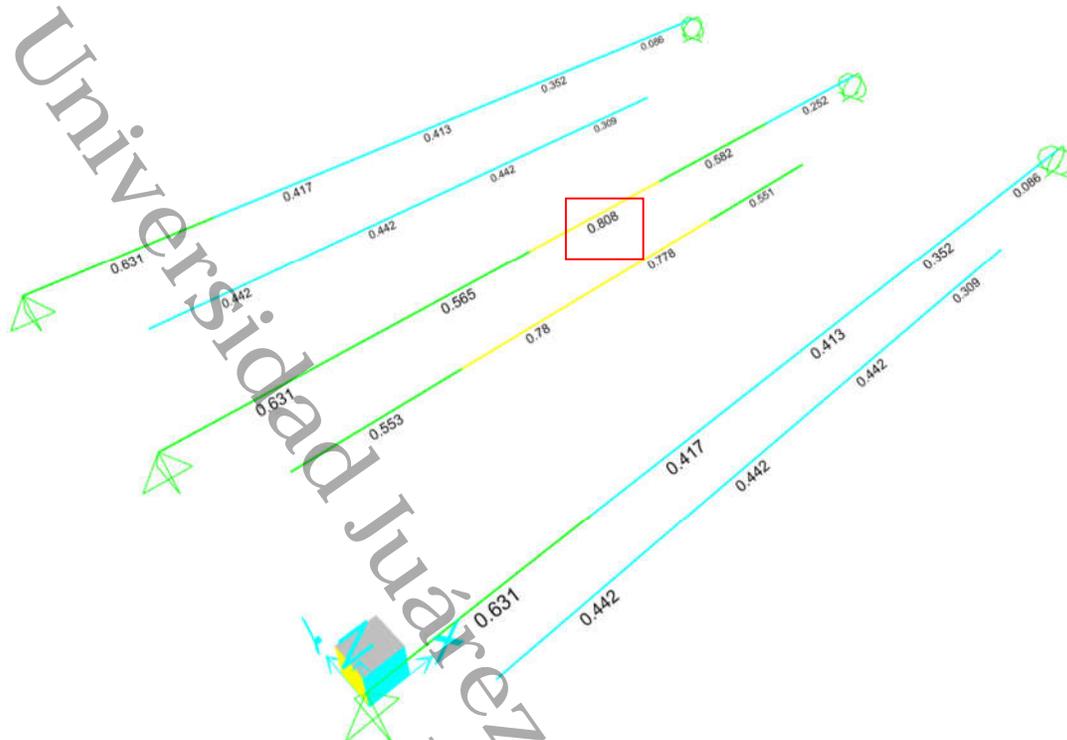
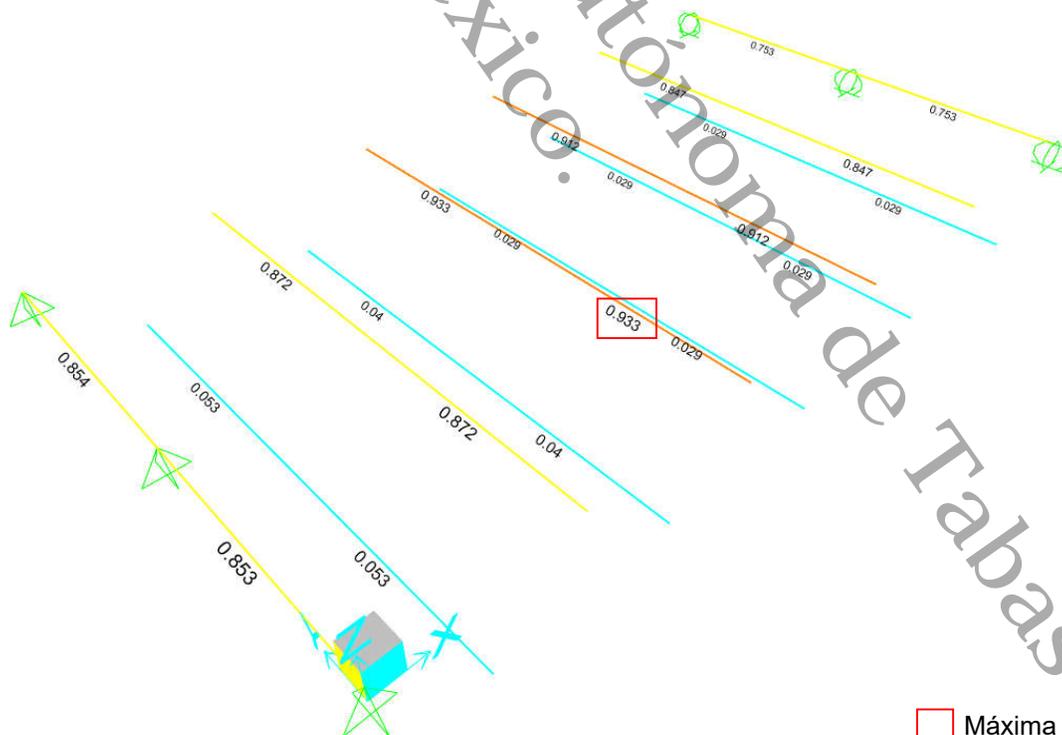


Figura 44. Relación de demanda/capacidad (D/C) de elementos de armadura (diagonales).



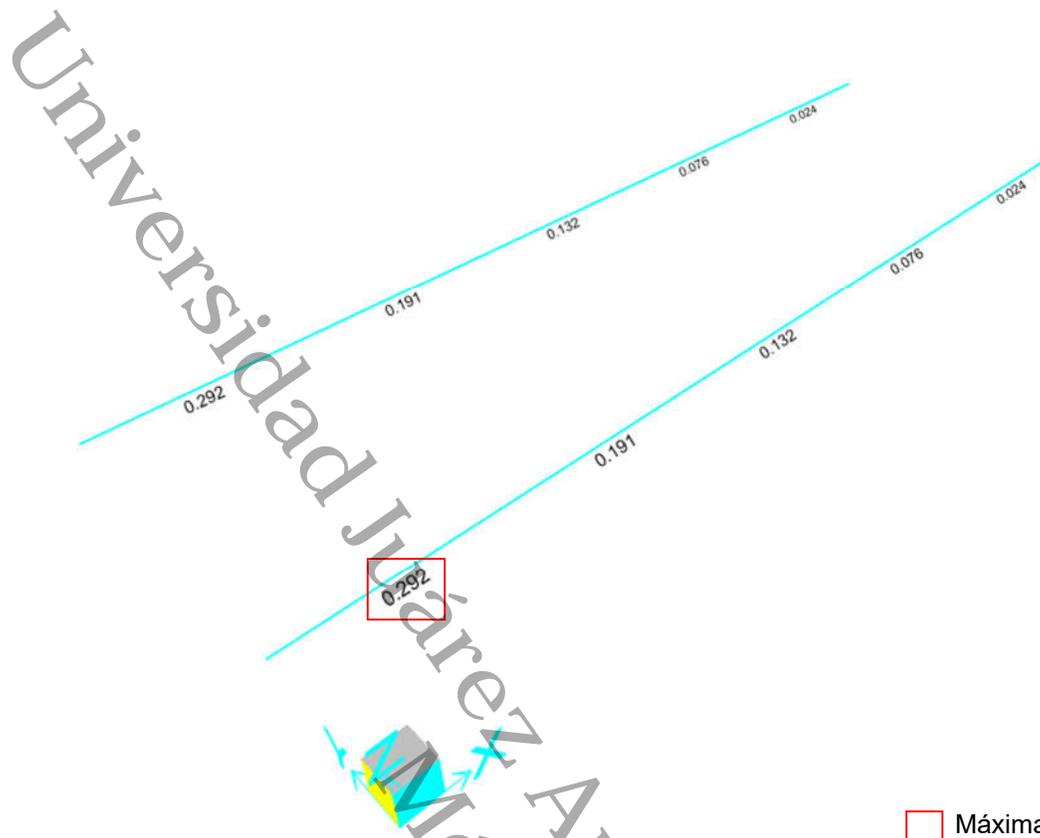
□ Máxima relación D/C.

Figura 45. Relación de demanda/capacidad (D/C) de elementos de armadura (cuerda superior e inferior).



□ Máxima relación D/C.

Figura 46. Relación de demanda/capacidad (D/C) de vigas transversales.



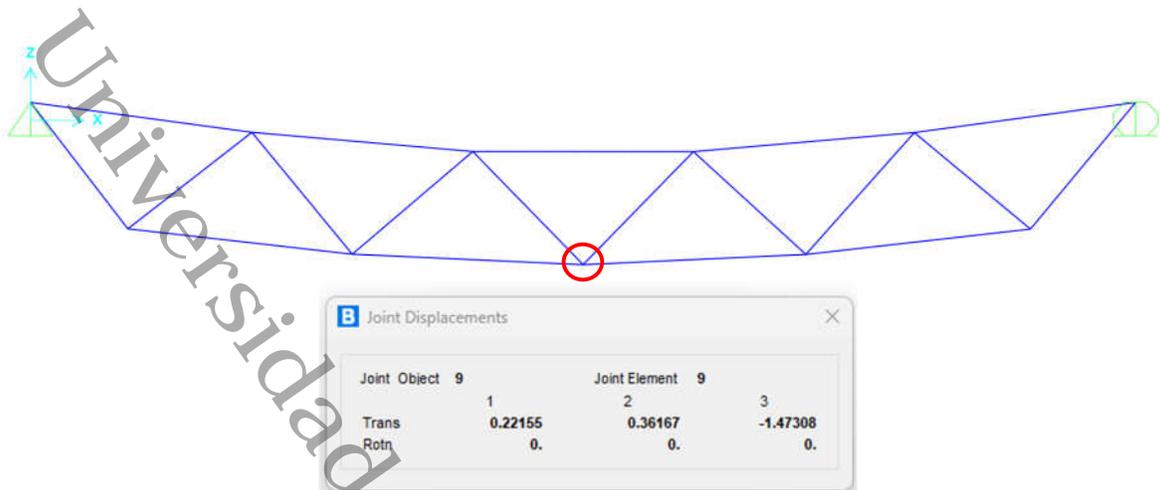
□ Máxima relación D/C.

Figura 47. Relación de demanda/capacidad (D/C) de vigas longitudinales.

Conforme se puede apreciar en las figuras anteriores, se obtienen valores de relación de demanda/capacidad menor que uno, lo que indica que los elementos cumplen con la resistencia requerida.

#### 11.1.4.5. Revisión de desplazamientos verticales.

El estado límite de servicio se revisó para un grupo de cargas en su condición de servicio. De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis estructural se obtuvo el siguiente desplazamiento máximo absoluto para la estructura del puente en la armadura central.



Desplazamiento en cm.

Figura 48. Desplazamiento máximo vertical.

De acuerdo con el manual de la AASHTO se tiene que para puentes se admite una deflexión máxima del claro (L) entre 800 (L/800), por lo que se tiene para el claro del puente una longitud de 12m, un desplazamiento vertical máximo permisible  $\Delta_{perm} = 12 \times 100 / 800 = 1.5 \text{ cm}$ .

Entonces se tiene que;  $\Delta_{perm} = 1.5 \text{ cm} > \Delta_{cal} = 1.47 \text{ cm}$

Con lo anterior se puede observar que el desplazamiento permisible es mayor que el desplazamiento calculado, por lo que se concluye que los desplazamientos están dentro de los límites que recomienda la especificación.

#### 11.1.5. Dimensionamiento de miembros de la armadura.

Una vez concluido el diseño estructural de los miembros estructurales del puente modulado, se seleccionan el elemento más esforzado de acuerdo con la relación demanda/capacidad (D/C) para predimensionar las piezas que conformaran las armaduras del puente modulado, en este caso, en la Figura 45 se muestra que el miembro más esforzado corresponde a la cuerda superior de la armadura central con una relación D/C = 0.808 correspondientes a un perfil OC 273mmx9.5mm. Las características físicas y geométricas del perfil son las siguientes, área,  $a = 73.5 \text{ cm}^2$  y momento de inercia,  $I = 6410 \text{ cm}^4$ .

Con las características anteriores, se buscó una sección equivalente que cumpliera con las propiedades geométricas de la sección comercial analizada.

La geometría propuesta pretende ser un elemento de fácil ensamble durante la instalación del puente modular, puesto que los agujeros servirán para ensamblar la conexión de la armadura. Este concepto se puede comprobar con el kit de experimento “Structural engineering. Bridges and Skycrapers” donde intuitivamente es posible formar múltiples geometrías a partir de piezas estándar y conexiones (Figura 49 y Figura 50).

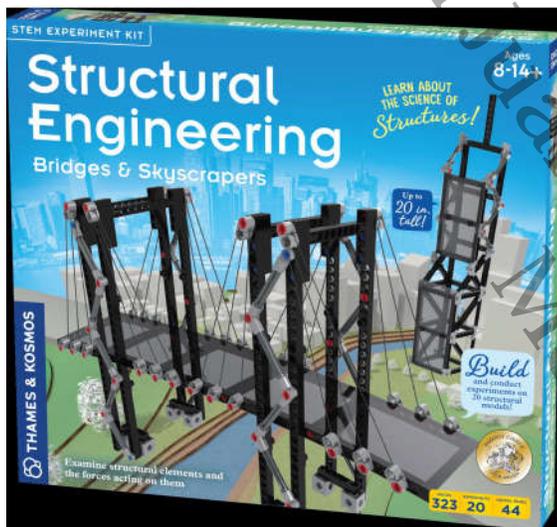


Figura 49. Sección equivalente. Cuerda superior e inferior.



Figura 50. Sección equivalente. Diagonal.

Para las piezas equivalente se propone emplear elementos de acero de sección cuadrada de 20x20 cm y agujeros de 15cm de diámetro espaciados en toda su longitud (Figura 51 y Figura 52).

Para el dimensionamiento de las piezas equivalente se calcularon sus propiedades físicas para la zona más crítica de la pieza, es decir, la zona donde se tienen los agujeros, de esta manera que se tiene:

Área de la sección sólida.

$$a_{sólida} = 20\text{cm} \times 20\text{cm} = 400\text{cm}^2$$

Área del agujero.

$$a_{\text{agujero}} = 20\text{cm} \times 15\text{cm} = 300\text{cm}^2$$

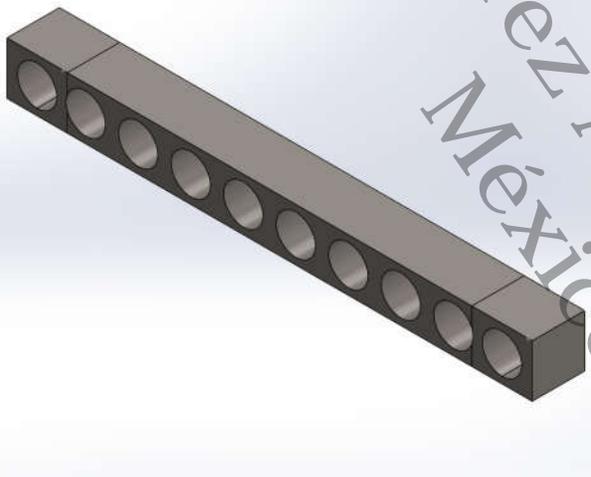
Área neta.

$$a_{\text{neta}} = a_{\text{solida}} - a_{\text{agujero}} = 400 - 200 = 100\text{cm}^2$$

Momento de inercia efectivo.

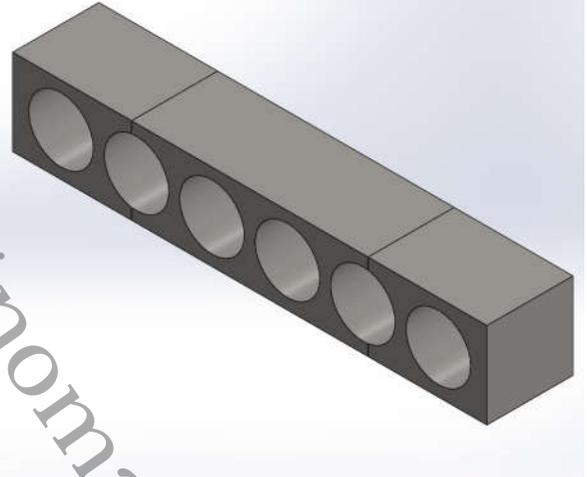
$$I = I_g - I_{\text{agu}} = \frac{20 * 20^3}{12} - \frac{20 * 15^3}{12} = 7708.33\text{cm}^4$$

Como puede observarse el área y momento de inercia de la sección equivalente es superior a las propiedades físicas de la sección propuesta y diseñada.



\*isométrico

Figura 51. Sección equivalente. Cuerda superior e inferior.



\*isométrico

Figura 52. Sección equivalente. Diagonal.

## 12. RESULTADOS.

### 12.1. Diseño por el método de elementos finitos (MEF).

Las secciones equivalentes mostradas en la Figura 51 y Figura 52 fueron diseñados a través del software Solidworks (Dassault Systèmes, 2022). Este programa es un software CAD 2D y 3D ampliamente usado para diseño mecánico, donde a partir de croquis en 2D se extruyen las geometrías para formar volúmenes que den forma a las piezas, además, es posible validar las piezas a través de los

diferentes tipos de análisis que pueden emplearse en el software (Análisis estáticos, de frecuencia, térmicos, pandeo, no lineal, dinámico lineal, recipientes a presión, etc.) a través del método de elementos finitos (MEF) la cual es una técnica numérica empleada para resolver problemas complejos.

### 12.1.1. Diseño de cuerda superior, inferior y diagonales.

Las fuerzas de diseño de los elementos de la armadura fueron tomadas del análisis estructural de la tipología estudiada presentada en la sección anterior, donde se tomaron las fuerzas máximas de tensión y compresión que actúan en la cuerda superior, inferior y diagonales. La magnitud de estas fuerzas se muestra de la Figura 53 a la Figura 56.

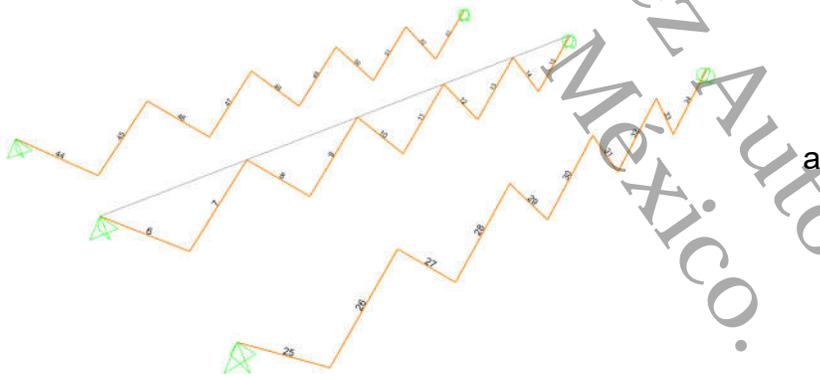


Figura 53. Vista en isométrico de diagonales.

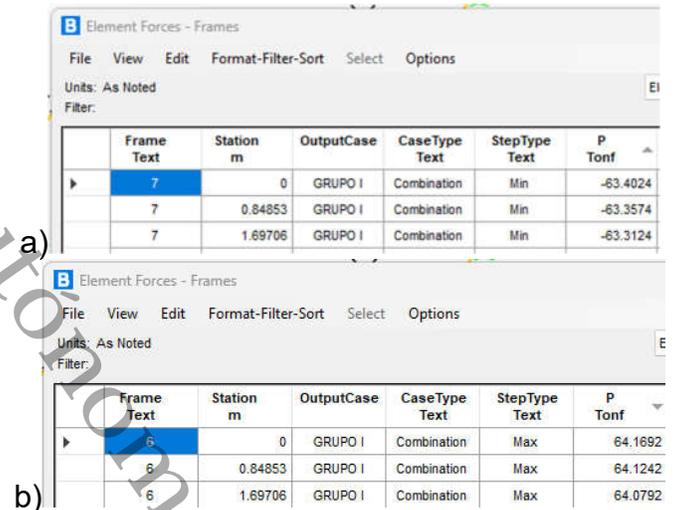
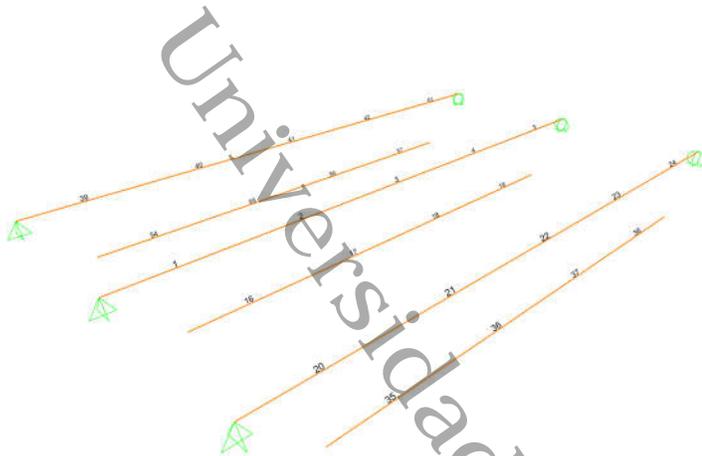


Figura 54. Máximas solicitaciones en diagonales.

a) Compresión, b) Tensión



a)

Frame Text	Station m	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	P Tonf
3	0	GRUPO I	Combination	Min	-106.0914
3	0.4	GRUPO I	Combination	Min	-106.0914
3	0.8	GRUPO I	Combination	Min	-106.0914

b)

Frame Text	Station m	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	P Tonf
17	0	GRUPO I	Combination	Max	126.4131
17	0.48	GRUPO I	Combination	Max	126.4131
17	0.96	GRUPO I	Combination	Max	126.4131

Figura 55. Vista en isométrico de cuerda superior e inferior.

Figura 56. Máximas solicitaciones en cuerda superior e inferior.

a) Compresión, b) Tensión.

### Definición de características de los materiales.

Para el análisis de las piezas propuestas de los miembros de la armadura se propuso emplear material ASTM A552 Gr.50, las características mecánicas de este material se muestran a continuación.

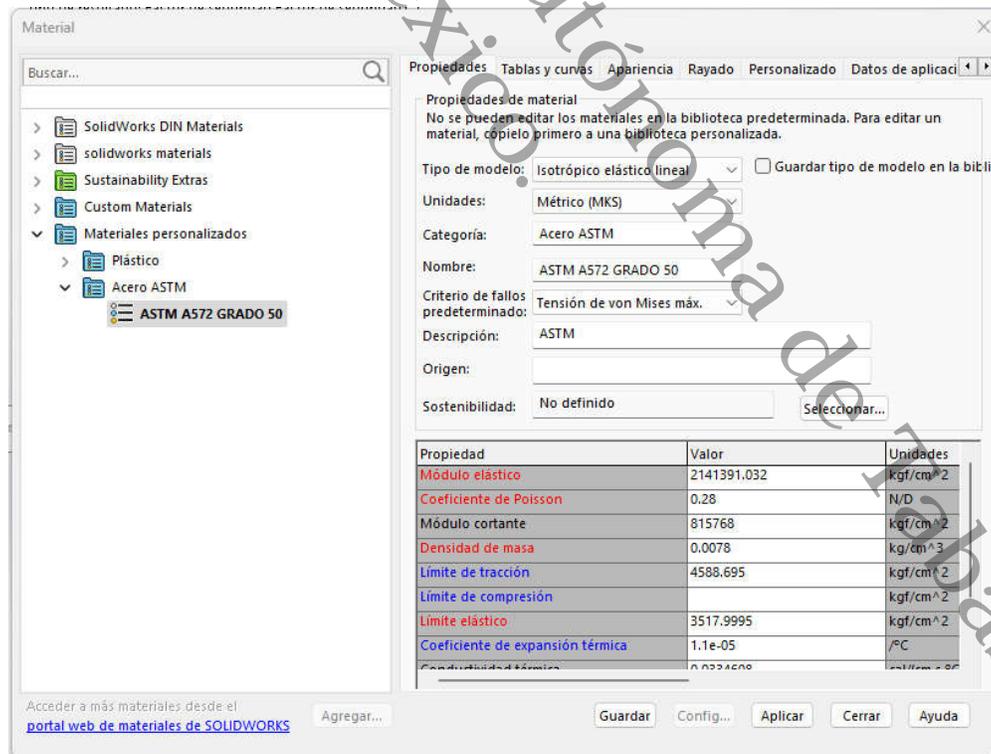


Figura 57. Características mecánicas de los materiales empleados (cuerdas y diagonales).

### Definición de condiciones de frontera.

Para definir las condiciones de frontera o de contacto de las piezas de análisis se tomó en cuenta que, estos elementos estarán restringidos lateralmente en los extremos de la conexión y la condición que ocurre con la dirección de la fuerza actuante, ya que según el tipo de fuerza (tensión o compresión), estará apoyada en uno u otro extremo de la conexión.

Para las restricciones laterales se aplicó una restricción a las caras de los extremos de la barra, en este tipo de apoyo se nulifican las traslaciones del elemento; por otra parte, para la condición que ocurre en el ensamble de la conexión se tomó en cuenta a través de una restricción tipo bisagra, la cual impide las traslaciones, pero permite la rotación sobre su propio eje. En la Figura 58 y Figura 59 se muestra la asignación de estas restricciones al modelo.

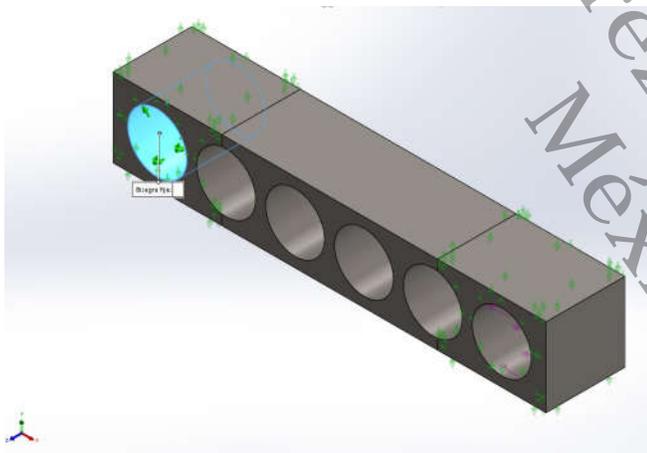


Figura 58. Condiciones de frontera o contorno.  
Diagonales.

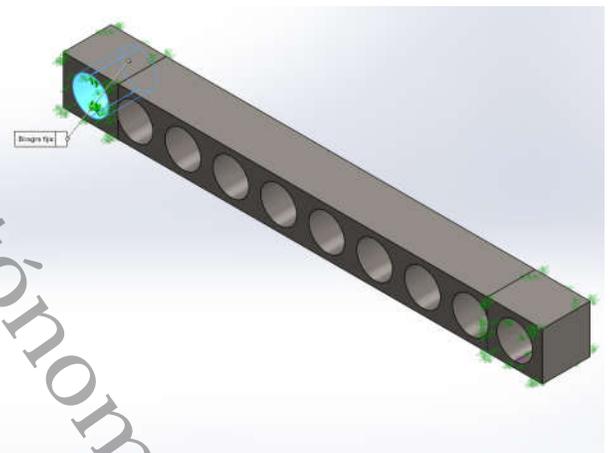


Figura 59. Condiciones de frontera o contorno.  
Cuerda superior e inferior.

### Definición de fuerzas en el elemento.

Las sollicitaciones de tensión o compresión se aplicaron al modelo a través de uno de los agujeros de la pieza, ya que se propone que las fuerzas serán transmitidas por la conexión hacia los elementos que conforman la armadura a través de sus partes en contacto. En la Figura 60 y Figura 61 se muestra la aplicación de las cargas a la pieza.

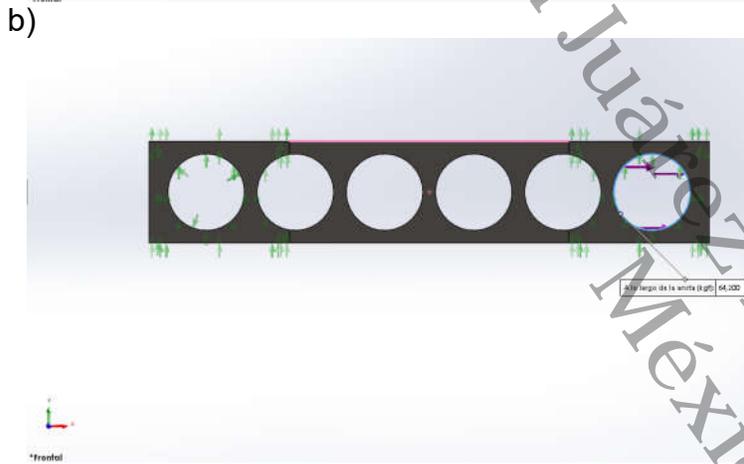
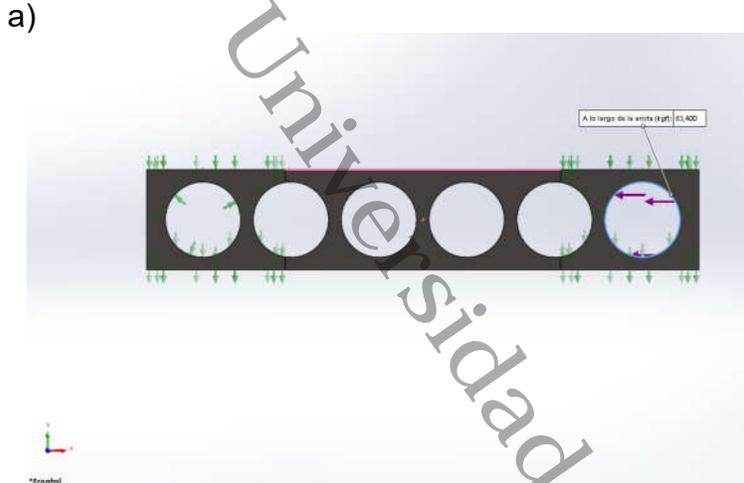


Figura 60. Asignación de fuerzas al modelo. Diagonales. a) Compresión, b) Tensión.

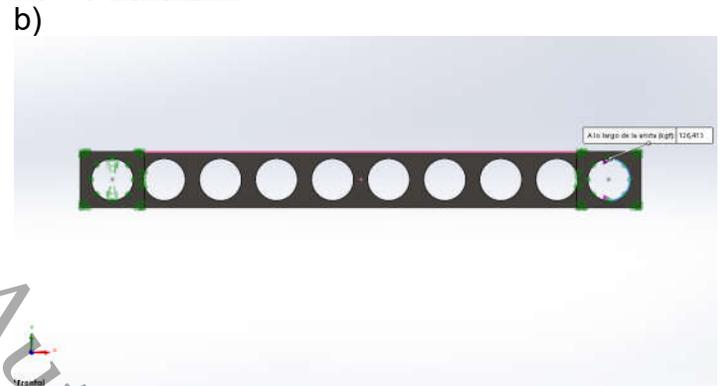
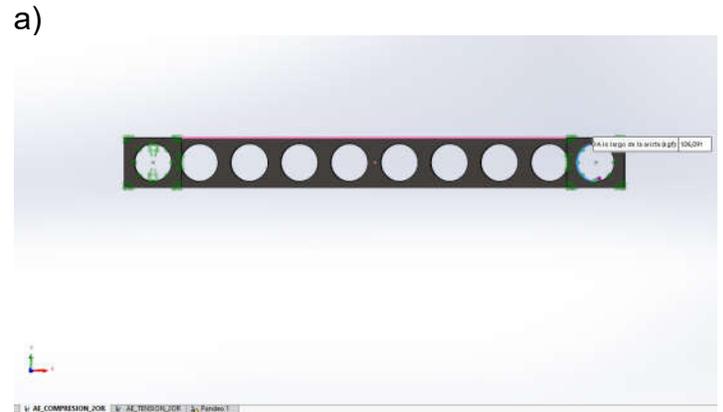


Figura 61. Asignación de fuerzas al modelo. Cuerda superior e inferior. a) Compresión, b) Tensión.

### Mallado

El proceso de mallado se realizó con la función de auto mallado del programa Solidworks (Dassault Systèmes, 2022), donde se emplearon elementos tetraédricos parabólicos llamados de segundo orden u orden superior, estos elementos tienen una mayor aproximación de resultados ya que se ajustan a contornos de piezas particulares, sin embargo, demandan mayor recurso computacional.

En la Figura 62 y Figura 63 se muestra el mallado de las piezas en estudio.

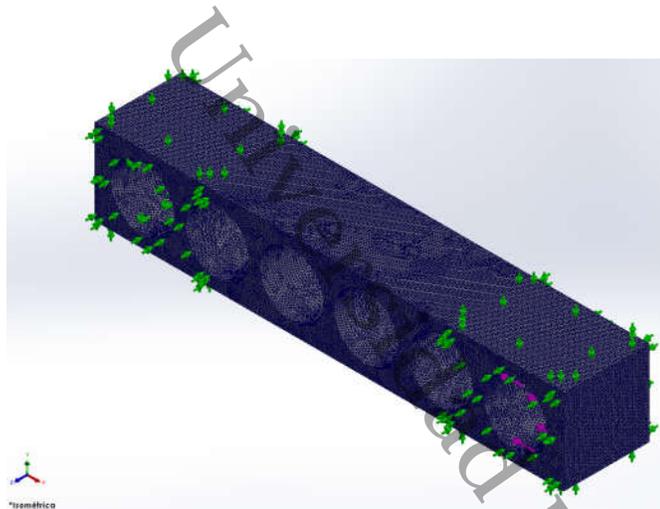


Figura 62. Mallado de diagonales.

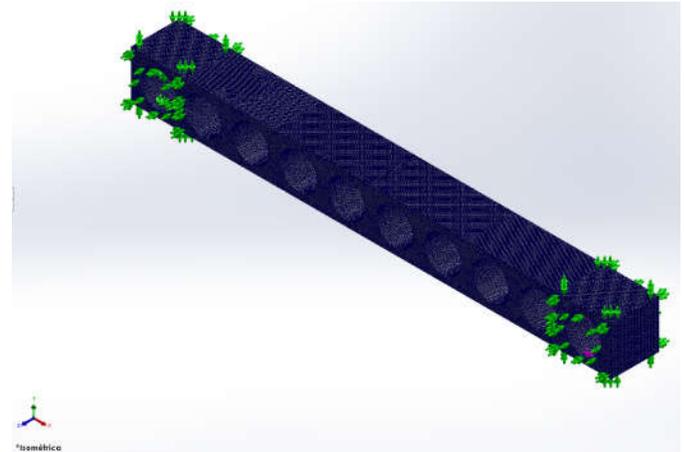


Figura 63. Mallado de cuerda superior e inferior.

### Resultados obtenidos.

Una vez introducidos todos los datos en el modelo computacional, se procedió a realizar un análisis estático lineal para conocer los esfuerzos y deformaciones a los que estarán sometidas las piezas producto de las cargas aplicadas.

Para definir la falla del material se usa el criterio de falla de Von Mises apropiado para materiales dúctiles como el acero; este criterio relaciona los esfuerzos que suceden en las tres direcciones de un elemento y queda definido como sigue.

$$\sigma_{von\ Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$

Donde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , son los esfuerzos principales.

Finalmente, la falla del material se estima en términos de un factor de seguridad que se define como el cociente entre el esfuerzo límite ( $\sigma_{limite}$ ), usualmente el esfuerzo de fluencia del material ( $\sigma_f$ ), y el esfuerzo de von Mises ( $\sigma_{von\ Mises}$ ), el cual se expresa como:

$$FS = \frac{\sigma_f}{\sigma_{von\ Mises}}$$

En las figuras siguientes se muestran los gráficos de distribución de esfuerzos (Figura 64 y Figura 65), gráficas de desplazamientos (Figura 66 a la Figura 69) y gráficas de factor de seguridad (Figura 70 y Figura 71).

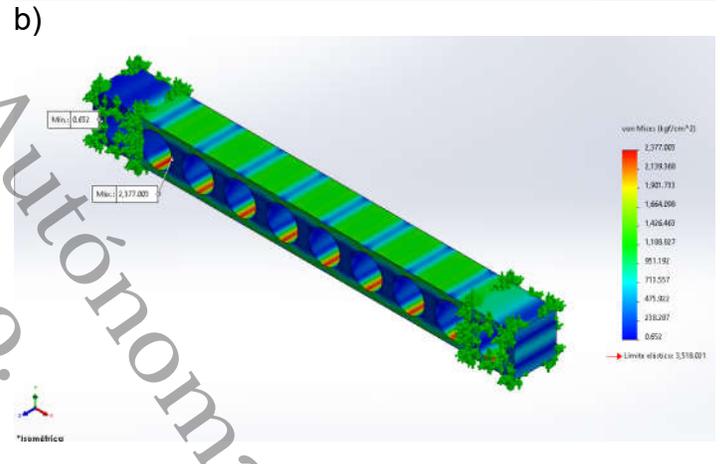
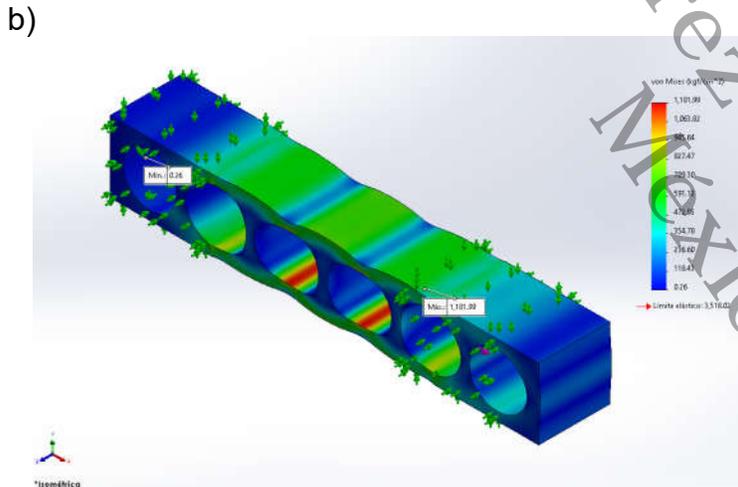
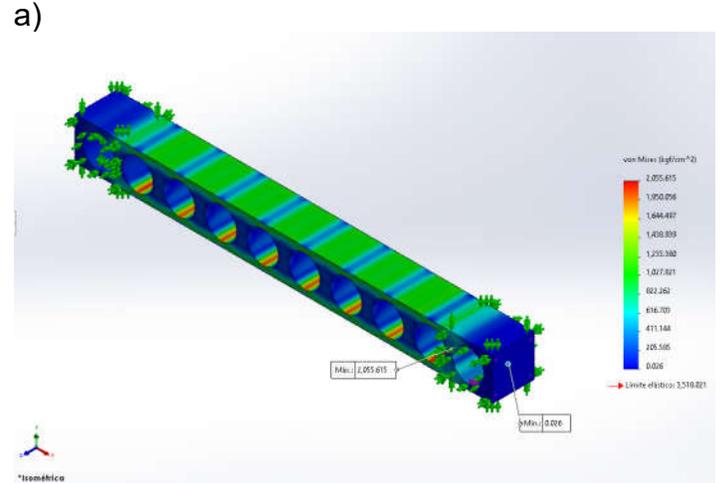
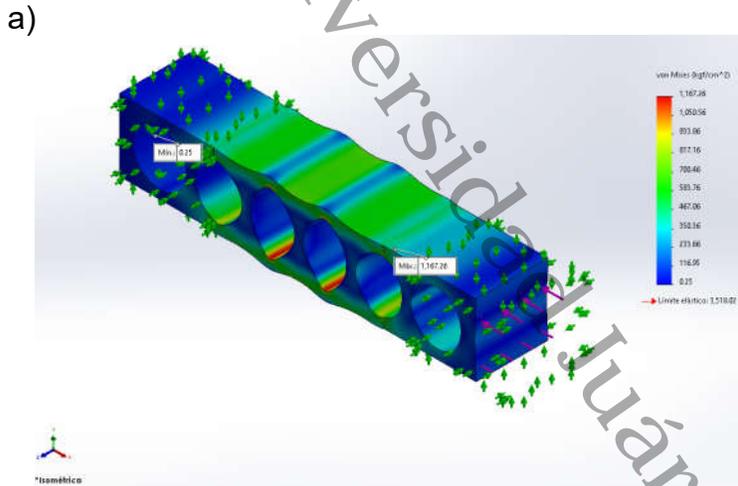
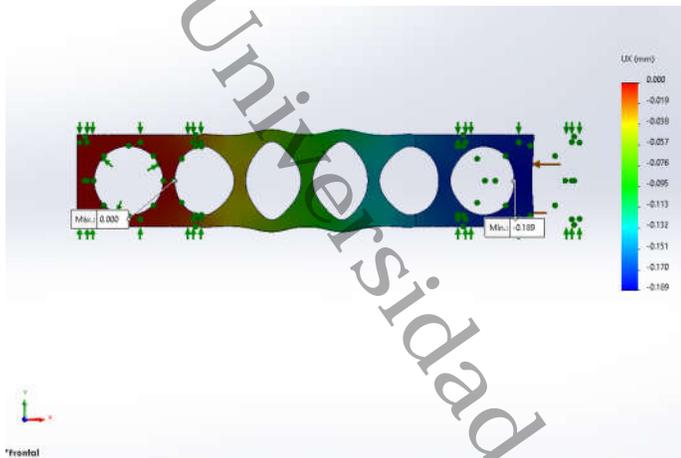


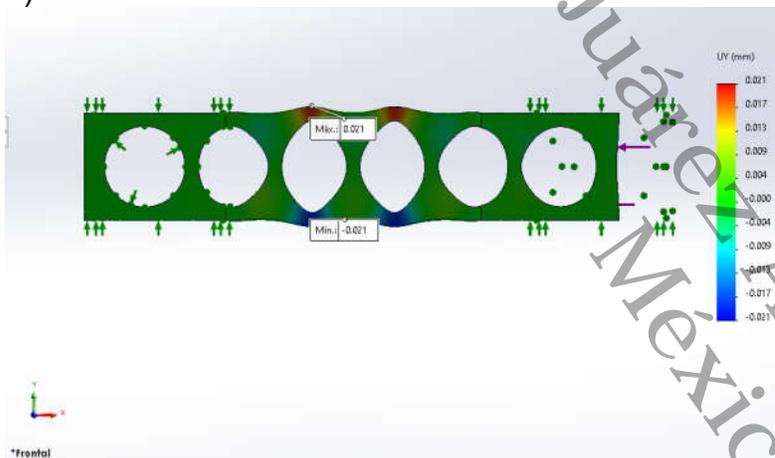
Figura 64. Esfuerzos de Von Mises en diagonales. a) Compresión, b) Tensión.

Figura 65. Esfuerzos de Von Mises en cuerda superior e inferior. a) Compresión, b) Tensión.

a)



b)



c)

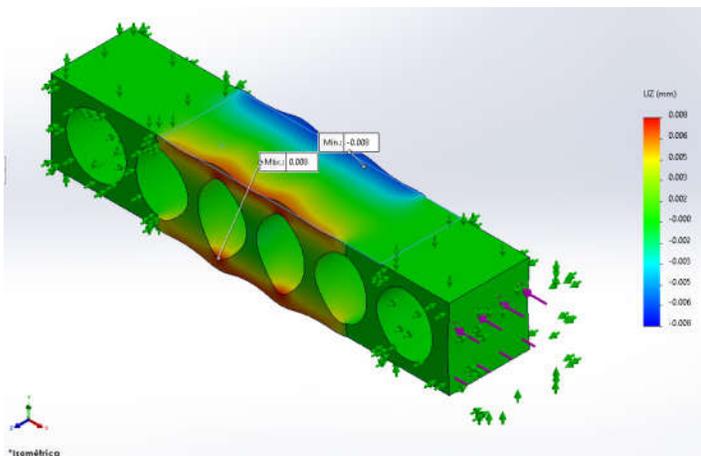
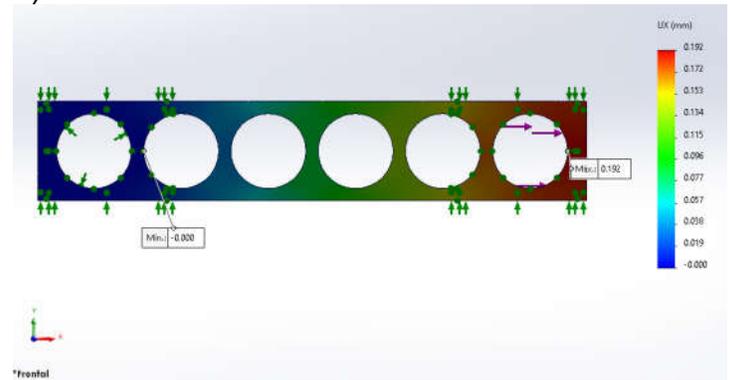
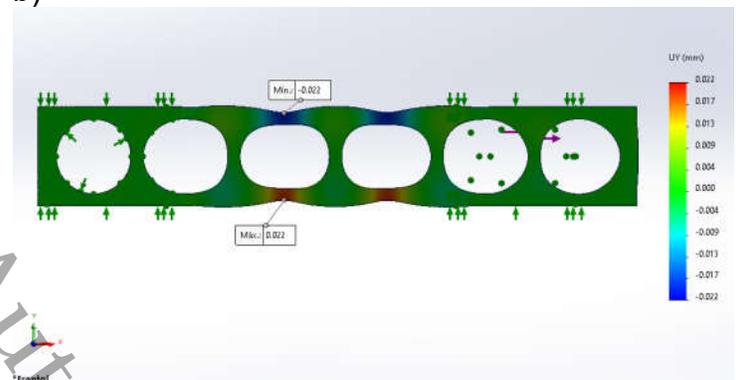


Figura 66. Desplazamientos en diagonales debido a fuerzas de compresión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm).

a)



b)



c)

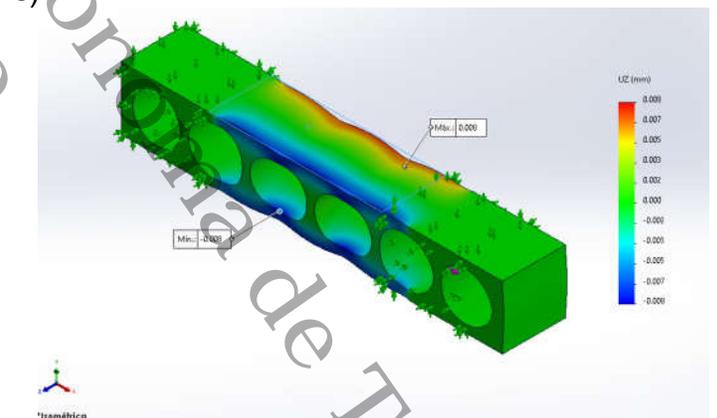


Figura 67. Desplazamientos en diagonales debido a fuerzas de tensión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm).

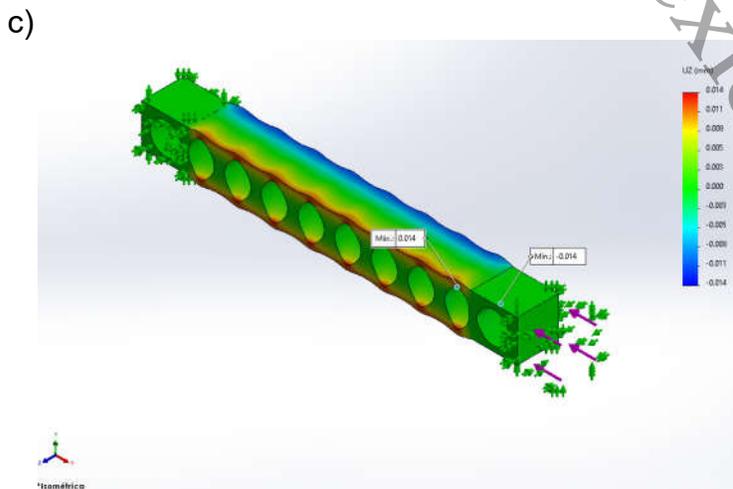
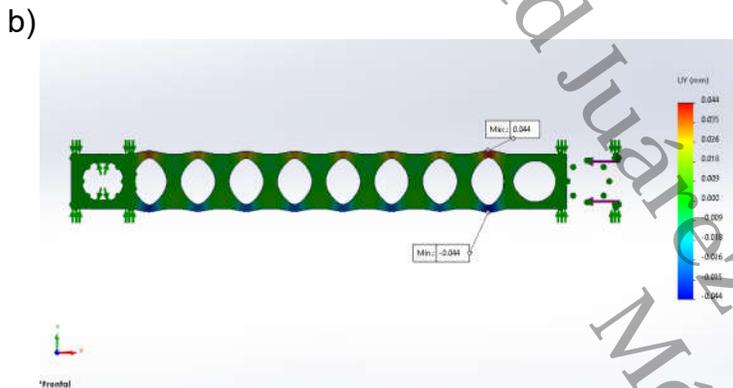
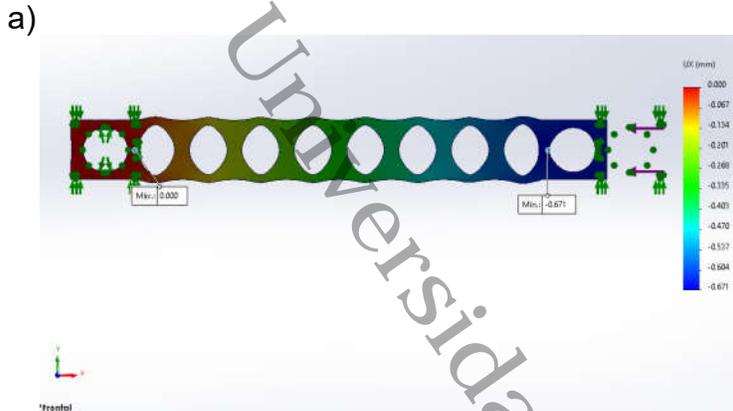


Figura 68. Desplazamientos en cuerda superior e inferior debido a fuerzas de compresión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm).

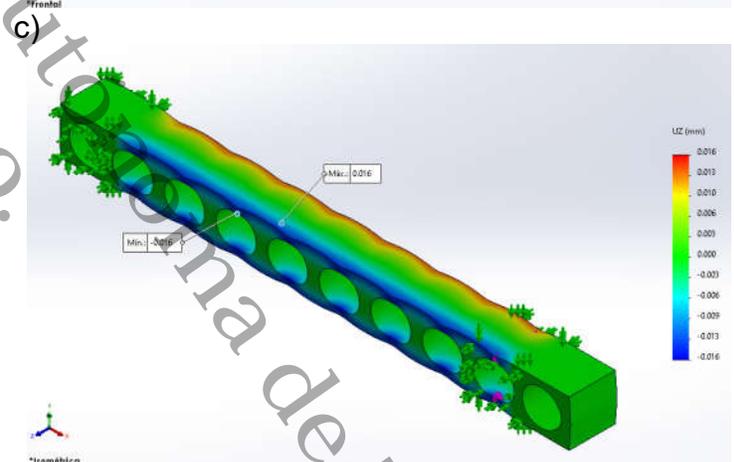
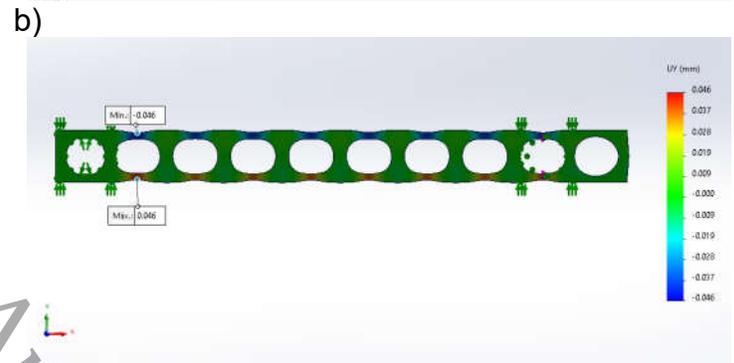
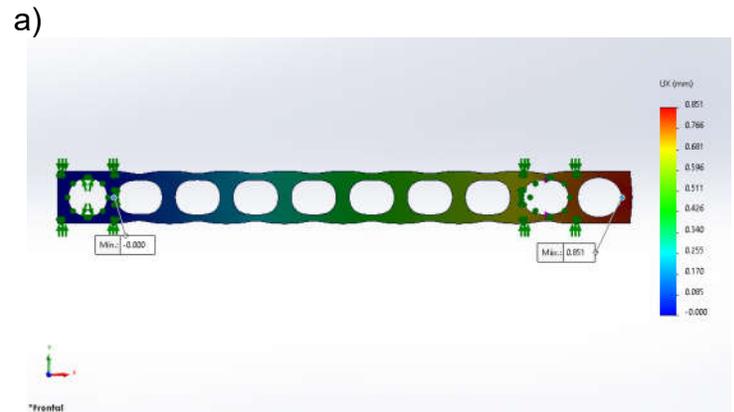


Figura 69. Desplazamientos en cuerda superior e inferior debido a fuerzas de tensión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm).

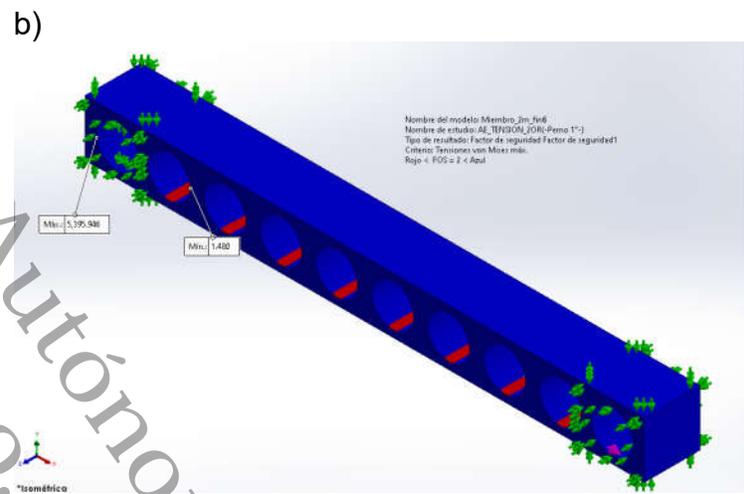
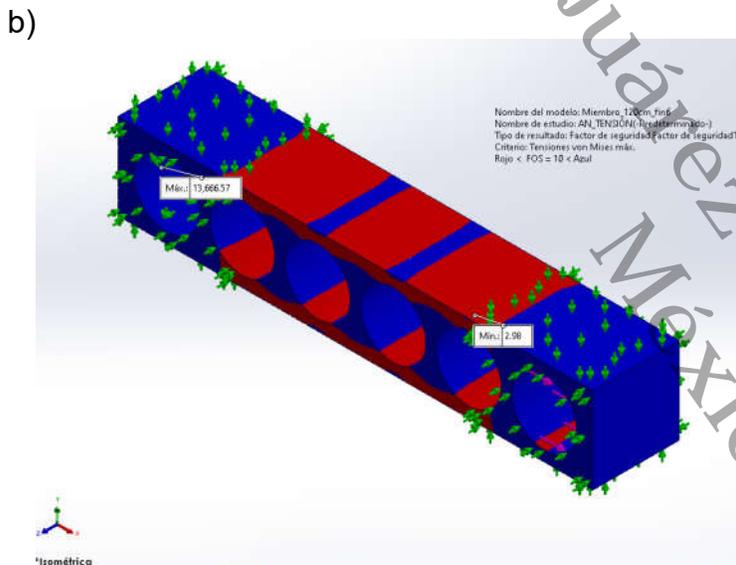
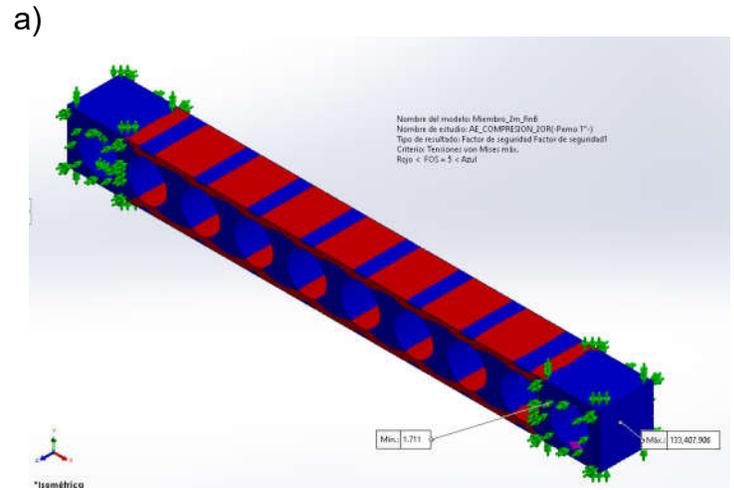
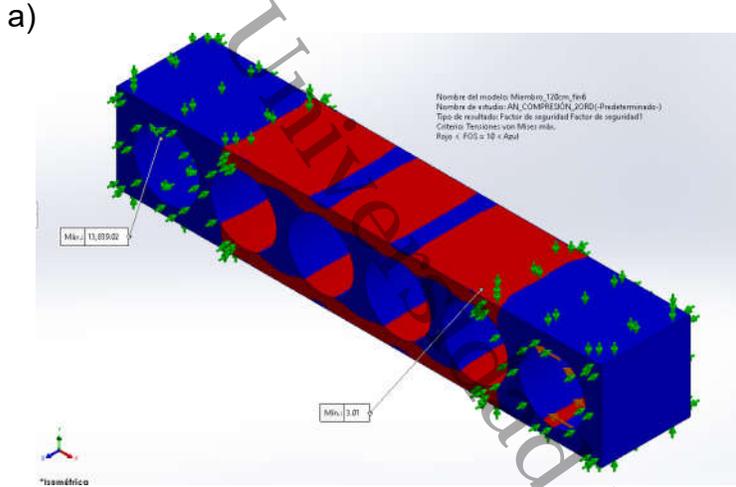


Figura 70. Mapa de factor de seguridad de diagonales. a) Compresión, b) Tensión.

Figura 71. Mapa de factor de seguridad de cuerda superior e inferior. a) Compresión, b) Tensión.

Como puede observarse ocurre una concentración de esfuerzos en las zonas centrales de los agujeros debido a los efectos de las solicitaciones a las que está sometida la pieza (tensión y compresión), sin embargo, estos esfuerzos que se presentan no rebasan el esfuerzo de fluencia de la pieza. Por otra parte, los desplazamientos de traslación en las tres direcciones ("X", "Y" y "Z") no son mayores a 1 mm para las dos condiciones de análisis (tensión y compresión) de los elementos estudiados, lo que indica que las deformaciones se encuentran dentro de valores tolerables para los objetivos de este estudio.

Así mismo en el mapa de factor de seguridad de las piezas se puede apreciar el factor de seguridad obtenido, el cual se resume en la tabla siguiente para los distintos elementos y condiciones de análisis.

Tabla 6. Factor de seguridad.

Elemento	Condición de análisis	
	Compresión	Tensión
Diagonal	3.01	2.98
Cuerda superior e inferior	1.71	1.48

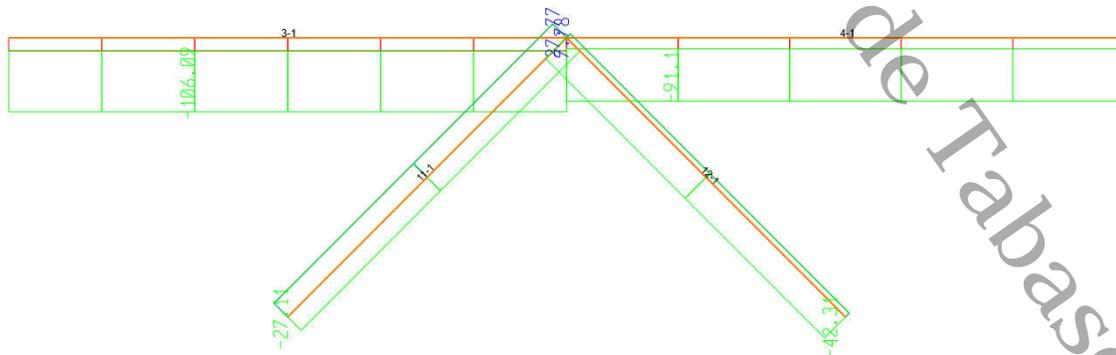
El factor de seguridad obtenido en los elementos indica que no se alcanza la fluencia del material, por lo que se considera adecuado para este estudio.

### 12.1.2. Diseño de conexión.

El diseño del tipo de conexión se realizó tomando en cuenta los siguientes aspectos: i) que esta conexión pudiera ensamblarse fácilmente en campo durante el procedimiento constructivo y ii) lograr un comportamiento de un nodo articulado para que el mecanismo de transferencias de cargas se realizará de acuerdo con el modelo analítico realizado.

El nodo de conexión se analizó para las fuerzas actuantes obtenidas del análisis estructural de la tipología estudiada en secciones anteriores. Estos elementos mecánicos fueron tomados a partir de las fuerzas de tensión y compresión de los elementos que a su vez son transmitidos a la conexión.

En la Figura 72 se muestra el nodo estudiado y las fuerzas que llegan a él.



\*Obtenidas de la combinación de carga I.

Figura 72. Fuerzas actuantes en nodo de estudio (unidades en t).

## Definición de características de los materiales.

La conexión estará constituida por acero ASTM A552 Gr. 50, cuyas características físicas y mecánicas se presentan a continuación.

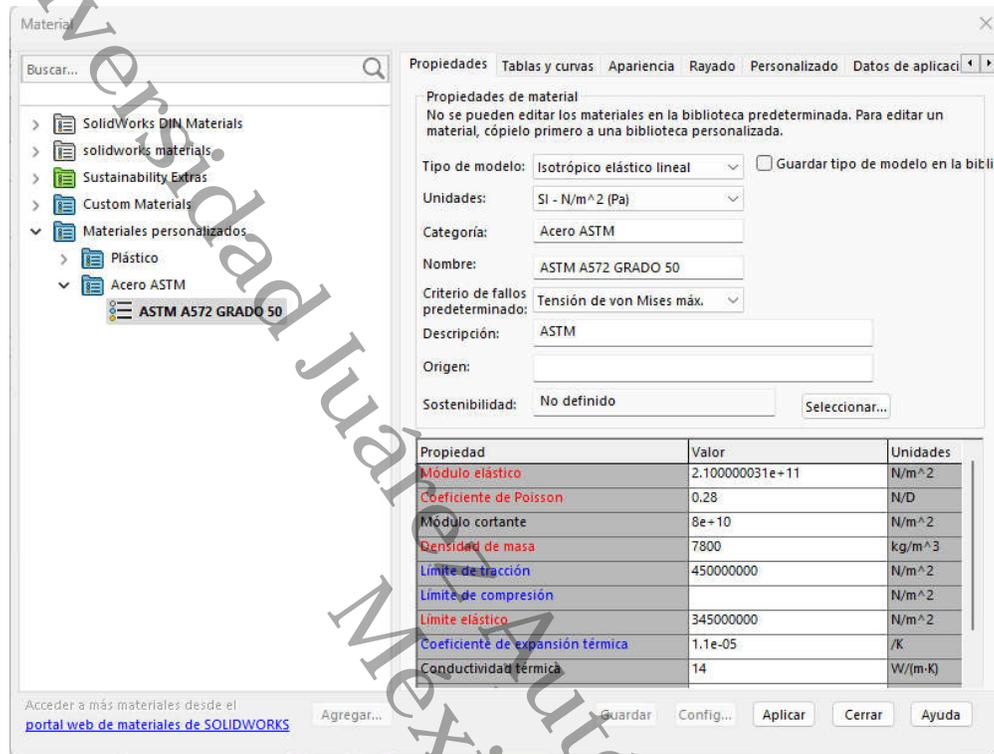


Figura 73. Características mecánicas de los materiales empleados (cuerdas y diagonales).

## Definición de condiciones de frontera.

Para la preparación del análisis del modelo matemático, se aplicaron restricciones en las caras laterales de la conexión y se asignaron pasadores en los orificios para restringir los desplazamientos fuera de su plano. Los pasadores permiten la rotación sobre su eje, pero restringen los desplazamientos a lo largo del mismo. En la Figura 74 y Figura 75 se muestran las condiciones de frontera impuestas al modelo analítico.

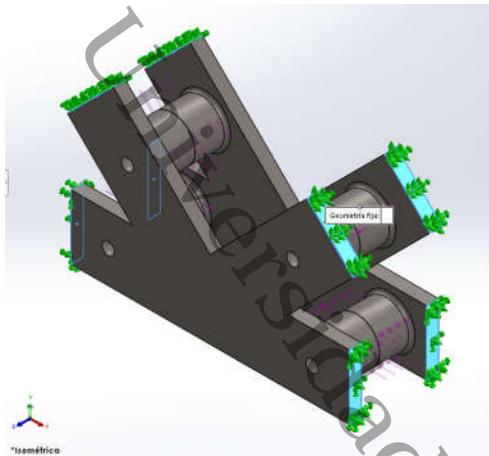


Figura 74. Asignación de restricción a conexión.

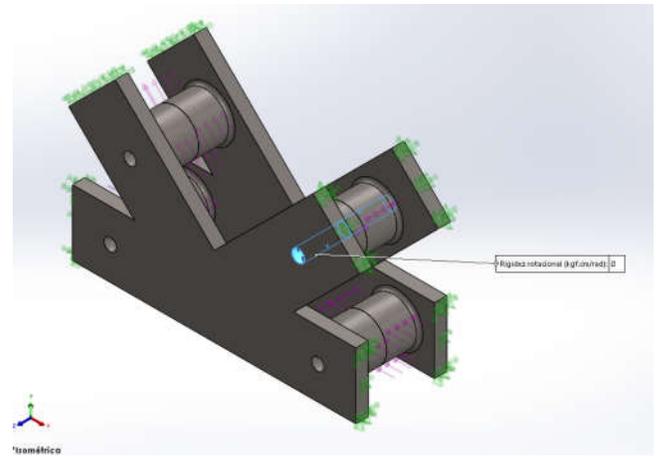


Figura 75. Asignación de conectores tipo pasador a conexión.

### Definición de fuerzas en el elemento.

Las fuerzas empleadas provenientes del análisis estructural de la tipología seleccionada son las que se muestran en la Figura 72. Estas fuerzas se asignaron al modelo analítico considerando que serán transmitidas a los cilindros de la conexión a través de los miembros de la armadura. En la Figura 76 y Figura 77 se muestra la introducción de las fuerzas al modelo de análisis.

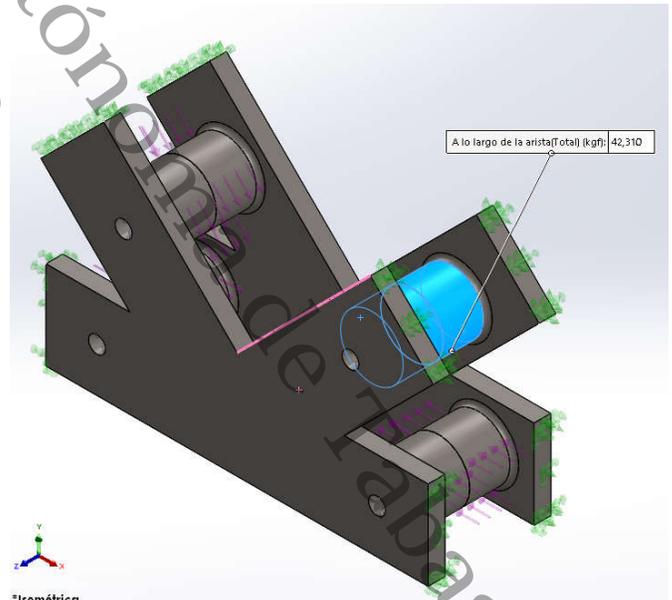
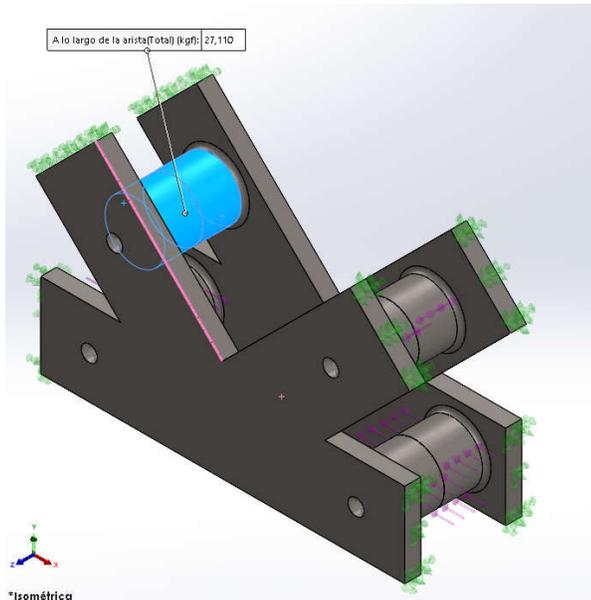


Figura 76. Asignación de fuerzas al modelo debido a diagonales.

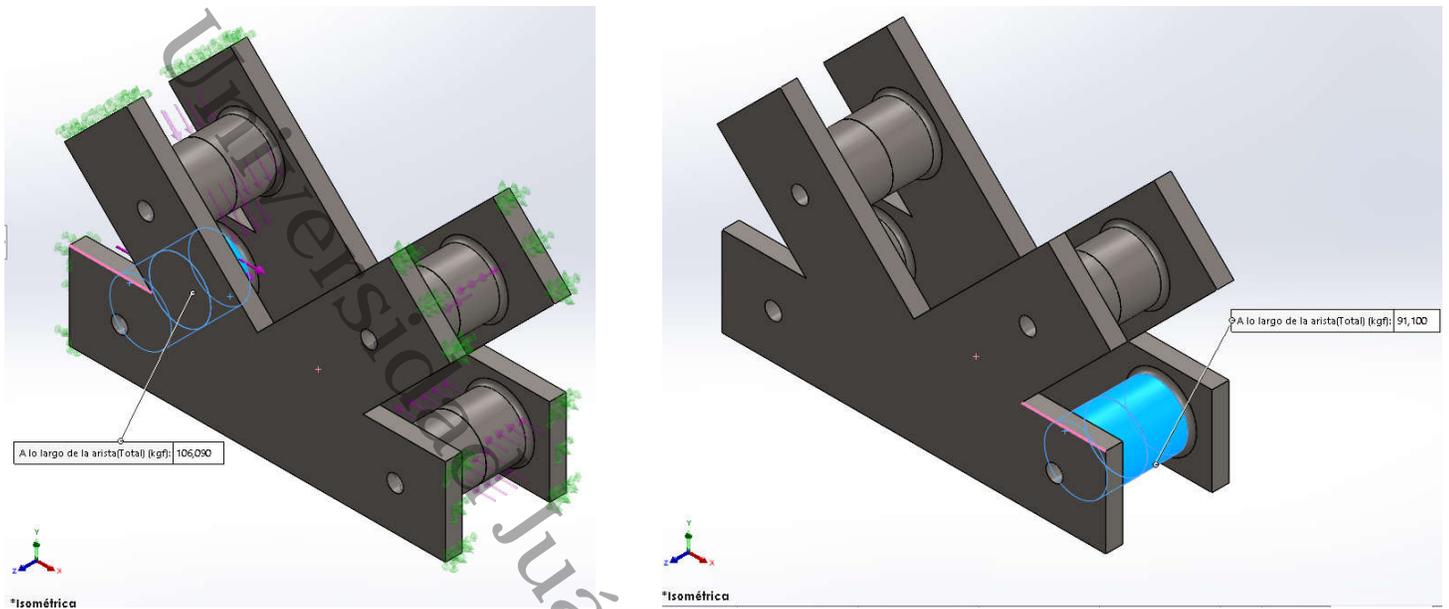


Figura 77. Asignación de fuerzas al modelo debido a cuerda superior.

### Mallado.

El mallado del elemento se realizó con la función de auto mallado del software utilizado, en Figura 78 se presenta una imagen de la pieza mallada.

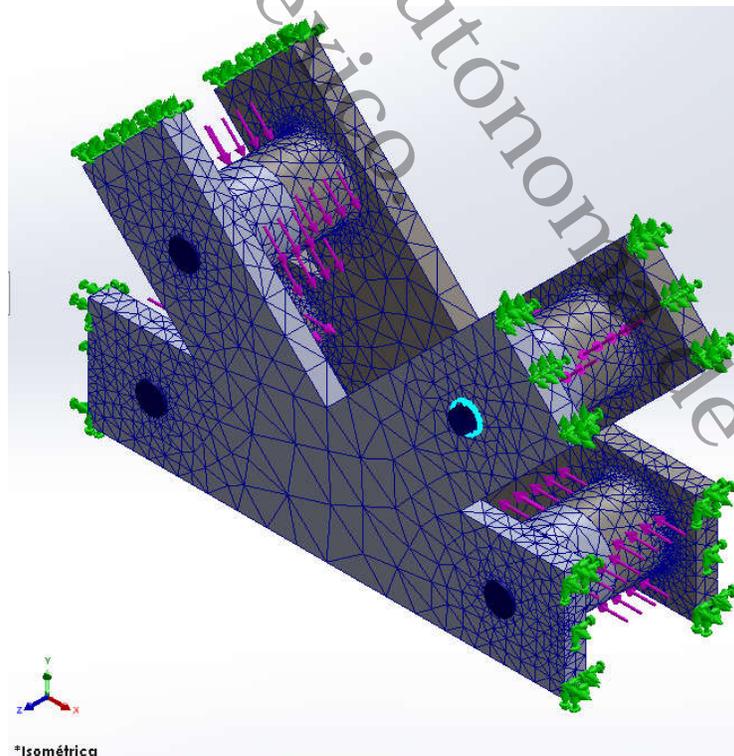


Figura 78. Mallado de conexión.

## Resultados obtenidos.

Una vez definidas todas las etapas de análisis, se realizó un análisis de estático lineal mediante el método de elementos finitos (MEF). En las figuras siguientes se muestran las gráficas de distribución de esfuerzos, desplazamientos y gráficas de factor de seguridad.

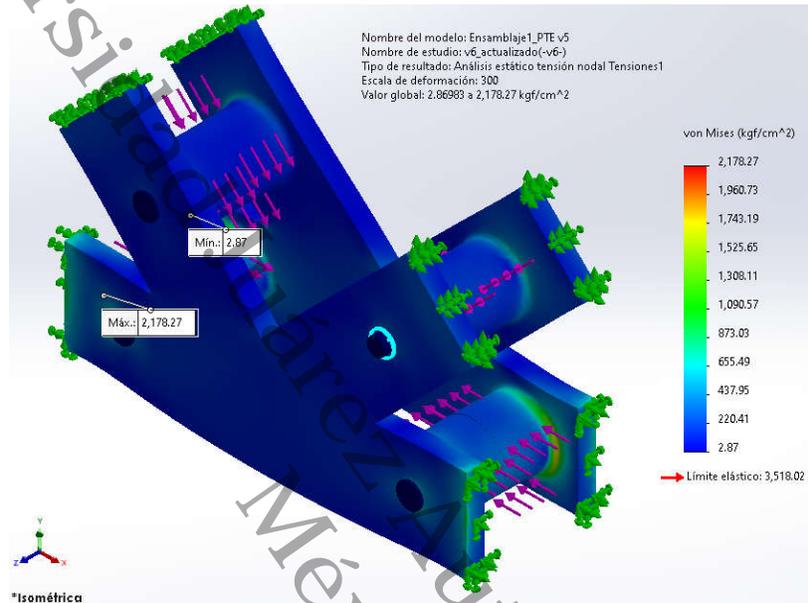
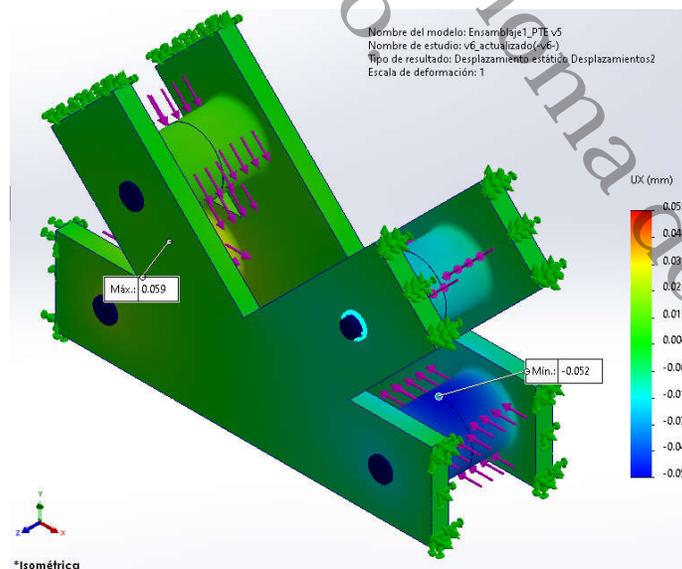
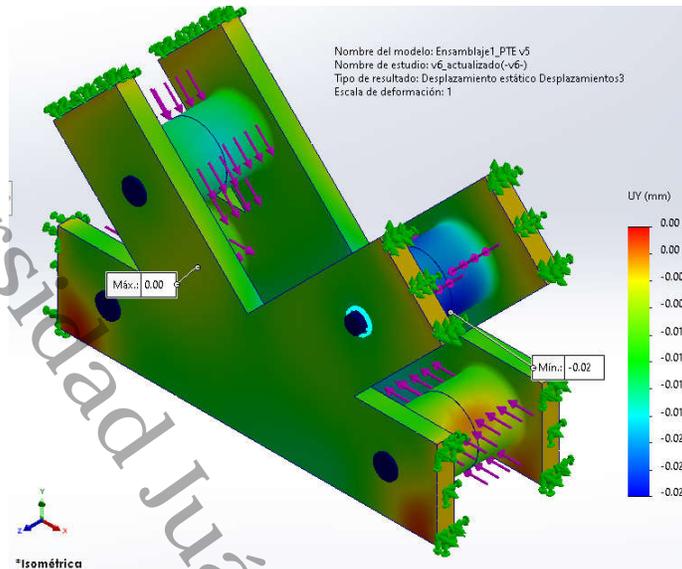


Figura 79. Esfuerzos de Von Mises.

a)



b)



c)

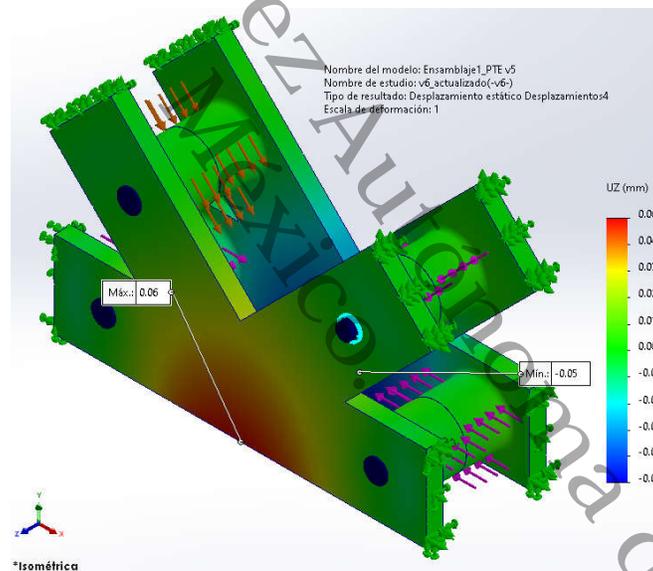


Figura 80. Desplazamientos de conexión. a) Eje X, b) Eje Y, c) Eje Z (unidades en mm).

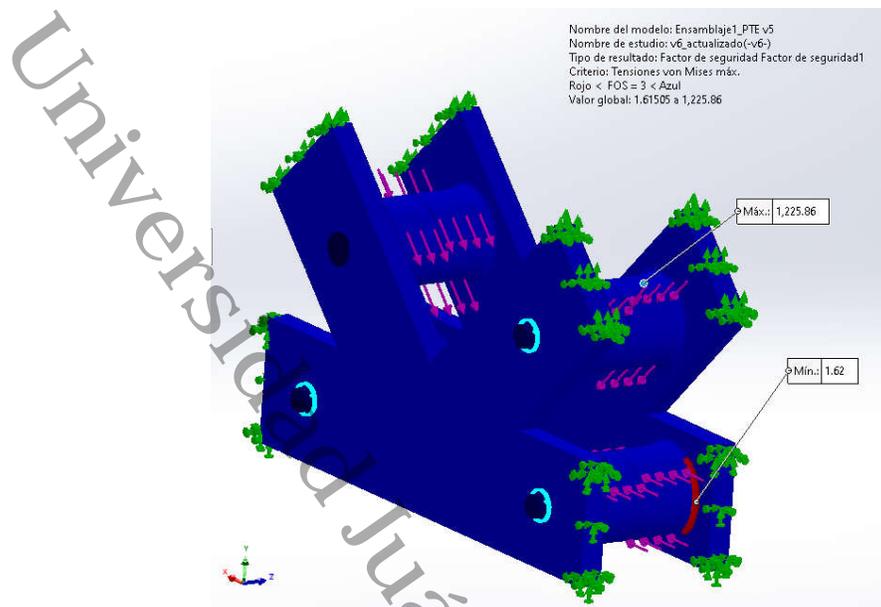


Figura 81. Mapa de factor de seguridad de conexión.

Conforme a los resultados obtenidos, se puede apreciar que los esfuerzos de Von Mises se localizan en la unión de las placas y cilindro de la conexión alcanzado valores de esfuerzo máximo de  $2,178.27 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que los desplazamientos máximos resultaron de  $0.059\text{mm}$ ,  $0.052\text{mm}$  y  $0.02\text{mm}$  para la dirección del eje "X", "Y" y "Z", respectivamente.

El factor de seguridad obtenido para la conexión resultó de 1.62. Los valores obtenidos son aceptables para los fines de este trabajo.

## 12.2. Modelo físico.

De acuerdo con los objetivos específicos de este trabajo, se planteó la realización de un modelo físico que permitiera validar el comportamiento de la estructura, si bien, no fue posible crear un modelo que permitiera estudiar su comportamiento mecánico mediante ensayos en laboratorio, se considera que contar con un modelo 3D del puente, permite conocer la factibilidad de la estructura durante el procedimiento constructivo, así mismo, detectar oportunidades de mejora para un correcto diseño geométrico y estructural.

Para ello se tuvieron dos alternativas: i) Impresión de piezas mediante impresora 3D; ii) fabricación de prototipo mediante corte laser.

### 12.2.1. Impresora 3D.

La impresión 3D es el proceso de obtención de elementos mediante el uso de materiales que son colocados a través de un cabezal de impresión, boquilla u otros componentes que pertenecen a una impresora; como resultado se obtienen volúmenes de objetos diseñados en software (CAD) (Pérez, 2017).

Esta técnica de generación de prototipos a escala es frecuentemente usada en la industria automotriz, para la fabricación de piezas mecánicas, cuyo propósito más usual es la de elaborar moldes para fabricación en serie de las piezas; así mismo es usada incluso para fabricar piezas funcionales de uso inmediato (Pérez, 2017).

Para la impresión 3D de las piezas propuestas en este trabajo se empleó un material plástico, en primera instancia, se decidió imprimir un triángulo de prueba para corroborar las tolerancias y funcionalidad al momento de realizar el ensamble. La impresión 3D fue realizada con una impresora Ender. En las figuras siguientes se presentan las fotografías de las piezas impresas en 3D.

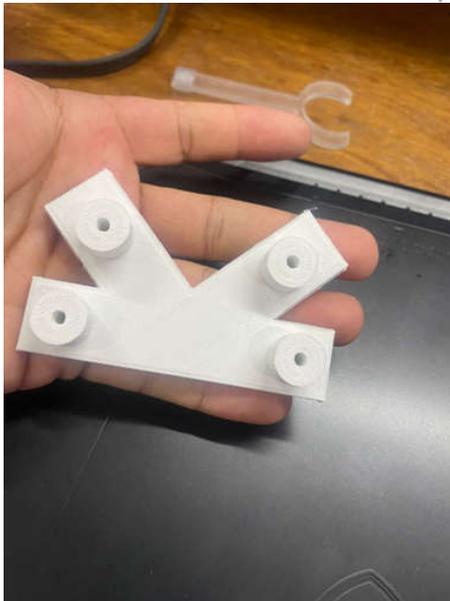


Figura 82. Impresión de conexión (escala 1:10).



Figura 83. Impresión de conexión (escala 1:10).

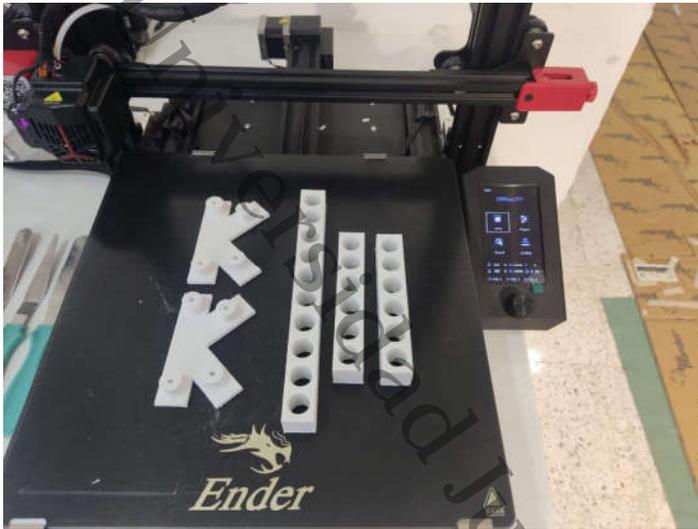


Figura 84. Impresión de conexión, diagonales y cuerdas.



Figura 85. Impresión de conexión, diagonales y cuerdas.

El proceso de impresión de las piezas tomó un tiempo de aproximadamente 5 horas por elemento, lo cual resulta muy tardado para la impresión de todos los elementos del puente. Así mismo se pudo determinar la tolerancia necesaria para poder ensamblar las piezas fabricadas en esta escala.

### 12.2.2. Corte con láser.

Para contar con una segunda opción para la fabricación del modelo a escala, se empleó el corte por láser; esta técnica se puede emplear para cortar o grabar, mediante un generador de luz láser de alta potencia, diversos materiales como aluminio, cuero, cartón, hierro, vidrio, maderas, etc.

El proceso de corte con láser es de alta precisión y permite generar geometrías complejas, así mismo es un proceso versátil en cuanto a la diversidad de materiales que se pueden trabajar.

Para el proceso de fabricación de las piezas se tomaron los modelos en 3D elaborados en el software Solidworks (Dassault Systèmes, 2022) y se exportaron al formato apropiado para poder ser leído por la cortadora láser. En las fotografías siguientes se ilustra parte del proceso de fabricación de las piezas.

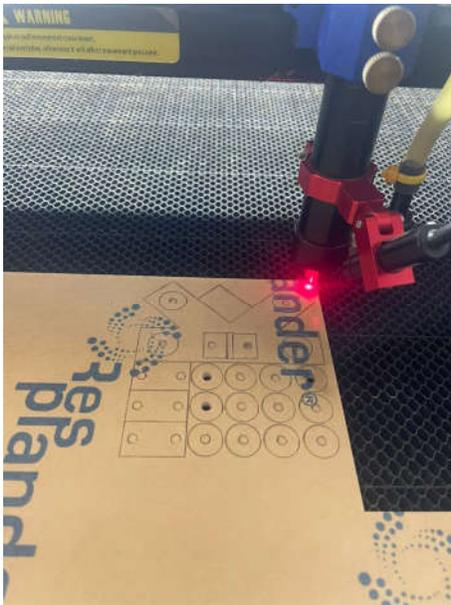


Figura 86. Corte de acrílico para fabricación de conexión.



Figura 87. Corte de acrílico para fabricación de conexión.



Figura 88. Corte de secciones de acrílico para fabricación de conexión.



Figura 89. Ensamble de unión de armadura.



Figura 90. Ensamble de armadura de prototipo.



Figura 91. Ensamble de puente de prototipo.

Ambas opciones de fabricación de los modelos físicos presentan ventajas y desventajas. Para el objetivo de este trabajo, resultó más favorable la fabricación de las piezas con corte láser, ya que el tiempo de fabricación resultó mucho menor que la impresión en 3D, sin embargo, una desventaja del corte con láser son los costos de los materiales empleados.



### 13. DISCUSIÓN.

Tradicionalmente los puentes vehiculares se han diseñado para construirse en su ubicación de manera permanente, sin embargo, existe una filosofía de diseño que se ha venido desarrollando a nivel mundial y consiste en la modulación de las estructuras tipo puente con posibilidades de reúso. Este concepto no es nuevo, ya que históricamente los primeros puentes se han empleado para situaciones de emergencia o motivos bélicos.

Esta metodología constructiva se ha orientado para cubrir un área de necesidad dentro de la industria petrolera, donde por la rapidez y duración de las actividades de este sector industrial, se necesita de infraestructura cuya vida útil pueda ser aprovechada al máximo.

Para cumplir con esta hipótesis, se propuso el diseño de un puente modulado de acero; en donde, en primer lugar, se definió la geometría del puente, tomando como base las características geométricas y estructurales de puentes existentes empleados en proyecto dentro de la industria. Posteriormente, se seleccionó la estructuración del puente, que para los fines de este proyecto resultó conveniente emplear armaduras simplemente apoyadas que fueran construibles en sitio con relativa facilidad. Esto se pudo confirmar con el estado del arte de puentes modulables, donde la mayoría de las estructuras temporales y reutilizables parten de los conceptos de armaduras. Una vez que se seleccionó el modelo a emplear, se realizaron distintas configuraciones de armaduras para seleccionar la tipología que distribuyera de una manera más uniforme las cargas a las que se somete la estructura durante su vida útil.

La tipología seleccionada fue analizada y diseñada considerando perfiles estructurales comerciales comúnmente utilizados en proyectos de la industria petrolera.

Una vez diseñados y dimensionados los perfiles estructurales de la tipología, se buscaron secciones equivalentes para los miembros estructurales que, dadas sus características geométricas, fueran fácilmente construibles en taller y ensamblados en campo. Para este objetivo, se tomó como inspiración los kits

interactivos de piezas y conexiones estándar que permiten construir diversas geometrías y longitudes de diferentes clases de puentes.

Establecidas el tipo de conexión, se realizó un análisis mediante el método de elementos finitos (MEF) para conocer los esfuerzos y deformaciones a los que se someterán los componentes del puente, este análisis permitió validar el comportamiento de la estructura mediante un modelo teórico-numérico.

### 13.1. Características geométricas del puente y de los elementos.

Finalmente, derivado de los análisis mencionados anteriormente, se obtuvieron las dimensiones y características de las secciones equivalentes y conexión de la estructura.

En la siguiente figura se muestra una vista del ensamble completo del puente.

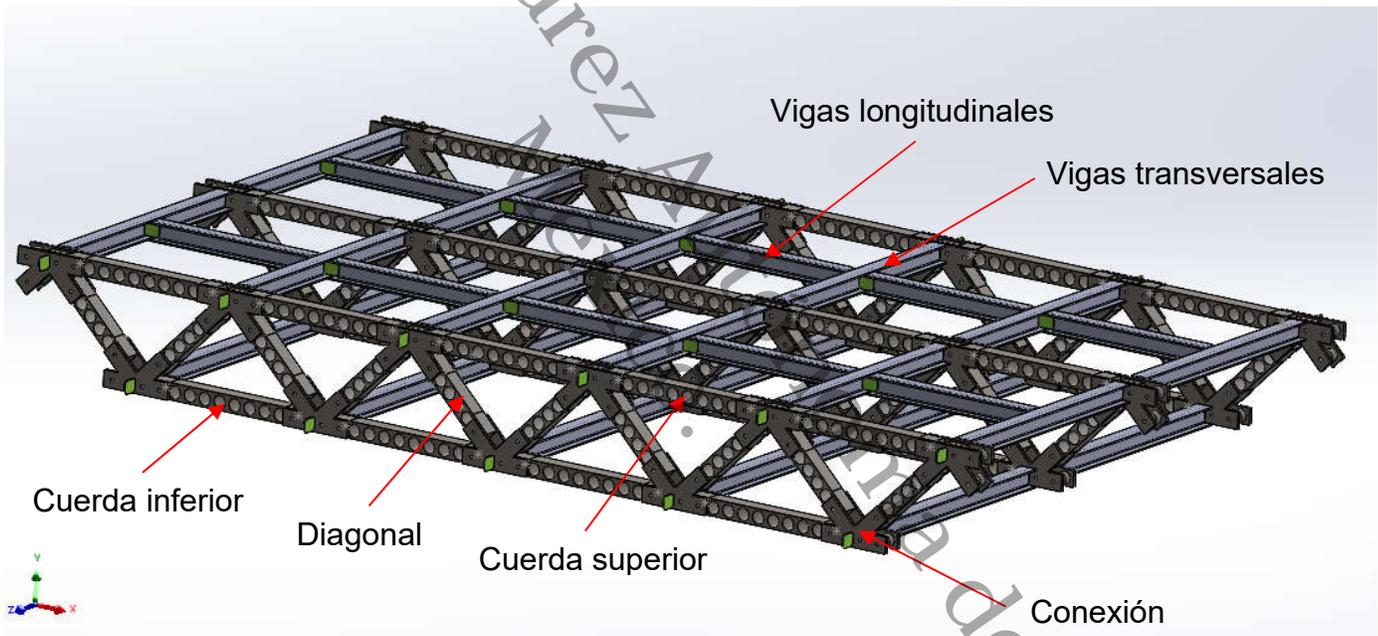


Figura 92. Vista en isométrico del ensamble del puente modular generada en software SolidWorks.

En la Figura 95 se muestra un plano de dimensionamiento de la diagonal.

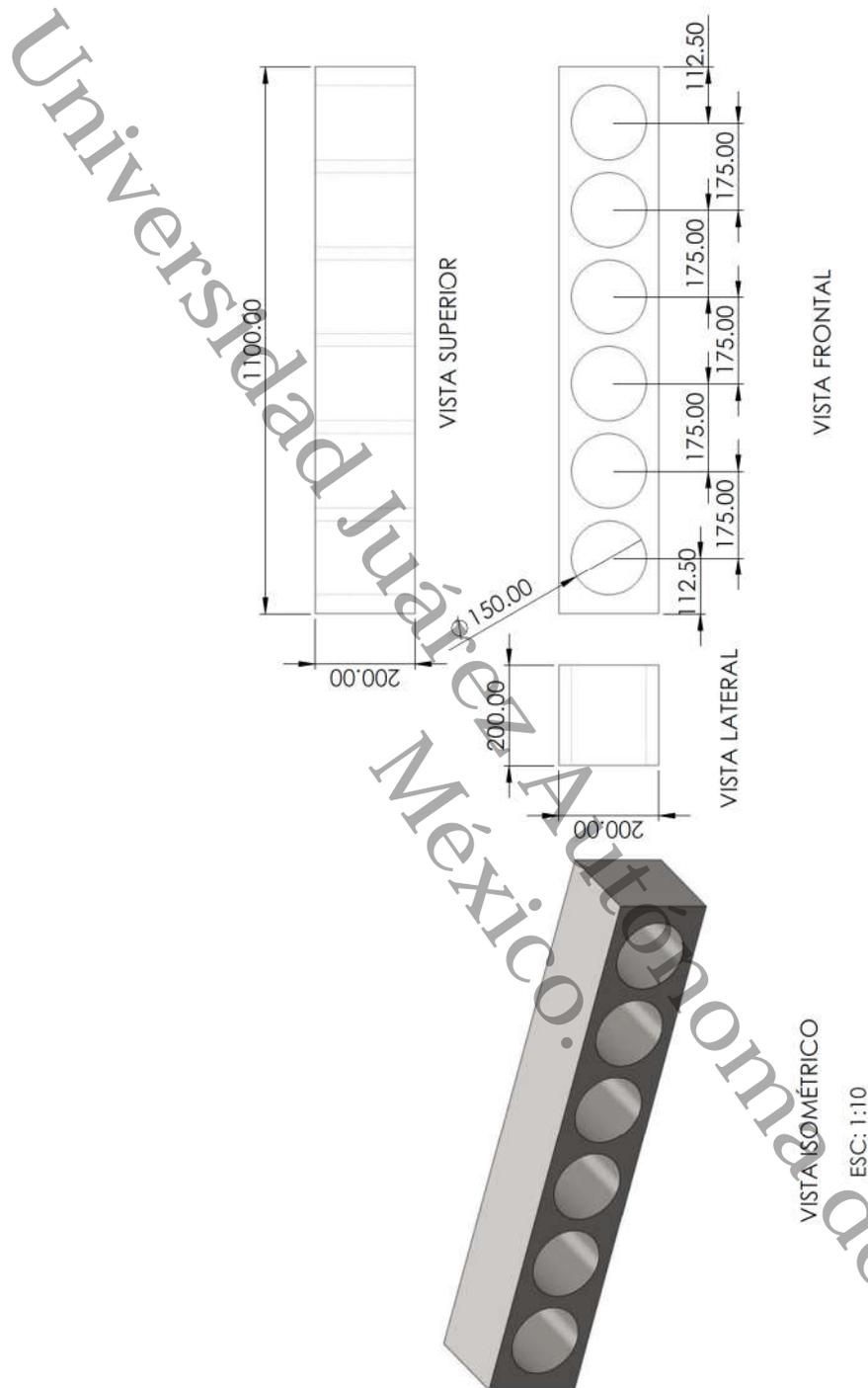


Figura 93. Plano de dimensionamiento de elemento diagonal.

**Descripción del elemento diagonal.** El elemento diagonal de la armadura del puente modulado se compone de una barra de acero estructural ASTM A572 Grado 50 de 1100mm de longitud con orificios de 150mm de diámetro espaciados

a cada 175 mm a lo largo de la barra. Los orificios extremos de la barra ensamblan con la conexión para formar el nodo articulado de la armadura.

En la Figura 95 se muestra un plano de dimensionamiento de la cuerda superior e inferior.

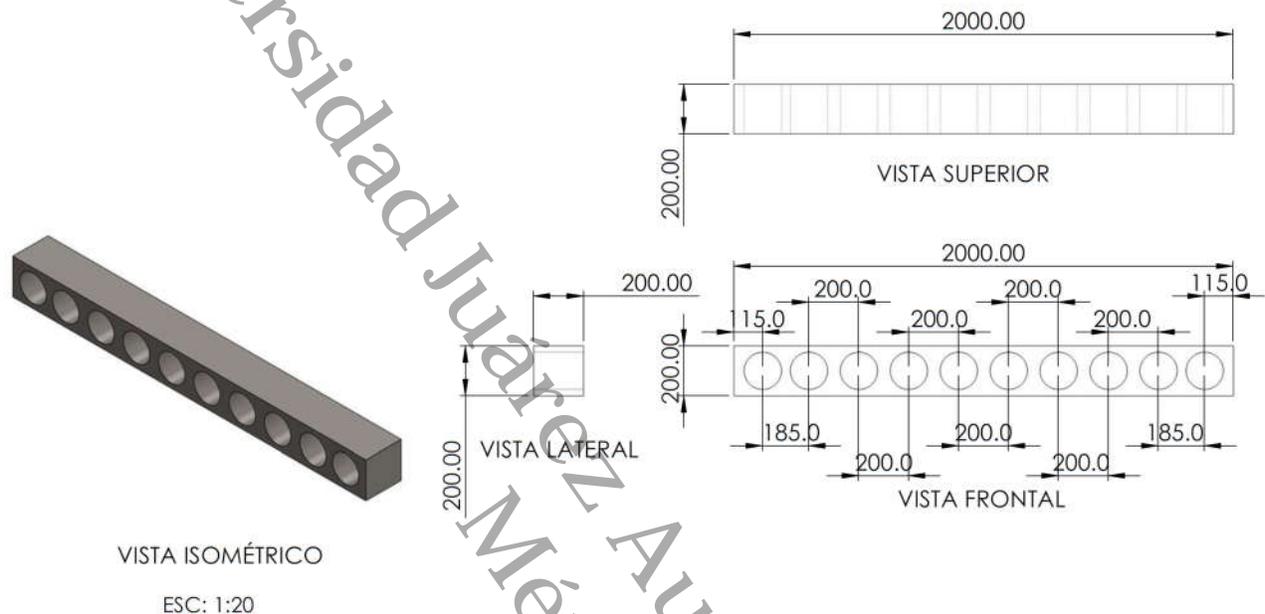


Figura 94. Plano de dimensionamiento de elemento diagonal.

### Descripción del elemento diagonal.

Análogo a los elementos diagonales del puente, las cuerdas superiores e inferiores de la armadura del puente modular se compone de una barra de acero estructural ASTM A572 Grado 50 de 1100mm de longitud con orificios de 150mm de diámetro espaciados a cada 200 mm a lo largo de la barra. Similarmente, los orificios extremos de la barra ensamblan con la conexión para formar el nodo articulado de la armadura.

En la Figura 95 se muestra un plano de dimensionamiento de la conexión.

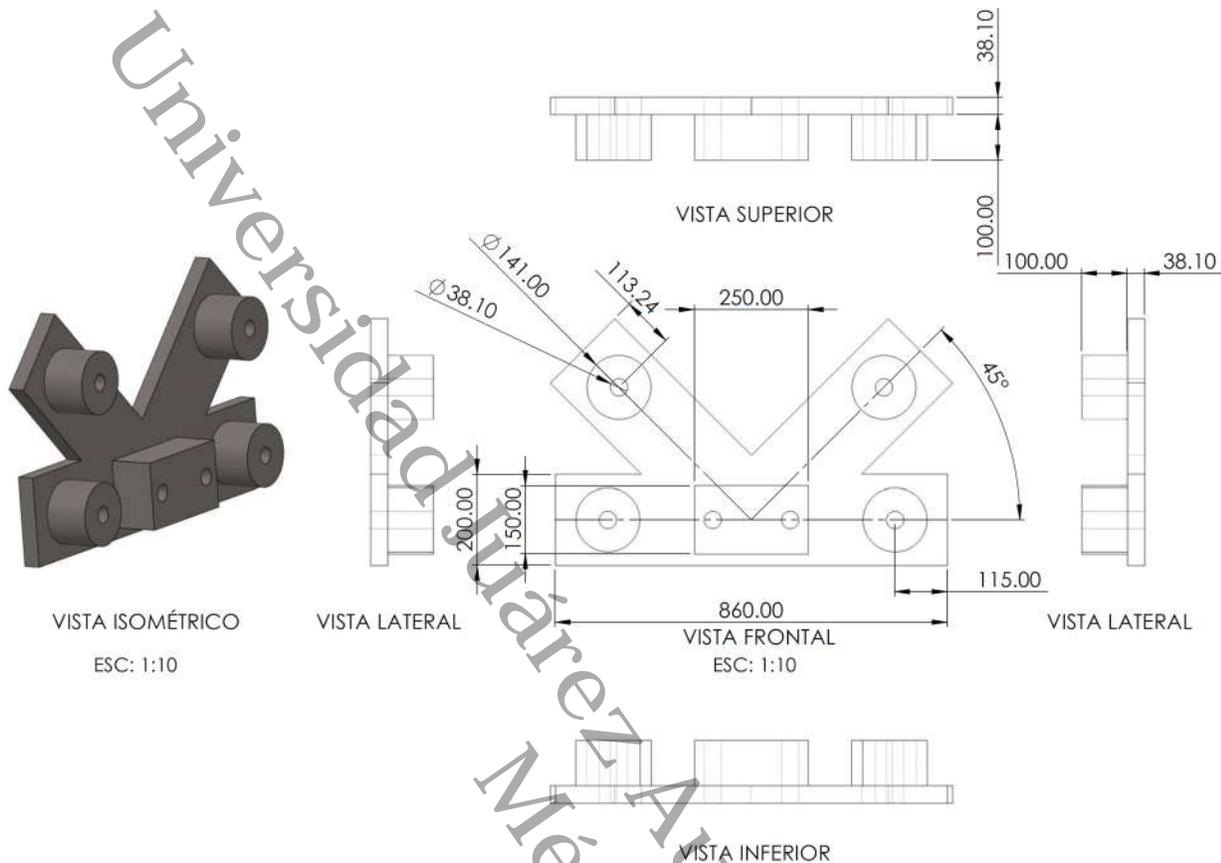


Figura 95. Plano de dimensionamiento de conexión.

**Descripción de la conexión.** La conexión está compuesta por dos piezas simétricas de acero estructural ASTM A572 Grado 50 que se ensamblan a través de los orificios de las cuerdas y diagonales del puente. Cada pieza de la conexión está estructurada por una placa de 38.10 mm de espesor, cuatro cilindros circulares de 141 mm de diámetro y un prisma rectangular de 150x250mm, ambas sobresalen de la placa 100 mm. Los cilindros y el prisma rectangular cuentan con orificios de 38.10 mm de diámetro. A través de estos orificios y una vez ensamblada la conexión, se sujetan mediante tensores a base de redondos lisos de acero con cuerdas en sus extremos para colocar tuercas y arandelas.

### 13.2. Propuesta de apoyo del puente.

La estructura transmitirá sus cargas hacia sus apoyos, para ello se propone emplear apoyos de concreto reforzado con secciones de acero ahogadas para recibir las conexiones de la estructura. En la figura siguiente se muestra un esquema de la propuesta.

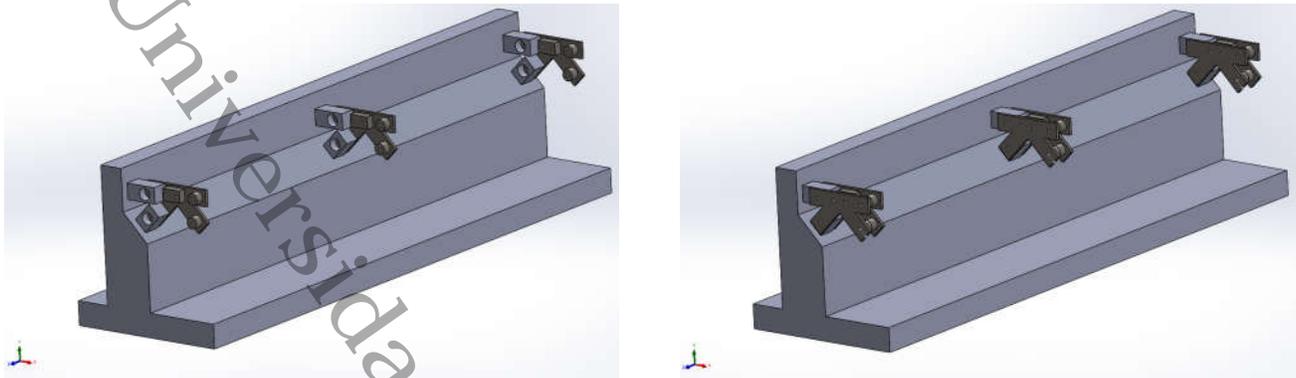


Figura 96. Propuesta de apoyo del puente.

### 13.3. Costo preliminar del puente.

En este apartado del trabajo se estima el costo de la superestructura del puente. Para la evaluación de los costos se toman las siguientes consideraciones:

i) Solo se evalúa la superestructura del puente, es decir, elementos de la armadura, vigas longitudinales y transversales, ii) no se incluyen los apoyos, conexiones y superficie de rodamiento, iii) no se incluye el costo de transporte y montaje y iv) se considera un factor de sobrecosto por fabricación de piezas especiales de 30%.

Para estimar el precio de la estructura, es necesario evaluar el peso de los componentes y conocer el número de piezas por los que está compuesto el puente. La estimación del peso total de la estructura se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7. Peso de la superestructura del puente modular.

Elemento	Peso por pieza (kg)	Piezas	Peso total (kg)
Cuerda superior e inferior	348.33	27	9404.91
Diagonal	177.8	30	5334
Conexión	333.42	33	11002.86
Vigas longitudinales	152.84	10	1528.4
Vigas transversales	225.91	22	4970.02
<b>Peso de la superestructura (kg) =</b>			<b>32240.19</b>

De acuerdo con fuentes consultadas en internet, la tonelada de acero estructural tiene un precio de \$30,338 MXN (sin incluir impuestos, costos de transporte e instalación); considerando un sobrecosto de 30% para tomar en cuenta



la fabricación de piezas especiales, se tiene un costo aproximado total de los elementos estructurales del puente de \$978,102.88 MXN.

Por otra parte, se analizó el peso de la estructura de un puente de tubería de acero usado actualmente para la construcción de estas estructuras, donde se tiene un peso aproximado de 25.6 t para un claro de 12 m. Para la estimación del peso de la estructura se tomaron las mismas consideraciones usadas para el puente modulado, excepto el sobrecosto por fabricación de piezas especiales. Con lo anterior, se tiene que un puente convencional tiene un costo de superestructura de \$776,652.80 MXN.

Derivado de lo anterior se tiene que la estructura del puente modulado tiene un costo aproximado 25% mayor que el costo de una estructura convencional, sin embargo, una de las principales ventajas del puente modulado que no se han cuantificado, es que este último tiene la posibilidad de ser reusado considerables veces, lo que aumenta el grado de aprovechamiento que pudiera tener una estructura.

#### 14. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

Como se ha venido describiendo en este trabajo, es importante realizar la validación de los modelos teóricos matemáticos para conocer la respuesta de las estructuras en la vida real, para ello se plantean las siguientes líneas de investigación que pueden ser abordadas para enriquecer y dar continuidad a este trabajo.

- i) Construcción de un prototipo a escala. Diseñar y construir un modelo a escala del puente con materiales reales. Esto permitirá evaluar la complejidad que pudieran tenerse al momento de la fabricación de las piezas a escala natural, así mismo podrán realizarse ensayos mecánicos.
- ii) Realización de pruebas al modelo físico del puente. Diseñar un programa de pruebas mecánicas del prototipo a escala, estas pruebas permitirán conocer la respuesta ante cargas estáticas y/o dinámicas que validen el comportamiento esperado del puente ante condiciones de trabajo.



- iii) Realizar la evaluación estructural de la propuesta de superficie de rodamiento. Como se mencionó en el desarrollo del trabajo, se considera que la superficie de rodamiento no aportará rigidez adicional a la estructura, salvo el peso propio. Para la superficie de rodamiento se propone emplear un sistema de losa de acero con capa de compresión simplemente apoyada sobre las vigas transversales y longitudinales del puente.
- iv) Realizar la evaluación estructural de la propuesta de conexión de las vigas transversales y longitudinales. Se recomienda realizar el modelo de elementos finitos de la propuesta de conexión a cortante de las vigas transversales a la conexión y la conexión de las vigas longitudinales a las transversales.
- v) Realizar la evaluación estructural de la propuesta de apoyos del puente. En este documento se aborda una propuesta considerando apoyos fijos de concreto con elementos ahogados para recibir las conexiones del puente, sin embargo, se recomienda investigar la viabilidad de usar apoyos a base pilotes de acero.
- vi) Proponer una logística constructiva del puente. Evaluar la producción, transporte, ensamblado de la estructura en campo, montaje, tolerancias, etc.
- vii) Se recomienda investigar otros usos del sistema constructivo propuesto. Se considera que este sistema puede ser usado en cubiertas de auditorios, estadios, puentes peatonales, obras de infraestructura hidráulica, etc.



## 15. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Este trabajo aborda el proceso de conceptualización, análisis y diseño de un puente de acero inspirado en los conceptos de modularización de estructuras temporales y de emergencia que se están empleando a nivel mundial. El proceso de desarrollo de este trabajo se realizó conforme a las teorías internacionalmente aceptadas para el análisis y diseño de estructuras de acero, empleando softwares computacionales para ahondar el proceso de investigación, además se tomó en cuenta las necesidades dentro de la industria para las cuales está dirigida.

Derivado de lo anterior se tienen las siguientes conclusiones.

15.1 En función a las condiciones del sitio y a las necesidades de la industria petrolera, se establecieron las dimensiones mínimas necesarias para iniciar el proceso de diseño de la estructura. Se definió el diseño de un puente vehicular de 2 carriles de circulación de 3.5 m de ancho y un claro entre apoyos de 12 m. De acuerdo con las necesidades de la obra podrán emplearse más claros para abarcar más distancia.

15.2 De acuerdo con el estado del arte de los puentes modulares, se decidió usar una estructuración a base de armaduras. Para ello se estudiaron cuatro tipologías de puentes. Conforme a estos análisis se encontró que, la tipología 3 presentó la mejor distribución de esfuerzos dentro de los miembros de la estructura. Por lo anterior, se decidió trabajar con la tipología 3 para el dimensionamiento y diseño de la armadura del puente.

15.3 Se realizó el análisis y diseño de la estructura del puente, considerando perfiles estructurales comerciales para el dimensionamiento del puente. De este análisis resultó que la armadura las tres armaduras longitudinales con las que se compone la estructura, se resuelven con perfiles OC 273mm x 9.5mm acero ASTM A-53 Grado B.

15.4 Conforme a los resultados descritos en el punto anterior, se propusieron secciones equivalentes cuyas características resultaran favorables para el



ensamble durante el ensamble de la estructura. Con el objetivo mencionado anteriormente, se propuso una sección de acero cuadrada de 20x20cm con agujeros espaciados en toda su longitud de 15 cm de diámetro. Para conformar la estructura de la armadura se tienen dos tipos de secciones: la cuerda superior e inferior y la diagonal, con una longitud de 2.0m y 1.1m, respectivamente. Estas secciones fueron analizadas mediante el método de elementos finitos para las fuerzas a las que se encuentra sometida, encontrando un factor de seguridad de 1.48 y 2.98 para las cuerdas y diagonales, respectivamente, evaluados en términos de los esfuerzos de Von Mises.

15.5 La conexión que formarán los nodos de la armadura y que unirán a las cuerdas y diagonales, fueron propuestas a base de placa de acero. La conexión constará de dos piezas simétricas con salientes circulares y rectangulares que se unirán a través de los orificios de los elementos de la armadura. Estas piezas estarán sujetas a través de tensores a base de redondo liso que pasarán por los orificios de la saliente para evitar que se abran fuera de su plano. La conexión fue analizada mediante el método de elementos finitos, obteniendo un factor de seguridad de Von Mises de 1.62, el cual se considera aceptable.

15.6 Para la realización del modelo físico, se exploraron dos opciones: i) impresión mediante impresora en 3D y, ii) corte de piezas con láser. Si bien ambas técnicas tienen inconvenientes, por ejemplo, la primera opción, demanda un tiempo alto para la impresión de las piezas; y la segunda opción, el costo de los materiales para la impresión; ambas opciones ofrecen la posibilidad de representar físicamente las piezas propuestas y con ello la posibilidad de identificar mejoras al modelo.

15.7 Se estima que la estructura del puente modulable tendrá un costo 25% superior que el costo de un puente convencional es importante que solo se toma en cuenta el costo de los materiales de la estructura principal en ambos casos. Sin embargo, a pesar de este incremento en costo, la posibilidad de reúso del puente modulable lo hace una alternativa competitiva respecto a una propuesta tradicional.



## 16. REFERENCIAS CITADAS.

1. Bianconi-Bailez, M. S., Apango-Vera, O., & Ramírez-de Alba, H. (2015). Puente portátil peatonal desmontable para emergencias. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 18, 125–134. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477947306009>
2. Bowser, M. G. (2010). *Development of a Shear Connection for a Portable Composite Bridge*. University of Waterloo.
3. Celigüeta, J. (2011). *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (4 ed.). tecnun.
4. Computers and Structures, I. (2023). *CSIBridge*.
5. Computers and Structures, Inc. (2022). *SAP 2000* (24.0.0). Computers and Structures, Inc.
6. Crespo, S., Rodríguez, N., Carrión, F., & Quintana, J. (2014). *Análisis de efectos longitudinales y transversales en puentes debido a cargas vivas vehiculares* (No. 398).
7. Cuevas, A. C., & Cadengo, M. (2020, diciembre). *Clasificación oficial de carreteras en México*. NOTAS núm. 188. [file:///H:/Mi%20unidad/UJAT/0.%20MIE/TESIS/z\\_Bibliografia/Normativa%20Puentes/Tipos%20de%20Caminos.html](file:///H:/Mi%20unidad/UJAT/0.%20MIE/TESIS/z_Bibliografia/Normativa%20Puentes/Tipos%20de%20Caminos.html)
8. Dassault Systèmes. (2022). *Solidworks Premium 2022 SP3.1*.
9. Dechkova Tumbeva, M. (2021a). *MODULAR JOINTS FOR THE ACCELERATED FABRICATION AND ERECTION OF STEEL STRUCTURES*. University of Notre Dame.
10. Dechkova Tumbeva, M. (2021b). *MODULAR JOINTS FOR THE ACCELERATED FABRICATION AND ERECTION OF STEEL STRUCTURES*. University of Notre Dame.
11. Estruch i Tena, C. (2016). *Nuevo concepto de puente de vigas hinchables ligero, modular y portátil*. Universidad Politécnica de Cataluña.
12. Fort Miller Company. (2016). *Prefabricated bridge units*. <https://www.fortmiller.com/portfolio-item/prefabricated-bridge-units/>
13. Gonzalez, O. (2002). *Análisis estructural* (1ra edición). Limusa.



14. Kuehl, T. W. (2018). *An investigation of a prefabricated steel truss girder bridge with a composite concrete deck*. Montana State University.
15. Lin, W., & Yoda, T. (2017). *Bridge Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00602-5>
16. Liu, G. R., & Quek, S. S. (2014). The Finite Element Method. En G. R. Liu & S. S. Quek (Eds.), *The Finite Element Method (Second Edition)*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00014-X>
17. N PRY CAR 6 01 003/01, Pub. L. No. N-PRY-CAR-6-01-003/01 (2001).
18. Pemex. (2021). *Evaluación de las reservas de hidrocarburos. 1 de enero de 2021*. Pemex Exploración y Producción. <https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/evaluaciones-reservas.aspx>
19. Pérez, C. (2017). *Impresión 3D y método de elemento finito aplicados a la optimización de plantillas y herramientas con aplicación automotriz*. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON.
20. Russell, B. R., & Thrall, A. P. (2013). Portable and Rapidly Deployable Bridges: Historical Perspective and Recent Technology Developments. *Journal of Bridge Engineering*, 18(10), 1074–1085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000454](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000454)
21. SEDEC. (2022). Perfil del estado. En *Gobierno del estado de Tabasco*. <https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/users/sdettabasco/Perfil%20del%20Estado.pdf>
22. SICT. (2001a). *Proyecto de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Cargas y Acciones. N-PRY-CAR-6-01-003/01*.
23. SICT. (2001b). *Proyecto de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Cargas y Acciones. N-PRY-CAR-6-01-003/01*.
24. SICT. (2001c). *Proyecto de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Sismo. N-PRY-CAR-6-01-005/01*.
25. SICT. (2001d). *Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Viento. N PRY CAR 6 01 004/01*.



26. SICT. (2016). *Proyecto de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Combinaciones de Carga. N-PRY-CAR-6-01-006/016.*
27. Tabasco Hoy. (2022, septiembre 29). Cae puente "Naranjeño"; incomunica a habitantes de Cárdenas. *Tabasco Hoy*. <https://www.tabascohoy.com/cae-puente-naranjeno-incomunica-a-habitantes-de-cardenas/>
28. Tonias, D. E., & Zhao, J. J. (2006). *Bridge Engineering: Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges* (2da edición). McGraw-Hill .
29. Viuda de Sainz, S. A. (s/f). *Diseño de ecopuente desmontable de instalación rápida.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.



## 17. ANEXOS.

<b>Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional</b>	
<b>Título de la Tesis:</b>	Análisis y diseño estructural de un puente modular con conexiones de rápido ensamble para caminos de acceso en la industria petrolera.
<b>Autor de la Tesis</b>	Juan Antonio Ramos Sánchez
<b>ORCID</b>	0009-0008-4054-4332
<b>Resumen de la Tesis</b>	<p>La industria petrolera es una de las principales actividades económicas que se desarrollan en el sureste del país. Por lo anterior, su presencia en estas regiones es amplia, lo que origina la necesidad de crear infraestructura para poder realizar la operación de la industria esta región.</p> <p>Dentro de la infraestructura necesaria se encuentran los puentes vehiculares los cuales permiten el acceso a los sitios de trabajo, sin embargo, debido a la logística propia de la industria, los puentes no son aprovechados al máximo de su vida útil, ya que cada vez que se desarrolla un proyecto, se requiere la construcción de nueva infraestructura.</p> <p>Este trabajo se realizó con el propósito de analizar y diseñar un puente vehicular modulable de acero que permitiera una instalación sencilla en obra y que permitiera un posible reúso en diversos proyectos, siendo una opción válida para aprovechar al máximo los recursos disponibles.</p> <p>Para lograr este objetivo, se realizó el estudio de diversas tipologías para definir el sistema estructural óptimo y una seleccionada</p>



	<p>la mejor propuesta se analizó particularmente los componentes del puente mediante el método de elementos finitos.</p> <p>Este proceso permitió establecer un sistema estructural de tipo armadura para el puente modulable, así como definir las características de los elementos y conexiones o nodos de la armadura. Así mismo se elaboró un modelo físico del puente modulable con la finalidad de verificar el proceso de ensamble de la estructura.</p>
<b>Palabras Clave de la Tesis</b>	Puente modulable, ensamble, estructuras de acero, método de elementos finitos, armaduras.
<b>Referencias citadas:</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Bianconi-Bailez, M. S., Apango-Vera, O., &amp; Ramírez-de Alba, H. (2015). Puente portátil peatonal desmontable para emergencias. Revista Legado de Arquitectura y Diseño, 18, 125–134. <a href="https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477947306009">https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477947306009</a></li><li>2. Bowser, M. G. (2010). Development of a Shear Connection for a Portable Composite Bridge. University of Waterloo.</li><li>3. Celigüeta, J. (2011). Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural (4 ed.). tecnun.</li><li>4. Computers and Structures, I. (2023). CSIBridge.</li><li>5. Computers and Structures, Inc. (2022). SAP 2000 (24.0.0). Computers and Structures, Inc. .</li><li>6. Crespo, S., Rodríguez, N., Carrión, F., &amp; Quintana, J. (2014). Análisis de efectos longitudinales y transversales en puentes debido a cargas vivas vehiculares (No. 398).</li><li>7. Cuevas, A. C., &amp; Cadengo, M. (2020, diciembre). Clasificación oficial de carreteras en México. NOTAS núm. 188. file:///H:/Mi%20unidad/UJAT/0.%20MIE/TESIS/z_Bibliografia/Normativa%20Puentes/Tipos%20de%20Caminos.html</li><li>8. Dassault Systèmes. (2022). Solidworks Premium 2022 SP3.1.</li></ol>



9. Dechkova Tumbeva, M. (2021a). MODULAR JOINTS FOR THE ACCELERATED FABRICATION AND ERECTION OF STEEL STRUCTURES. University of Notre Dame.
10. Dechkova Tumbeva, M. (2021b). MODULAR JOINTS FOR THE ACCELERATED FABRICATION AND ERECTION OF STEEL STRUCTURES. University of Notre Dame.
11. Estruch i Tena, C. (2016). Nuevo concepto de puente de vigas hinchables ligero, modular y portátil. Universidad Politécnica de Cataluña.
12. Fort Miller Company. (2016). Prefabricated bridge units. <https://www.fortmiller.com/portfolio-item/prefabricated-bridge-units/>
13. Gonzalez, O. (2002). Análisis estructural (1ra edición). Limusa.
14. Kuehl, T. W. (2018). An investigation of a prefabricated steel truss girder bridge with a composite concrete deck. Montana State University.
15. Lin, W., & Yoda, T. (2017). Bridge Engineering. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00602-5>
16. Liu, G. R., & Quek, S. S. (2014). The Finite Element Method. En G. R. Liu & S. S. Quek (Eds.), The Finite Element Method (Second Edition). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00014-X>
17. N PRY CAR 6 01 003/01, Pub. L. No. N-PRY-CAR-6-01-003/01 (2001).
18. Pemex. (2021). Evaluación de las reservas de hidrocarburos. 1 de enero de 2021. Pemex Exploración y Producción. <https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/evaluaciones-reservas.aspx>



19. Pérez, C. (2017). Impresión 3D y método de elemento finito aplicados a la optimización de plantillas y herramientas con aplicación automotriz. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON.
20. Russell, B. R., & Thrall, A. P. (2013). Portable and Rapidly Deployable Bridges: Historical Perspective and Recent Technology Developments. *Journal of Bridge Engineering*, 18(10), 1074–1085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000454](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000454)
21. SEDEC. (2022). Perfil del estado. En Gobierno del estado de Tabasco. <https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/users/sdettabasco/Perfil%20del%20Estado.pdf>
22. SICT. (2001a). Proyecto de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Cargas y Acciones. N-PRY-CAR-6-01-003/01.
23. SICT. (2001b). Proyecto de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Cargas y Acciones. N-PRY-CAR-6-01-003/01.
24. SICT. (2001c). Proyecto de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Sismo. N-PRY-CAR-6-01-005/01.
25. SICT. (2001d). Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Viento. N PRY CAR 6 01 004/01.
26. SICT. (2016). Proyecto de Nuevos Puentes y Estructuras Similares. Combinaciones de Carga. N-PRY-CAR-6-01-006/016.
27. Tabasco Hoy. (2022, septiembre 29). Cae puente "Naranjeño"; comunica a habitantes de Cárdenas. Tabasco Hoy. <https://www.tabascohoy.com/cae-puente-naranjeno-incomunica-a-habitantes-de-cardenas/>



	<p>28. Tonia, D. E., &amp; Zhao, J. J. (2006). Bridge Engineering: Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges (2da edición). McGraw-Hill .</p> <p>29. Viuda de Sainz, S. A. (s/f). Diseño de ecopunteo desmontable de instalación rápida.</p>
--	--

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.