

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



## FACULTAD INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA – CENTRO DE POSGRADOS

### MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS METÁLICAS

**TEMA:**

---

**“PROPUESTA DE REFORZAMIENTO DE VIGAS DE ALMA LLENA DE  
PUENTES METÁLICOS CON FIBRA DE CARBONO Y RESINA EPÓXICA”**

---

Trabajo de titulación Previo a la obtención del grado académico de Magister en  
Ingeniería Civil Con Mención En Estructuras Metálicas

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

**Autores:** Ing. Francisco Agustín Peña Jordán – Ing. José Luis Yunapanta Velasteguí

**Director:** Ing. Oswaldo Marcelo Guerra Avendaño MSc - MDI

Ambato – Ecuador

2022

## **APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. El Tribunal Receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg., e integrado por los señores: Ing. Víctor Rodrigo Espín Guerrero, Mg., y Ing. Alex Xavier Frías Torres, designados por el Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: “PROPUESTA DE REFORZAMIENTO DE VIGAS DE ALMA LLENA DE PUENTES METÁLICOS CON FIBRA DE CARBONO Y RESINA EPÓXICA”, elaborado y presentado por el Ing. Francisco Agustín Peña Jordán MSc., e Ing. José Luis Yunapanta Velasteguí MSc., para optar por el Grado Académico de Magister en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

---

Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg.  
Presidente del Tribunal

---

Ing. Víctor Rodrigo Espín Guerrero, Mg.  
Miembro del Tribunal

---

Ing. Alex Xavier Frías Torres, Mg.  
Miembro del Tribunal

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “PROPUESTA DE REFORZAMIENTO DE VIGAS DE ALMA LLENA DE PUENTES METÁLICOS CON FIBRA DE CARBONO Y RESINA EPÓXICA”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Francisco Agustín Peña Jordán MSc., e Ing. José Luis Yunapanta Velasteguí MSc., Autores bajo la Dirección del Ing. Oswaldo Marcelo Guerra Avendaño MSc - MDI, Director del Trabajo de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

---

Ing. Francisco Agustín Peña Jordán MSc.  
AUTOR

---

Ing. José Luis Yunapanta Velasteguí MSc.  
AUTOR

---

Ing. Oswaldo Marcelo Guerra Avendaño MSc - MDI  
DIRECTOR

## **DERECHOS DE AUTOR**

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

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

---

Ing. Francisco Agustín Peña Jordán MSc.  
C.I: 1803605540  
AUTOR

---

Ing. José Luis Yunapanta Velasteguí MSc.  
C.I: 1801868090  
AUTOR

# ÍNDICE GENERAL

## Contenido

<b>PORTADA .....</b>	<b>i</b>
<b>APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....</b>	<b>iii</b>
<b>DERECHOS DE AUTOR.....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>x</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>xii</b>
<b>EXECUTIVE SUMMARY .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
10.1. Introducción .....	1
10.2. Justificación .....	2
10.3. Objetivos .....	4
<b>2. CAPÍTULO II .....</b>	<b>5</b>
11.1. Trabajos previos mediante la aplicación del método de elementos finitos .....	5
11.2. Solución implícita y solución explícita.....	6
11.3. Contacto entre cuerpos.....	7
11.4. Tipos de puentes metálicos .....	8
11.5. Fibra de Carbono.....	11
11.5.1. Presentación de la Fibra de Carbono.....	11
11.5.2. Resina Epoxi .....	12

11.5.3. Preparación de la superficie de adherencia .....	12
11.5.4. Propiedades Mecánicas de la Fibra de Carbono .....	12
11.5.5. Norma aplicable para la ejecución del ensayo de flexión. ....	14
<b>3.      CAPÍTULO III.....</b>	<b>15</b>
12.1. Ubicación .....	15
12.2. Equipo y materiales.....	15
12.3. Tipo de investigación.....	18
12.4. Prueba de hipótesis.....	19
12.5. Población o muestra.....	19
12.6. Recolección de la información.....	19
12.7. Procesamiento de la información .....	21
12.8. Variables de respuesta o resultados alcanzados .....	23
<b>4.      CAPÍTULO IV .....</b>	<b>28</b>
13.1. Resultados del ensayo de la viga compuesta.....	28
13.2. Resultados Viga IPE 100 .....	31
13.3. Resultados de la aplicación en una viga de puente. ....	38
13.4. Verificación de la hipótesis.....	42
13.5. Análisis de costos.....	44
<b>5.      CAPÍTULO V.....</b>	<b>46</b>
<b>5.1.    CONCLUSIONES.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2.    RECOMENDACIONES.....</b>	<b>47</b>
<b>5.3.    BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>47</b>
<b>5.4.    ANEXOS .....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO 4.....</b>	<b>65</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. SIMETRÍAS DE LAS FIBRAS .	13
TABLA 3.1. INSTRUMENTOS Y CONSUMIBLES	15
TABLA 3.2. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL.....	16
TABLA 3.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO PARA LA VIGAS Y CONECTORES DE CORTE .....	16
TABLA 3.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE CARBONO .....	16
TABLA 3.5. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA RESINA EPÓXICA .....	17
TABLA 3.6. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN .....	17
TABLA 3.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE CARBONO. ....	18
TABLA 3.8. APLICACIÓN DE CONTACTOS.....	21
TABLA 3.9. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.....	23
TABLA 3.10. OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE LAS VIGAS POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS.....	23
TABLA 3.11. OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS.....	24
TABLA 3.12. OBTENCIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO EXPERIMENTAL. .....	25
TABLA 4.1. DEFLEXIÓN DE LA VIGA COMPUESTA SIN REFORZAMIENTO .....	28
TABLA 4.2. DEFLEXIÓN DE LA VIGA COMPUESTA CON REFORZAMIENTO. .....	29
TABLA 4.3. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 SIN REFORZAMIENTO – ENSAYO CON ELEMENTOS FINITOS .....	31
TABLA 4.4. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 CON REFORZAMIENTO – ENSAYO CON ELEMENTOS FINITOS .....	32
TABLA 4.5. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 SIN REFORZAMIENTO – ENSAYO EXPERIMENTAL 1 .....	33
TABLA 4.6. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 SIN REFORZAMIENTO – ENSAYO EXPERIMENTAL 2 .....	34
TABLA 4.7. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 CON REFORZAMIENTO – ENSAYO EXPERIMENTAL 1 .....	35

TABLA 4.8. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 CON REFORZAMIENTO – ENSAYO EXPERIMENTAL 2 .....	36
TABLA 4.9. DATOS DE SIMULACIÓN PARA LA VIGA DE 40 METROS: RESISTENCIA I - SIN REFORZAMIENTO.....	39
TABLA 4.10. DATOS DE SIMULACIÓN PARA LA VIGA DE 40 METROS: RESISTENCIA I - CON REFORZAMIENTO.....	40
TABLA 4.11. DATOS DE SIMULACIÓN PARA LA VIGA DE 40 METROS: SERVICIO I - SIN REFORZAMIENTO.....	40
TABLA 4.12. DATOS DE SIMULACIÓN PARA LA VIGA DE 40 METROS: SERVICIO I - CON REFORZAMIENTO.....	41
TABLA 4.13. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE LA VIGA COMPUESTA.....	43
TABLA 4.14. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE LA VIGA IPE.....	44



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diferencia entre método implícito y explícito. F: fuerzas que actúan, m: masa, a: aceleración.....	6
Figura 2.2. Comportamiento de contacto Bonded. ....	7
Figura 2.3. Comportamiento de contacto Frictionless. ....	7
Figura 2.4. Comportamiento de contacto Frictional .....	8
Figura 2.5. Puentes tipo trabe: a) viga armada, b) ubicación en el puente.....	9
Figura 2.6. Puentes tipo cajón: a) viga armada, b) configuración de armado del puente.. ....	10
Figura 2.7. Puente tipo celosía.....	10
Figura 2.8. Presentación de la fibra de carbono: a) roving de fibra de carbono; b) tejidos de fibra de carbono, pueden ser unidireccionales o multidireccionales, c) fibra de carbono unidireccional tipo platina. ....	12
Figura 3.1. Curva esfuerzo deformación verdadera para el acero A572.....	17
Figura 3.2. Curva esfuerzo deformación verdadera para el acero A36.....	18
Figura 3.3. Curva esfuerzo-deformación para el hormigón. ....	18
Figura 3.4. Dimensiones y materiales utilizados para el ensayo por medio de elementos finitos.....	20
Figura 3.5. Dimensiones y materiales utilizados para el ensayo experimental.....	21
Figura 3.6. Pasos para el proceso de recolección de información. ....	22
Figura 4.1. Comparación de resultados entre ensayo experimental del estudio de Al-Saidy y ensayo por medio de elementos finitos, sin reforzamiento y con reforzamiento. ....	30
Figura 4.2. Comparación de resultados entre el ensayo experimental y el ensayo por medio de elementos finitos, sin reforzamiento.....	37
Figura 4.3. Comparación de resultados entre el ensayo experimental y el ensayo por medio de elementos finitos, con reforzamiento.....	38
Figura 4.4. Comparación de resultados entre el ensayo experimental y el ensayo por medio de elementos finitos, sin reforzamiento y con reforzamiento.....	38
Figura 4.5. Comparación de esfuerzos de deflexión: a) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Sin Refuerzo (SR), b) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Con Refuerzo (SR).....	41
Figura 4.6. Comparación de esfuerzos patín superior: a) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Sin Refuerzo (SR), b) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Con Refuerzo (CR) .....	42
Figura 4.7. Comparación de esfuerzos patín inferior: a) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Sin Refuerzo (SR), b) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Con Refuerzo (CR) .....	42

## AGRADECIMIENTO

*La gloria solo es de Jehová, gracias a Él por darme la capacidad, la salud y el entusiasmo para poder alcanzar este objetivo.*

*Agradezco a la Universidad Técnica de Ambato y a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por haber brindado todo el conocimiento para mi formación profesional.*

*Francisco Agustín Peña Jordán*

*A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.*

*José Luís Yunapanta Velasteguí*

## DEDICATORIA

*El presente trabajo lo dedico a mi Esposa Fernanda, mis Hijos Isaac y Andrés, por haber demostrado apoyo y entusiasmo en este nuevo reto.*

*A mi Padre y a mi Madre por ser ejemplo de honestidad, trabajo y superación.*

*Francisco Agustín Peña Jordán*

*El presente trabajo está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en mi etapa estudiantil y laboral, aportando a mi formación como ser humano y como profesional.*

*José Luíz Yunapanta Velasteguí*

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA – CENTRO DE  
POSGRADOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – MENCIÓN ESTRUCTURAS  
METÁLICAS

TEMA: PROPUESTA DE REFORZAMIENTO DE VIGAS DE ALMA LLENA DE  
PUENTES METÁLICOS CON FIBRA DE CARBONO Y RESINA EPÓXICA

AUTORES: Ing. Francisco Agustín Peña Jordán MSc., e Ing. José Luis Yunapanta  
Velasguí MSc.

DIRECTOR: Ing. Oswaldo Marcelo Guerra Avendaño MSc – MDI

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Ingeniería, Industria y Construcción

FECHA: 20 de diciembre de 2021

## **RESUMEN EJECUTIVO**

Vigas metálicas de alma llena son utilizadas para puentes vehiculares, estos miembros estructurales están sometidos a cargas cíclicas, las que producen daños con el transcurrir del tiempo. Los puentes son diseñados para una vida útil de al menos 50 años, razón por la que requieren de mantenimiento, ya sea para reparación o repotenciación. Una alternativa es el reforzamiento con láminas de fibra de carbono y resina epóxica. Con la presente investigación se obtuvo un modelo matemático tridimensional que se ajusta al comportamiento real de vigas compuestas de acero y hormigón, reforzado con fibra de carbono. La investigación se desarrolló aplicando ensayos de flexión reales, y a través de elementos finitos en el software ANSYS RESEARCH - WORKBENCH. Se comparó los resultados entre estos ensayos de la viga compuesta y se obtuvo una diferencia máxima de 4,8303 mm. El modelo tridimensional obtenido se puede utilizar para estimar el reforzamiento de vigas metálicas de alma llena utilizadas en puentes metálicos.

Palabras Clave: fibra de carbono, fibra unidireccional, deflexión, viga compuesta, puentes, contactos de intercara.

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA – CENTRO DE  
POSGRADOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – MENCIÓN ESTRUCTURAS  
METÁLICAS

THEME: PROPOSAL FOR REINFORCING FULL WEB BEAMS OF METAL  
BRIDGES WITH CARBON FIBER AND EPOXY RESIN

AUTHORS: Ing. Francisco Agustín Peña Jordán MSc., e Ing. José Luis Yunapanta  
Velasguí MSc.

DIRECTED BY: Ing. Oswaldo Marcelo Guerra Avendaño MSc - MDI

LINE OF RESEARCH: Engineering, Industry and Construction

DATE: December 20, 2021

## **EXECUTIVE SUMMARY**

Full web steel girders are used for vehicular bridges. These structural members are subjected to cyclic loading, which causes damage over time. The bridges are designed for a service life of at least 50 years, which is why they require maintenance, either for repair or repowering. An alternative is the reinforcement with carbon fiber and epoxy resin sheets. With the present research, a three-dimensional mathematical model was obtained that adjusts to the real behavior of beams composed of steel and concrete, reinforced with carbon fiber. The research was developed by applying real bending tests, and through finite elements in ANSYS RESEARCH - WORKBENCH software. The results between these tests of the composite beam were compared and a max difference of 4,8303 mm was obtained. The three-dimensional model obtained can be used to estimate the reinforcement of full web steel beams used in steel bridges.

Keywords: carbon fiber, unidirectional fiber, deflection, composite beam, bridges, interface contacts.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Introducción

El presente trabajo de investigación con el tema “**Propuesta de Reforzamiento de Vigas de Alma Llena de Puentes Metálicos con Fibra de Carbono**” ha sido planteado teniendo en consideración que a nivel internacional se presentan estudios donde se indica que algunos puentes son considerados estructuralmente deficientes en Estados Unidos. La vida útil y la falta de mantenimiento, aumento de la demanda vehicular son algunas de las causas que deterioran a las vigas de los puentes. Con el desarrollo del tema planteado, esperamos contribuir con una alternativa efectiva para minimizar el problema descrito.

Resulta un desafío para la Ingeniería Civil y Mecánica, el mantenimiento y repotenciación de las estructuras metálicas existentes, mejorar la resistencia para soportar cargas subestimadas o imprevistas como impactos o intensos terremotos; incrementar la capacidad de resistencia para permitir mayores cargas; eliminar fallos prematuros debido a un inadecuado diseño o construcción; devolver la capacidad de carga perdida debido a la corrosión u otros tipos de degradación causados por el envejecimiento; etc. Todo esto sumado a la construcción en lugares inaccesibles, requiere soluciones innovadoras.

En la actualidad es posible reemplazar el acero por materiales compuestos livianos a base de fibras sintéticas, que han sido usados con éxito en la industria aeroespacial durante muchas décadas. Las fibras de carbono CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Polimer) son las que poseen las mejores características mecánicas (alta resistencia a la tracción y alto módulo de elasticidad) y químicas, por lo cual se han seleccionado para la presente experimentación.

La reparación y refuerzo de estructuras de acero mediante materiales compuestos, en especial mediante polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP), se presenta como una alternativa interesante frente a los sistemas tradicionales de intervención,

debido fundamentalmente a las grandes prestaciones mecánicas de estos nuevos materiales (mayores relaciones resistencia/peso y rigidez/peso), a su buen comportamiento frente a la corrosión y a su facilidad y rapidez de puesta en obra, además de no requerir mano de obra especializada. Sin embargo, aunque son numerosas las investigaciones que han abordado el estudio de este tipo de refuerzos, no existe todavía un modelo establecido de dimensionamiento para reforzamiento de vigas de acero, por lo cual se propone la metodología experimental con la cual se trata de reproducir el comportamiento experimental de una viga reforzada por medio de un modelo matemático utilizando elementos finitos a través de software ANSYS/WORKBENCH - STATIC STRUCTURAL.

## **1.2. Justificación**

En el contexto internacional se presentan estudios donde se indica que el 15% de puentes son considerados como estructuralmente deficientes en Estados Unidos, las causas son atribuidas al deterioro por el tiempo de vida, falta de mantenimiento, aumento constante en el peso de los vehículos los cuales incrementan aproximadamente el 40% de carga adicional en comparación a la carga utilizada para el diseño inicial [1]. Los puentes son diseñados con vigas compuestas de acero y hormigón, regularmente la vigas son de tipo I, lo cual da como resultado ahorros significativos en material y costos de construcción [2][3].

En Colombia el 66.1% de 1958 puentes, se detectaron como vulnerables; siendo los puentes de acero los de mayor vulnerabilidad [4]. En Ecuador, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas reporta alrededor de 256 puentes metálicos con estas características, de los cuales no existen registros de mantenimiento [5]. En la Región Andina se han efectuado estudios acerca del reforzamiento de vigas de hormigón con fibra de carbono y resina epóxica, obteniendo como resultados el incremento de la capacidad de carga y la disminución del agrietamiento en el hormigón, además reduce fallas por flexión y corte [6], [7].

Los efectos que producen al utilizar polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) en la resistencia de vigas, incluido vigas sobrecargadas, la capacidad de carga de la viga se incrementa al utilizar fibra de carbono como refuerzo, además el crecimiento de grietas se reduce significativamente [8]–[10]. La rigidez elástica a la flexión de las

vigas dañadas se puede restaurar parcialmente hasta el 50% [1]. Las fibras de carbono resultaron ser una buena opción para el reforzamiento del puente de hormigón San Ramón en el cantón Sigsig perteneciente a la provincia del Azuay [11]. Las vigas de acero reforzadas con fibra de carbono, presentan rapidez en la ejecución del proceso de reforzamiento, estableciendo de esta manera también un beneficio económico [12].

La fibra de carbono presenta un comportamiento lineal durante el ensayo y aporta al incremento de resistencia del elemento sometido a flexión [13]. Las propiedades mecánicas de la fibra de carbono depende de la configuración de las capas del tejido, la cual influye directamente en las propiedades del material [14]. Según ensayos de tracción realizados en materiales compuestos de acero y fibra de carbono se verifica que la propiedad de resistencia a tracción se incrementa significativamente [15].

Según la literatura referente a la repotenciación de estructuras, existen estudios del reforzamiento de vigas de acero con fibras de carbono, sin embargo, no se indican los métodos establecidos de una manera secuencial desde el desarrollo de análisis hasta la verificación del incremento de resistencia de la viga y por último aplicación del reforzamiento. Además, los métodos existentes enfocan al reforzamiento de vigas de hormigón, y se encontró pocas referencias donde se aplica el reforzamiento al acero lo cual no presenta resultados favorables, sobre todo por la falla en la interfaz acero - fibra de carbono. El ensayo de flexión es utilizado para verificar el incremento de resistencia de las vigas reforzadas. Los análisis aplicados son no lineales por lo tanto se debe definir las características no lineales principalmente del acero, así como también los contactos entre los diferentes materiales, también tienen un comportamiento no lineal a excepción de la interfaz acero - fibra de carbono, cuyo contacto es lineal.

El objetivo de esta investigación es determinar los parámetros de diseño a aplicar en el reforzamiento de vigas de acero con materiales existentes en el país, además de proponer un procedimiento de aplicación del reforzamiento de vigas de acero con fibra de carbono. Con el desarrollo del presente tema se podrán rehabilitar los puentes de acero para extender su vida útil.



### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Desarrollar una propuesta de reforzamiento de vigas de alma llena de puentes metálicos, con fibra de carbono y resina epóxica.

#### **1.3.2. Específicos**

- Determinar las características mecánicas de la fibra de carbono a utilizar mediante investigación bibliográfica
- Establecer el método de aplicación del material de refuerzo
- Validar el modelo matemático con el modelo físico experimental
- Analizar el costo de la aplicación del reforzamiento

## CAPÍTULO II

### ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

La propuesta de reforzamiento de vigas metálicas de alma llena con fibra de carbono y resina epóxica, en puentes metálicos tiene como objetivo incrementar las propiedades mecánicas del elemento estructural, basados en estudios similares y análogos que permitan alcanzar el propósito planteado.

#### **2.1. Trabajos previos mediante la aplicación del método de elementos finitos**

Según [16], “el método de los elementos finitos (FEM) puede considerarse como la herramienta informática más importante en mecánica estructural”. Análisis realizados en vigas compuestas de almas almenadas en el software ABAQUS demostraron que la capacidad a momento de la viga incrementa con la relación de almenado para la deflexión máxima admisible en la mitad del vano [17]. Estudios comparativos entre ensayos experimentales y computacionales aplicados a vigas compuestas reforzadas con fibra de carbono en el software ANSYS muestran un alto porcentaje de coincidencia con los datos experimentales de las pruebas [18], mientras que pruebas de vibración se determinó que los resultados experimentales concuerdan con los resultados analíticos [19]. Según los resultados, el comportamiento ante dos tipos de carga se comprueba que la viga compuesta presenta un desempeño estructural beneficioso de la rigidez, resistencia y ductilidad ante la aplicación de cargas concentradas o distribuidas” [3].

Los modelos computacionales deben reproducir el comportamiento experimental de la deflexión en una viga, el factor que determina la interacción entre las intercaras de los elementos son las condiciones de contacto, estas “son capaces de simular la existencia de presión entre ellos cuando hay contacto y separación entre ellos cuando no lo hay, los dos contactos materiales también tienen en cuenta la fricción y la cohesión entre las partes”. El coeficiente de fricción considerado para la interfaz normal acero – hormigón, es 0,45, mientras que para el resto de interfaces se considera 0,25 [20]. La adherencia de la fibra de carbono al acero depende directamente de la fuerza de unión, por lo tanto la aplicación del adhesivo que asegure esta unión es de vital importancia [21], por lo tanto para los análisis numéricos es necesario establecer este tipo de contacto, el cual asegura el alto desempeño de la unión adhesiva [22]. En el análisis

numérico es necesario entender que el acero, debido a la deformación mecánica se endurece, incrementa la resistencia y la dureza. Para incluir este efecto en el análisis se establece el módulo tangente que define una propiedad de material bilineal [23]. Mientras que para el hormigón se considera la curva de tensión-deformación isotrópica multilínea [24].

## 2.2. Solución implícita y solución explícita

La formulación matemática, o enfoque de integración temporal, es la principal característica distintiva entre los diferentes programas utilizados en la simulación numérica en un proceso de conformación mecánica. La formulación define la forma de resolver el problema mediante un programa. Es necesario conocer, además de esto, las limitaciones de las herramientas de simulación empleadas, ya que la misma ecuación dinámica que rige el proceso puede resolverse de dos maneras diferentes: implícita y explícitamente. En un contexto de coste computacional y cargas dinámicas, la solución implícita, en general, suele ser más rápida. Sin embargo, la solución explícita suele estar más cerca de la solución real, en la que se visualiza defectos en el proceso de conformación de la chapa, como arrugas y grietas en la parte estampada. El método implícito es el más indicado para simulaciones estáticas y el método explícito, para las simulaciones dinámicas. Existen aplicaciones en las que se pueden utilizar ambos métodos, en las que las pruebas se clasifican como cuasiestáticas, por ejemplo, en los procesos de estampado [25]. En la Figura 2.1 se indica la diferencia entre el método implícito y explícito.

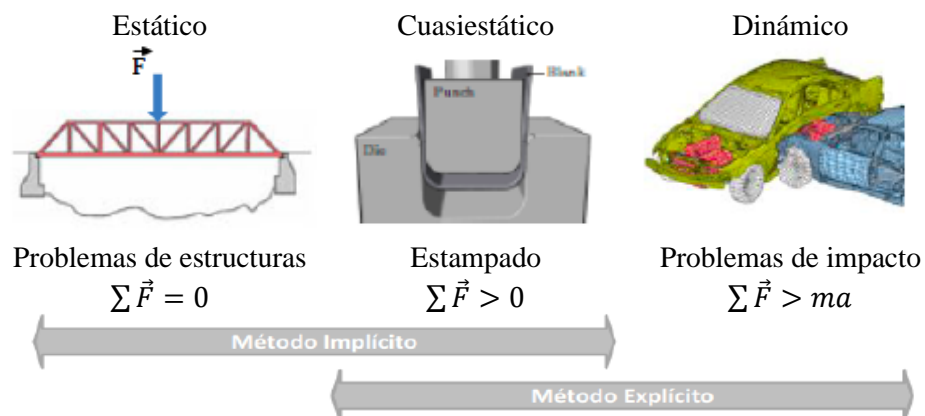


Figura 2.1. Diferencia entre método implícito y explícito [25]. F: fuerzas que actúan, m: masa, a: aceleración

Según la Figura 2.1, para simular el ensayo de flexión se puede utilizar la solución implícita o explícita debido a que se trata de un problema cuasiestático. Al tratarse de un ensayo destructivo, por lo tanto, las deformaciones son grandes y es necesario verificar en qué estado de carga falla.

### 2.3. Contacto entre cuerpos

Cuando dos cuerpos interactúan se debe indicar como afecta el movimiento relativo entre ellos. Para tener en cuenta este fenómeno se aplican contactos entre los cuerpos que pueden interactuar. Los contactos utilizados se describen a continuación.

#### 2.3.1. Contacto Bonded

Este tipo de contacto restringe la separación y el deslizamiento entre las superficies que se encuentran en contacto, es decir se considera que los cuerpos están pegados. En la Figura 2.2 se esquematiza el comportamiento de este contacto.

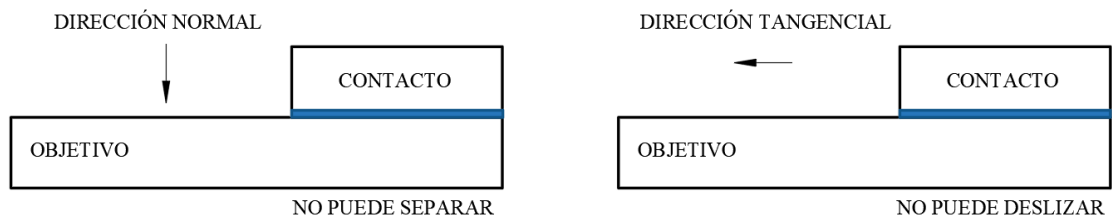


Figura 2.2. Comportamiento de contacto Bonded [26].

#### 2.3.2. Contacto Frictionless

Si se produce una separación la presión normal desaparece, por lo tanto, puede formar espacios entre los cuerpos dependiendo del tipo de carga, en la dirección tangencial la fricción se considera nula por lo tanto el deslizamiento es libre. En la Figura 2.3 se esquematiza el comportamiento de este contacto.

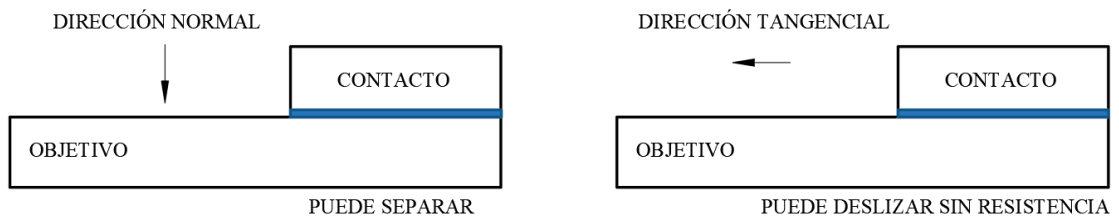


Figura 2.3. Comportamiento de contacto Frictionless [26].

### 2.3.3. Contacto Frictional

Las superficies de los cuerpos en contacto pueden soportar esfuerzos cortantes hasta que la interfaz de los cuerpos en contacto comience a deslizar entre sí. Para crear este efecto durante una simulación se debe ingresar un coeficiente de fricción no negativo. En la Figura 2.4 se esquematiza el comportamiento de este contacto.

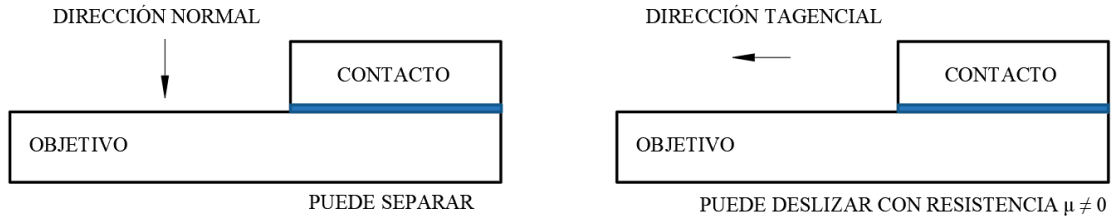


Figura 2.4. Comportamiento de contacto Frictional [26].

### 2.4. Tipos de puentes metálicos

Los puentes de acero presentan características versátiles para los diversos vanos a cubrir. La cimentación resulta ser más liviana en comparación a los puentes de hormigón, además de una construcción y montaje más rápido, y sumado la facilidad de reciclaje una vez concluida su vida útil. Las vigas comerciales pueden cubrir hasta 30 m de vano, también se pueden utilizar las vigas tipo cercha. Para vanos de hasta 100 metros las vigas armadas con placas metálicas o trabes, es una solución conveniente, en la Figura 2.5 se muestra este tipo de vigas, junto con la ubicación en el puente. Sobre los 100 metros de longitud de vano es conveniente utilizar vigas tipo cajón cuyas ventajas son: mayor rigidez torsional y buen comportamiento aerodinámico, en la Figura 2.6 se muestra las vigas tipo cajón y la configuración para el armado del puente. Para vanos de más de 250 m, resulta conveniente la utilización de celosía combinados con vigas armadas o vigas de cajón, en la Figura 2.7 se indican las características de los puentes tipo celosía [27].

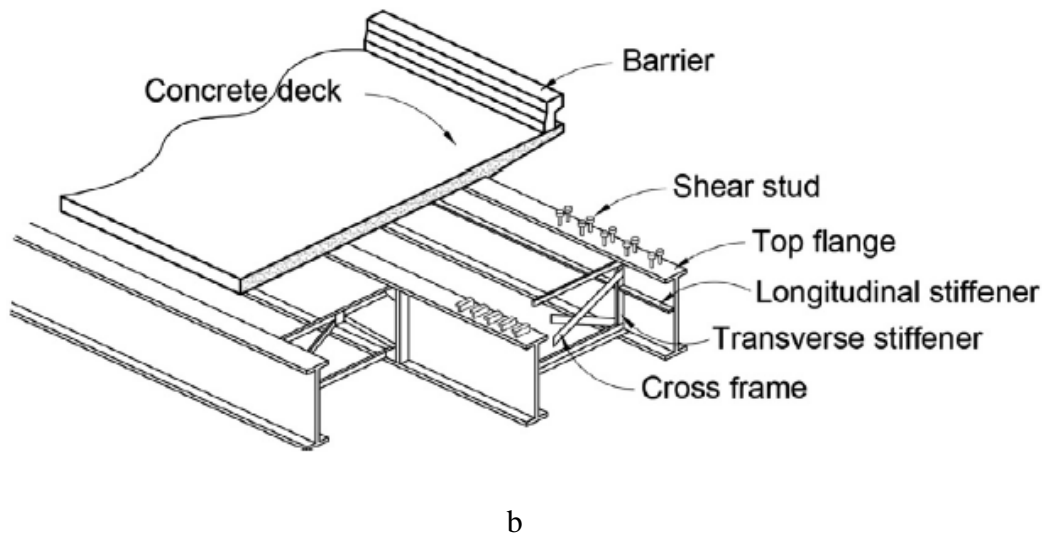
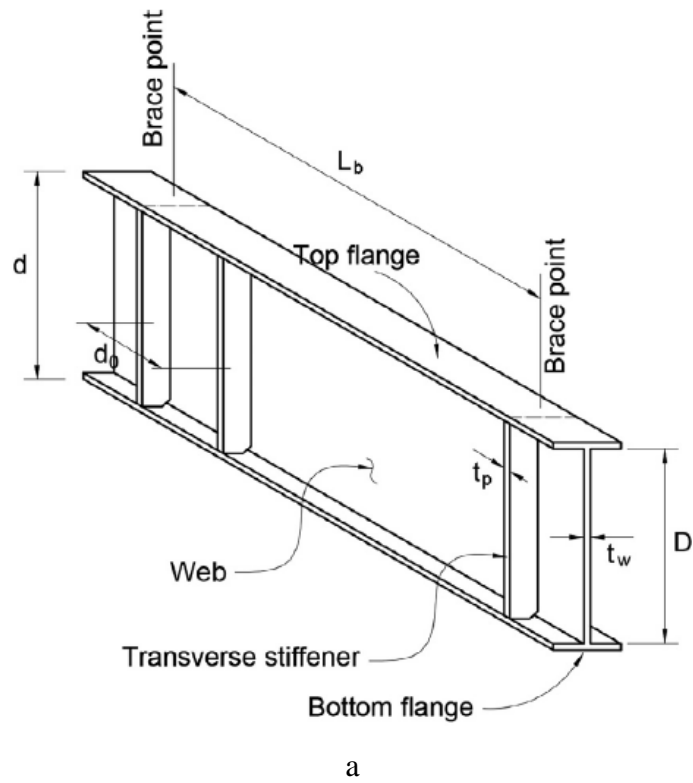


Figura 2.5. Puentes tipo trabe: a) viga armada, b) ubicación en el puente. [27].

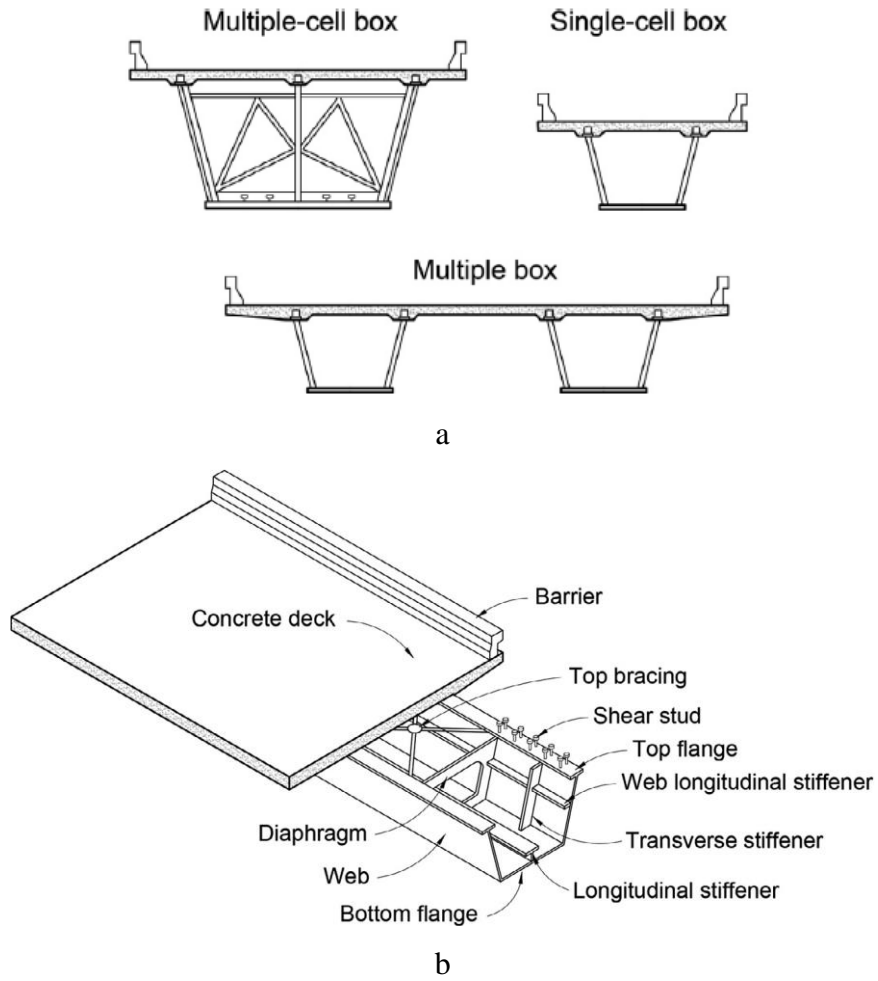


Figura 2.6. Puentes tipo cajón: a) viga armada, b) configuración de armado del puente. [27].

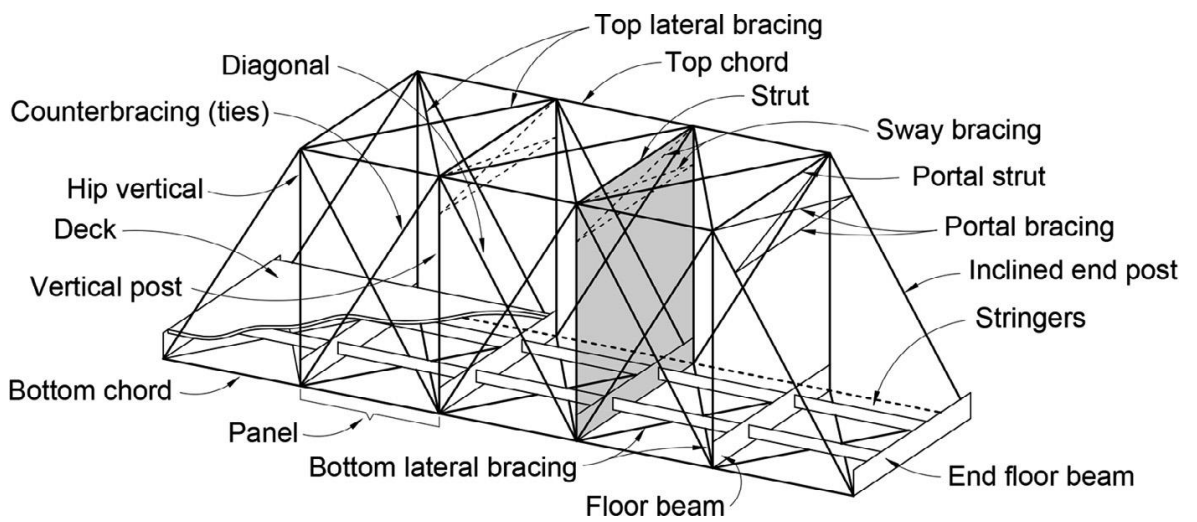


Figura 2.7. Puente tipo celosía [27].

## **2.5. Fibra de Carbono**

Materiales no convencionales se están utilizando para el reemplazo de materiales comúnmente utilizados, tal es el caso de Yamin [28], donde menciona que “los cables y tirantes de un puente colgante existente se reemplazaron con material CFRP mediante la adopción de un método equivalente al área”, también es utilizado para el reforzamiento de estructuras donde “la fibra de carbono se ha vuelto una alternativa de material de reforzamiento” [29]. La fibra de carbono brinda una excelente resistencia mecánica, y se pueden fabricar materiales que pueden superar el rendimiento de materiales convencionales y también se utilizan en aplicaciones de elevada tecnología [30]. La fibra contienen el 92% de carbono, cuya resistencia a la tracción se encuentra entre 2 a 7 GPa ( $2.04 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$  -  $7.14 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ ), considerable resistencia a la compresión, módulo de elasticidad entre 200 a 900 GPa ( $2.04 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$  -  $9.18 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ ), densidad entre 1.75 a 2.20 g/cm<sup>3</sup> [30]. En [31], “la fibra de carbono es considerada como un material excepcional para aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga”, además presenta alta resistencia a la corrosión [32]. Según el estudio de Ahmed [21] “cuando se usa fibra de carbono en la zona de tensión de la viga de acero, la carga última (como indicador de la resistencia a la flexión) se incrementó, y este incremento es directamente proporcional a la longitud del tramo”. Los resultados del uso de fibras de carbono para reforzar vigas de acero incrementan significativamente la resistencia del miembro con la metodología de aplicación apropiada [33].

### **2.5.1. Presentación de la Fibra de Carbono**

La fibra de carbono posee filamentos con diámetros entre 5 y 8  $\mu\text{m}$ , se presenta en forma de agrupaciones que contienen entre 5000 a 12000 filamentos. Se presentan en forma de tejidos o en forma de hilos [31]. Para el reforzamiento de vigas se utiliza fibra de carbono unidireccional, puesto que se puede mejorar las propiedades mecánicas a flexión de manera significativa [34]. En la Figura 2.8 se muestran las presentaciones de la fibra de carbono.



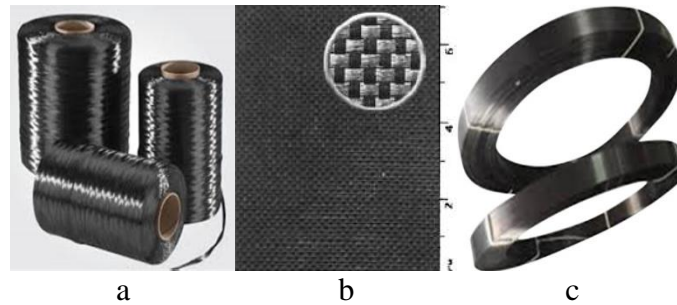


Figura 2.8. Presentación de la fibra de carbono: a) roving de fibra de carbono [35]; b) tejidos de fibra de carbono, pueden ser unidireccionales o multidireccionales [31], c) fibra de carbono unidireccional tipo platina [36].

### 2.5.2. Resina Epoxi

Este tipo de resinas son termoendurecibles. Este tipo de resina es de mayor dureza en comparación a las resinas poliéster, y por esta razón pueden utilizar hasta 180 °C de temperatura. Una ventaja es la buena adherencia a varios sustratos y baja contracción durante la polimerización [31]. Las placas de fibra de carbono como refuerzo externo se adhieren a la superficie de acero mediante un epoxi que consiste en la mezcla de dos sustratos que se curan con el transcurrir del tiempo, con lo cual se asegura la unión adhesiva adecuada entre las dos superficies en contacto [21], [37].

### 2.5.3. Preparación de la superficie de adherencia

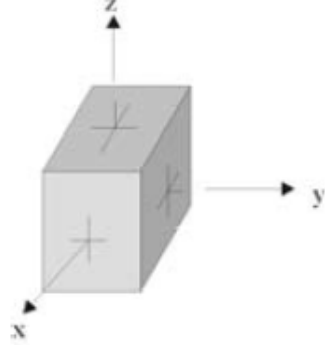
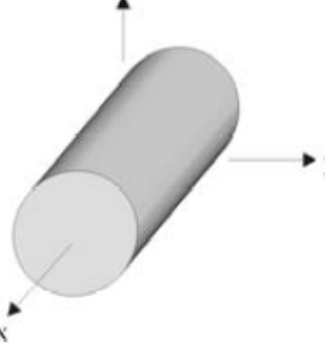
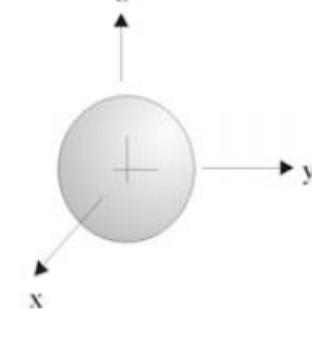
La eficiencia de la adherencia de la intercara acero-refuerzo depende del estado de la superficie de acero. La superficie de acero debe estar libre de contaminantes, para ello se debe limpiar la superficie con cepillos de alambre de acero y posteriormente aplicar limpieza con disolvente. Posterior una limpieza en seco para eliminar el polvo [33]. Otras investigaciones indican la aplicación de arena a presión o conocido como proceso de sand blasting [1], [38].

### 2.5.4. Propiedades Mecánicas de la Fibra de Carbono

La resistencia mecánica de la fibra de carbono la definen ciertas características como: las propiedades de la fibra y la matriz, la fracción de volumen de la fibra, la distribución de la fibra, la impregnación de la matriz y la compatibilidad entre la fibra y la resina [35], [39]. La fracción volumétrica es la característica que determina la resistencia final del compuesto, si las demás están controladas o son conocidas, “los resultados muestran que los compuestos de fibra de carbono / epoxi poseen la mayor fuerza de fractura y desplazamiento cuando la fracción de volumen de fibra es del 70%

en volumen” [40]. Las propiedades mecánicas dependen de la simetría de la fibra. Existen 3 casos en los cuales se determinan las constantes independientes según los ejes coordenados [31]. En la Tabla 2.1 se muestra las simetrías de las fibras correspondientes a cada caso. La fibra de carbono unidireccional le corresponde la simetría transversalmente isótropa

TABLA 2.1. SIMETRÍAS DE LAS FIBRAS [31].

Tipo	Gráfico	Constantes Independientes
Ortótropo		Módulo de elasticidad: $E_x, E_y, E_z$ Coeficiente de Poisson: $\nu_x, \nu_y, \nu_z$ Módulo cortante: $G_x, G_y, G_z$
Transversalmente Isótropo		Módulo de elasticidad: $E_x, E_y=E_z$ Coeficiente de Poisson: $\nu_x, \nu_y=\nu_z$ Módulo cortante: $G_x, G_y=G_z$
Isótropo		Módulo de elasticidad: $E_x=E_y=E_z$ Coeficiente de Poisson: $\nu_x=\nu_y=\nu_z$ Módulo cortante: $G_x=G_y=G_z$

Para determinar las propiedades mecánicas mencionadas en la Tabla 2.1 se aplican las siguientes ecuaciones, tomadas de [31]:

$$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad \text{Ec. 1}$$

$$E_2 = \frac{\frac{E_m}{(1 - \nu_m^2)(1 + 0.85\nu_f^2)}}{\frac{E_m V_f}{(1 - V_f)^{1.25}} + \frac{E_f}{1 - \nu_m^2}} \quad \text{Ec. 2}$$

$$G_{12} = \frac{G_m(1 + 0.6V_f^{0.5})}{(1 - V_f)^{1.25} + \frac{V_f}{1 - \nu_m^2}} \quad \text{Ec. 3}$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + (1 - V_f) \nu_m \quad \text{Ec. 4}$$

$$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1} \quad \text{Ec. 5}$$

$$G_{21} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{21})} \quad \text{Ec. 6}$$

### 2.5.5. Norma aplicable para la ejecución del ensayo de flexión.

Según la norma ASTM A370-14, la severidad de la prueba está principalmente sujeta al ángulo de curvatura interior y de la sección transversal de la muestra, estas condiciones son dependientes de la ubicación de la probeta, composición química, resistencia a la tracción, dureza y el tipo de acero [41]. Bajo estas consideraciones el ensayo de flexión se aplica de acuerdo con las condiciones descritas, según el requerimiento que proporcione los datos necesarios para la obtención de resultados que son importantes para la comparación con el ensayo por medio de elementos finitos.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Ubicación

El trabajo de investigación se llevará a cabo en los Laboratorios del Centro de Fomento Metalmeccánico de Tungurahua, el mismo que cuenta con los equipos necesarios para realizar los ensayos que nos permitan obtener los resultados planteados en la investigación, además de contar con personal de experiencia en la ejecución de los ensayos requeridos. El Centro de Fomento Metalmeccánico fue fundado el 2 de febrero del 2016, ubicado en la calle Toronto y Río de Janeiro, sector Catiglata, La Península, ciudad de Ambato. Tungurahua posee 580 empresas dedicadas a la metalmeccánica, de las cuales 49 se encuentran en Ambato, razón por la cual se ubica en el cuarto lugar a nivel nacional [42]. En Tungurahua la industria del cuero y calzado aportan una producción del 44% a nivel nacional [43].

#### 3.2. Equipo y materiales

##### 3.2.1. Equipo

La máquina para ejecutar los ensayos es Metrotest STH-2000/, la capacidad de carga es de 400 kN a 2000 kN. Precisión en la medición de la carga:  $\pm 0.5\%$ . Para preparar la junta epóxica se requiere de instrumentos adicionales, además de consumible para la limpieza de la superficie y equipo de protección, estos son mostrados en la Tabla 3.1 y 3.2.

TABLA 3.1. INSTRUMENTOS Y CONSUMIBLES

Balanza digital	Mezclador industrial	Paño industrial	Thinner	Espátula
				

TABLA 3.2. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL



### 3.2.2. Materiales

Para la presente investigación se utilizó dos tipos de ensayos: ensayo experimental y ensayo por medio de elementos finitos. El ensayo por medio de elementos finitos se utiliza para replicar el ensayo experimental ejecutado en [1], con el objetivo de obtener las variables que dan como resultado la reproducción del ensayo experimental por medio de elementos finitos. El ensayo experimental se ejecutó para verificar el incremento de la resistencia a flexión con el material de refuerzo disponible en el país, puesto que el material de refuerzo descrito en [1] no se encuentra al alcance. En las Tablas 3.3 a la 3.6 se describen los materiales utilizados para la presente investigación.

TABLA 3.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO PARA LA VIGAS Y CONECTORES DE CORTE

Material	Módulo de elasticidad [GPa]	Relación de Poisson	Límite de Fluencia [MPa]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Falla ante la deformación plástica
A572 Grado 50	200	0.3	364	496	0.20
A36	200	0.3	250	400	0.23
AISI 1018 (Conectores de corte)	200	0.3	220	400	0.25

TABLA 3.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE CARBONO

Material	Módulo de elasticidad [GPa]	Relación de Poisson	Módulo de corte [GPa]
E 230	230	0.23	9
E 290	290	0.23	9

TABLA 3.5. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA RESINA EPÓXICA

Módulo de elasticidad [GPa]	Relación de Poisson	Módulo de corte [GPa]
3.78	0.35	1.4

TABLA 3.6. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

Material	Relación de Poisson	Resistencia a compresión [MPa]	Falla ante la deformación plástica
Hormigón	0.18	31	0.004

Para la fibra de carbono se debe determinar las propiedades mecánicas adicionales indicadas en la Tabla 2.1. La determinación de estas propiedades mecánicas se calculó por medio de las Ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6; en el Anexo 1 se indican los valores obtenidos para los compuestos de fibra de carbono y resina epóxica  $E = 230$  GPa y  $E = 290$  GPa, respectivamente.

La viga de acero se analizó en el rango plástico, por lo tanto, se estableció la curva esfuerzo – deformación verdadera del acero A572 grado 50, el acero A36 (rigidizadores). En las Figuras 3.1 y 3.2 se indican las curvas esfuerzo – deformación verdaderas tomadas de [44], [45]. Para el hormigón se consideró el modelo de Rüsçh [46], la curva se muestra en la Figura 3.3. Con estas curvas, se definió en el software modelos de materiales multilineales.

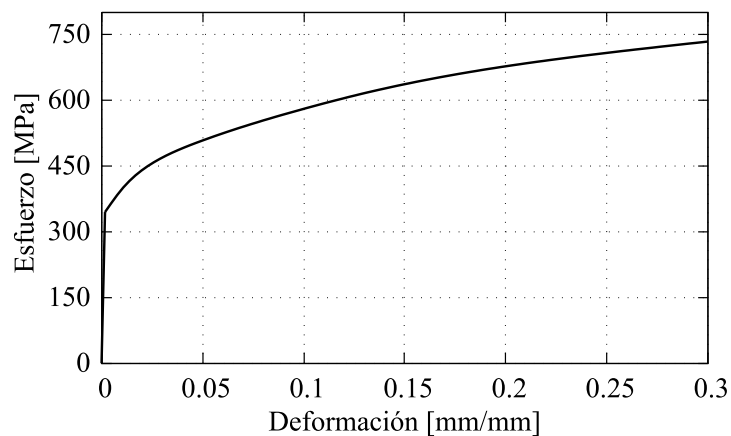


Figura 3.1. Curva esfuerzo deformación verdadera para el acero A572.

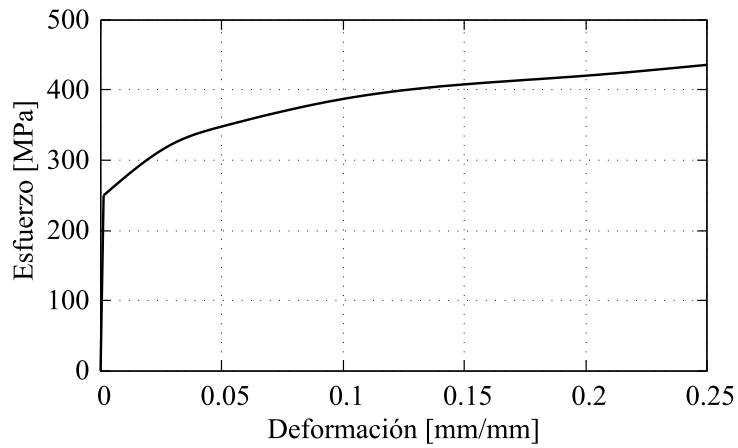


Figura 3.2. Curva esfuerzo deformación verdadera para el acero A36.

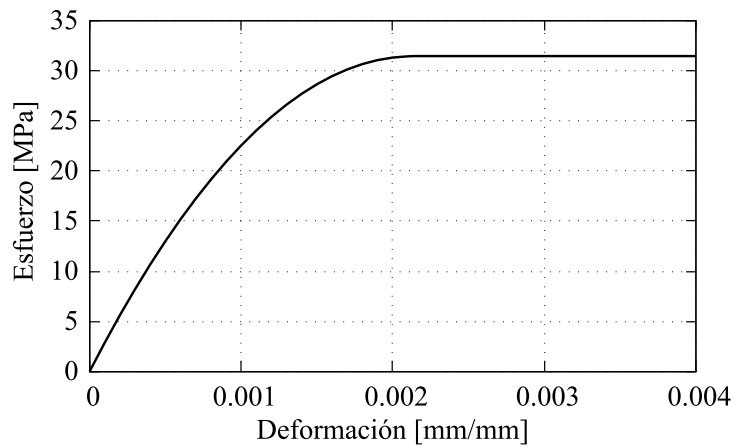


Figura 3.3. Curva esfuerzo-deformación para el hormigón.

Con los datos calculados en el Anexo 1 se determinó los compuestos de fibra de carbono correspondiente, tales compuestos de indican en la Tabla 3.7

TABLA 3.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE CARBONO.

Material	Módulo de elasticidad [GPa]	Relación de Poisson	Resistencia a tracción [MPa]	Falla ante la deformación plástica	Espesor [mm]
FC1	200	0.23	2746	0.014	1.4
FC2	162	0.23	2746	0.017	1.2

### 3.3. Tipo de investigación

Se utilizará la investigación experimental, puesto que se desea reproducir el ensayo experimental utilizando software de diseño por medio de elementos finitos. Con el enfoque cualitativo puesto que se midió las deformaciones de la viga.

### **3.4. Prueba de hipótesis**

El nivel de carga aplicada dará como resultado la deflexión en la viga, lo cual permitirá validar un modelo matemático por medio del análisis con elementos finitos, el cual representa el comportamiento real de la viga reforzada con fibra de carbono.

#### **3.4.1. Variable Independiente**

La carga aplicada a distintos niveles

#### **3.4.2. Variable Dependiente**

La deflexión en el centro de la viga, lo cual permitirá validar un modelo matemático por medio del análisis con elementos finitos

### **3.5. Población o muestra**

En la bibliografía consultada no se reportan métodos para la determinación de la muestra, además ejecutan un ensayo de cada probeta. La norma FEMA-350/junio 2020, indica que al menos se debe ejecutar dos ensayos para la conexión viga columna. El ensayo que indica la norma descrita no es específicamente para el ensayo de flexión, sin embargo, da indicios de una aproximación adecuada para ejecutar el ensayo de flexión; por lo tanto, el tamaño de la muestra a ensayar a escala, son dos vigas reforzadas y dos vigas no reforzadas.

### **3.6. Recolección de la información**

Mediante tabulación se registra de deflexión en el centro de la viga a cada nivel de carga aplicado, hasta llegar a la falla. En la Figura 3.4 y 3.5, se indica las dimensiones y materiales para la ejecución del ensayo por medio de elementos finitos y el ensayo experimental, respectivamente.



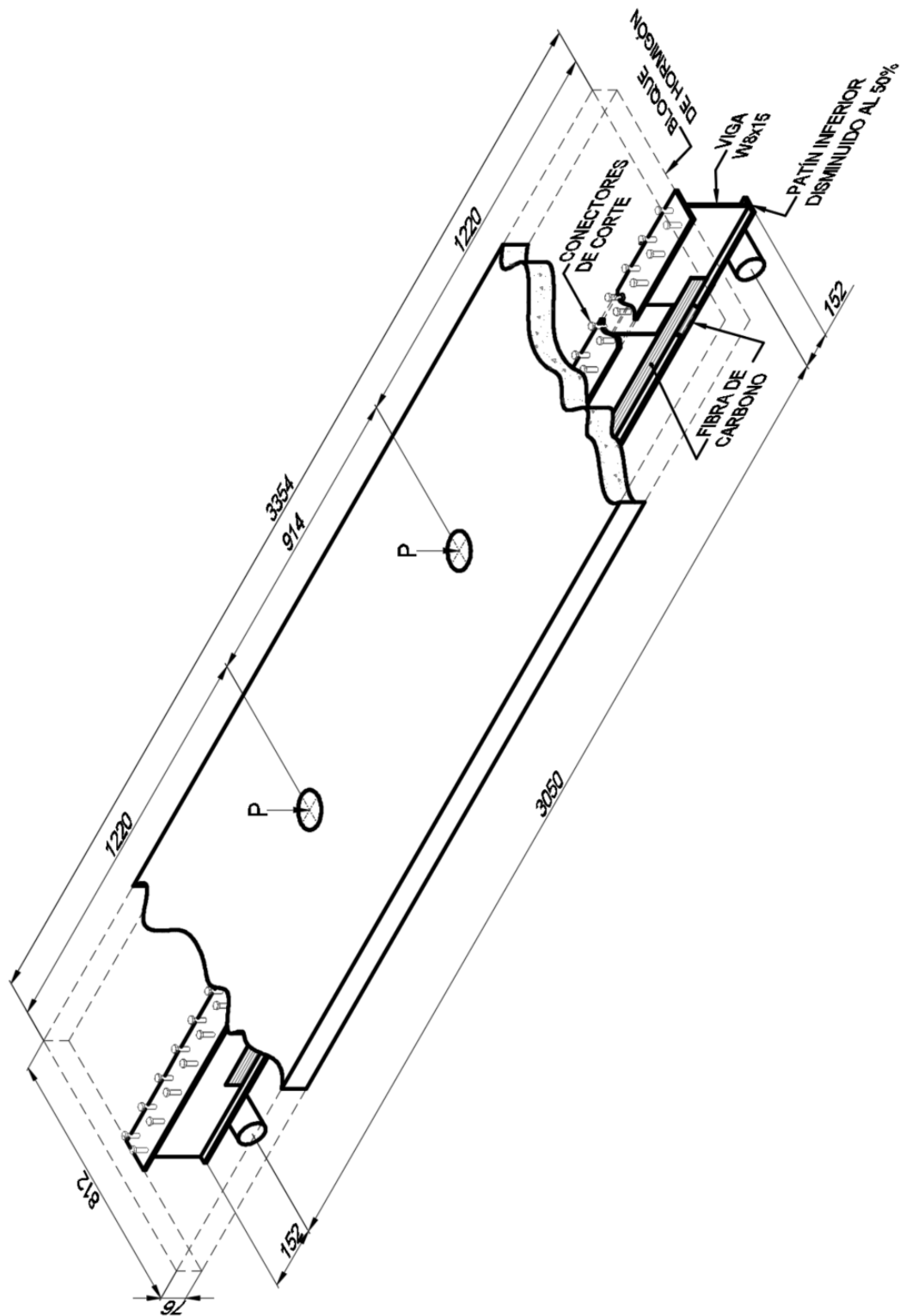


Figura 3.4. Dimensiones y materiales utilizados para el ensayo por medio de elementos finitos [1].

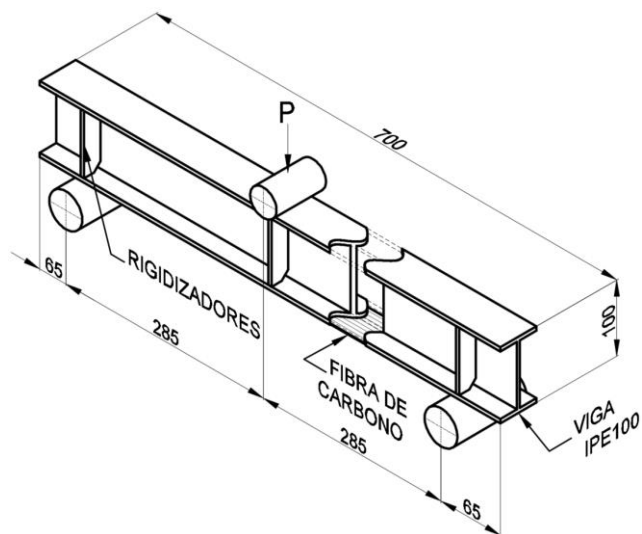


Figura 3.5. Dimensiones y materiales utilizados para el ensayo experimental.

Los contactos aplicados a la interfaz entre los materiales y el tipo de contacto entre los apoyos – viga y aplicador de carga – viga se detallan en la Tabla 3.8.

TABLA 3.8. APLICACIÓN DE CONTACTOS

Partes en contacto	Tipo de contacto aplicado	Valor de contacto
Apoyos - viga	Frictionless	No aplica
Aplicador - viga	Frictionless	No aplica
Bloque - viga	Frictional	0.45
Bloque - conectores	Frictional	0.25
Viga - fibra	Bonded	No aplica

### 3.7. Procesamiento de la información

Al ser estudio de casos, el procesamiento de la información se ejecutó mediante un análisis gráfico. Una vez obtenido los datos de los ensayos por medio de elementos finitos y experimentales, se graficaron en el eje de las abscisas las deflexiones, mientras que en el eje de las ordenadas se graficaron la carga y el esfuerzo. Las curvas de los ensayos deben tener un comportamiento similar. El proceso se describe en el diagrama de flujo de la Figura 3.6. Las probetas se identificaron según se muestra en la Tabla 3.9.

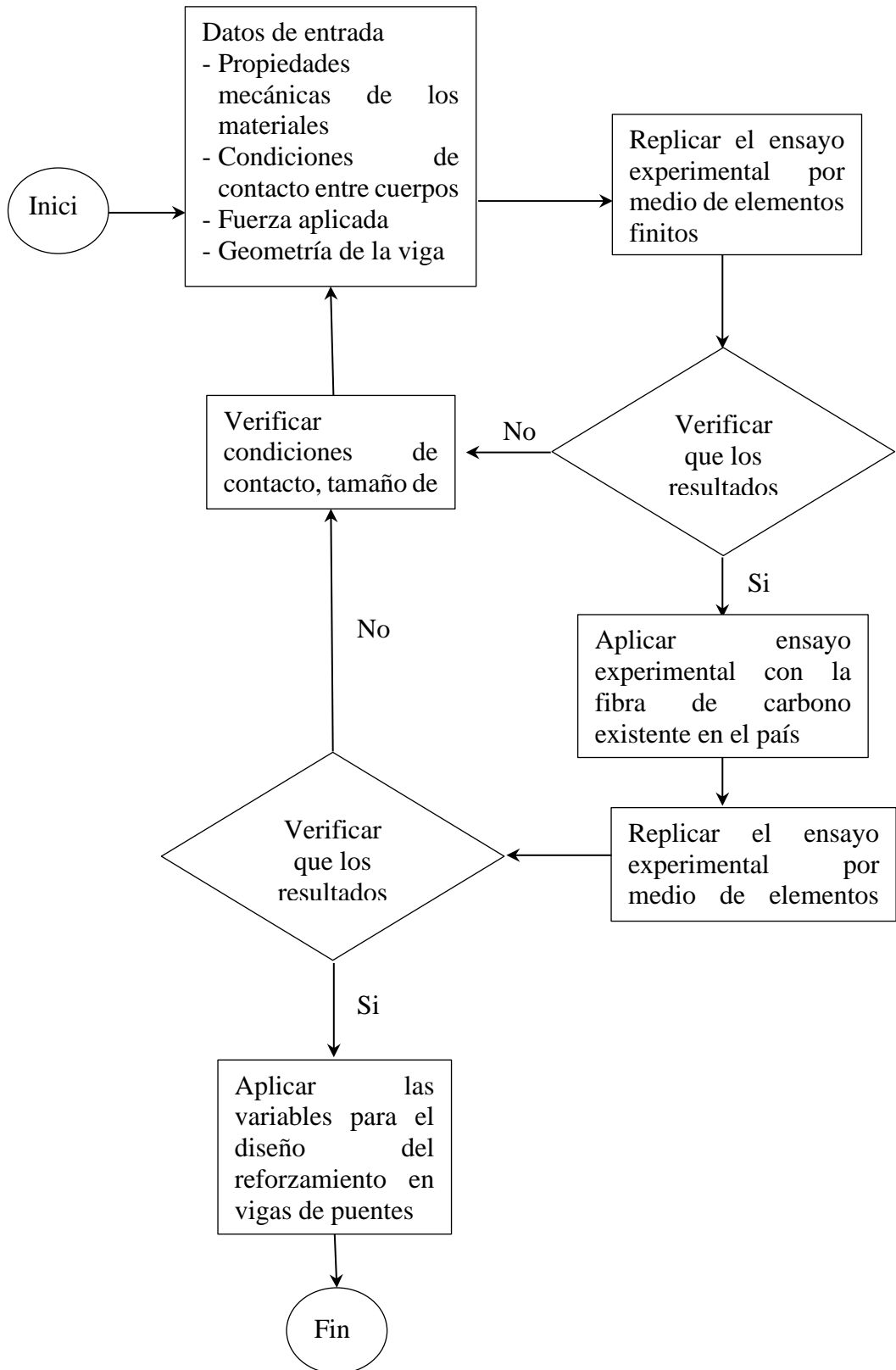


Figura 3.6. Pasos para el proceso de recolección de información.

**TABLA 3.9. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.**

Probeta	Descripción	Tipo de flexión
D50	Viga no reforzada según Figura 3.4	Ensayo experimental
D50_EF	Viga no reforzada según Figura 3.4	Ensayo con elementos finitos
D50R2E29	Viga reforzada según Figura 3.4	Ensayo experimental
D50R2E29_EF	Viga reforzada según Figura 3.4	Ensayo con elementos finitos
IPE_100_SR_EF	Viga no reforzada	Ensayo con elementos finitos
IPE_100_SR_1	Viga no reforzada muestra 1	Ensayo experimental
IPE_100_SR_2	Viga no reforzada muestra 2	Ensayo experimental
IPE_100_CR_EF	Viga reforzada	Ensayo con elementos finitos
IPE_100_CR_1	Viga reforzada muestra 1	Ensayo experimental
IPE_100_CR_2	Viga reforzada muestra 2	Ensayo experimental

### **3.8. Variables de respuesta o resultados alcanzados**

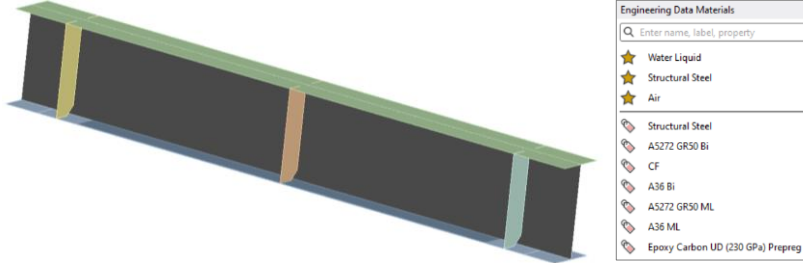
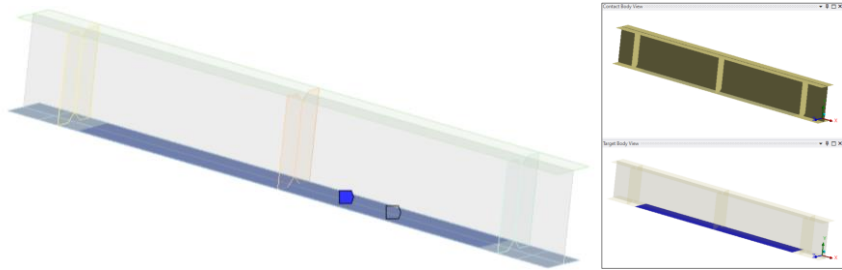
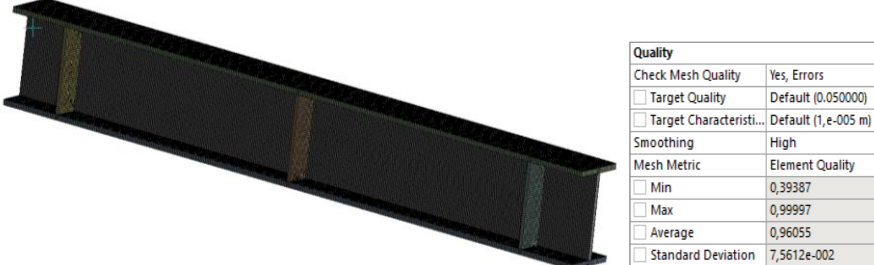
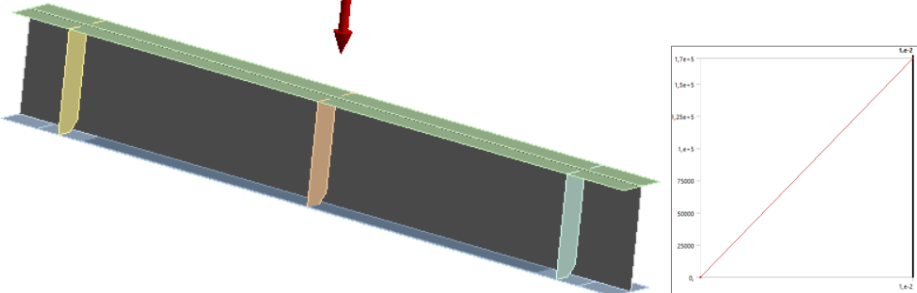
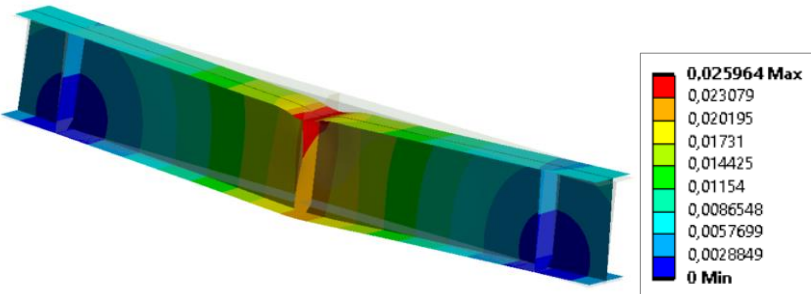
#### **3.8.1. Resultados por medio de elementos finitos**

Las variables de respuesta alcanzadas son la deflexión a distintos niveles de carga. Para obtener los resultados se utiliza el procedimiento mostrado en la Tabla 3.10. Los resultados del ensayo experimental de la viga compuesta se obtuvieron mediante la tabulación de los datos mostrados en la referencia [1]. Las deflexiones medidas en los dos tipos de ensayos, se toman en el centro de las vigas. En la Tabla 3.11 se muestra los pasos para la obtención de resultados mediante el método de elementos finitos.

**TABLA 3.10. OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE LAS VIGAS POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS.**

<b>Paso</b>	<b>Descripción</b>
1. Preparación del modelo tridimensional de la viga	Ver Figura 3.4 y Figura 3.5
2. Asignación de materiales	Ver Figura 3.1, 3.2, 3.3
3. Aplicación de apoyos y restricciones	Simplemente apoyado y restricciones de traslación a lo largo de la losa de hormigón
4. Aplicación de contacto entre materiales	Según lo indicado en el Literal 2.1.
5. Aplicación de cargas a distintos niveles	Número de niveles: 20
6. Ejecución del ensayo por medio de elementos finitos	En el software ANSYS WORKBENCH
7. Tabulación de resultados	Deflexión eje X, carga eje Y, se generan de manera automática en el software

TABLA 3.11. OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS.

Paso																				
<p>1. Representación de la geometría y definición de materiales</p>  <p>The image shows a 3D model of a beam with a central cutout. To the right is a material selection panel titled 'Engineering Data Materials'. It includes a search bar and a list of materials: Water Liquid, Structural Steel, Air, Structural Steel, AS272 GR50 Bi, CF, A36 Bi, AS272 GR50 ML, A36 ML, and Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg.</p>																				
<p>2. Asignación de contactos</p>  <p>The image shows the 3D model with contact assignments. Two inset windows show 'Contact Body Type' and 'Support Body Type' for different parts of the model.</p>																				
<p>3. Mallado</p>  <p>The image shows the 3D model with a mesh applied. To the right is a 'Quality' control table:</p> <table border="1" data-bbox="1058 1048 1305 1267"> <thead> <tr> <th colspan="2">Quality</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Check Mesh Quality</td> <td>Yes, Errors</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Quality</td> <td>Default (0.050000)</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Characteristi...</td> <td>Default (1,e-005 m)</td> </tr> <tr> <td>Smoothing</td> <td>High</td> </tr> <tr> <th>Mesh Metric</th> <th>Element Quality</th> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Min</td> <td>0,39387</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Max</td> <td>0,99997</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Average</td> <td>0,96055</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td> <td>7,5612e-002</td> </tr> </tbody> </table>	Quality		Check Mesh Quality	Yes, Errors	<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)	<input type="checkbox"/> Target Characteristi...	Default (1,e-005 m)	Smoothing	High	Mesh Metric	Element Quality	<input type="checkbox"/> Min	0,39387	<input type="checkbox"/> Max	0,99997	<input type="checkbox"/> Average	0,96055	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	7,5612e-002
Quality																				
Check Mesh Quality	Yes, Errors																			
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)																			
<input type="checkbox"/> Target Characteristi...	Default (1,e-005 m)																			
Smoothing	High																			
Mesh Metric	Element Quality																			
<input type="checkbox"/> Min	0,39387																			
<input type="checkbox"/> Max	0,99997																			
<input type="checkbox"/> Average	0,96055																			
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	7,5612e-002																			
<p>4. Condiciones de simulación, tipos de unión, desplazamiento y fuerza</p>  <p>The image shows the 3D model with a red arrow indicating a downward force. To the right is a graph showing displacement (Y-axis, 0 to 1.7e-5) versus force (X-axis, 0 to 1e-2).</p>																				
<p>5. Obtención de resultados</p>  <p>The image shows the 3D model with a color map representing simulation results. A legend on the right shows a scale from 0 Min (blue) to 0,025964 Max (red).</p> <table border="1" data-bbox="1098 1709 1273 1951"> <tbody> <tr><td>0,025964 Max</td></tr> <tr><td>0,023079</td></tr> <tr><td>0,020195</td></tr> <tr><td>0,01731</td></tr> <tr><td>0,014425</td></tr> <tr><td>0,01154</td></tr> <tr><td>0,0086548</td></tr> <tr><td>0,0057699</td></tr> <tr><td>0,0028849</td></tr> <tr><td>0 Min</td></tr> </tbody> </table>	0,025964 Max	0,023079	0,020195	0,01731	0,014425	0,01154	0,0086548	0,0057699	0,0028849	0 Min										
0,025964 Max																				
0,023079																				
0,020195																				
0,01731																				
0,014425																				
0,01154																				
0,0086548																				
0,0057699																				
0,0028849																				
0 Min																				

### 3.8.2. Resultados del ensayo experimental.

En la Tabla 3.12 se indica el procedimiento para la obtención de resultados mediante el ensayo de flexión con los materiales disponibles en el país.

TABLA 3.12. OBTENCIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO EXPERIMENTAL.

Paso
1. Limpieza de la viga 
2. Corte de la viga: longitud 700 mm 
3. Preparación de la superficie con disco de desbaste 

TABLA 3.12. OBTENCIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO EXPERIMENTAL, CONTINUACIÓN.







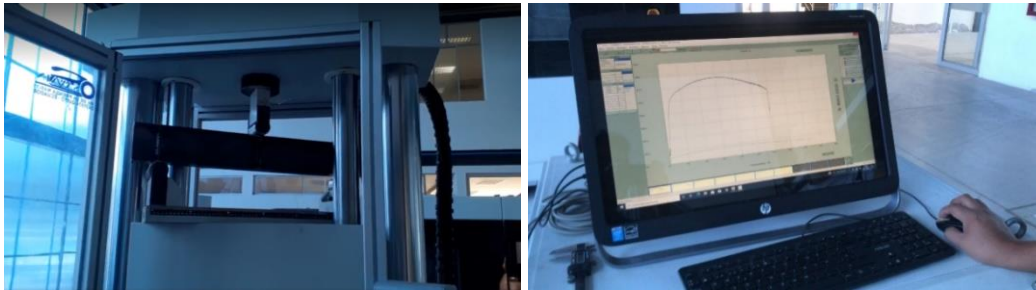
Paso
4. Corte de las láminas de fibra de carbono: longitud 500 mm

5. Preparación del epóxico, A y B con relación 3 a 1

6. Limpieza de las superficies antes de aplicar el epóxico


TABLA 3.12. OBTENCIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO EXPERIMENTAL, CONTINUACIÓN.

Paso
7. Distribución del epóxico por medio de un dispensador, espesor de capa aproximado 2 mm

8. Aplicación de la fibra de carbono en la superficie de acero,

9. Probeta concluida, tiempo de reposo para el secado del epóxico: 3 días

10. Ejecución del ensayo en la máquina universal Metrotest STH-2000, los datos se tabulan en el software de la máquina universal




## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados en tres grupos, en el primer grupo se encuentran los datos de la viga compuesta de la referencia [1] y en el segundo grupo los resultados de la viga IPE. Mientras que en el tercer grupo se presenta la aplicación de la propuesta en una viga de un puente existente.

#### 4.1. Resultados del ensayo de la viga compuesta

TABLA 4.1. DEFLEXIÓN DE LA VIGA COMPUESTA SIN REFORZAMIENTO



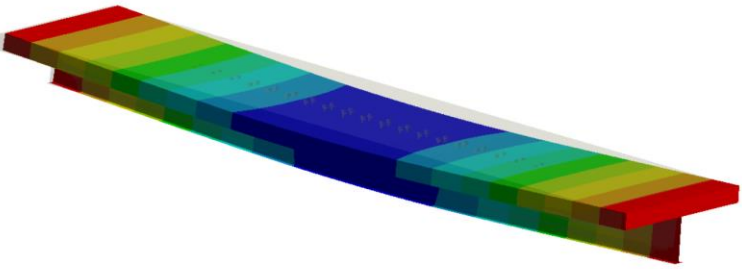


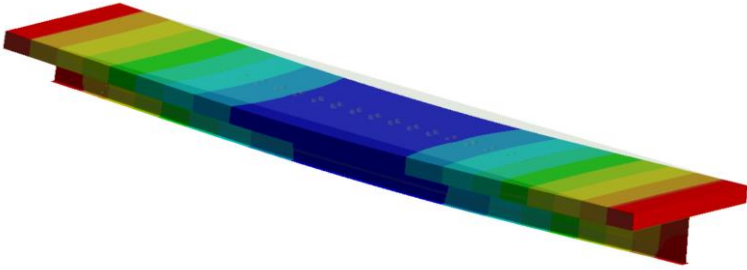
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
N° de Simulación:	01_D50	Probeta	D50_EF		
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:		
	ASTM A572 Gr 50	N/A	f'c = 31 MPa		
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:		
	116 kN	10 mm/min	18 min		
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH				
N° de nodos:	246992	Tipo de análisis:	Static Structural		
N° de elementos:	155116	Calidad de mallado:	0,8		
Características del ordenador:	Intel(R) i7-9750H CPU 2.60GHz	24 GB RAM	6 núcleos		
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra		
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021		
Resultados de Simulación					
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]				
0	0				
10	1,4816				
20	2,9907				
30	4,4970				
40	5,9995				
50	7,5703				
60	9,1454				
70	11,4861				
80	14,2961				
90	18,9121				
100	27,7424				
110	42,9669				
116	57,2690				

TABLA 4.2. DEFLEXIÓN DE LA VIGA COMPUESTA CON REFORZAMIENTO.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
N° de Simulación:	02_D50	Probeta	D50R2E29_EF
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A572 Gr 50	FC1	$f_c = 31 \text{ MPa}$
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:
	150 kN	10 mm/min	17 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
N° de nodos:	246624	Tipo de análisis:	Static Structural
N° de elementos:	155107	Calidad de mallado:	0.8
Características del ordenador:	Intel(R) i7-9750H CPU 2.60GHz	24 GB RAM	6 núcleos
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021
Resultados de Simulación			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]	 <p style="text-align: center;">Deflexión</p>	
0	0		
10	1.2635		
20	2.5963		
30	3.8829		
40	5.2773		
50	6.5794		
60	7.8737		
70	9.2604		
80	10.5470		
90	12.1186		
100	13.9908		
110	16.5254		
120	20.0080		
130	23.1125		
140	26.8490		
150	30.7935		
160	35.0115		
170	40.1072		

Los resultados mostrados en las Tablas 4.1 y 4.2 se resumen en la Figura 4.1, donde se observa que existe tendencia en el trayecto de las curvas Fuerza vs Deflexión, mediante ensayo experimental y ensayo utilizando elementos finitos, tanto para el caso con reforzamiento y sin reforzamiento.

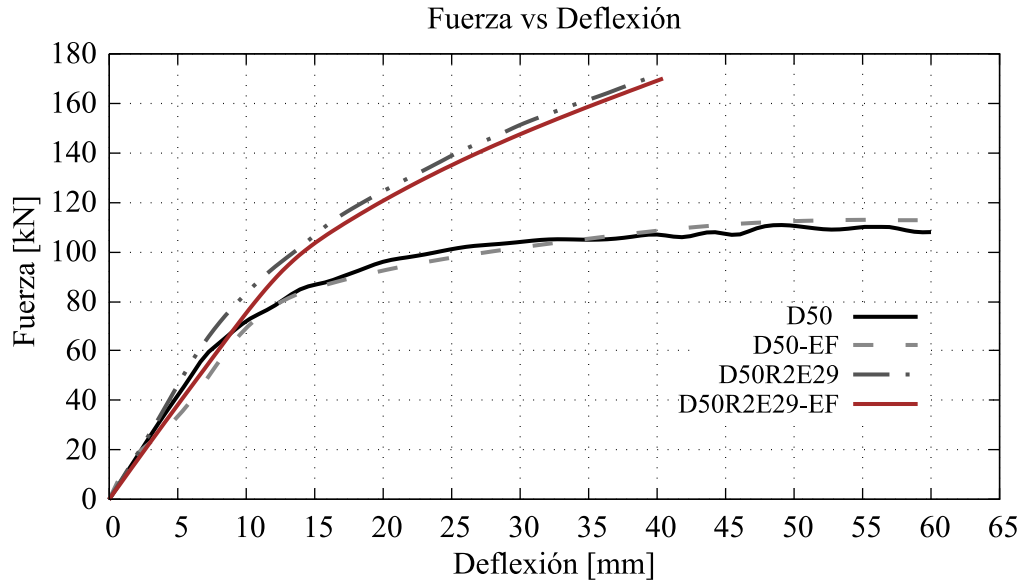


Figura 4.1. Comparación de resultados entre ensayo experimental del estudio de Al-Saidy y ensayo por medio de elementos finitos, sin reforzamiento y con reforzamiento.

La deflexión registrada por medio ensayos experimentales es aproximada a los ensayos ejecutados por medio de elementos finitos. La trayectoria en el rango plástico sugiere que existe cierta variación, sin embargo, esta es mínima tal como se indica en la Tabla 4.13. En el rango plástico la variación es mucho menor en comparación al rango elástico.

## 4.2. Resultados Viga IPE 100

TABLA 4.3. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 SIN REFORZAMIENTO – ENSAYO CON ELEMENTOS FINITOS



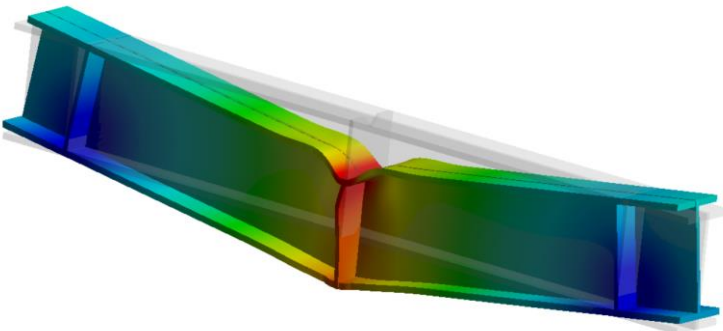
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
N° de Simulación:	01_IPE100	Probeta	IPE_100_SR_EF		
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:		
	ASTM A572 Gr 50	N/A	N/A		
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:		
	130 kN	10 mm/min	43 min		
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH				
N° de nodos:	50197	Tipo de análisis:	Static Structural		
N° de elementos:	82118	Calidad de mallado:	0.92		
Características del ordenador:	Intel(R) i7-9750H CPU 2.60GHz	24 GB RAM	6 núcleos		
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra		
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021		
Resultados de Simulación					
F [kN]	Deflexión [mm]	 <p style="text-align: center;">Deflexión</p>			
0	0				
10	0,2217				
20	0,4809				
30	0,7126				
40	0,9986				
50	1,2171				
60	1,5138				
70	1,7186				
80	1,9819				
90	2,25				
100	2,6933				
110	3,349				
120	6,635				
130	12,579				

TABLA 4.4. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 CON REFORZAMIENTO –  
ENSAYO CON ELEMENTOS FINITOS



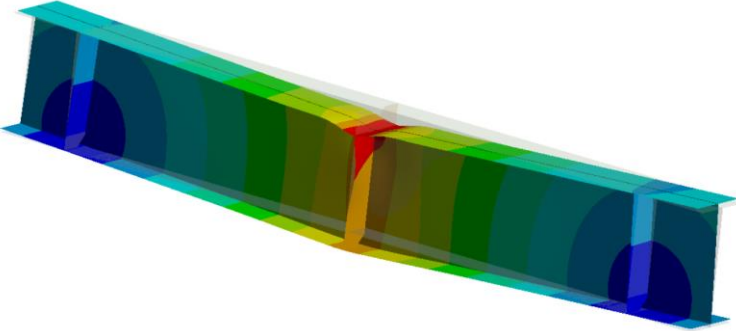
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
N° de Simulación:	02_IPE100	Probeta	IPE_100_CR_EF		
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:		
	ASTM A572 Gr 50	FC2	N/A		
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:		
	130 kN	10 mm/min	48 min		
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH				
N° de nodos:	51176	Tipo de análisis:	Static Structural		
N° de elementos:	58407	Calidad de mallado:	0.96		
Características del ordenador:	Intel(R) i7-9750H CPU 2.60GHz	24 GB RAM	6 núcleos		
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra		
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021		
Resultados de Simulación					
F [kN]	Deflexión [mm]	 <p style="text-align: center;">Deflexión</p>			
0	0				
10	0,1717				
20	0,4911				
30	0,6226				
40	0,9164				
50	1,1153				
60	1,2646				
70	1,6236				
80	1,7921				
90	2,1176				
100	2,4671				
110	2,9299				
120	3,8571				
130	5,7748				

TABLA 4.5. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 SIN REFORZAMIENTO –  
ENSAYO EXPERIMENTAL 1



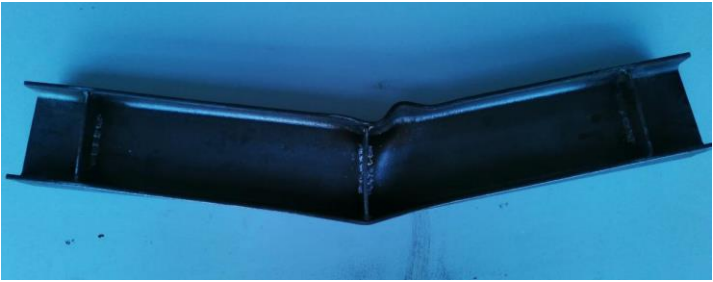
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
N° de Ensayo:	01_IPE100	Probeta	IPE_100_SR_1
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A572 Gr 50	N/A	N/A
Características del ensayo:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:
	130 kN	10 mm/min	
Características de la máquina:	Metrotest STH-2000	Capacidad: 400 kN a 2000 kN	Precisión $\pm 0.5\%$ .
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021
Resultados del ensayo			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0	0		
10	0,2586		
20	0,5173		
30	0,7788		
40	1,0284		
50	1,276		
60	1,545		
70	1,831		
80	2,125		
90	2,456		
100	2,916		
110	3,81		
120	6,562		
130	11,623		

TABLA 4.6. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 SIN REFORZAMIENTO – ENSAYO EXPERIMENTAL 2




	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
N° de Ensayo:	01_IPE100	Probeta	IPE_100_SR_2
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A572 Gr 50	N/A	N/A
Características del ensayo:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:
	130 kN	10 mm/min	
Características de la máquina:	Metrotest STH-2000	Capacidad: 400 kN a 2000 kN	Precisión $\pm 0.5\%$ .
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021
Resultados del ensayo			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0	0,0000		
10	0,2559		
20	0,5118		
30	0,7677		
40	0,9980		
50	1,2470		
60	1,5100		
70	1,7805		
80	2,0740		
90	2,4210		
100	2,8784		
110	3,5330		
120	6,3975		
130	11,3890		

TABLA 4.7. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 CON REFORZAMIENTO –  
ENSAYO EXPERIMENTAL 1







	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
N° de Ensayo:	01_IPE100	Probeta	IPE_100_CR_1
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A572 Gr 50	FC2	N/A
Características del ensayo:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:
	130 kN	10 mm/min	
Características de la máquina:	Metrotest STH-2000	Capacidad: 400 kN a 2000 kN	Precisión ± 0.5%.
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021
Resultados del ensayo			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0	0		
10	0,2350		
20	0,4700		
30	0,7050		
40	0,9410		
50	1,1595		
60	1,3998		
70	1,6410		
80	1,9105		
90	2,2400		
100	2,6683		
110	3,1833		
120	3,8500		
130	5,8860		



TABLA 4.8. DEFLEXIÓN DE LA VIGA IPE100 CON REFORZAMIENTO –  
ENSAYO EXPERIMENTAL 2

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
N° de Ensayo:	01_IPE100	Probeta	IPE_100_CR_2
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A572 Gr 50	FC2	N/A
Características del ensayo:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:
	130 kN	10 mm/min	
Características de la máquina:	Metrotest STH-2000	Capacidad: 400 kN a 2000 kN	Precisión $\pm 0.5\%$ .
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021
Resultados del ensayo			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0	0		
10	0,2305		
20	0,4610		
30	0,6915		
40	0,9010		
50	1,1438		
60	1,3800		
70	1,6400		
80	1,9026		
90	2,1945		
100	2,5837		
110	3,1740		
120	3,9580		
130	6,3190		

Los resultados mostrados en las Tablas 4.3 a la 4.8 se resumen en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4. En la Figura 4.2 y 4.3 se compara los datos del ensayo de flexión para la viga IPE sin reforzamiento, se observa que la tendencia en el trayecto de las curvas Fuerza vs Deflexión es similar, para los dos tipos de ensayo: experimental y mediante elementos finitos, tanto para el caso con reforzamiento y el caso sin reforzamiento. En la Figura 4.4 se compara los resultados de las vigas reforzadas y no reforzadas, se observa una trayectoria similar.

En el ensayo de las vigas IPE-100-CR-1 y IPE-100-CR-2, el refuerzo de fibra de carbono se desprendió, esto ocasionó que los resultados posteriores se adapten a la viga sin refuerzo como muestra en la Figura 4.3 y 4.4. Según [47], la carga cortante se distribuye uniformemente en el área de unión, por lo tanto, el área de contacto debe ser suficiente para que la unión pueda tolerar algún grado de separación antes de que se alcance la carga crítica. La longitud de fibra de carbono aplicada a las vigas IPE-100-CR-1 y IPE-100-CR-2 es 570 mm, por lo tanto, debido a la fuerza que soportaba y ante la falta de área de contacto se produjo la cizalladura en la unión con el epóxico. En la investigación de [21] menciona que en vigas cortas la rigidez no se ve afectada de manera significativa por el refuerzo de fibra utilizada, pudiendo ser similar a vigas que no son reforzadas con fibra de carbono.

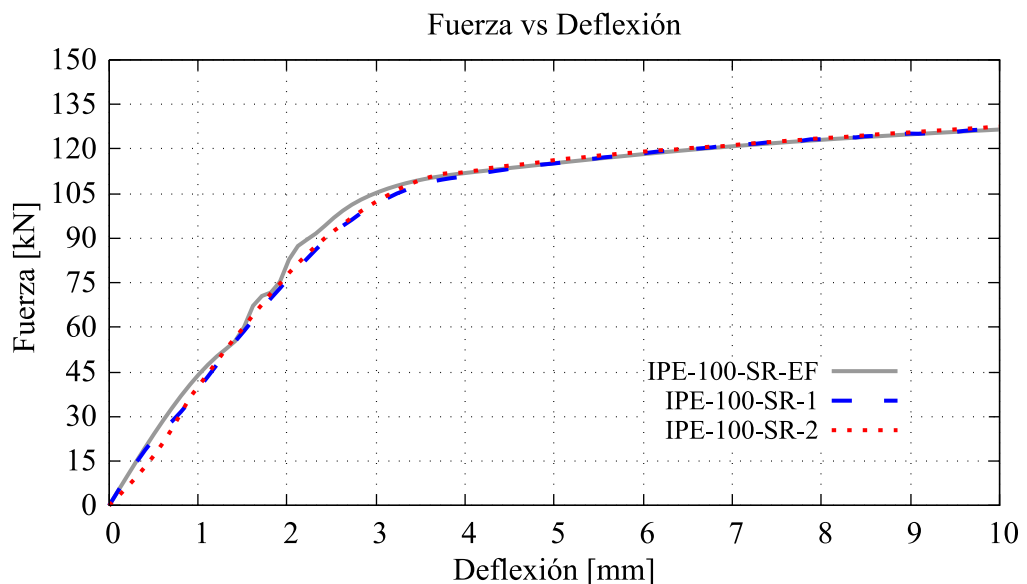


Figura 4.2. Comparación de resultados entre el ensayo experimental y el ensayo por medio de elementos finitos, sin reforzamiento.

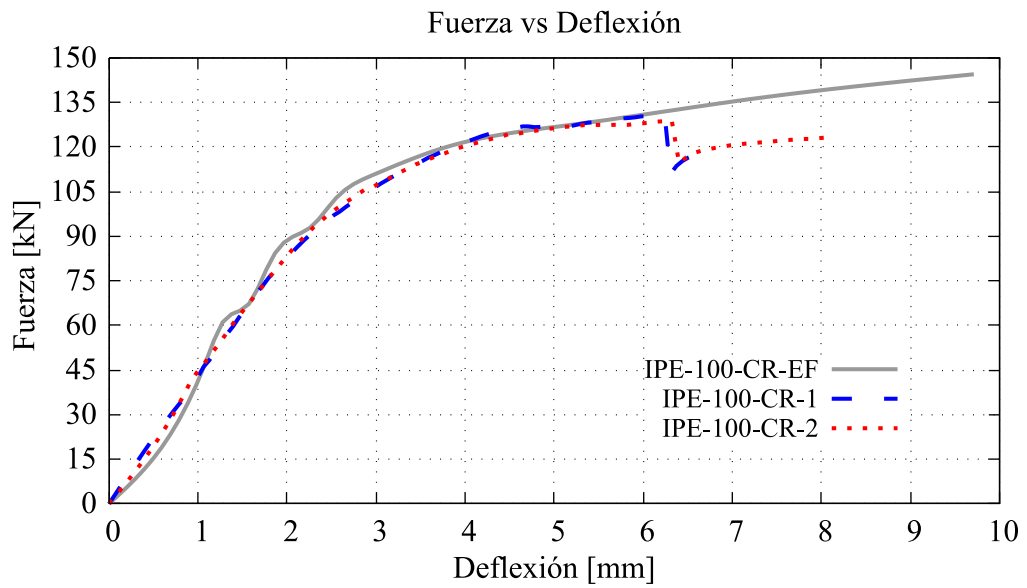


Figura 4.3. Comparación de resultados entre el ensayo experimental y el ensayo por medio de elementos finitos, con reforzamiento.

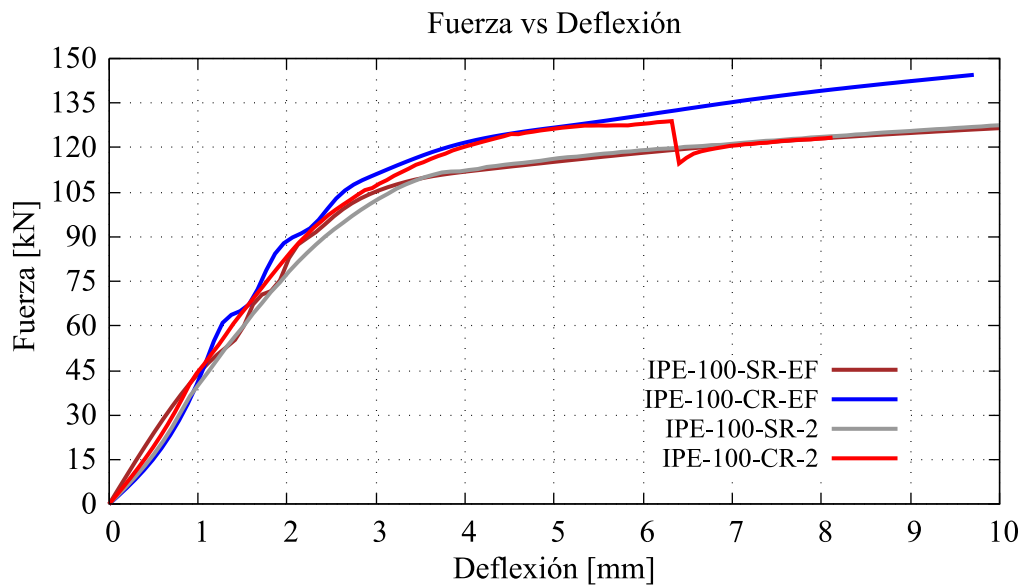


Figura 4.4. Comparación de resultados entre el ensayo experimental y el ensayo por medio de elementos finitos, sin reforzamiento y con reforzamiento.

### 4.3. Resultados de la aplicación en una viga de puente.

Los resultados obtenidos en los literales 4.1 y 4.2 brindan una orientación adecuada para la aplicación de la metodología de análisis en la viga de un puente existente. Para el análisis se consideró el puente Tucsi, cuya longitud es de 40 metros. La geometría de la viga se describe en el Anexo 2. Con la guía en la referencia [48], las cargas se estimaron en base a la norma AASHTO LRFD 2014, vigente hasta la fabricación y

montaje del puente, la cuales constan en el Anexo 3. Los casos considerados son Resistencia I y Servicio I. En las Tablas 4.9 a 4.12 se indican los datos de la simulación. En las Figuras 4.5 a 4.7 se muestran los resultados comparados para los casos: Resistencia I y Servicio I, para el estado con reforzamiento y sin reforzamiento.

En la Figura 4.5 se observa la deflexión a lo largo de la viga, para el caso Resistencia I tiene una deflexión aproximada de 225 mm, y se registra una reducción aproximada a 75 mm una vez aplicado el refuerzo de fibra de carbono. La reducción también es evidente en el caso de Servicio I, la deflexión se reduce de 150 mm a 50 mm aproximadamente. En las Figura 4.6 y 4.7 se observa el esfuerzo a lo largo del patín superior e inferior respectivamente, el comportamiento es similar al de la deflexión, es decir se reduce el esfuerzo al comparar los casos con refuerzo y sin refuerzo.

**TABLA 4.9. DATOS DE SIMULACIÓN PARA LA VIGA DE 40 METROS:  
RESISTENCIA I - SIN REFORZAMIENTO**

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
N° de Simulación:	01	Probeta	Resistencia I - SR
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A588	N/A	24 MPa
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:
	Resistencia I	N/A	35 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
N° de nodos:	146135	Tipo de análisis:	Static Structural
N° de elementos:	142965	Calidad de mallado:	0.97
Características del ordenador:	Intel(R) i7-9750H CPU 2.60GHz	24 GB RAM	6 núcleos
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021
Resultados en la Figura 4.5, 4.6 y 4.7			

**TABLA 4.10. DATOS DE SIMULACIÓN PARA LA VIGA DE 40 METROS:  
RESISTENCIA I - CON REFORZAMIENTO**

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
N° de Simulación:	01	Probeta	Resistencia I - CR
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A588	FC1	24 MPa
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:
	Resistencia I	N/A	59 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
N° de nodos:	155901	Tipo de análisis:	Static Structural
N° de elementos:	149779	Calidad de mallado:	0.97
Características del ordenador:	Intel(R) i7-9750H CPU 2.60GHz	24 GB RAM	6 núcleos
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021
Resultados en la Figura 4.5, 4.6 y 4.7			

**TABLA 4.11. DATOS DE SIMULACIÓN PARA LA VIGA DE 40 METROS:  
SERVICIO I - SIN REFORZAMIENTO**

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
N° de Simulación:	01	Probeta	Servicio I - SR
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A588	N/A	24 MPa
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:
	Servicio I	N/A	37 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
N° de nodos:	146135	Tipo de análisis:	Static Structural
N° de elementos:	142965	Calidad de mallado:	0.97
Características del ordenador:	Intel(R) i7-9750H CPU 2.60GHz	24 GB RAM	6 núcleos
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021
Resultados en la Figura 4.5, 4.6 y 4.7			

TABLA 4.12. DATOS DE SIMULACIÓN PARA LA VIGA DE 40 METROS:  
SERVICIO I - CON REFORZAMIENTO

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
N° de Simulación:	01	Probeta	Servicio I - CR
Material:	Viga:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A588	FC1	24 MPa
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación	Tiempo de procesamiento:
	Servicio I	N/A	38 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
N° de nodos:	155901	Tipo de análisis:	Static Structural
N° de elementos:	149779	Calidad de mallado:	0.97
Características del ordenador:	Intel(R) i7-9750H CPU 2.60GHz	24 GB RAM	6 núcleos
Realizado por:	F. Peña	Revisado por:	Ing. Marcelo Guerra
	J. Yunapanta	Fecha:	22/12/2021
Resultados en la Figura 4.5, 4.6 y 4.7			

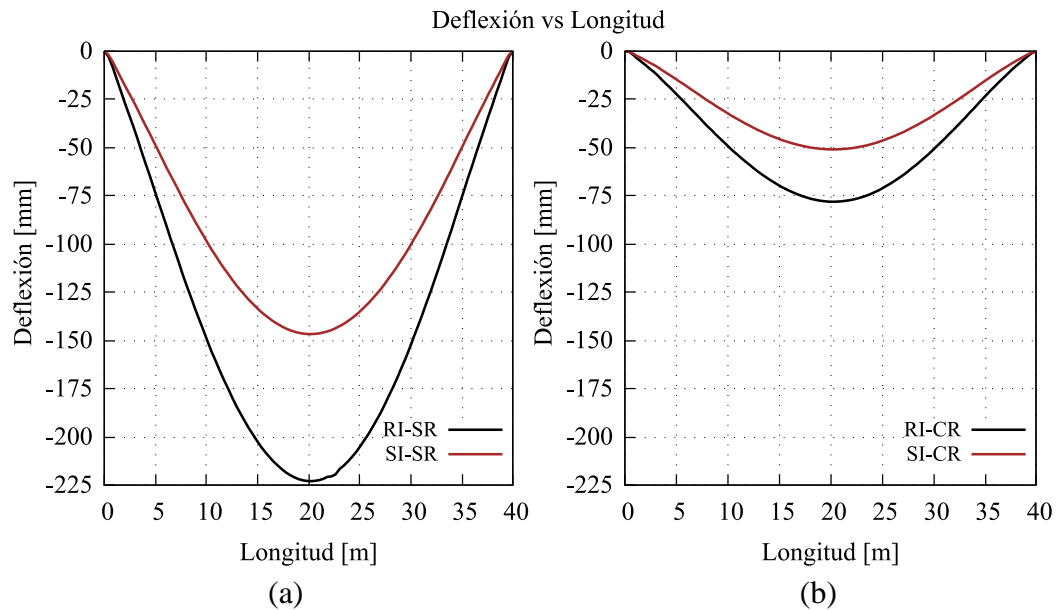


Figura 4.5. Comparación de esfuerzos de deflexión: a) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Sin Refuerzo (SR), b) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Con Refuerzo (SR)

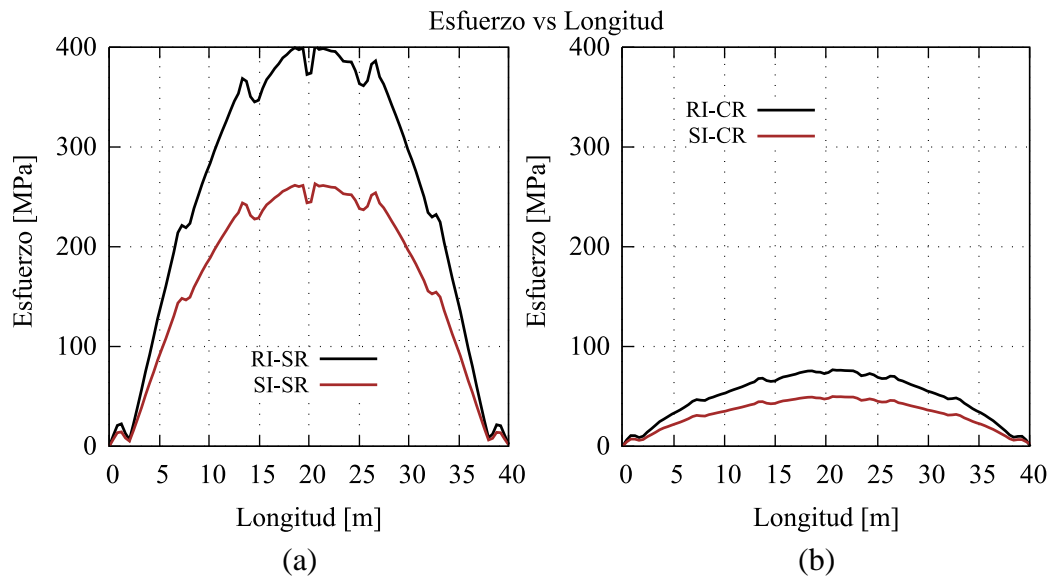


Figura 4.6. Comparación de esfuerzos patín superior: a) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Sin Refuerzo (SR), b) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Con Refuerzo (CR)

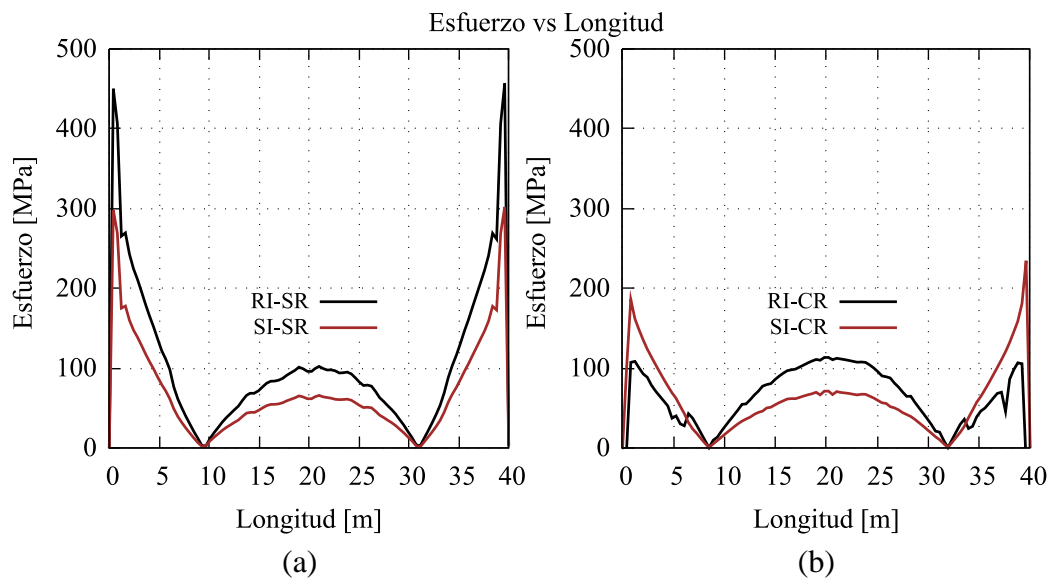


Figura 4.7. Comparación de esfuerzos patín inferior: a) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Sin Refuerzo (SR), b) Resistencia I (RI), Servicio I (SI), Con Refuerzo (CR)

#### 4.4. Verificación de la hipótesis

El método utilizado es la comparación de datos expresados en la diferencia de las deflexiones de cada uno de los ensayos. La diferencia positiva significa que los datos experimentales están bajo los datos obtenidos mediante el método de elementos finitos, y si la diferencia resulta negativa significa que los datos experimentales están sobre

los datos obtenidos mediante el método de elementos finitos. En las Tablas 4.13 y 4.14, se muestran los resultados comparados.

TABLA 4.13. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE LA VIGA COMPUESTA.

Fuerza [kN]	D50	D50_EF	DIFERENCIA	D50R2E29	D50R2E29_EF	DIFERENCIA
	Deflexión [mm]					
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	1,170	1,482	-0,311	0,985	1,026	-0,041
20	2,379	2,991	-0,612	2,158	2,143	0,015
30	4,044	4,497	-0,453	3,296	3,259	0,037
40	5,471	6,000	-0,529	4,330	4,336	-0,006
50	6,993	7,570	-0,577	5,384	5,375	0,009
60	8,592	9,145	-0,554	6,585	6,492	0,094
70	10,826	11,486	-0,660	8,094	7,793	0,300
80	13,803	14,296	-0,493	10,000	9,358	0,642
90	17,887	18,912	-1,025	11,690	11,209	0,481
100	25,413	27,742	-2,329	13,715	13,444	0,271
110	42,274	42,967	-0,693	16,061	15,682	0,380
Máximo			0,000	18,897	18,477	0,419
Mínimo			-2,329	22,102	22,023	0,079
				25,0000	25,3354	-0,3354
				30,0000	29,4263	0,5737
				34,1131	29,2829	4,8303
				41,2291	39,9757	1,2533
Máximo						4,8303
Mínimo						-0,3354

En la viga compuesta sin refuerzo existe una diferencia mínima de -2,329 mm, mientras que en la viga compuesta con refuerzo existe una diferencia máxima de 4,8303 mm y una diferencia mínima de -0,3354 mm.



TABLA 4.14. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE LA VIGA IPE.

Fuerza [kN]	IPE_100_SR_EF	IPE_100_SR_1	DIFERENCIA	IPE_100_SR_2	DIFERENCIA	IPE_100_CR_EF	IPE_100_CR_1	DIFERENCIA	IPE_100_CR_2	DIFERENCIA
	Deflexión [mm]									
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,222	0,259	0,037	0,256	0,034	0,172	0,235	0,063	0,231	0,059
20	0,481	0,517	0,036	0,512	0,031	0,491	0,470	0,021	0,461	0,030
30	0,713	0,779	0,066	0,768	0,055	0,623	0,705	0,082	0,692	0,069
40	0,999	1,028	0,030	0,998	0,001	0,916	0,941	0,025	0,901	0,015
50	1,217	1,276	0,059	1,247	0,030	1,115	1,160	0,044	1,144	0,029
60	1,514	1,545	0,031	1,510	0,004	1,265	1,400	0,135	1,380	0,115
70	1,719	1,831	0,112	1,781	0,062	1,624	1,641	0,017	1,640	0,016
80	1,982	2,125	0,143	2,074	0,092	1,792	1,911	0,118	1,903	0,111
90	2,250	2,456	0,206	2,421	0,171	2,118	2,240	0,122	2,195	0,077
100	2,693	2,916	0,223	2,878	0,185	2,467	2,668	0,201	2,584	0,117
110	3,349	3,810	0,461	3,533	0,184	2,930	3,183	0,253	3,174	0,244
120	6,635	6,562	0,073	6,398	0,238	3,857	3,850	0,007	3,958	0,101
130	12,579	11,623	0,956	11,389	1,190	5,775	5,886	0,111	6,319	0,544
Máximo			0,956		1,190			0,253		0,544
Mínimo			0,030		0,001			0,007		0,015

En la viga sin refuerzo existe una diferencia máxima de 0,956 mm y 1,190 mm para cada ensayo respectivamente, mientras que en la viga con refuerzo existe una diferencia máxima de 0,253 mm y 0,544 mm.

Las diferencias calculadas son aceptables como se observa en las Figuras 4.1 a la 4.4, en las cuales se comparó cada uno de los métodos en todos los casos, por lo tanto, la hipótesis planteada es adecuada y por consiguiente es aceptada.

#### 4.5. Análisis de costos

El análisis de los costos descritos a continuación hace referencia a la aplicación de la fibra de carbono y la resina epóxica a lo largo de las 4 vigas longitudinales que tienen una dimensión de 40 m cada una. El primer rubro de diseño y planificación nos permite determinar a través de un análisis dinámico de cargas, los lugares específicos de adherencia de la fibra y su efecto en términos de incremento de resistencia, requiere

de conocimientos técnicos especializados por lo que su costo corresponde al 8,19 % del costo total; el ítem 3 hace referencia a la instalación de andamios colgantes con las consideraciones de seguridad pertinentes que garanticen la ejecución del trabajo minimizando los riesgos y maximizando la confiabilidad de los ejecutores; el costo unitario de la fibra de carbono es de 34,09 \$/m y el de la resina epóxica de 15,5 \$/Kg dándonos un total de \$ 26779,68 que corresponden al 48,73% del costo total; los materiales consumibles como el desoxidante, thinner, paños industriales y gratas se estiman en \$ 821 que corresponden al 1,49% del costo total. Es necesario también utilizar equipos e instrumentos como un generador eléctrico, amoladoras manuales, prensas, dispensadores, espátulas, mezclador industrial, y balanza digital, los que generan un costo de renta de \$ 5757 equivalentes al 10,48 % del costo total, en honorarios profesionales se estima \$ 3400 que corresponde al 6,19 % del costo total y finalmente se incluyen rubros por logística y transporte, y contingencias por un valor de \$10495,89 que corresponden a un 19,1 %. El detalle de cada costo se indica en el Anexo 4.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- La investigación bibliográfica permitió determinar las propiedades elásticas de la fibra de carbono unidireccional, las mismas que constan en el Anexo 1. Estas constantes permitieron seleccionar el material de la fibra de carbono correspondiente para los ensayos experimentales y ensayos por medio de elementos finitos, los cuales presentaron resultados satisfactorios.
- La superficie del acero donde se aplicó el refuerzo debe estar completamente limpia. Según el fabricante del producto recomienda la limpieza con chorro de arena, o discos abrasivos. Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se utilizó la limpieza con discos de desbaste puesto que este método se aplicaría en trabajos de campo por el factor económico que representa.
- El área de contacto en la junta epóxica es el factor determinante para la estabilidad de la unión. Al ser una viga de 700 mm de longitud, la falla se produjo en la junta epóxica, por lo tanto, se concluye que se obtendrían mejores resultados en vigas de mayor longitud.
- Las variables utilizadas para reproducir el ensayo experimental por medio del análisis con elementos finitos son adecuadas, puesto que la comparación de resultados da diferencias no significativas. En los ensayos experimentales de la referencia [1], se determinó una diferencia mínima de -2,329 mm para la viga no reforzada, mientras que para la viga reforzada se determinó una diferencia máxima de 4,8303 mm. En los resultados para los ensayos experimentales de la viga IPE, se determinó una diferencia máxima de 1.19 mm en el caso de vigas no reforzadas, mientras que para las vigas reforzadas se determinó una diferencia máxima de 0,544 mm.
- Los resultados obtenidos en vigas más largas, tal es el caso de la viga de 40 metros, donde se verifica que el reforzamiento de vigas de acero con fibra de carbono favorece a la disminución de esfuerzos y de deflexiones.
- El costo global estimado para el Puente Tucsi con una longitud de 40 m es de \$54954,77 por lo que se deduce un costo aproximado de \$ 1373,87 por metro lineal. El detalle de los costos se adjunta en el Anexo 4.

## 5.2. Recomendaciones

- La preparación de la superficie de la viga, previo a la aplicación de la resina epóxica es de fundamental importancia por lo que se recomienda la limpieza por medio de una amoladora con disco de desbaste y grata, hasta obtener una superficie brillante. Otra alternativa sugerida en la bibliografía investigada es la limpieza con arena a presión (sand blasting), sin embargo, no se consideró este método puesto que para la ejecución de la limpieza en campo no sería el adecuado por la dificultad que conlleva el reciclado de la arena y por los costos que implica la utilización del equipo.
- En la etapa de corte de la fibra de carbono, eventualmente se puede producir un desgarramiento longitudinal de la misma. Por tal motivo se recomienda se ejecute el corte protegiendo el área de incidencia de la herramienta de corte, para la presente investigación se utilizó cinta adhesiva. Se recomienda además utilizar herramientas manuales para el corte.
- Al momento de ejecutar los ensayos de flexión, permitir la aplicación de la carga hasta antes de que la deformación plástica se presente en el patín superior de la viga, esto con el objetivo de obtener resultados de deflexión en el patín inferior, puesto que la deflexión registrada por el equipo de ensayo no corresponde a la deflexión total de la viga. Si se va a utilizar medidores de deflexión en la parte inferior de la viga, esta recomendación no debe ser aplicada.
- Proponer investigaciones para determinar la rugosidad más adecuada de la superficie que propicie mejores resultados de adherencia entre la resina epóxica y el acero.

## 5.3. Bibliografía

- [1] A. Al-Saidy, F. W. Klaiber, A. H. Al-Saidy, ; F W Klaiber, and T. J. Wipf, “Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates,” *Artic. J. Compos. Constr.*, vol. 8, no. 2, pp. 163–172, Mar. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(163).
- [2] M. E.-H. journal and undefined 2017, “Structural analysis of a composite continuous girder with a single rectangular web opening,” *Elsevier*, Accessed: Oct. 04, 2020. [Online]. Available:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404815000528>.
- [3] X. Liu, M. Bradford, Q. Chen, H. B.-F. E. in A. and, and undefined 2016, “Finite element modelling of steel–concrete composite beams with high-strength friction-grip bolt shear connectors,” *Elsevier*, Accessed: Oct. 04, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X15001390>.
- [4] L. E. Yamin and D. Ruiz, “Vulnerabilidad sísmica de puentes en Colombia y estrategias para rehabilitación,” <https://doi.org/10.16924/revinge.13.10>, no. 13, pp. 74–80, Feb. 2021, doi: 10.16924/REVINGE.13.10.
- [5] P. Mantilla, “Estudio Técnico del Estado Actual de los Puentes Metálicos,” 2017.
- [6] G. Alegre Gago, “Estudio de la influencia en la resistencia y ductilidad de las fibras de carbono utilizadas como reforzamiento de vigas de concreto armado,” 2017.
- [7] W. D. Borja Quintanilla and J. P. Rea Castillo, “Análisis comparativo del módulo de rotura en vigas de hormigón simple y vigas reforzadas con fibra de carbono con una resistencia a la compresión de 28 MPa utilizando agregados del sector Guayllabamba y cemento holcim tipo HE.” Quito: UCE., 2015.
- [8] M. Dawood and S. Rizkalla, “Development of a Carbon Fiber Reinforced Polymer System for Strengthening and Repair of Steel Bridges and Structures,” 2008.
- [9] D. Linghoff, R. Haghani, M. A.-E.-T. structures, and undefined 2009, “Carbon-fibre composites for strengthening steel structures,” *Elsevier*, Accessed: Oct. 04, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823108002255>.
- [10] H. T. Wang, G. Wu, and J. B. Jiang, “Closure to ‘fatigue Behavior of Cracked Steel Plates Strengthened with Different CFRP Systems and Configurations’ by Hai-Tao Wang, Gang Wu, and Jian-Biao Jiang,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 21, no. 3. American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 659–669, Jun. 01, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000768.
- [11] J. Barrezueta and A. Moscoso, “Ampliación y Reforzamiento Mediante Fibras de Carbono del Puente San Ramón sobre El Río Alcacay de La Comunidad de Dacte Perteneiente al Cantón Sígsig, Provincia del Azuay.” Cuenca.

- [12] J. Dueñas, “Reforzamiento de Estructuras con FRP (fiber reinforcement polymer), Aplicacion al Caso de Refuerzo a Flexión de Vigas Metálicas.” .
- [13] S. G. Vaca Uribe, “Análisis de elementos estructurales que trabajan a flexión con fibras de carbono.” Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., 2013.
- [14] M. D. Telenchana Flores, “Análisis numérico experimental de los componentes del material compuesto alternativo de matriz epoxi reforzada con fibras sintéticas utilizado para la fabricación y reparación de superficies de vuelo en las aeronaves del CIDFAE.” Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., 2020.
- [15] P. A. Silva Vera, “Refuerzo estructural con fibra de carbono.” Quito: USFQ, 2016, 2016.
- [16] A. Öchsner and R. Makvandi, “Finite Elements for Truss and Frame Structures,” 2019, doi: 10.1007/978-3-319-94941-3.
- [17] A. H. Al-Zuhairi, A. Mansi, A. H. A. Al-Zuhairi, and A. I. Mansi, *Behavior of Composite Concrete-Castellated Steel Beams in Flexure*. 2017.
- [18] T. Subramani, ... K. B.-J. of A. or I. in, and undefined 2016, “Finite Element Analysis Of Composite Element For FRP Reinforced Concrete Slab By Using ANSYS,” *academia.edu*, Accessed: Jun. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/download/46499194/IJAIEM-2016-05-24-22.pdf>.
- [19] J. Wang, J. Ren, and Y. Zhang, “Vibration Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Steel-Concrete Composite Beams Considering Shear-Slip Effects,” *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 19, no. 7, Jul. 2019, doi: 10.1142/S0219455419500779.
- [20] A. M. Mahmoud, “Finite element modeling of steel concrete beam considering double composite action,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 73–88, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.asej.2015.03.012.
- [21] A. Al-Ridha, A. Atshan, ... K. M.-J. of, and undefined 2019, “Effect of strengthening of steel beams with variable length by using carbon fiber,” *hindawi.com*, Accessed: Jun. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/je/2019/1631692/abs/>.
- [22] M. Seleem, I. Sharaky, H. S.-M. & Design, and undefined 2010, “Flexural behavior of steel beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer plates—Three dimensional finite element simulation,” *Elsevier*, Accessed: Sep.

- 17, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909004956>.
- [23] B. Chatterjee, P. S.-I. J. of E. and, and undefined 2010, “Effect of strain hardening on unloading of a deformable sphere loaded against a rigid flat-a finite element study,” *Citeseer*, vol. 2, no. 4, pp. 225–233, 2010, Accessed: Sep. 17, 2021. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.437.4881&rep=rep1&type=pdf>.
- [24] M. A. ElShaer, “Structural analysis of a composite continuous girder with a single rectangular web opening,” *HBRC J.*, vol. 13, no. 2, pp. 152–162, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.HBRCJ.2015.06.004.
- [25] M. V. Melconian, “Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos : equação preditiva geral para o cálculo da força de retenção em freios de estampagem.”
- [26] “Tipos de contactos de Ansys y explicaciones | Mechead.com.” <https://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/> (accessed Oct. 13, 2021).
- [27] A. Pipinato and M. De Miranda, “Steel and composite bridges,” *Innov. Bridg. Des. Handb. Constr. Rehabil. Maint.*, pp. 247–271, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-800058-8.00010-4.
- [28] Y. Sun, P. Huang, K. Mei, T. W.-S. of Advanced, and undefined 2018, “Vehicle-Induced Response of Long-Span Suspension Bridges with Steel and Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Cables and Suspenders,” *ingentaconnect.com*, Accessed: Jun. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/asp/sam/2018/00000010/00000006/art00020>.
- [29] M. Theurer, “Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras,” *Ing. Rev. Académica*, pp. 52–62, 2016, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927006.pdf>.
- [30] K. Shirvanimoghaddam, S. Hamim, ... M. A.-C. P. A., and undefined 2017, “Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties,” *Elsevier*, Accessed: Jun. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X16303591>.

- [31] A. Miravete, *Materiales compuestos Vol. 1*, 1st ed. Barcelona, 2012.
- [32] Y. Sun, P. Huang, K. Mei, and T. Wang, “Vehicle-Induced Response of Long-Span Suspension Bridges with Steel and Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Cables and Suspenders,” *Sci. Adv. Mater.*, vol. 10, no. 6, pp. 913–922, Apr. 2018, doi: 10.1166/SAM.2018.3268.
- [33] S. Selvaraj and M. Madhavan, “Retrofitting of steel beams using low-modulus carbon fiber reinforced polymer laminates,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 167, p. 105825, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105825.
- [34] F. J. Rescalvo, R. Duriot, G. Pot, A. Gallego, and L. Denaud, “Enhancement of bending properties of Douglas-fir and poplar laminate veneer lumber (LVL) beams with carbon and basalt fibers reinforcement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, p. 120185, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120185.
- [35] C. Reddy, P. Babu, ... R. R. today, and undefined 2017, “Mechanical characterization of unidirectional carbon and glass/epoxy reinforced composites for high strength applications,” *Elsevier*, Accessed: Jun. 11, 2021. [Online]. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317304108>.
- [36] “Sika® CarboDur® S | Platinas de fibras de carbono.”  
<https://per.sika.com/es/construccion/reforzamiento-estructural/platinas-fibras-carbono/sika-carbodur-s.html>.
- [37] S. Selvaraj, M. M.-J. of C. S. Research, and undefined 2020, “Retrofitting of steel beams using low-modulus carbon fiber reinforced polymer laminates,” *Elsevier*, Accessed: Sep. 20, 2021. [Online]. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X1930968X>.
- [38] H. Zhou, T. Attard, Y. Wang, J. Wang, F. R.-C. Structures, and undefined 2013, “Rehabilitation of notch damaged steel beams using a carbon fiber reinforced hybrid polymeric-matrix composite,” *Elsevier*, Accessed: Sep. 20, 2021. [Online]. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822313003231>.
- [39] Y. Ma, M. Ueda, T. Yokozeki, T. Sugahara, ... Y. Y.-C., and undefined 2017, “A comparative study of the mechanical properties and failure behavior of carbon fiber/epoxy and carbon fiber/polyamide 6 unidirectional composites,” *Elsevier*, Accessed: Jun. 11, 2021. [Online]. Available:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316317822>.

- [40] H. W. He and F. Gao, “Effect of Fiber Volume Fraction on the Flexural Properties of Unidirectional Carbon Fiber/Epoxy Composites,” *Int. J. Polym. Anal. Charact.*, vol. 20, no. 2, pp. 180–189, Feb. 2015, doi: 10.1080/1023666X.2015.989076.
- [41] “ASTM A370 - 20 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.” <https://www.astm.org/Standards/A370.htm> (accessed Sep. 17, 2021).
- [42] C. Lucín and P. Pérez, “Competitividad ex post de la industria metalmecánica en Ecuador,” *Congr. Int. Ciencia, Tecnol. e Innovación para la Soc.*, vol. 4, no. June, 2018.
- [43] V. M. Margalina, M. K. Benítez Gaibor, J. P. Martínez Mesias, and E. de las M. Zurita Mesa, “Relational coordination in the footwear manufacturing value chain of the province of Tungurahua, Ecuador,” *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 783, pp. 370–379, 2019, doi: 10.1007/978-3-319-94709-9\_35.
- [44] J. M. Spritzer, H. Bohra, and S. Guzey, “Imperfection-sensitivity of unanchored aboveground open-top steel welded liquid storage tanks subjected to seismic loads,” *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 12, pp. 1–21, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1597-7.
- [45] M. Seif, J. Main, J. Weigand, T. P. McAllister, and W. Luecke, “Finite element modeling of structural steel component failure at elevated temperatures,” *Structures*, vol. 6, pp. 134–145, 2016, doi: 10.1016/j.istruc.2016.03.002.
- [46] H. Zhu, L. Yang, and L. Yuan, “Flexural Capacity of Singly Reinforced CRC Beams(Part-I),” *Adv. Mater. Res.*, vol. 168–170, pp. 1810–1814, 2011, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.168-170.1810.
- [47] R. Budynas and K. Nisbett, *Shigley’s Mechanical Engineering Desing*, 11th ed. Ney York: MacGraw Hill, 2020.
- [48] “Steel Bridge Design Handbook | American Institute of Steel Construction.” <https://www.aisc.org/nsba/design-and-estimation-resources/steel-bridge-design-handbook/> (accessed Dec. 07, 2021).

## 5.4. Anexos

### ANEXO 1

#### PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COMPUESTO UNIDIRECCIONAL E = 230 GPa.

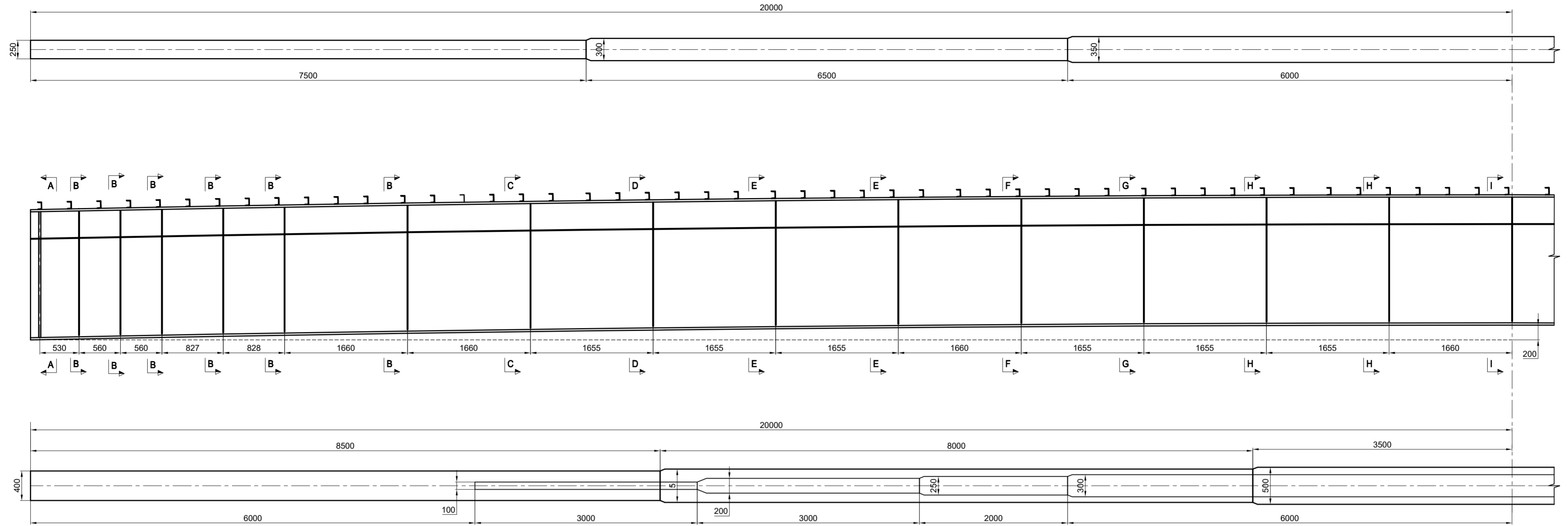
Datos		Ecuación		Resultado
Fracción volumétrica de la fibra	$V_f = 0.7$	Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 1	$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$	$E_1 = 162.1 \text{ GPa}$
Módulo de elasticidad de la fibra	$E_f = 230 \text{ GPa}$			
Módulo de elasticidad de la matriz	$E_m = 3.78 \text{ GPa}$			
Módulo de elasticidad de la fibra	$E_f = 230 \text{ GPa}$	Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 2	$E_2 = \frac{E_m}{(1 - v_m^2)(1 + 0.85v_f^2)}$ $= \frac{E_m V_f}{(1 - V_f)^{1.25} + \frac{E_m V_f}{E_f (1 - v_m^2)}}$	$E_2 = 12.93 \text{ GPa}$
Módulo de elasticidad de la matriz	$E_m = 3.78 \text{ GPa}$			
Coefficiente de Poisson de la fibra	$v_f = 0.23$			
Coefficiente de Poisson de la fibra de la matriz	$v_m = 0.35$			
Módulo cortante de la matriz	$G_m = 1.4 \text{ GPa}$	Módulo cortante menor	$G_{12} = \frac{G_m (1 + 0.6V_f^{0.5})}{(1 - V_f)^{1.25} + \frac{V_f}{1 - v_m^2}}$	$G_{12} = 2.06 \text{ GPa}$
Fracción volumétrica de la fibra	$V_f = 0.7$			
Coefficiente de Poisson de la fibra de la matriz	$v_m = 0.35$			
Fracción volumétrica de la fibra	$V_f = 0.7$	Coefficiente de Poisson mayor	$v_{12} = V_f v_f + (1 - V_f) v_m$	$v_{12} = 0.266$
Coefficiente de Poisson de la fibra	$v_f = 0.20$			
Coefficiente de Poisson de la fibra de la matriz	$v_m = 0.35$			
Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 1	$E_1 = 162.1 \text{ GPa}$	Coefficiente de Poisson menor	$v_{21} = v_{12} \frac{E_2}{E_1}$	$v_{21} = 0.021$
Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 2	$E_2 = 12.93 \text{ GPa}$			
Coefficiente de Poisson mayor	$v_{12} = 0.245$			
Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 2	$E_2 = 12.93 \text{ GPa}$	Módulo cortante mayor	$G_{21} = \frac{E_2}{2(1 + v_{21})}$	$G_{21} = 6.33 \text{ GPa}$
Coefficiente de Poisson menor	$v_{21} = 0.02$			

**PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COMPUESTO UNIDIRECCIONAL E = 290 GPa.**

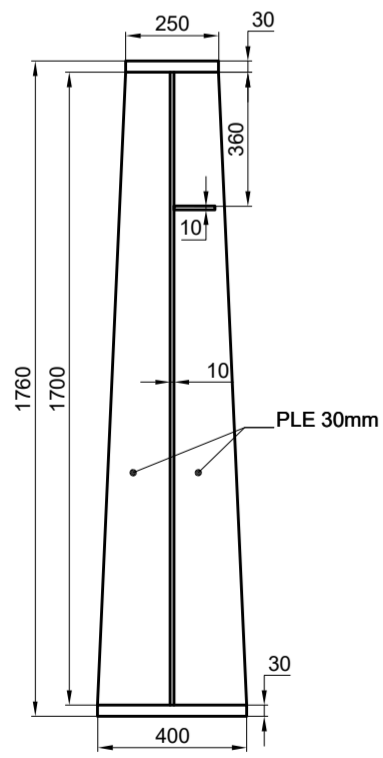
Datos		Ecuación		Resultado
Fracción volumétrica de la fibra	$V_f = 0.7$	Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 1	$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$	$E_1 = 204.13 \text{ GPa}$
Módulo de elasticidad de la fibra	$E_f = 290 \text{ GPa}$			
Módulo de elasticidad de la matriz	$E_m = 3.78 \text{ GPa}$			
Módulo de elasticidad de la fibra	$E_f = 290 \text{ GPa}$	Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 2	$E_2 = \frac{E_m}{(1 - v_m^2)(1 + 0.85v_f^2)} = \frac{E_m V_f}{(1 - V_f)^{1.25} + \frac{E_f}{1 - v_m^2}}$	$E_2 = 13.08 \text{ GPa}$
Módulo de elasticidad de la matriz	$E_m = 3.78 \text{ GPa}$			
Coefficiente de Poisson de la fibra	$v_f = 0.23$			
Coefficiente de Poisson de la fibra de la matriz	$v_m = 0.35$			
Módulo cortante de la matriz	$G_m = 1.4 \text{ GPa}$	Módulo cortante menor	$G_{12} = \frac{G_m(1 + 0.6V_f^{0.5})}{(1 - V_f)^{1.25} + \frac{V_f}{1 - v_m^2}}$	$G_{12} = 2.06 \text{ GPa}$
Fracción volumétrica de la fibra	$V_f = 0.7$			
Coefficiente de Poisson de la fibra de la matriz	$v_m = 0.35$			
Fracción volumétrica de la fibra	$V_f = 0.7$	Coefficiente de Poisson mayor	$v_{12} = V_f v_f + (1 - V_f) v_m$	$v_{12} = 0.266$
Coefficiente de Poisson de la fibra	$v_f = 0.20$			
Coefficiente de Poisson de la fibra de la matriz	$v_m = 0.35$			
Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 1	$E_1 = 162.1 \text{ GPa}$	Coefficiente de Poisson menor	$v_{21} = v_{12} \frac{E_2}{E_1}$	$v_{21} = 0.017$
Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 2	$E_2 = 12.93 \text{ GPa}$			
Coefficiente de Poisson mayor	$v_{12} = 0.245$			
Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 2	$E_2 = 13.08 \text{ GPa}$	Modulo cortante mayor	$G_{21} = \frac{E_2}{2(1 + v_{21})}$	$G_{21} = 6.43 \text{ GPa}$

## **ANEXO 2**

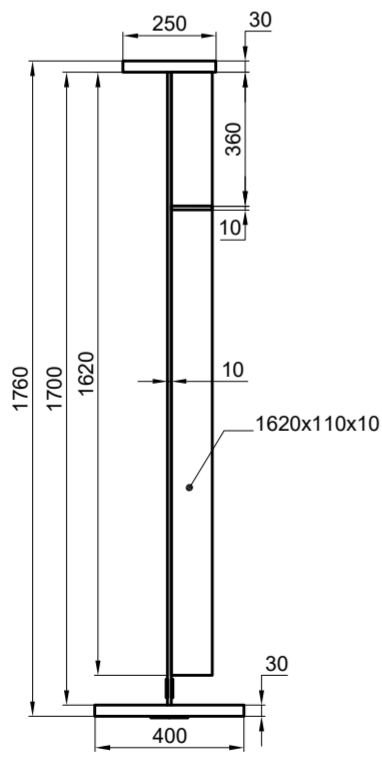
VIGA 40 METROS  
ESCALA 1:40



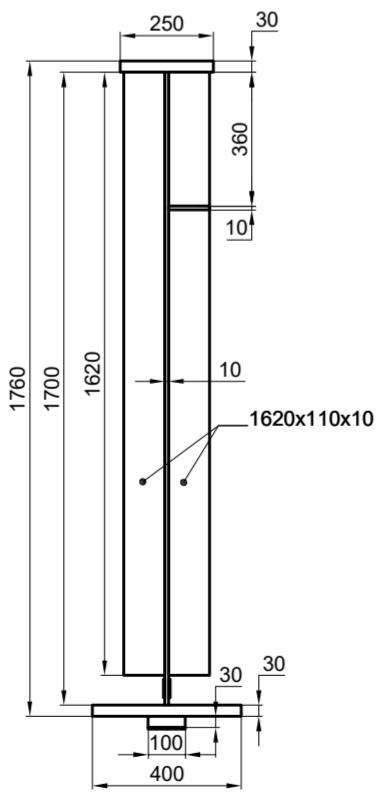
SECCION A - A  
ESCALA 1:20



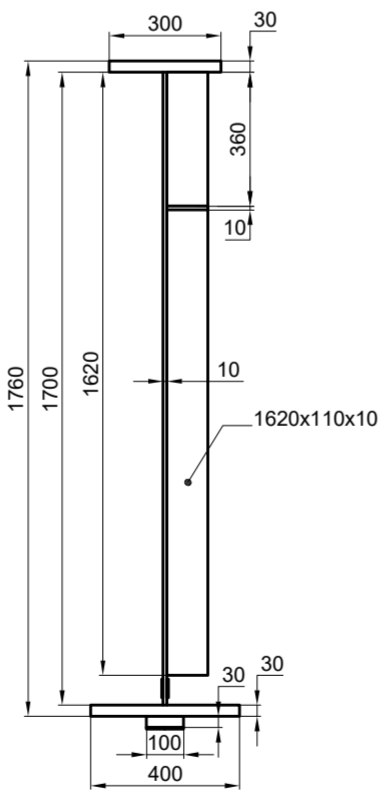
SECCION B - B  
ESCALA 1:20



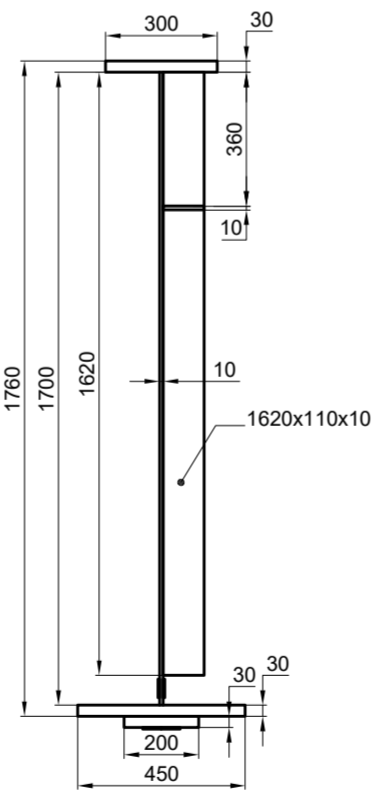
SECCION C - C  
ESCALA 1:20



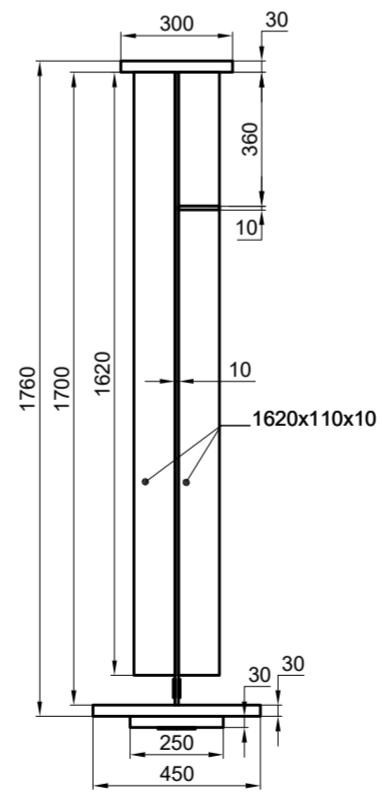
SECCION D - D  
ESCALA 1:20



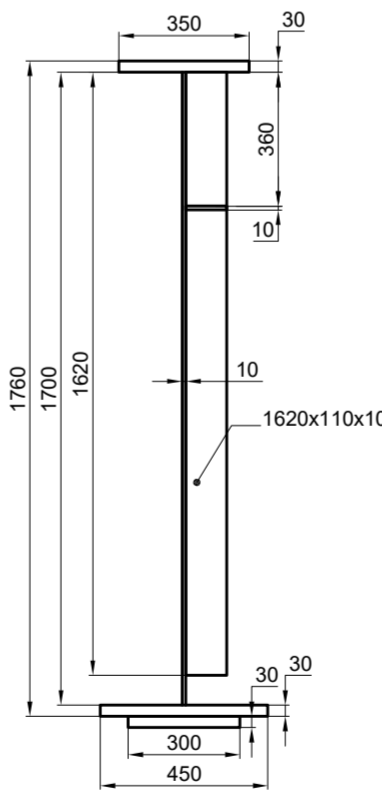
SECCION E - E  
ESCALA 1:20



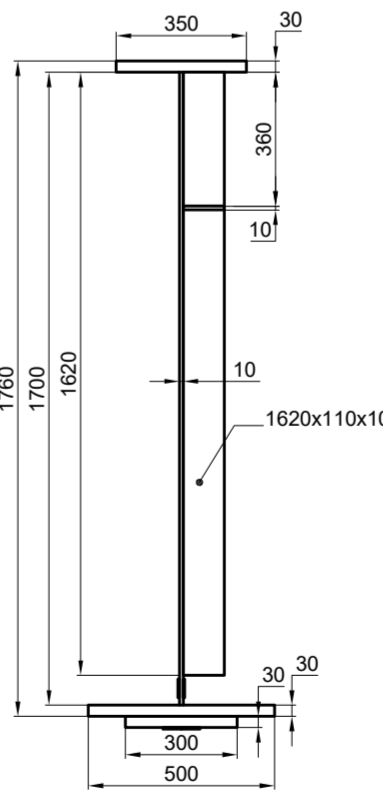
SECCION F - F  
ESCALA 1:20



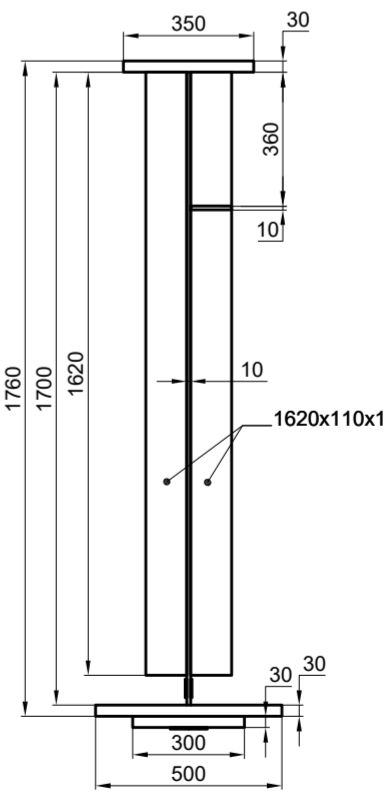
SECCION G - G  
ESCALA 1:20



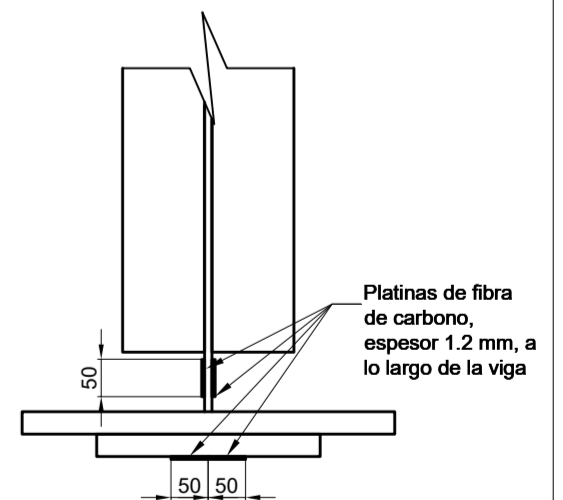
SECCION H - H  
ESCALA 1:20



SECCION I - I  
ESCALA 1:20

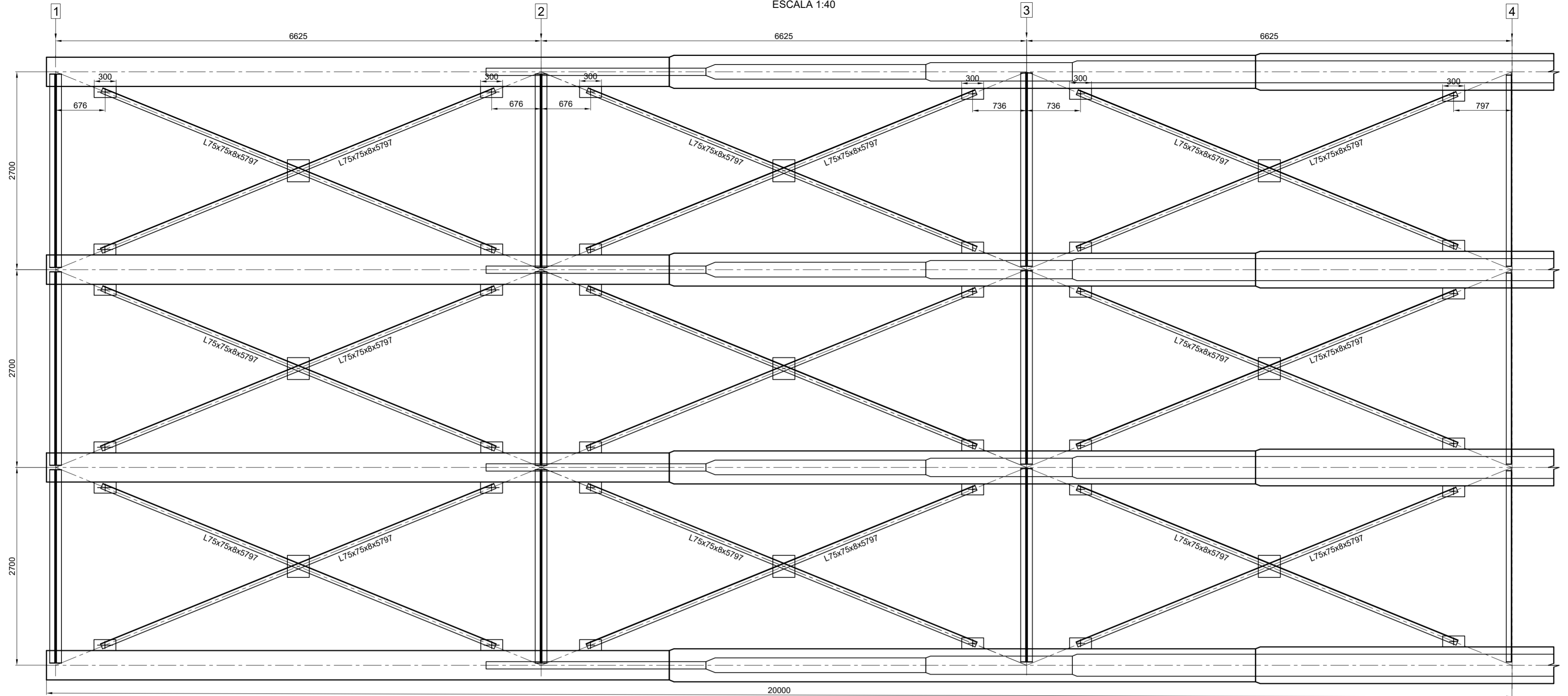


REFORZAMIENTO  
PROPUESTO EN LA VIGA  
ESCALA 1:10

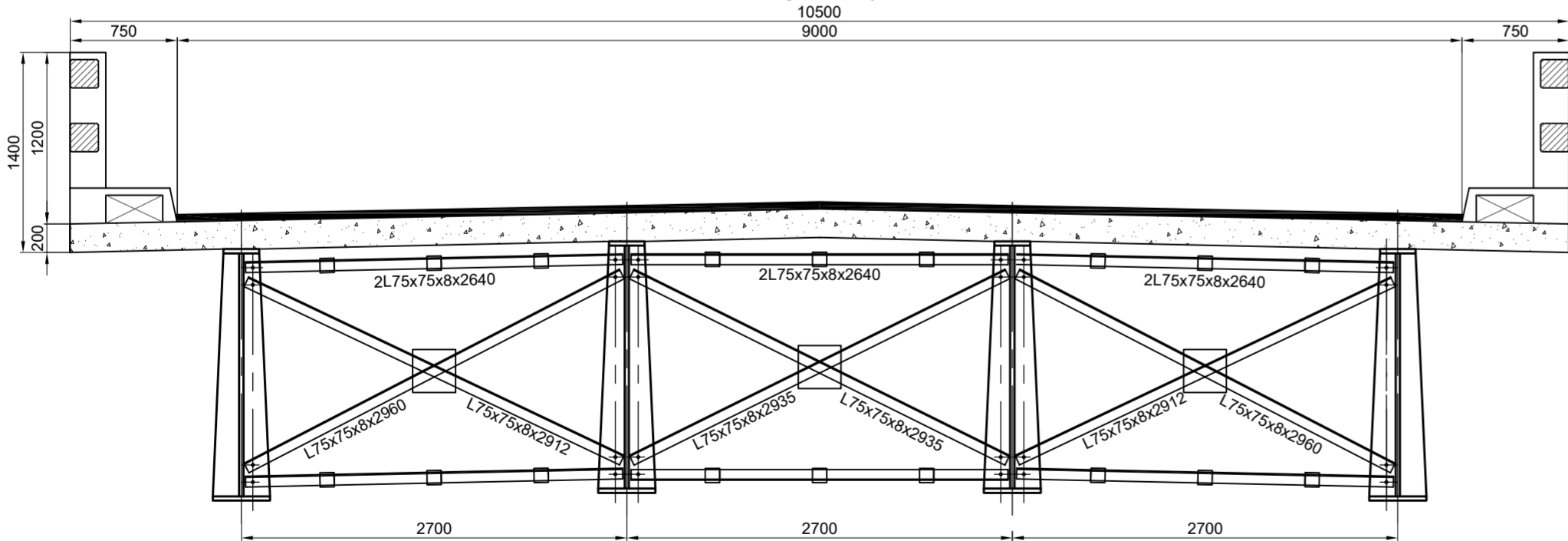


				Tolerancia	Peso	Proyecto	
				± 2 mm	N/A	REFORZAMIENTO PUENTE 40 METROS	
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Div. 12/12/21	J.Y. - F.P.	REFORZAMIENTO DE VIGAS	N/A
				Rev. 12/12/21	J.Y. - F.P.		
				Aprob. 12/12/21	ING. M. G.		
				Materiales			Sistema
				ASTM A588 - FC2			
				Codigo de plano:			TME-01
1	Descríp.	12/12/21	Nombre				
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre				

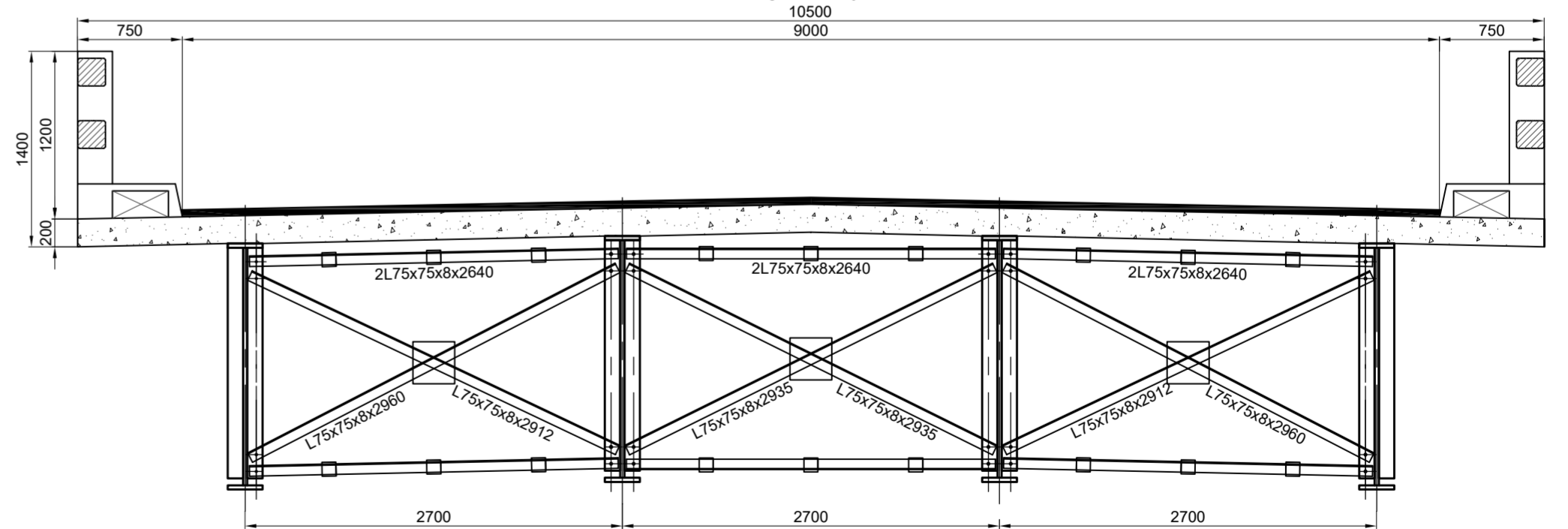
VISTA INFERIOR PUENTE 40 METROS  
ESCALA 1:40



VISTA ARRIOSTRAMIENTOS EJE 1  
ESCALA 1:40



VISTA ARRIOSTRAMIENTOS EJES 2, 3, 4  
ESCALA 1:40



		Tolerancia		Peso		Proyecto	
		± 2 mm		N/A		REFORZAMIENTO PUENTE 40 METROS	
		Fecha		Nombre		Denominación	
		12/12/21		J.Y. - F.P.		VISTAS DE ARRIOSTRAMIENTOS	
		Rev.		J.Y. - F.P.		Escala	
		12/12/21		ING. M. G.		N/A	
		Aprob.		ING. M. G.		Materiales	
		12/12/21				ASTM A 588 - FC2	
1		Descríp.		12/12/21		Nombre	
Edición		Modificación		Fecha		Nombre	
						Codigo de plano:	
						TME-02	
						Sistema	

## **ANEXO 3**

## 1. GEOMETRIA DEL PUENTE

Longitud total del Puente  $L_t := 40 \text{ m}$

Longitud para el calculo  $L := L_t - 0.6 \text{ m}$

Abscisa para el cálculo  $x := \frac{L}{2} = 19.7 \text{ m}$

Número de vigas  $N_V := 4$

Asignación de unidad de fuerza  $t := \text{tonnef}$ :

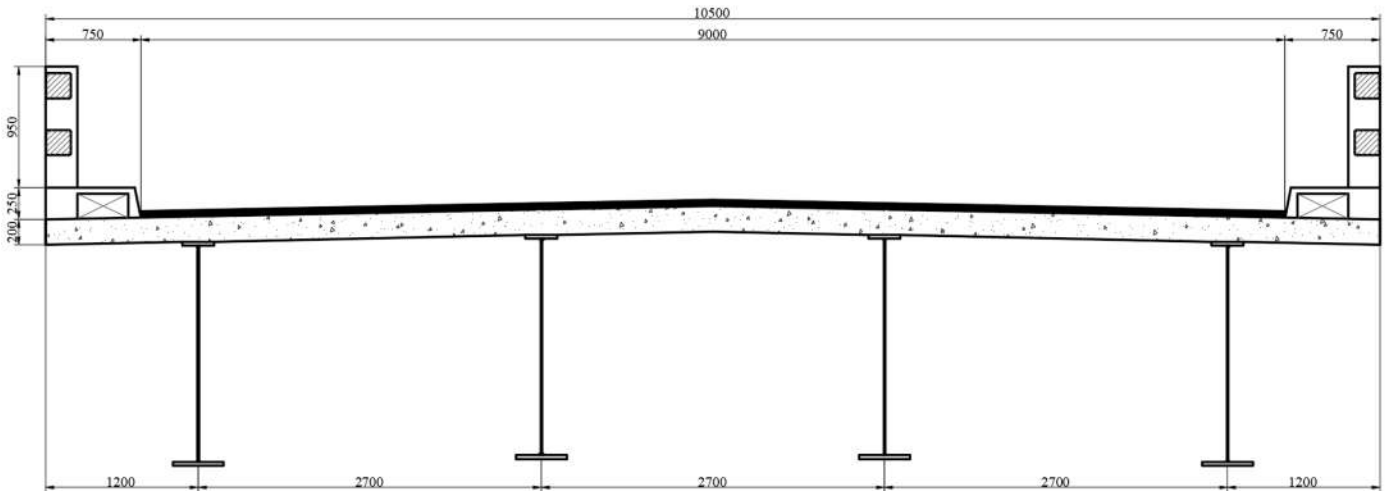
Ancho total del puente  $A_T := 10.5 \text{ m}$

Ancho total de cada acera  $A_{AC} := 0.75 \text{ m}$

Ancho total de la calzada  $A_{CAL} := A_T - 2 \cdot A_{AC} = 9 \text{ m}$

Longitud de voladizo a cada lado  $L_V := 1.2 \text{ m}$

Separación de los ejes de cada viga  $S_V := \frac{A_T - 2 \cdot L_V}{N_V - 1} = 2.7 \text{ m}$



## 2. MATERIALES

Resistencia del hormigón a la compresión a los 28 días  $f'_c := 280 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

Densidad del hormigón  $\rho_{HOR} := 2.4 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$

Densidad de la capa de rodadura de hormigón  $\rho_{R.HOR} := 2.2 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$

Densidad del cero  $\rho_s := 7.85 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$

Módulo de elasticidad del hormigón  $E_c := 12000 \cdot \sqrt{f'_c \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{kgf}}} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 200798.406 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

Módulo de elasticidad del acero  $E_s := 2030000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

$n := \text{floor} \left( \frac{E_s}{E_c} \right) = 10$

## 3. GEOMETRIA DE LA VIGA

Ancho del patín superior  $b_{fs} := 300 \text{ mm}$

Espesor del patín superior  $t_{fs} := 30 \text{ mm}$

Ancho del patín inferior  $b_{fi} := 400 \text{ mm}$

Espesor del patín inferior  $t_{fi} := 30 \text{ mm}$

Ancho de la a cubre placa patín inferior  $c_{pi} := 100 \text{ mm}$

Espesor de la cubre placa patín inferior  $t_{cpi} := 30 \text{ mm}$

Espesor de la losa  $t := 200 \text{ mm}$

Espesor de la capa de rodadura:  $t_{cr} := 5 \text{ cm}$

Altura total de la viga de acero  $d := 1760 \text{ mm}$

Altura del alma  $h_w := d - t_{fs} - t_{fi} - t_{cpi} = 1670 \text{ mm}$

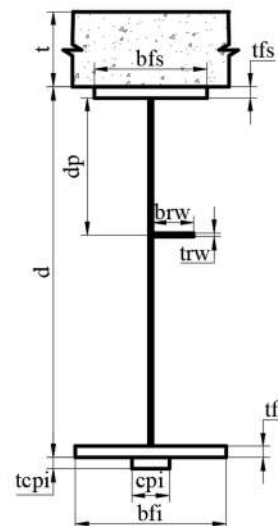
Espesor del alma de la viga  $t_w := 10 \text{ mm}$

Ancho del refuerzo del alma  $br_w := 110 \text{ mm}$

Espesor del refuerzo del alma  $tr_w := 10 \text{ mm}$

Distancia desde el borde superior del alma  $dp := 360 \text{ mm}$

$A := h_w \cdot t_w + b_{fs} \cdot t_{fs} + b_{fi} \cdot t_{fi} + c_{pi} \cdot t_{cpi} + br_w \cdot tr_w = 41800 \text{ mm}^2$





$$y_i := \frac{cpi \cdot tcpi \cdot \frac{tcpi}{2} + (bfi \cdot tfi) \cdot \left(\frac{tfi}{2} + tcpi\right) + \frac{hw \cdot tw \cdot \left(\frac{hw}{2} + tfi + tcpi\right) + (bfs \cdot tfs) \cdot \left(d - \frac{tfs}{2}\right)}{A} + \frac{brw \cdot trw \cdot (hw - dp + tfi + tcpi)}{A} \downarrow = 783.337 \text{ mm}$$

$$y_s := d - y_i = 976.663 \text{ mm}$$

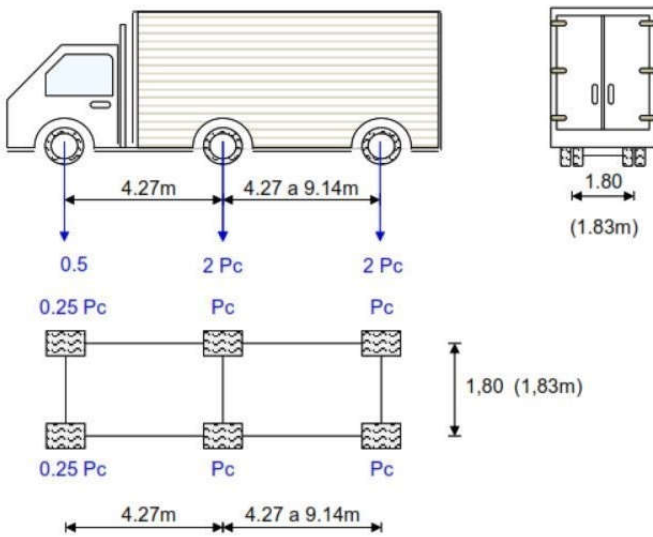
$$I_{xc} := \frac{cpi \cdot tcpi^3}{12} + cpi \cdot tcpi \cdot \left(y_i - \frac{tcpi}{2}\right)^2 + \frac{bfi \cdot tfi^3}{12} + bfi \cdot tfi \cdot \left(y_i - \frac{tfi}{2} - tcpi\right)^2 + \frac{tw \cdot hw^3}{12} + hw \cdot tw \cdot \left(y_i - tcpi - tfi - \frac{hw}{2}\right)^2 + \frac{bfs \cdot tfs^3}{12} + bfs \cdot tfs \cdot \left(d - y_i - \frac{tfs}{2}\right)^2 + \frac{brw \cdot trw^3}{12} + brw \cdot trw \cdot (d - y_i - dp - tfs)^2 \downarrow = 21105730277.1132 \text{ mm}^4$$

$$eg := y_s + \frac{t}{2} = 1076.663 \text{ mm}$$

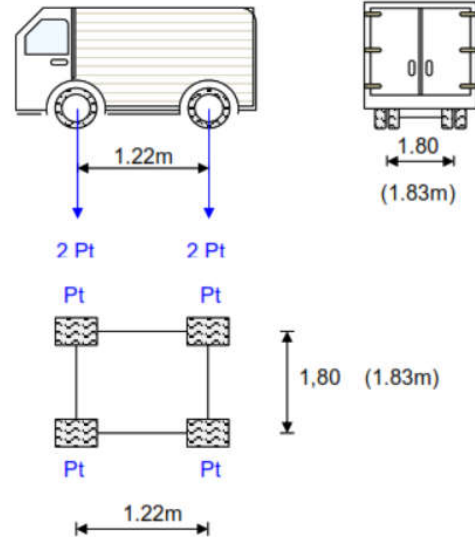
$$\text{Parámetro de rigidez longitudinal } Kg := n \cdot (I_{xc} + A \cdot eg^2) = 69560395.833 \text{ cm}^4$$

#### 4. CARRIL DE DISEÑO

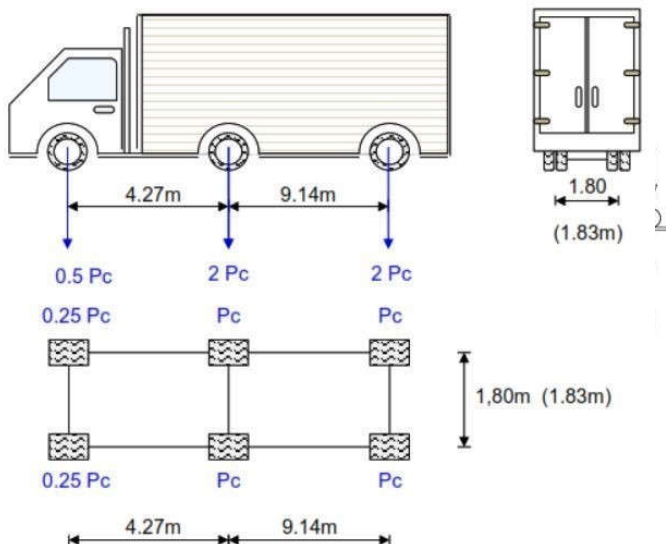
a. Camión de diseño  $P_c := 7.27 \cdot t$ :



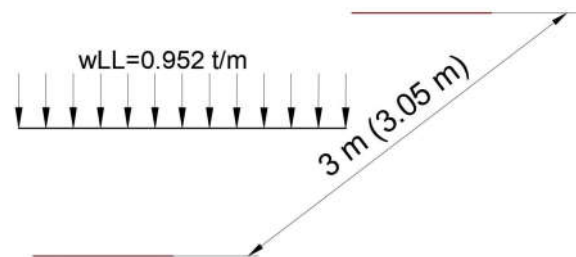
b. Tandem de diseño  $P_t := 5.669 t$ :



c. Camión de diseño estado limite  $P_c := 7.27 t$ :



d. Carril de diseño estado  $w_{LL} := 0.952 \frac{t}{m}$ :



## 5. FACTORES DE DISTRIBUCIÓN PARA MOMENTO

a. Datos carga viva

1. Camión de diseño

Carga de rueda del camión de diseño  $Prc := 7.270 \text{ t}$

Separación  $S_{EJESC} := 4.27 \text{ m}$

Separación  $S'_{EJESC} := 1.800 \text{ m}$

2. Tándem

Carga de rueda de tándem  $Prt := 5.669 \text{ t}$

Separación  $S_{EJEST} := 1.220 \text{ m}$

Separación  $S'_{EJEST} := 1.800 \text{ m}$

3. Carril de diseño

Carga del carril de diseño  $w_{LL} := 0.952 \frac{\text{t}}{\text{m}}$

Ancho de la carga de carril de diseño  $a_{LL} := 3.050 \text{ m}$

Factor de impacto  $IM := 1.33$

b. Distribución de las sobrecargas por carril para momento en vigas interiores

b.1. Un carril cargado

$$DFi_{M\_1C} := 0.06 + \left( \frac{Sv}{4300} \right)^{0.4} \cdot \left( \frac{Sv}{L} \right)^{0.3} \cdot \left( \frac{Kg}{L \cdot t^3} \right)^{0.1} = 0.462$$

b.2. Dos o mas carriles cargados

$$DFi_{M\_2C} := 0.075 + \left( \frac{Sv}{2900} \right)^{0.4} \cdot \left( \frac{Sv}{L} \right)^{0.2} \cdot \left( \frac{Kg}{L \cdot t^3} \right)^{0.1} = 0.69$$

b.3. Factor máximo

$$DFi_M := \max(DFi_{M\_1C}, DFi_{M\_2C}) = 0.69$$

d. Distribución de las sobrecargas por carril para momento en vigas exteriores

d.1. Utilizando la formula

Factor de presencia múltiple 1 carril  $m_I := 1.2$  Table 3.6.1.1.2-1

$$DFe_{IM} := \left( 0.5 + 0.5 \cdot \left( \frac{Sv - S'_{EJEST}}{3050} \right) \right) \cdot m_I = 0.777$$

d.2. Modificando el factor de la viga interior

Distancia del borde de la vereda a la viga  $de := 500 \text{ mm}$

$$e := 0.77 + \frac{2 \cdot \text{mm}}{2770} = 0.86$$

$$DFe_{2M} := e \cdot DFi_M = 0.5939$$

a. Un carril de diseño cargado

Número de carriles cargados  $N_L := 1$

Número de vigas  $N_V = 4$

Separación de los ejes de cada viga  $Sv = 2.7 \text{ m}$

Distancia horizontal desde el centro de gravedad del conjunto de vigas a la viga 1  $X_1 := Sv + \frac{Sv}{2} = 4.05 \text{ m}$

Distancia horizontal desde el centro de gravedad del conjunto de vigas a la viga 2  $X_2 := \frac{Sv}{2} = 1.35 \text{ m}$

Distancia horizontal desde el centro de gravedad del conjunto hasta la viga exterior  $X_{ext} := X_1 = 4.05 \text{ m}$

Excentricidad del camión de diseño  $e_1 := 3135 \text{ mm}$

$$R := \frac{N_L}{N_V} + \frac{X_{ext} \cdot e_1}{2 \cdot (X_1^2 + X_2^2)} = 0.598$$

Factor de presencia múltiple 1 carril  $m_{1C} := 1.2$

$$DFe_{3M} := R \cdot m_{1C} = 0.718$$

b. Dos carriles de diseño cargados

Número de carriles cargados  $N_L := 2$

Número de vigas  $N_V := 4$

Distancia horizontal desde el centro de gravedad del conjunto de vigas a la viga 1  $X_1 := Sv + \frac{Sv}{2} = 4.05 \text{ m}$

Distancia horizontal desde el centro de gravedad del conjunto de vigas a la viga 2  $X_2 := \frac{Sv}{2} = 1.35 \text{ m}$

Distancia horizontal desde el centro de gravedad del conjunto hasta la viga exterior  $X_{ext} := X_1 = 4.05 \text{ m}$

Excentricidad del camión de diseño  $e_1 := 3135 \text{ mm}$

Excentricidad del camión de diseño  $e_2 := 0 \text{ mm}$

Factor de presencia múltiple 2 carriles  $m_{2C} := 1$

$$R := \frac{N_L}{N_V} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 \cdot (X_1^2 + X_2^2)} = 0.848$$

$$DFe_{4M} := R \cdot m_{2C} = 0.848$$

$$DFe_M := \max(DFe_{1M}, DFe_{2M}, DFe_{3M}, DFe_{4M}) = 0.848$$

## 6. CARGAS

a. Ancho efectivo  $B := \min\left(Sv, \frac{Sv}{2} + Lv\right) = 2550 \text{ mm}$

b. Cargas muertas

$$\text{Peso del tablero } W_{TAB} := t \cdot \rho_{HOR} = 0.48 \frac{\text{t}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Peso de la viga de acero } W_{VAC} := \rho_s \cdot A = 0.328 \frac{\text{t}}{\text{m}}$$

$$\text{Peso de la capa de rodadura } W_{CR} := tcr \cdot \rho_{R.HOR} = 0.11 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} \quad W_{CR} = 0.00108 \text{ MPa}$$

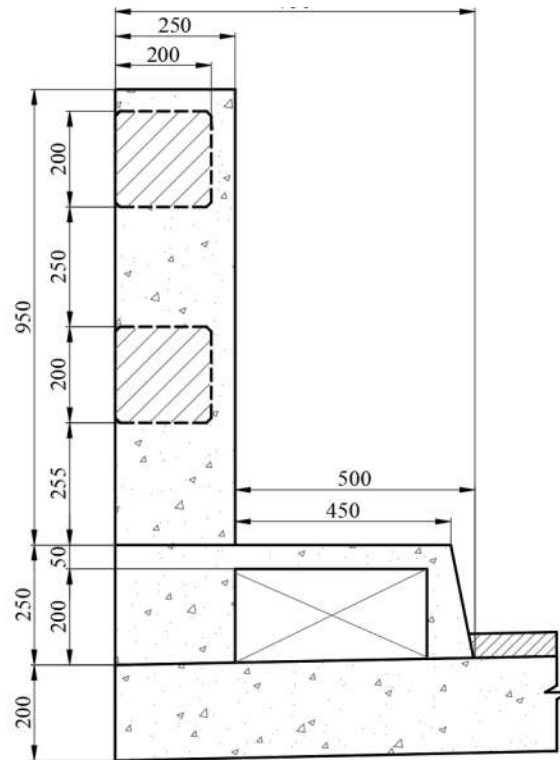
c. Cargas muertas posteriores

$$A := 200 \text{ mm} \quad C := 250 \text{ mm} \quad A_{AC} := 750 \text{ mm} \quad Ap := 250 \text{ mm} \quad bp := 250 \text{ mm} \quad ar := 200 \text{ mm} \quad br := 200 \text{ mm}$$

$$H := 950 \text{ mm} \quad Hi := 250 \text{ mm} \quad rieles := 2 \quad Np := 24 \quad \text{Base del ducto: } bd := 350 \text{ mm} \quad \text{Altura del ducto: } ad := 20 \text{ cm}$$

$$L_{RIEL} := Lt - Np \cdot bp = 34000 \text{ mm}$$

$$\text{c.1. Peso de la acera } W_{AC} := \left(Hi \cdot A_{AC} - bd \cdot ad - \frac{5 \text{ cm} \cdot Hi}{2}\right) \cdot \rho_{HOR} = 0.267 \frac{\text{t}}{\text{m}}$$



c.2. Peso de los postes  $W_P := \frac{A_p \cdot b_p \cdot \rho_{HOR} \cdot N_p}{L_t} \cdot m = 0.09 \frac{t}{m}$

c.3. Peso de rieles  $W_R := \frac{ar \cdot br \cdot L_{RIEL} \cdot rieles \cdot \rho_{HOR}}{L_t} = 0.163 \frac{t}{m}$

c.4. Peso total  $W_{P_R} := (W_{AC} + W_P + W_R) = 0.52 \frac{t}{m}$

d. Viva peatonal  $W_{V_P} := 0.367 \frac{t}{m^2}$

Ancho útil de cada acera  $A_{UT} := 45 \text{ cm}$

Carga viva peatonal por viga  $W_{cvp} := \frac{W_{V_P} \cdot A_{UT}}{N_V} = 0.069 \frac{t}{m^2}$

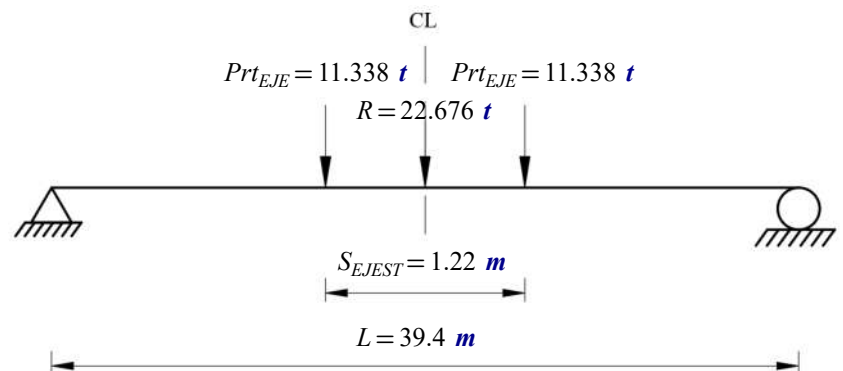
## 7. CARGA DE TANDEM

Carga de rueda del eje del tándem  $Prt_{EJE} := 2 \cdot Prt = 11.338 \text{ t}$

$R := 4 \cdot Prt = 22.676 \text{ t}$

$V_{Tandem} := R = 22.676 \text{ t}$

$M_T := R \cdot \frac{x}{2} = 223.359 \text{ t} \cdot m$



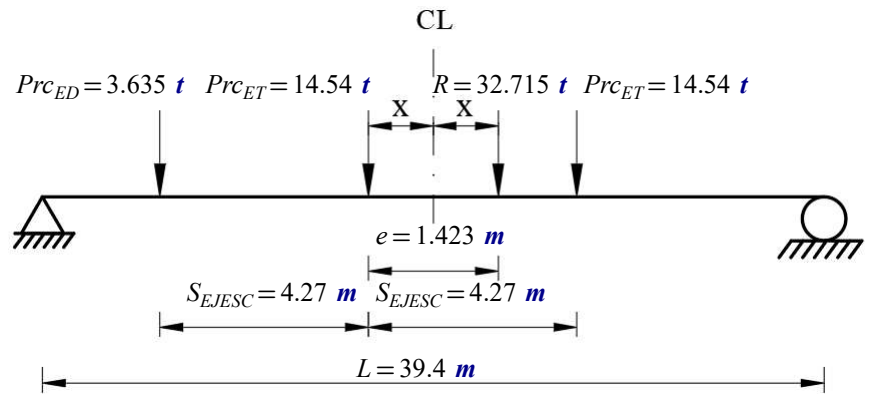
## 10. CAMION DE DISEÑO POSICIÓN 1

Carga de eje del camión de diseño (eje delantero)  $Prc_{ED} := 0.5 \cdot Prc = 3.635 \text{ t}$

Carga de eje del camión de diseño (eje trasero)  $Prc_{ET} := 2 \cdot Prc = 14.54 \text{ t}$

$R := Prc_{ED} + 2 \cdot Prc_{ET} = 32.715 \text{ t}$

$$e := \frac{Prc_{ET} \cdot S_{EJESC} - Prc_{ED} \cdot S_{EJESC}}{R} = 1.423 \text{ m}$$



$$x := \frac{e}{2} = 0.712 \text{ m} \quad V_{CP1} := R = 32.715 \text{ t}$$

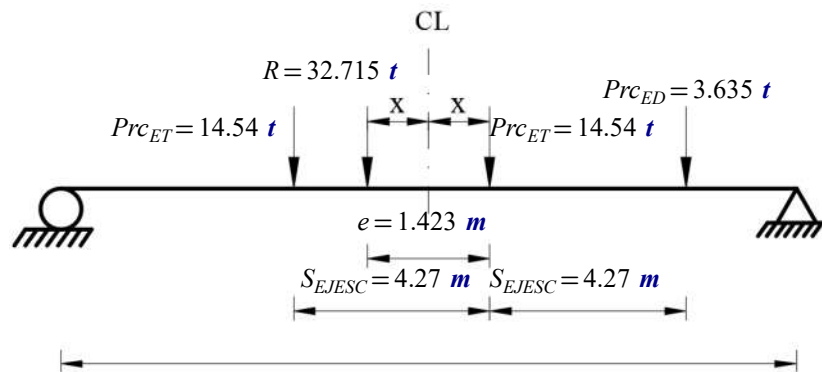
$$M_{CP1} := \frac{R}{L} \cdot \left( \frac{L}{2} + x \right)^2 - S_{EJESC} \cdot Prc_{ET} = 283.86 \text{ t} \cdot \text{m} \quad IM = 1.33$$

## 8. CAMION DE DISEÑO POSICIÓN 2

Carga de eje del camión de diseño (eje delantero)  $Prc_{ED} := 0.5 \cdot Prc = 3.635 \text{ t}$

Carga de eje del camión de diseño (eje trasero)  $Prc_{ET} := 2 \cdot Prc = 14.54 \text{ t}$

$$R := Prc_{ED} + 2 \cdot Prc_{ET} = 32.715 \text{ t}$$



$$e := \frac{Prc_{ET} \cdot S_{EJESC} - Prc_{ED} \cdot S_{EJESC}}{R} = 1.423 \text{ m}$$

$$x := \frac{e}{2} \quad V_{CP1} := R = 32.715 \text{ t}$$

$$M_{CP2} := \frac{R}{L} \cdot \left( \frac{L}{2} - x \right)^2 - S_{EJESC} \cdot Prc_{ET} = 237.295 \text{ t} \cdot \text{m}$$

## 9. MOMENTO MAXIMO OCASIONADO EN LA POSICION CRITICA

$$M_{MAX} := \max(M_T, M_{CP1}, M_{CP2}) = 283.86 \text{ t} \cdot \text{m}$$

## **ANEXO 4**

**COSTOS DE REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO DEL PUENTE TUCSI**

<b>CÓDIGO</b>	<b>ÍTEM</b>	<b>UNID.</b>	<b>CANT.</b>	<b>PRECIO UNIT.</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>	<b>%</b>
	<b>Planificación</b>					
1	Diseño del Proyecto	m	40,00	62,50	\$ 2.500,00	4,55%
2	Tarifa por emisión de documentos y planos	m	40,00	50,00	\$ 2.000,00	3,64%
	<b>Subtotal</b>				<b>\$ 4.500,00</b>	<b>8,19%</b>
	<b>Obras Preliminares</b>					
3	Instalación de estructura/andamio	m	40,00	80,00	\$ 3.200,00	5,82%
	<b>Subtotal</b>				<b>\$ 3.200,00</b>	<b>5,82%</b>
	<b>Reforzamiento Puente 40 m</b>					
4	Fibra de carbono	m	640,00	34,09	\$ 21.819,68	39,70%
5	Resina epoxi	Kg	320,00	15,50	\$ 4.960,00	9,03%
	<b>Subtotal</b>				<b>\$ 26.779,68</b>	<b>48,73%</b>
	<b>Consumibles</b>					
6	Desoxidante	m	640,00	0,31	\$ 197,33	0,36%
7	Thinner	m	640,00	0,18	\$ 112,00	0,20%
8	Paño industrial	m	320,00	0,49	\$ 155,68	0,28%
9	Grata	m	640,00	0,56	\$ 356,48	0,65%
	<b>Subtotal</b>				<b>\$ 821,48</b>	<b>1,49%</b>
	<b>Instrumentos</b>					
10	Balanza digital	m	640,00	0,19	\$ 120,00	0,22%
11	Mezclador industrial	m	640,00	0,26	\$ 165,00	0,30%
12	Espátula	m	640,00	0,04	\$ 22,72	0,04%
13	Dispensador	m	640,00	0,08	\$ 50,00	0,09%
14	Prensas	m	40,00	11,00	\$ 440,00	0,80%
15	Generador eléctrico	m	640,00	6,25	\$ 4.000,00	7,28%
16	Amoladora	m	640,00	1,50	\$ 960,00	1,75%
	<b>Subtotal</b>				<b>\$ 5.757,72</b>	<b>10,48%</b>
	<b>Honorarios profesionales</b>					
17	Supervisor Técnico	m	40,00	15,00	\$ 600,00	1,09%
18	Supervisor Seguridad	m	40,00	10,00	\$ 400,00	0,73%
19	Operadores Técnicos	m	40,00	40,00	\$ 1.600,00	2,91%
20	Auxiliares	m	40,00	20,00	\$ 800,00	1,46%
	<b>Subtotal</b>				<b>\$ 3.400,00</b>	<b>6,19%</b>
	<b>Logística y transporte</b>					
21	Logística y transporte	m	40,00	137,50	\$ 5.500,00	10,01%
22	Contingencias	m	40,00	124,90	\$ 4.995,89	9,09%
	<b>Subtotal</b>				<b>\$ 10.495,89</b>	<b>19,10%</b>
	<b>TOTAL:</b>				<b>\$ 54.954,77</b>	<b>100,00%</b>