

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



**“ANÁLISIS Y DISEÑO DE SUPERESTRUCTURAS TIPO VIGA-LOSA PARA  
PUENTES VEHICULARES DE HORMIGÓN PREESFORZADO CON  
ARMADURAS POSTESAS”**

**Por:**

**CASTILLO IRAHOLA LEANDRO**

Proyecto de Grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de  
Licenciatura en Ingeniería Civil

**SEMESTRE II-2025**

**TARIJA-BOLIVIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“ANÁLISIS Y DISEÑO DE SUPERESTRUCTURAS TIPO VIGA-LOSA PARA  
PUENTES VEHICULARES DE HORMIGÓN PREESFORZADO CON  
ARMADURAS POSTESAS”**

**Por:**

**CASTILLO IRAHOLA LEANDRO**

**SEMESTRE II-2025**

**TARIJA-BOLIVIA**

**Dedicatoria:**

Este trabajo de grado se lo dedico a mis padres Leonor Irahola Diaz, Gualberto Jose Castillo Sanchez, y a mis hermanas Veronica y Lorena

## **INDICE:**

|          |                                                                                                                                           |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                                                                                                  | <b>1</b>  |
| 1.1      | PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....                                                                                                           | 1         |
| 1.1.1    | Planteamiento del problema.....                                                                                                           | 1         |
| 1.1.2    | Formulación. ....                                                                                                                         | 2         |
| 1.1.3    | Sistematización del problema .....                                                                                                        | 3         |
| 1.2      | OBJETIVOS .....                                                                                                                           | 3         |
| 1.2.1    | General.....                                                                                                                              | 3         |
| 1.2.2    | Específico.....                                                                                                                           | 3         |
| 1.3      | JUSTIFICACIÓN.....                                                                                                                        | 4         |
| 1.3.1    | Académica.....                                                                                                                            | 4         |
| 1.3.2    | Técnica.....                                                                                                                              | 5         |
| 1.3.3    | Social. ....                                                                                                                              | 5         |
| 1.4      | ALCANCE Y LIMITACIONES DEL PROYECTO .....                                                                                                 | 6         |
| 1.4.1    | Alcance .....                                                                                                                             | 6         |
| 1.4.2    | Limitaciones.....                                                                                                                         | 8         |
| 1.4.3    | Hipótesis. ....                                                                                                                           | 10        |
| <b>2</b> | <b>MARCO TEÓRICO.....</b>                                                                                                                 | <b>11</b> |
| 2.1      | BREVE HISTORIA DE LOS PUENTES PREESFORZADOS.....                                                                                          | 11        |
| 2.1.1    | Breves Antecedentes de los Puentes Preesforzados en Bolivia. ....                                                                         | 11        |
| 2.2      | PUENTE TIPO VIGA-LOSA.....                                                                                                                | 12        |
| 2.2.1    | Morfología y Dimensionamiento.....                                                                                                        | 14        |
| 2.2.2    | Relación entre Algunas de las Variables más Significativas en el Diseño de las Superestructuras de Vigas Prefabricadas Preesforzadas..... | 15        |
| 2.3      | FILOSOFIA DE SEGURIDAD EN LOS PUENTES .....                                                                                               | 16        |

|         |                                                                                                                |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.1   | Diseño por Esfuerzos Admisibles (ASD) .....                                                                    | 17 |
| 2.3.2   | Diseño por Factores de Carga (LFD). ....                                                                       | 18 |
| 2.3.3   | Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD).....                                                         | 18 |
| 2.3.4   | Combinaciones y Factores de carga Norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 10th Edition (2024) .....    | 21 |
| 2.3.4.1 | Factores de Carga .....                                                                                        | 21 |
| 2.3.5   | Cargas en Superestructuras de Puentes Norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 10th Edition (2024)..... | 23 |
| 2.3.5.1 | Cargas Permanentes.....                                                                                        | 23 |
| 2.3.5.2 | Cargas Transitorias. ....                                                                                      | 25 |
| 2.4     | CONSTRUCCION DE PUENTES TIPO VIGA-LOSA.....                                                                    | 34 |
| 2.4.1   | Puentes Prefabricados de Hormigón con Vigas. ....                                                              | 35 |
| 2.4.1.1 | Sección Transversal.....                                                                                       | 36 |
| 2.4.1.2 | Morfología Longitudinal.....                                                                                   | 37 |
| 2.5     | HORMIGÓN PREESFORZADO .....                                                                                    | 47 |
| 2.5.1   | Cargas Equivalentes.....                                                                                       | 47 |
| 2.5.2   | Técnicas de Preesfuerzo.....                                                                                   | 50 |
| 2.5.2.1 | Elementos Pretensados.....                                                                                     | 50 |
| 2.5.2.2 | Elementos Postensados. ....                                                                                    | 50 |
| 2.5.3   | Variación de la Fuerza de Preesfuerzo.....                                                                     | 51 |
| 2.6     | MATERIALES.....                                                                                                | 53 |
| 2.6.1   | Tipos de Aceros Preesforzado.....                                                                              | 53 |
| 2.6.1.1 | Alambres.....                                                                                                  | 53 |
| 2.6.1.2 | Torones (Cable trenzado).....                                                                                  | 54 |
| 2.6.1.3 | Barras o Varillas.....                                                                                         | 54 |

|         |                                                                                                                                       |    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6.1.4 | Cables. ....                                                                                                                          | 54 |
| 2.6.2   | Acero de refuerzo no Preesforzado.....                                                                                                | 55 |
| 2.6.3   | Tipos de Hormigón.....                                                                                                                | 55 |
| 2.6.4   | Lechada.....                                                                                                                          | 56 |
| 2.7     | ANALISIS POR FLEXION.....                                                                                                             | 57 |
| 2.7.1   | Esfuerzos elásticos de Flexión en Vigas no Agrietadas.....                                                                            | 58 |
| 2.7.1.1 | Comportamiento de Vigas Preesforzadas en el rango Elástico.....                                                                       | 58 |
| 2.7.1.2 | Esfuerzos Elásticos.....                                                                                                              | 60 |
| 2.7.1.3 | Cálculo de las Propiedades de la Sección.....                                                                                         | 63 |
| 2.7.2   | Esfuerzos Permisibles de Flexión.....                                                                                                 | 63 |
| 2.7.3   | Carga de Agrietamiento.....                                                                                                           | 65 |
| 2.7.4   | Resistencia a la Flexión .....                                                                                                        | 67 |
| 2.7.4.1 | Curvas de esfuerzo-deformación.....                                                                                                   | 68 |
| 2.7.4.2 | Distribución sucesiva de esfuerzos en el Hormigón a medida que la viga se sobrecarga.....                                             | 69 |
| 2.7.4.3 | Bloque Rectangular de Esfuerzos Equivalentes.....                                                                                     | 71 |
| 2.7.4.4 | Resistencia a la flexión mediante el análisis de compatibilidad de deformaciones.....                                                 | 72 |
| 2.7.4.5 | Resistencia a la flexión en Elementos con Tendones adheridos según AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 10th Edition (2024)..... | 74 |
| 2.8     | DISEÑO DE VIGAS POSTENSADAS .....                                                                                                     | 76 |
| 2.8.1   | Comportamiento de Vigas Postensadas.....                                                                                              | 77 |
| 2.8.2   | Estimación de la Fuerza de Preesfuerzo.....                                                                                           | 80 |
| 2.8.3   | Cálculo de la Trayectoria de los Tendones.....                                                                                        | 82 |
| 2.8.4   | Estimación de las Perdidas de Preesfuerzo.....                                                                                        | 83 |

|          |                                                                           |     |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.8.4.1  | Perdidas Inmediatas.....                                                  | 85  |
| 2.8.4.2  | Perdidas que se Producen a lo largo del Tiempo.....                       | 89  |
| 2.8.5    | Verificación del Estado Limite de Resistencia (AASHTO LRFD 2024.).....    | 93  |
| 2.8.5.1  | Secciones con tendones que transmiten el Preesfuerzo por adherencia. .... | 95  |
| 2.8.5.2  | Acero mínimo de refuerzo. ....                                            | 96  |
| 2.8.5.3  | Control de agrietamiento mediante la distribución de refuerzos.....       | 98  |
| 2.8.6    | Diseño por Corte .....                                                    | 99  |
| 2.8.6.1  | Esfuerzo por corte en el Hormigón.....                                    | 101 |
| 2.8.6.2  | Refuerzo Transversal Mínimo Requerido.....                                | 102 |
| 2.8.6.3  | Máximo espaciamiento para el refuerzo transversal. ....                   | 102 |
| 2.8.6.4  | Resistencia al corte .....                                                | 102 |
| 2.8.7    | Corte Horizontal Entre la Losa del Tablero y las Vigas Preesforzadas..... | 105 |
| 2.8.7.1  | Fuerza de corte horizontal.....                                           | 106 |
| 2.8.7.2  | Fuerza de corte horizontal por unidad de longitud.....                    | 108 |
| 2.8.7.3  | Fuerza horizontal al corte.....                                           | 109 |
| 2.8.7.4  | Refuerzo Mínimo de Corte por Fricción.....                                | 111 |
| 2.8.8    | Zonas de Anclaje en Elementos Postensados.....                            | 113 |
| 2.8.8.1  | Diseño de Zona General. ....                                              | 114 |
| 2.8.8.2  | Diseño de Zona Local.....                                                 | 118 |
| 2.8.9    | Llaves de Corte .....                                                     | 121 |
| 2.8.9.1  | Descripción de las Juntas Secas. ....                                     | 122 |
| 2.8.9.2  | Comportamiento Resistente de las Juntas.....                              | 122 |
| 2.8.10   | Deformaciones.....                                                        | 125 |
| 2.8.10.1 | Flechas y Contraflechas.....                                              | 127 |

|          |                                                                   |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.8.10.2 | Cálculo de deflexiones y Contraflechas. ....                      | 129        |
| 2.8.10.3 | Debido a la fuerza de Preesfuerzo (Ecuación general) .....        | 129        |
| 2.8.10.4 | Deflexiones por cargas distribuidas (q) sobre la viga .....       | 131        |
| 2.9      | DISEÑO DE LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO .....                          | 131        |
| 2.9.1    | Sistemas de Tableros .....                                        | 132        |
| 2.9.2    | Estados Limites en Losas de Tablero. ....                         | 133        |
| 2.9.2.1  | Estados Limites de Servicio. ....                                 | 133        |
| 2.9.2.2  | Estados Limite de Fatiga y Fractura .....                         | 134        |
| 2.9.2.3  | Estados Limites de Resistencia. ....                              | 134        |
| 2.9.2.4  | Estados Limites Correspondientes a Eventos Extremos. ....         | 134        |
| 2.9.3    | Métodos de Análisis de Tableros. ....                             | 134        |
| 2.9.3.1  | Método de Análisis Aproximado.....                                | 135        |
| 2.9.3.2  | Método de Diseño Empírico para losas de Tablero de Hormigón. .... | 135        |
| 2.9.3.3  | Método de Análisis Refinado.....                                  | 135        |
| 2.10     | DISEÑO DE VIGAS DIAFRAGMAS, TRANSVERSALES O RIOSTRAS.<br>.....    | 136        |
| <b>3</b> | <b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>                                    | <b>138</b> |
| 3.1      | PARÁMETROS PRELIMINARES DE DISEÑO .....                           | 141        |
| 3.1.1    | Parámetros de los Materiales.....                                 | 141        |
| 3.1.2    | Parámetros Geométricos de la Superestructura.....                 | 142        |
| 3.1.3    | Parámetros Pertenecientes a la Metodología Constructiva .....     | 142        |
| 3.2      | MODELADO DE LA SUPERESTRUCTURA. ....                              | 143        |
| 3.3      | MODELADO DE LAS CARGAS ACTUANTES EN LA<br>SUPERESTRUCTURA. ....   | 145        |
| 3.3.1    | Modelación de las cargas Permanentes: .....                       | 145        |

|         |                                                                                        |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.1.1 | Peso Propio (DC).....                                                                  | 145 |
| 3.3.1.2 | Peso Propio de las Barandas (DC).....                                                  | 145 |
| 3.3.1.3 | Peso Propio de las Defensas New Jersey (DC). ....                                      | 145 |
| 3.3.1.4 | Peso Propio de la capa de rodadura (DW).....                                           | 146 |
| 3.3.2   | Modelación de las cargas no Permanentes.....                                           | 146 |
| 3.3.2.1 | Carga Peatonal (PL) .....                                                              | 146 |
| 3.3.2.2 | Carga Vehicular HL-93 (IL). ....                                                       | 147 |
| 3.4     | ANÁLISIS, CÁLCULO Y DISEÑO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA. ....  | 148 |
| 3.4.1   | Determinación de las solicitaciones.....                                               | 148 |
| 3.4.2   | Análisis de la Variabilidad de la solicitud para distintas configuraciones. ....       | 148 |
| 3.4.3   | Diseño de las Vigas para una Longitud de cálculo de 25 metros.....                     | 151 |
| 3.4.3.1 | Definición de la Resistencia del Hormigón y del acero de Postensado.....               | 151 |
| 3.4.3.2 | Definición de las Propiedades de la Sección de la Vigas Postensada en Centro Luz ..... | 152 |
| 3.4.3.3 | Determinación de las cargas actuantes en las vigas de la Superestructura               | 155 |
| 3.4.3.4 | Determinación de la Fuerza de Preesfuerzo Inicial y Final. ....                        | 158 |
| 3.4.3.5 | Determinación de la Trayectoria del Tendón Equivalente.....                            | 159 |
| 3.4.3.6 | Estimación de las Perdida de Preesfuerzo Inmediatas y Dependientes del Tiempo.         | 160 |
| 3.4.3.7 | Verificación por Flexión en el Estado de Resistencia I.....                            | 168 |
| 3.4.3.8 | Diseño por Cortante.....                                                               | 168 |
| 3.4.3.9 | Diseño Zona de Anclaje y de Transición.....                                            | 171 |

|          |                                                                                                                                 |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.3.10 | Verificación en la zona de Interfaz entre la Viga de H <sup>o</sup> P <sup>o</sup> y la Losa de H <sup>o</sup> A <sup>o</sup> . | 171        |
| 3.4.3.11 | Verificación de las Flechas.....                                                                                                | 172        |
| 3.4.3.12 | Verificación del Comportamiento de las Armaduras Activas. ....                                                                  | 173        |
| 3.4.3.13 | Verificación de las llaves de Corte .....                                                                                       | 179        |
| 3.4.4    | Análisis y Diseño de la Losa de Hormigón Armado.....                                                                            | 180        |
| 3.4.4.1  | Refuerzo para Momento Positivo (As +).....                                                                                      | 182        |
| 3.4.4.2  | Armadura de Distribución (Asdistr.).....                                                                                        | 182        |
| 3.4.4.3  | Refuerzo para Momento Negativo (As –).....                                                                                      | 183        |
| 3.4.4.4  | Armadura por Retracción y Temperatura (Astemper.).....                                                                          | 183        |
| 3.4.5    | Análisis y Diseño de los Diafragmas.....                                                                                        | 184        |
| 3.5      | PROCESO DE OPTIMIZACION DE LAS SUPERESTRUCTURAS ANALIZADAS .....                                                                | 193        |
| 3.6      | ANALISIS DEL COSTO DE LAS SUPERESTRUCTURAS ANALIZADAS. ....                                                                     | 207        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>                                                                                           | <b>212</b> |
| 4.1      | RESULTADOS .....                                                                                                                | 212        |
| 4.2      | CONCLUSIONES.....                                                                                                               | 217        |

## **ANEXOS:**

**Anexo A:** Fundamentos de la Aplicación del Método de Elementos Finitos en el Análisis y Cálculo de las Superestructuras Tipo Viga-Losa.

**Anexo B:** Cantidad mínima de Elementos finitos usados.

**Anexo C:** Solicitaciones obtenidas de los modelos de elementos finitos para todas las configuraciones.

**Anexo D:** Precios Unitarios.

**Anexo E:** Verificación Manual.

**Anexo F:** Planos.

## INDICE DE TABLAS.

|                   |                                                                                                                                |     |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 1.1</b>  | Variables Independientes y Dependientes que se Analizarán .....                                                                | 6   |
| <b>Tabla 1.2</b>  | Cantidad de Casos que se Analizarán .....                                                                                      | 7   |
| <b>Tabla 1.3</b>  | Cantidad de Vigas Según la Separación entre Vigas .....                                                                        | 7   |
| <b>Tabla 1.4</b>  | Constantes para el Análisis.....                                                                                               | 8   |
| <b>Tabla 2.1</b>  | Factor de Ductilidad.....                                                                                                      | 20  |
| <b>Tabla 2.2</b>  | Factor de Redundancia .....                                                                                                    | 20  |
| <b>Tabla 2.3</b>  | Factor de Importancia .....                                                                                                    | 21  |
| <b>Tabla 2.4</b>  | Fracción de Tráfico de Camiones en un Único Carril $p$ .....                                                                   | 28  |
| <b>Tabla 2.5</b>  | Fracción de Tráfico de Camiones en un Único Carril .....                                                                       | 28  |
| <b>Tabla 2.6</b>  | Factor de Presencia Múltiple ( $m$ ).....                                                                                      | 29  |
| <b>Tabla 2.7</b>  | Incremento por Carga Dinámica.....                                                                                             | 30  |
| <b>Tabla 2.8</b>  | Límites de Tensión en el Acero de Preesfuerzo .....                                                                            | 63  |
| <b>Tabla 2.9</b>  | Límites de Esfuerzo en el Hormigón .....                                                                                       | 64  |
| <b>Tabla 2.10</b> | Valores de $K$ para distintos Tipos de Tendones .....                                                                          | 75  |
| <b>Tabla 2.11</b> | Coeficiente de fricción para tendones Postensados .....                                                                        | 86  |
| <b>Tabla 2.12</b> | Factores de Cohesión y Fricción.....                                                                                           | 111 |
| <b>Tabla 2.13</b> | Deflexiones admisibles según el tipo de carga.....                                                                             | 127 |
| <b>Tabla 3.1</b>  | Análisis de la Variación de los Momentos Según Distintas Distribuciones                                                        | 140 |
| <b>Tabla 3.2</b>  | Cantidad de Elementos Finitos en una Superestructura Dada.....                                                                 | 144 |
| <b>Tabla 3.3</b>  | Variación del Momento Flector ( $kN\cdot m$ ) en las Vigas para la Situación de Carga I Según Distintas Configuraciones .....  | 149 |
| <b>Tabla 3.4</b>  | Variación del Momento Flector ( $kN\cdot m$ ) en las Vigas para la Situación de Carga II Según Distintas Configuraciones ..... | 149 |

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 3.5</b> Variación del Momento Flector en las Vigas para la Situación de Carga III<br>Según Distintas Configuraciones..... | 150 |
| <b>Tabla 3.6</b> Variación del Momento Flector en las Vigas para la Situación de Carga IV<br>Según Distintas Configuraciones ..... | 150 |
| <b>Tabla 3.7</b> Resistencia del Hormigón .....                                                                                    | 151 |
| <b>Tabla 3.8</b> Geometría de la Sección de la Viga.....                                                                           | 152 |
| <b>Tabla 3.9</b> Propiedades de la Sección Bruta .....                                                                             | 152 |
| <b>Tabla 3.10</b> Propiedades de la Sección Neta (Hueca).....                                                                      | 153 |
| <b>Tabla 3.11</b> Datos de Tendones y Torones .....                                                                                | 153 |
| <b>Tabla 3.12</b> Datos de los Tendones .....                                                                                      | 153 |
| <b>Tabla 3.13</b> Homogeneización entre la Viga y el Acero de Preesfuerzo .....                                                    | 153 |
| <b>Tabla 3.14</b> Propiedades Geométricas de la Sección Homogeneizada de la Viga en el<br>Momento de Transferencia.....            | 154 |
| <b>Tabla 3.15</b> Homogeneización de la Sección de la Viga en el Hormigonado de la Losa<br>.....                                   | 154 |
| <b>Tabla 3.16</b> Propiedades Geométricas de la Sección Homogeneizada de la Viga en el<br>Momento del Vaciado de la Losa .....     | 154 |
| <b>Tabla 3.17</b> Homogeneización entre la Viga y la Losa.....                                                                     | 155 |
| <b>Tabla 3.18</b> Propiedades de la Sección Viga+Losa .....                                                                        | 155 |
| <b>Tabla 3.19</b> Carga Equivalente Considerando la Geometría Longitudinal de la Viga<br>Durante la Transferencia .....            | 156 |
| <b>Tabla 3.20</b> Carga Equivalente Considerando la Geometría Longitudinal de la Viga al<br>Final de la Vida Útil.....             | 157 |
| <b>Tabla 3.21</b> Peso Propio de los Diafragmas .....                                                                              | 157 |
| <b>Tabla 3.22</b> Momentos Flectores Para cada Caso de Carga.....                                                                  | 158 |
| <b>Tabla 3.23</b> Determinación de la Fuerza de Preesfuerzo Inicial .....                                                          | 158 |

|                   |                                                                 |     |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 3.24</b> | Determinación de la Zona de Guyon .....                         | 159 |
| <b>Tabla 3.25</b> | Trayectoria del Tendón Equivalente .....                        | 159 |
| <b>Tabla 3.26</b> | Perdidas Por Fricción .....                                     | 160 |
| <b>Tabla 3.27</b> | Determinación de las Perdidas por Fricción.....                 | 161 |
| <b>Tabla 3.28</b> | Cálculo de la Perdida Por Acuñaamiento .....                    | 161 |
| <b>Tabla 3.29</b> | Cálculo de la Perdida por Acortamiento Elástico.....            | 162 |
| <b>Tabla 3.30</b> | Variación de la Fuerza de Preesfuerzo Inicial y Final .....     | 162 |
| <b>Tabla 3.31</b> | Perdida por Retracción del Hormigón .....                       | 163 |
| <b>Tabla 3.32</b> | Cálculo de los Coeficientes para la Perdida por Retracción..... | 163 |
| <b>Tabla 3.33</b> | Cálculo de la Perdida por Fluencia del Hormigón.....            | 164 |
| <b>Tabla 3.34</b> | Perdida por Relajación del Acero .....                          | 164 |
| <b>Tabla 3.35</b> | Perdida por Retracción.....                                     | 164 |
| <b>Tabla 3.36</b> | Coeficiente de Fluencia.....                                    | 165 |
| <b>Tabla 3.37</b> | Cálculo de la Perdida Por fluencia.....                         | 165 |
| <b>Tabla 3.38</b> | Coeficiente de Fluencia.....                                    | 166 |
| <b>Tabla 3.39</b> | Perdida Por Relajación del Acero.....                           | 166 |
| <b>Tabla 3.40</b> | Ganancia debido a la Retracción de la Losa.....                 | 166 |
| <b>Tabla 3.41</b> | Coeficiente de Fluencia del Hormigón .....                      | 167 |
| <b>Tabla 3.42</b> | Detalle de las Perdidas Dependientes del Tiempo.....            | 167 |
| <b>Tabla 3.43</b> | Verificación al Momento Ultimo.....                             | 168 |
| <b>Tabla 3.44</b> | Verificación a Torsión .....                                    | 169 |
| <b>Tabla 3.45</b> | Verificación a Corte en Sección S1-S2.....                      | 170 |
| <b>Tabla 3.46</b> | Verificación a Corte en Sección S4.....                         | 170 |
| <b>Tabla 3.47</b> | Análisis de las Fibras para una Etapa I .....                   | 174 |

|                   |                                                          |     |
|-------------------|----------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 3.48</b> | Análisis de las Fibras para una Etapa II .....           | 175 |
| <b>Tabla 3.49</b> | Análisis de las Fibras para una Etapa III.....           | 177 |
| <b>Tabla 3.50</b> | Esfuerzos en los Puntos Discretizados .....              | 185 |
| <b>Tabla 3.51</b> | Propiedades Geométricas de las Vigas .....               | 187 |
| <b>Tabla 3.52</b> | Propiedades Geométricos y Resistentes de las Vigas ..... | 188 |
| <b>Tabla 3.53</b> | Propiedades Resistentes de las Vigas.....                | 189 |
| <b>Tabla 3.54</b> | Diseño de Losa de Hormigón Armado .....                  | 190 |
| <b>Tabla 3.55</b> | Diseño de Diafragmas para los Casos Analizados.....      | 191 |
| <b>Tabla 3.56</b> | Dimensiones Mínimas de la Zona de Anclaje .....          | 194 |
| <b>Tabla 3.57</b> | Aprovechamiento de la Fuerza de Preesfuerzo.....         | 194 |
| <b>Tabla 3.58</b> | Costo de los Elementos que Conforman las Viga.....       | 207 |
| <b>Tabla 3.59</b> | Volúmenes de Hormigones de Vigas, Diafragmas y Losa..... | 208 |
| <b>Tabla 3.60</b> | Volúmenes del Acero de Alta Resistencia .....            | 209 |
| <b>Tabla 3.61</b> | Costo de las Superestructuras .....                      | 210 |

## INDICE DE FIGURAS.

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2-1</b> Imagen Descriptiva de una Superestructura Tipo Viga-Losa.....                                                 | 13 |
| <b>Figura 2-2</b> Sección Tipo de la Superestructura de un Puente.....                                                          | 14 |
| <b>Figura 2-3</b> Combinación de Cargas y Factores de Carga para Todos los Estados.....                                         | 21 |
| <b>Figura 2-4</b> Factores de Carga, para Cargas Permanentes .....                                                              | 22 |
| <b>Figura 2-5</b> Factores de carga, para cargas permanentes debido a deformaciones<br>sobreimpuestas .....                     | 22 |
| <b>Figura 2-6</b> Factores de carga para cargas vivas para la combinación de cargas de<br>servicio III .....                    | 23 |
| <b>Figura 2-7</b> Factores de carga para cargas permanentes debido a movimientos de la<br>cimentación.....                      | 23 |
| <b>Figura 2-8</b> Densidades de Algunos Materiales .....                                                                        | 24 |
| <b>Figura 2-9</b> Camión Estándar HL-93.....                                                                                    | 26 |
| <b>Figura 2-10</b> Tándem HL-93.....                                                                                            | 26 |
| <b>Figura 2-11</b> Carga de Carril de Diseño .....                                                                              | 27 |
| <b>Figura 2-12</b> Fuerza de Diseño en una Baranda Metálica, Ubicación en Altura y<br>Longitud de Distribución Horizontal ..... | 34 |
| <b>Figura 2-13</b> Fuerzas de Diseño para las Barreras de Tráfico Vehicular.....                                                | 34 |
| <b>Figura 2-14</b> Disposición de Vigas en un Tablero de Hormigón Armado.....                                                   | 37 |
| <b>Figura 2-15</b> Disposición de las Vigas en los Apoyos .....                                                                 | 38 |
| <b>Figura 2-16</b> Disposición de las Juntas.....                                                                               | 39 |
| <b>Figura 2-17</b> Tipo de Continuidad entre Vigas en los Apoyos .....                                                          | 40 |
| <b>Figura 2-18</b> Unión de Tableros en L/4 .....                                                                               | 42 |
| <b>Figura 2-19</b> Distintas configuraciones de Unión de Tableros a L/4 .....                                                   | 43 |
| <b>Figura 2-20</b> Distintas Disposiciones de Pilas con el Tablero .....                                                        | 44 |

|                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2-21</b> Disposición de una Viga Tipo Gerber con dos apoyos .....                                                                                                                            | 45 |
| <b>Figura 2-22</b> Fotografía del Puente Ustarez.....                                                                                                                                                  | 46 |
| <b>Figura 2-23</b> Esquema de la Superestructura del Puente Ustarez .....                                                                                                                              | 46 |
| <b>Figura 2-24</b> Fotografía de un Puente Continuo por Carga Viva Carretera Chuquisaca-Santa Cruz.....                                                                                                | 46 |
| <b>Figura 2-25</b> Cargas y Momentos Equivalentes producidos por Tendones Preesforzados .....                                                                                                          | 49 |
| <b>Figura 2-26</b> Técnica de Pretensado .....                                                                                                                                                         | 50 |
| <b>Figura 2-27</b> Técnica de Postensado.....                                                                                                                                                          | 51 |
| <b>Figura 2-28</b> Variación de la Fuerza de Preesfuerzo .....                                                                                                                                         | 53 |
| <b>Figura 2-29</b> Grafica Esfuerzo vs Deformación de distintos Tipos de Acero de Preesfuerzo .....                                                                                                    | 54 |
| <b>Figura 2-30</b> Grafica Esfuerzo vs Deformación del Acero típico de Refuerzo.....                                                                                                                   | 55 |
| <b>Figura 2-31</b> Fuerzas que Actúan en una Viga Típica Preesforzada .....                                                                                                                            | 59 |
| <b>Figura 2-32</b> Esfuerzos que se Producen en una Viga sin Agrietar.....                                                                                                                             | 60 |
| <b>Figura 2-33</b> Variación del Esfuerzo del Acero en una Viga Preesforzada.....                                                                                                                      | 66 |
| <b>Figura 2-34</b> Curvas Representativas de esfuerzo-deformación. (a) Acero de Preesfuerzo. (b) Hormigón.....                                                                                         | 69 |
| <b>Figura 2-35</b> Distribuciones sucesivas de Flexión a medida que se incrementa la carga desde la de agrietamiento hasta la última. (a) Viga Preesforzada (b) Viga Preesforzada sobre reforzada..... | 71 |
| <b>Figura 2-36</b> Distribución de Deformaciones y Esfuerzos bajo Cargas de Falla .....                                                                                                                | 72 |
| <b>Figura 2-37</b> Deformaciones y Esfuerzos a Medida que la Carga de la Viga se Incrementa hasta la Falla. (a) Deformaciones en el Hormigón y en el Acero.....                                        | 73 |
| <b>Figura 2-38</b> Curva Carga-Deflexión para una Viga Típica .....                                                                                                                                    | 80 |
| <b>Figura 2-39</b> Zona de Guyon.....                                                                                                                                                                  | 83 |

|                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 2-40</b> Grafica de la Variación de la Fuerza de Preesfuerzo cuando se Realiza el tesado de un Solo Lado y la Longitud de Influencia del Acuñaamiento Sobrepasa el Centro Luz..... | 84  |
| <b>Figura 2-41</b> Variación de la Fuerza de Preesfuerzo Cuando se Realiza el Tesado de un Solo Lado y la Longitud de Influencia del Acuñaamiento no Sobrepasa el Centro Luz ..              | 84  |
| <b>Figura 2-42</b> Variación de la Fuerza de Preesfuerzo cuando se realiza el tesado de dos lados y la longitud de influencia del acuñaamiento sobrepasa el centro luz .....                 | 85  |
| <b>Figura 2-43</b> Variación de la Fuerza de Preesfuerzo cuando se realiza el tesado de dos lados y la longitud de influencia del acuñaamiento no sobrepasa el centro luz.....               | 85  |
| <b>Figura 2-44</b> Cálculo del momento flector nominal para miembro con comportamiento equivalente al de una sección T .....                                                                 | 95  |
| <b>Figura 2-45</b> Acero de paramento en vigas Pre-Postensadas.....                                                                                                                          | 99  |
| <b>Figura 2-46</b> Ubicación de la zona critica a corte .....                                                                                                                                | 100 |
| <b>Figura 2-47</b> Representación de la Ubicación del Aceros de Preesfuerzo y de Refuerzo .....                                                                                              | 101 |
| <b>Figura 2-48</b> Interfaz de Corte por Fricción.....                                                                                                                                       | 106 |
| <b>Figura 2-49</b> Diagrama de Cuerpo Libre .....                                                                                                                                            | 106 |
| <b>Figura 2-50</b> Fuerzas Actuantes en el Corte Horizontal (vista de Perfil) .....                                                                                                          | 107 |
| <b>Figura 2-51</b> Ancho del Hormigón para absorber el corte por fricción.....                                                                                                               | 108 |
| <b>Figura 2-52</b> Vigas Preesforzadas con conectores de corte para unión losa-viga para absorber el corte por fricción.....                                                                 | 113 |
| <b>Figura 2-53</b> Zona General y Local Según AASHTO LRFD 2024.....                                                                                                                          | 114 |
| <b>Figura 2-54</b> Esquema de la Disposición del Acero en la Zona del Cabezal.....                                                                                                           | 116 |
| <b>Figura 2-55</b> Fuerzas a Tracción en el Borde.....                                                                                                                                       | 116 |
| <b>Figura 2-56</b> Trayectoria de Fuerzas para Múltiples Anclajes.....                                                                                                                       | 117 |
| <b>Figura 2-57</b> Distribución del Anclaje en la zona de Refuerzo.....                                                                                                                      | 117 |

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 2-58</b> Dimensiones de la Zona Local cuando Existen Recomendaciones del Fabricante .....          | 118 |
| <b>Figura 2-59</b> Recomendaciones del Proveedor .....                                                       | 119 |
| <b>Figura 2-60</b> Longitud de la Zona Local para Dispositivos de Anclaje con Múltiples Placas de Apoyo..... | 119 |
| <b>Figura 2-61</b> Áreas para el Cálculo de Resistencia en el Apoyo.....                                     | 120 |
| <b>Figura 2-62</b> Detalle ejemplo de Arreglo de Conectores de Corte.....                                    | 121 |
| <b>Figura 2-63</b> Análisis de una Junta.....                                                                | 122 |
| <b>Figura 2-64</b> Tendón recto o excentricidad constante .....                                              | 130 |
| <b>Figura 2-65</b> Para tendones desviados en un punto .....                                                 | 130 |
| <b>Figura 2-66</b> Para tendones desviados en dos puntos .....                                               | 130 |
| <b>Figura 2-67</b> Para tendones con Trayectoria de Parábola .....                                           | 130 |
| <b>Figura 2-68</b> Construcción del Tablero Mediante Prelas .....                                            | 132 |
| <b>Figura 2-69</b> Construcción del Tablero Hormigonado In Situ.....                                         | 132 |
| <b>Figura 2-70</b> Esfuerzos de Flexión y Membrana.....                                                      | 133 |
| <b>Figura 3-1</b> Dimensiones de los Carriles y de la Acera Peatonal-Ciclista .....                          | 142 |
| <b>Figura 3-2</b> Vista Inferior de la Disposición de los Elementos Finitos en la Superestructura.....       | 144 |
| <b>Figura 3-3</b> Vista Inferior de la cantidad de Elementos Finitos de la Superestructura .                 | 145 |
| <b>Figura 3-4</b> Medidas en Centímetros de la Geometría de la Defensa New Jersey.....                       | 146 |
| <b>Figura 3-5</b> Modelación de los Carriles vehiculares.....                                                | 147 |
| <b>Figura 3-6</b> Discretización de las Cargas en CSI BRIDGE .....                                           | 147 |
| <b>Figura 3-7</b> Sección de la Viga en C/L .....                                                            | 152 |
| <b>Figura 3-8</b> Esquema de la Geometría Longitudinal de la Viga .....                                      | 155 |
| <b>Figura 3-9</b> Geometría de la Sección de la Viga en los Anclajes.....                                    | 156 |

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 3-10</b> Grafica del Tendón Equivalente .....                                                    | 160 |
| <b>Figura 3-11</b> Grafica de la Variación de la Fuerza de Preesfuerzo Inicial .....                       | 162 |
| <b>Figura 3-12</b> Variación de las Fibras Estado I .....                                                  | 174 |
| <b>Figura 3-13</b> Diagrama de Esfuerzos en la Sección C/L Etapa I .....                                   | 175 |
| <b>Figura 3-14</b> Variación de las Fibras Estado II .....                                                 | 176 |
| <b>Figura 3-15</b> Diagrama de Esfuerzos en la Sección C/L Etapa II .....                                  | 176 |
| <b>Figura 3-16</b> Variación de las Fibras Estado III .....                                                | 178 |
| <b>Figura 3-17</b> Diagrama de Esfuerzos en la Sección C/L Etapa III .....                                 | 178 |
| <b>Figura 3-18</b> Variación de Momentos Positivos a lo largo del eje Y-Y en Resistencia I<br>(kN·m) ..... | 180 |
| <b>Figura 3-19</b> Variación de Momentos a lo largo del eje X-X en Resistencia I (kN·m).<br>.....          | 181 |
| <b>Figura 3-20</b> Vista de los esfuerzos en el eje Y-Y del Diafragma más Solicitado (MPa).<br>.....       | 184 |
| <b>Figura 3-21</b> Detalle de la discretización y de los esfuerzos Producidos en los<br>Diafragmas .....   | 185 |
| <b>Figura 3-22</b> Variación de las Dimensiones de las Vigas Para una Longitud de 25 metros<br>.....       | 195 |
| <b>Figura 3-23</b> Variación de las Dimensiones de las Vigas Para una Longitud de 27,5<br>metros .....     | 195 |
| <b>Figura 3-24</b> Variación de las Dimensiones de las Vigas Para una Longitud de 30,00<br>metros .....    | 196 |
| <b>Figura 3-25</b> Variación de las Dimensiones de las Vigas Para una Longitud de 32,50<br>metros .....    | 196 |
| <b>Figura 3-26</b> Variación de las Dimensiones de las Vigas Para una Longitud de 35,00<br>metros .....    | 197 |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 3-27</b> Variación de las Dimensiones de las Vigas Para una Longitud de 37,50 metros..... | 197 |
| <b>Figura 3-28</b> Variación de las Dimensiones de las Vigas Para una Longitud de 40,00 metros..... | 198 |
| <b>Figura 3-29</b> Esfuerzo a Compresión L=25 m.....                                                | 198 |
| <b>Figura 3-30</b> Esfuerzo a Compresión L=27,50 m.....                                             | 199 |
| <b>Figura 3-31</b> Esfuerzo a Compresión L=30,00 m.....                                             | 199 |
| <b>Figura 3-32</b> Esfuerzo a Compresión L=32,50m.....                                              | 199 |
| <b>Figura 3-33</b> Esfuerzo a Compresión L=35,00 m.....                                             | 200 |
| <b>Figura 3-34</b> Esfuerzo a Compresión L=37,50 m.....                                             | 200 |
| <b>Figura 3-35</b> Esfuerzo a Compresión L=40,00 m.....                                             | 200 |
| <b>Figura 3-36</b> Variación del Esfuerzo en la Fibra Inferior para distintas Longitudes.....       | 201 |
| <b>Figura 3-37</b> Esfuerzo a Compresión L=25,00 m.....                                             | 201 |
| <b>Figura 3-38</b> Esfuerzo a Compresión L=27,50 m.....                                             | 201 |
| <b>Figura 3-39</b> Esfuerzo a Compresión L=30,00 m.....                                             | 202 |
| <b>Figura 3-40</b> Esfuerzo a Compresión L=32,50 m.....                                             | 202 |
| <b>Figura 3-41</b> Esfuerzo a Compresión L=35,00 m.....                                             | 202 |
| <b>Figura 3-42</b> Esfuerzo a Compresión L=37,50 m.....                                             | 202 |
| <b>Figura 3-43</b> Esfuerzo a Compresión L=40,00 m.....                                             | 203 |
| <b>Figura 3-44</b> Variación del Esfuerzo en la Fibra Inferior para distintas Longitudes.....       | 203 |
| <b>Figura 3-45</b> Reducción de las dimensiones del Ala Superior Unidades en centímetros .....      | 204 |
| <b>Figura 3-46</b> Optimización Estructural Para un Tramo de 30,00 m.....                           | 204 |
| <b>Figura 3-47</b> Optimización Estructural Para un Tramo de 32,50 m.....                           | 205 |
| <b>Figura 3-48</b> Optimización Estructural Para un Tramo de 35,00 m.....                           | 205 |

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 3-49</b> Optimización Estructural Para un Tramo de 37,50 m..... | 206 |
| <b>Figura 3-50</b> Optimización Estructural Para un Tramo de 40,00 m..... | 206 |
| <b>Figura 4-1</b> Variación de la Inercia de la Viga.....                 | 213 |
| <b>Figura 4-2</b> Variación del Área Homogeneizada de la Viga.....        | 213 |
| <b>Figura 4-3</b> Variación del Radio de Giro .....                       | 213 |
| <b>Figura 4-4</b> Variación de la Cantidad de Tendones.....               | 214 |
| <b>Figura 4-5</b> Variación del Esfuerzo en la Fibra Superior.....        | 214 |
| <b>Figura 4-6</b> Variación del Esfuerzo en la Fibra Inferior .....       | 214 |
| <b>Figura 4-7</b> Variación del Esfuerzo en la Fibra Superior.....        | 215 |
| <b>Figura 4-8</b> Variación del Esfuerzo en la Fibra Inferior .....       | 215 |
| <b>Figura 4-9</b> Variación de la Resistencia Nominal a Flexión.....      | 215 |
| <b>Figura 4-10</b> Variación de la Resistencia Nominal a Cortante .....   | 216 |
| <b>Figura 4-11</b> Variación de la Resistencia Nominal a Torsión.....     | 216 |