

# Evaluación Estructural del Tablero del Puente Los Lojas compuesto por Vigas de Hormigón Pretensado

Loor Párraga Biron Miguel <sup>1</sup>  Lindao Tomalá Pablo Julio <sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

<sup>2</sup> Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Guayas, Ecuador.

✉ Correspondencia: [blloor1308@utm.edu.ec](mailto:blloor1308@utm.edu.ec)  + 0958604290

DOI /URL: <https://doi.org/10.53313/gwj72143>

**Resumen:** Este artículo presenta una evaluación estructural del tablero del Puente Los Lojas, con un enfoque en las vigas de hormigón pretensado utilizando CSI Bridge como herramienta principal de análisis. La investigación aborda las pérdidas de pretensado inmediatas y diferidas, destacando la importancia de su cálculo preciso para garantizar la durabilidad y seguridad del puente. El estudio incluye un análisis detallado de las cargas actuantes, tanto estáticas como dinámicas, y se desarrolló un modelo tridimensional del puente. Los resultados indican que las pérdidas de pretensado alcanzan un 18.73%, dentro del rango considerado generalmente para el diseño. Los esfuerzos verificados cumplen con los límites establecidos por AASHTO LRFD, garantizando la integridad estructural. El diseño a flexión y corte se verifica conforme a la normativa, con una relación demanda/capacidad adecuada y deflexiones dentro de los límites permisibles. El uso de CSI Bridge permitió realizar un análisis exhaustivo, proporcionando datos precisos y visualizaciones claras para la toma de decisiones. Los hallazgos no solo son relevantes para el Puente Los Lojas, sino también para otros proyectos de infraestructura similares, contribuyendo al avance del conocimiento en ingeniería de puentes y promoviendo la seguridad y eficiencia en la construcción de puentes a nivel global.

**Palabras claves:** Puentes, evaluación estructural, hormigón pretensado, CSI Bridge, análisis estático, análisis dinámico.

## Structural Assessment of the Los Lojas Bridge Deck Composed of Prestressed Concrete Beams

**Abstract:** This article presents a structural assessment of the Los Lojas Bridge deck, focusing on prestressed concrete beams using CSI Bridge as the primary analysis tool. The research addresses both immediate and long-term prestressing losses, highlighting the importance of accurate calculation to ensure the bridge's durability



**Cita:** Loor Párraga, B. M., & Lindao Tomalá, P. J. (2024). Evaluación Estructural del Tablero del Puente Los Lojas compuesto por Vigas de Hormigón Pretensado. *Green World Journal*, 07(02), 143. <https://doi.org/10.53313/gwj72143>

**Received:** 20/June /2024

**Accepted:** 26/July /2024

**Published:** 30/July /2024

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.  
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial  
[editor@greenworldjournal.com](mailto:editor@greenworldjournal.com)

**Editor's note:** CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2024 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

and safety. The study includes a detailed analysis of acting loads, both static and dynamic, and a three-dimensional model of the bridge was developed. The results indicate that prestressing losses reach 18.73%, within the range generally considered for design. The verified stresses comply with the limits established by AASHTO LRFD, ensuring structural integrity. The flexural and shear design is verified according to the standards, with a suitable demand/capacity ratio and deflections within permissible limits. The use of CSI Bridge allowed for a comprehensive analysis, providing precise data and clear visualizations for decision-making. The findings are not only relevant for the Los Lojas Bridge but also for other similar infrastructure projects, contributing to the advancement of bridge engineering knowledge and promoting safety and efficiency in bridge construction globally.

**Keywords:** Structural assessment, prestressed concrete, CSI Bridge, static analysis, dynamic analysis.

## 1 Introducción

La evaluación estructural de puentes es un proceso fundamental en el campo de la Ingeniería Civil, que implica analizar la capacidad de las estructuras para soportar las cargas a las que estarán expuestas durante su vida útil [1]. En este contexto, el Puente Los Lojas se presenta como un caso de estudio particularmente relevante, ya que su composición de vigas de hormigón pretensado plantea desafíos únicos en términos de diseño, análisis y mantenimiento.

El Puente Los Lojas, ubicado en la parroquia los Lojas del cantón Daule, está expuesto a un volumen significativo de tráfico diario que puede afectar su integridad estructural, por lo que las vigas de hormigón pretensado que lo conforman requieren una evaluación minuciosa de su comportamiento estructural para garantizar la seguridad y funcionalidad a largo plazo del puente.

Este artículo presenta una evaluación estructural integral de las vigas pretensadas del tablero del Puente Los Lojas, centrándose en los siguientes objetivos:

- Determinar la magnitud de la fuerza de pretensado en cada etapa de carga, desde la transferencia inicial de la fuerza al concreto hasta las diversas etapas de pretensado disponibles en la carga de servicio, considerando las pérdidas de pretensado inmediatas y diferidas.
- Verificar los esfuerzos máximos en las vigas pretensadas tanto en etapa de transferencia como de servicio y comparar con los esfuerzos permisibles conforme con la normativa AASTHO LRFD 2020.
- Evaluar el comportamiento estructural de las vigas del puente utilizando el software CSI Bridge para desarrollar un modelo matemático preciso y simular el comportamiento del tablero bajo diferentes condiciones de carga.
- Analizar el diseño a flexión y corte de las vigas pretensadas, verificando la cantidad óptima de pretensado y la distribución adecuada de los tendones, así como la disposición de los refuerzos transversales y longitudinales para evitar fallos por cortante.
- Comprobar la deflexión máxima de las vigas pretensadas por carga viva vehicular y comparar con la deflexión máxima permitida según la norma AASTHO LRFD 2020.
- Contribuir al avance del conocimiento en la ingeniería de puentes, proporcionando información valiosa sobre el comportamiento de las vigas de hormigón pretensado bajo diferentes condiciones de carga, aplicable a otros proyectos de infraestructura.

En el estudio de las vigas de concreto pretensado, se reconoce ampliamente que la fuerza de pretensado inicial aplicada al elemento de concreto disminuye gradualmente a lo largo de un período de aproximadamente cinco años [2]. Por lo tanto, es importante determinar la magnitud de la fuerza de pretensado en cada etapa de carga, desde la transferencia inicial de la fuerza al concreto,

pasando por las diversas etapas de pretensado disponibles en la carga de servicio, hasta la última etapa considerando de este modo las pérdidas de pretensado [3].

Las pérdidas de pretensado en vigas prefabricadas son un factor crucial en el diseño y construcción de estructuras de puentes, ya que afectan directamente la durabilidad, seguridad y desempeño estructural de las vigas. Estas pérdidas se pueden clasificar en dos categorías principales: pérdidas inmediatas y pérdidas diferidas [4].

Por una parte, las pérdidas inmediatas ocurren poco después de la aplicación del pretensado y se pueden subdividir en varios tipos como: acortamiento elástico del hormigón, deslizamiento de los anclajes y fricción (únicamente en los elementos postensados). Por otra parte, las pérdidas diferidas se desarrollan durante la vida útil de la estructura, identificándose las siguientes: fluencia lenta del hormigón, retracción del hormigón y relajación del acero[2].

En la práctica, la pérdida total de pretensado se considera generalmente del 20% para el diseño de este tipo de elementos [5]. Sin embargo, para el presente caso de estudio se evaluará mediante fórmulas el valor pertinente de cada tipo de pérdida de pretensado.

Por otra parte, se debe considerar que al aplicar la fuerza de tensado la viga experimenta un proceso de compresión de las fibras inferiores del elemento y tensión en las fibras superiores, generando esfuerzos que deben mantenerse por debajo de los esfuerzos permisibles conforme con AASHTO LRFD [6], los mismos que se evalúan en etapa de transferencia. De la misma forma cuando el elemento recibe la carga de la superestructura, es decir en estado de servicio, este experimenta esfuerzos de compresión en las fibras superiores y tensión en las fibras inferiores que deben ser comparados con los esfuerzos permisibles [7].

La evaluación integral del tablero del Puente Los Lojas también abarca aspectos cruciales del diseño a flexión y corte de vigas pretensadas, que son fundamentales para garantizar la integridad estructural y la seguridad del puente. En el diseño a flexión, se consideran varios factores, como la resistencia del hormigón y del acero de refuerzo, así como la distribución de cargas a lo largo de la viga. La aplicación de la técnica de pretensado permite mejorar significativamente la capacidad de carga de las vigas, al introducir fuerzas de compresión iniciales que contrarrestan las tensiones producidas por las cargas externas[8]. Es esencial realizar un análisis detallado para determinar la cantidad óptima de pretensado y la distribución adecuada de los tendones a lo largo de la viga, maximizando así su capacidad de resistencia a la flexión.

Por otro lado, el diseño a corte de vigas pretensadas implica consideraciones específicas para evitar el fallo por cortante. El pretensado contribuye a mejorar la resistencia al corte al generar fuerzas de compresión adicionales en la sección transversal de la viga. Sin embargo, es crucial evaluar cuidadosamente la disposición de los refuerzos transversales y longitudinales, para garantizar una distribución adecuada de las tensiones y prevenir posibles modos de fallo por cortante[9].

La importancia de una evaluación exhaustiva radica en garantizar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de la infraestructura vial, así como en optimizar los recursos disponibles [10]. En este sentido, es crucial utilizar herramientas avanzadas de análisis estructural que permitan desarrollar modelos matemáticos precisos para simular el comportamiento de un puente bajo diversas condiciones de carga.

Una de estas herramientas es CSI Bridge, un software especializado en el análisis y diseño de puentes que ofrece capacidades avanzadas para la modelización de estructuras complejas [11]. Su interfaz intuitiva y su capacidad para integrar diferentes tipos de elementos finitos lo convierten en una opción ideal para estudios de evaluación estructural como el que se presenta en este artículo [12].

El Puente Los Lojas, situado en una región de tráfico intensivo y condiciones ambientales variables, requiere una evaluación minuciosa de su comportamiento estructural para garantizar su seguridad y funcionalidad a largo plazo. Motivo por el cual, el uso de CSi Bridge se revela como una herramienta invaluable, ya que permite desarrollar modelos detallados del puente y simular su respuesta bajo diferentes escenarios de carga, incluyendo cargas estáticas y dinámicas [12].

Al emplear CSi Bridge en el análisis estructural del tablero del Puente Los Lojas, se pueden realizar estudios de sensibilidad para identificar los factores que más influyen en su comportamiento, así como evaluar el rendimiento de diversas estrategias de refuerzo y mantenimiento [11]. Además, la capacidad del software para generar informes detallados y visualizaciones gráficas facilita la comunicación de los resultados a diferentes partes interesadas, incluyendo ingenieros, diseñadores, autoridades de transporte y la comunidad en general.

Además de su importancia en la evaluación estructural del tablero del Puente Los Lojas, este estudio también contribuirá al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería de puentes, proporcionando información valiosa sobre el comportamiento de las vigas de hormigón pretensado bajo diferentes condiciones de carga. Los hallazgos obtenidos no solo serán relevantes para el diseño y mantenimiento del tablero del Puente Los Lojas, sino que también podrán aplicarse a otros proyectos de infraestructura que empleen este tipo de elementos estructurales. De esta manera, se amplía el impacto de la investigación más allá de un caso específico, promoviendo la seguridad y eficiencia en la construcción de puentes a nivel global.

## 1 Materiales y métodos

### 1.1 Área de estudio

El Puente Los Lojas se encuentra ubicado en la región central del Ecuador, específicamente en la provincia de Guayas, cantón Daule, parroquia Los Lojas. Este puente es una importante infraestructura vial que conecta dos áreas urbanas clave y facilita el transporte de personas y mercancías a lo largo de la región.

La Figura 1 muestra la ubicación del Puente Los Lojas a nivel global y local. Se puede observar su posición geográfica dentro del Ecuador y su relación con otras características geográficas importantes, como ríos, montañas y ciudades cercanas.



Figura 1. Ubicación del Puente Los Lojas a nivel global (A) y local (B).

### 1.2 Descripción de la estructura

El puente Los Lojas ubicado en la parroquia Los Lojas del cantón Daule, provincia de Guayas, sobre el estero Abejones (desemboca al río Daule) a 12 Km de la vía a Salitre y a 45 km al centro de Guayaquil, consiste en un puente de 1 solo tramo de 25 m de longitud (ver Figura 2).

La superestructura del puente consta de un tablero de longitud  $L=25.00$  m, sección transversal de 5.60 m, compuesto por 3 vigas de hormigón preesforzadas de altura  $H=0.92$  m y separación de 1.90 m, losa de hormigón de espesor  $t_s=0.18$  m, diafragmas transversales en los apoyos e intermedio con 0.30 m y 0.20 m de espesor respectivamente.

La subestructura está conformada por dos estribos tipo muro de ala, diseñados para proporcionar una base sólida y estable para el puente, apoyados sobre pilotes cuadrados de 13 m de longitud (ver Figura 3).

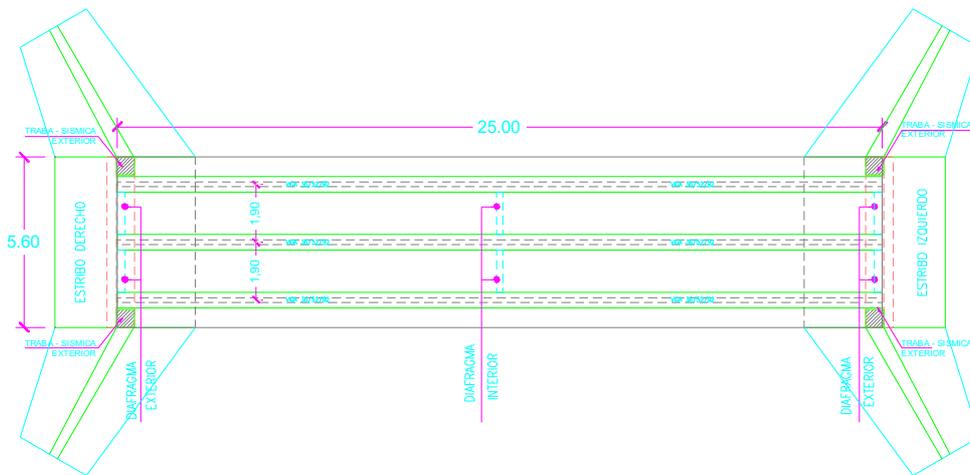


Figura 2. Vista en planta del Puente Los Lojas.

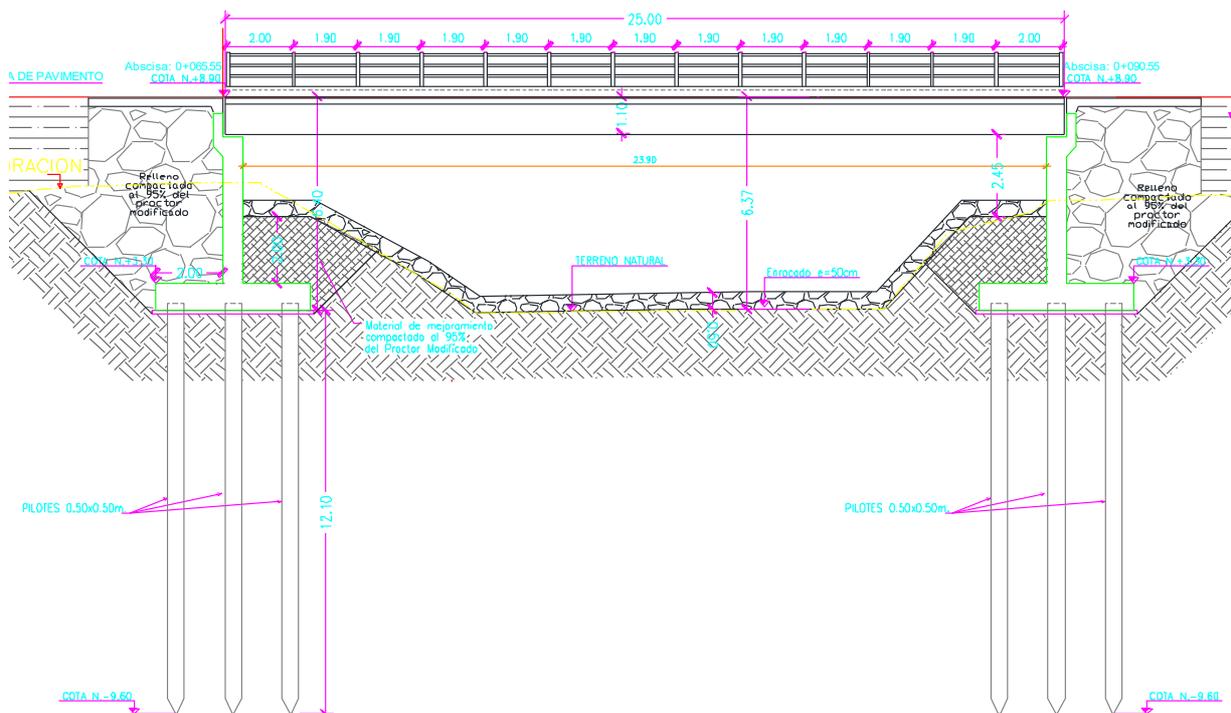


Figura 3. Perfil longitudinal del Puente Los Lojas.

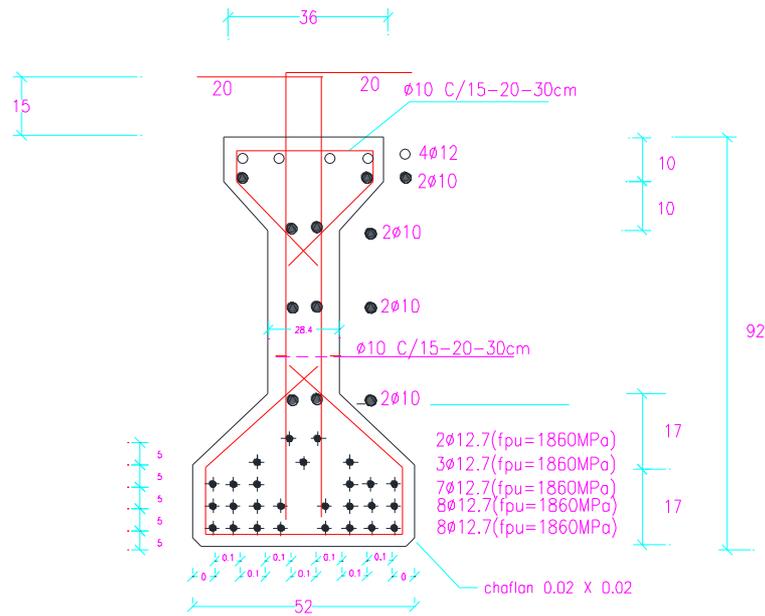


Figura 4. Sección transversal de viga pretensada.

### 1.3 Métodos

En este estudio, se llevó a cabo una serie de procedimientos y análisis para evaluar el comportamiento estructural de las vigas del Puente Los Lojas. Los métodos utilizados se describen detalladamente a continuación:

**2.3.1. Recopilación de Datos:** Se recopilaron datos relevantes sobre el diseño y la construcción del Puente Los Lojas, incluyendo planos estructurales, especificaciones de materiales (ver Tabla 1) y detalles de la construcción.

Tabla 1. Especificaciones de materiales.

Elemento	Peso Específico	Resistencia
Losa del tablero	2400 kgf/m <sup>3</sup>	f'c= 280 kgf/cm <sup>2</sup>
Vigas presforzadas	2400 kgf/m <sup>3</sup>	f'c= 450 kgf/cm <sup>2</sup>
Diafragmas	2400 kgf/m <sup>3</sup>	f'c= 280 kgf/cm <sup>2</sup>

**2.3.2. Evaluación de cargas actuantes:** Se realizó una evaluación de las cargas que actúan en la superestructura del puente, se muestran las cargas estáticas o cargas permanentes en la Tabla 2.

Tabla 2. Cargas Estáticas

Elemento	Espesor (m)	Peso Específico (ton/ m <sup>3</sup> )	Carga Distribuida (ton/ m <sup>2</sup> )	Carga Distribuida (ton/ m)
Losa del tablero	0.18	2.4	0.432	-
Aceras	0.22	2.4	0.528	-
Barandas	-	-	-	0.10
Asfalto	0.075	2.2	0.165	-
Instalaciones	-	-	0.10	-

Las cargas dinámicas que actúan en la superestructura del puente son: carga peatonal y carga viva vehicular. Estas cargas se definen conforme con AASHTO LRFD [6], donde en su Art. 3.6.1.2 se designa la carga peatonal como se muestra en la Tabla 3 y la carga viva vehicular HL-93, consiste en una combinación de: Camión de diseño o tándem de diseño y carga de carril de diseño de 0,952 Ton/m en un ancho de 3.0m tal como se muestra en las Figuras 5 y 6 respectivamente. Se considera además el factor de presencia múltiple hasta 2 carriles cargados y el incremento por carga dinámica.

Tabla 3. Cargas Dinámicas

Elemento	Carga Distribuida (ton/ m <sup>2</sup> )	Tipo
Carga peatonal	0.366	PL
HL-93	-	LL

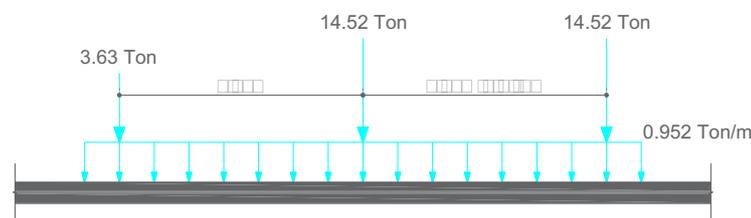


Figura 5. Carga viva vehicular, camión + carga de carril.

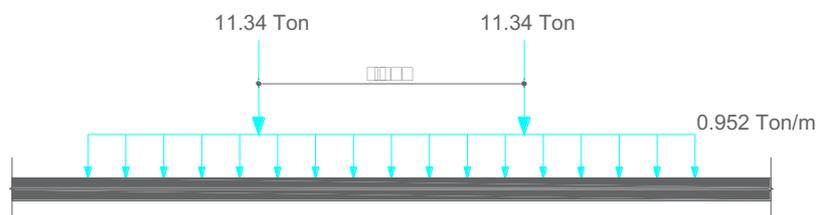


Figura 6. Carga viva vehicular, tándem + carga de carril.

**2.3.3. Modelado en CSI Bridge:** Se utilizó el software de análisis estructural CSI Bridge para desarrollar un modelo matemático tridimensional del Puente Los Lojas. Este modelo incluyó todas las características estructurales importantes del puente, como la losa del tablero, vigas de hormigón pretensado, los estribos de soporte y pilotes (ver Figura 7).

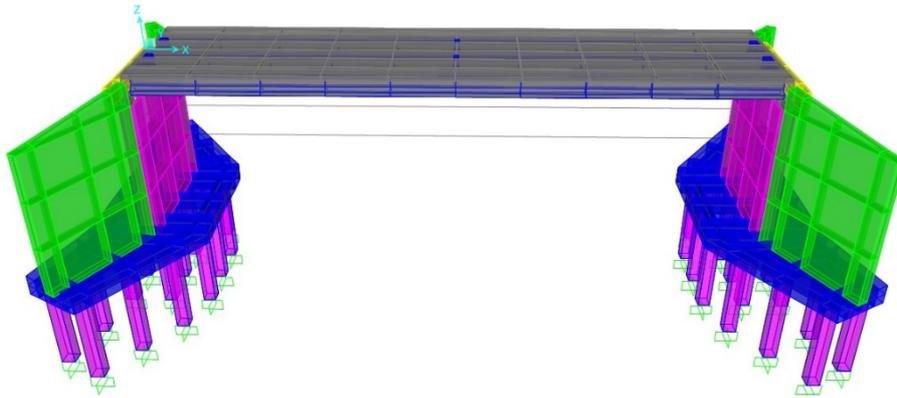


Figura 7. Modelo 3D del puente en CSiBridge.

**2.3.4. Análisis Estáticos y dinámicos:** Se realizaron análisis estáticos para evaluar la respuesta del puente bajo cargas estáticas representativas de condiciones de servicio normales y se llevaron a cabo análisis dinámicos para simular la respuesta del puente ante cargas dinámicas, como el paso de vehículos.

#### 2.3.4.1. Pérdidas Parciales de Pretensado

La reducción de la fuerza de pretensado se agrupa en dos categorías:

Pérdidas inmediatas que se producen durante el proceso de fabricación o construcción e incluyen el acortamiento elástico del hormigón y pérdidas por deslizamiento de los anclajes[2].

Cuando se transfiere la fuerza de pretensado a una pieza, se produce un acortamiento elástico en el concreto debido a la compresión tal como se muestra en la Figura 8 [5].

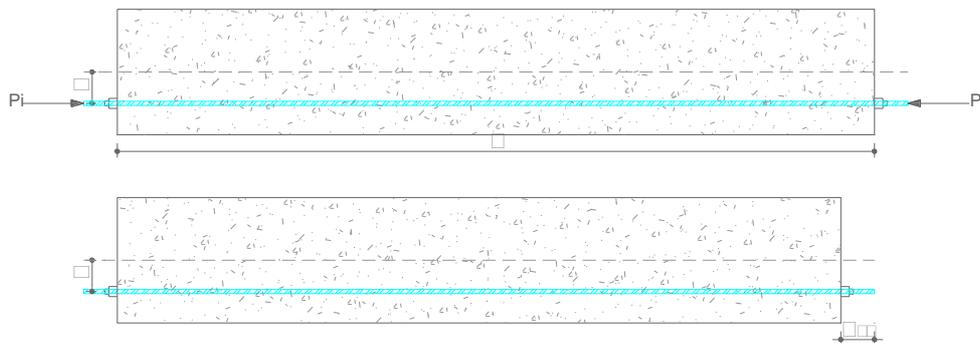


Figura 8. Pérdida de esfuerzo por acortamiento elástico del hormigón.

La pérdida por acortamiento del hormigón se calcula mediante la siguiente ecuación:  $\Delta f_{pES} = n f_{cs}$ , donde,  $n$  es la relación entre los módulos de elasticidad del acero de pretensado o torones y del hormigón en su resistencia inicial, a su vez  $f_{cs}$  es el esfuerzo de compresión en la fibra inferior al momento de la transferencia del preesfuerzo.

Las pérdidas por deslizamiento de los anclajes se verifican en el alargamiento de los cables en el momento de la transferencia del esfuerzo del elemento tensor hacia el anclaje y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$\Delta f p_A = \frac{\Delta A}{L} E_p$ , donde,  $\Delta A$  es el acortamiento inicial asumido tomado como 1/4 in - 3/8 in, L es la longitud de la viga y  $E_p$  es el módulo de elasticidad del acero de presfuerzo [2].

Una vez que se calculan las pérdidas inmediatas, es posible conocer la fuerza de tensado inicial  $P_i$  en el estado de transferencia,  $P_i = P_j - \Delta f p_{ES} - \Delta f p_A$ , donde,  $P_j$  es la fuerza de tensado original.

Otro tipo de pérdidas que se presentan son las pérdidas diferidas dependientes del tiempo tales como fluencia lenta, contracción del hormigón y relajación del acero[2].

La fluencia lenta del hormigón se presenta como deformaciones cuando cargas externas actúan sobre el elemento y esta se considera mediante la siguiente ecuación:

$\Delta f p_{CR} = n K_{CR} (f_{cs} - f_{csd})$ , donde,  $K_{CR} = 2$  para elementos pretensados y 1.6 para elementos postensados,  $f_{cs}$  y  $f_{csd}$  esfuerzos en el hormigón inmediatamente después de la transferencia y en estado de servicio respectivamente[7].

Al igual que ocurre con la fluencia del hormigón, la magnitud de su contracción es influenciada por diversos factores. Entre estos se encuentran las proporciones de la mezcla, el tipo de agregado y cemento, el tiempo de curado, el intervalo entre el final del curado externo y la aplicación del pretensado, el tamaño del elemento y las condiciones ambientales [7].

$\Delta f p_{SH} = 8.2 \times 10^{-6} K_{SH} (1 - 0.06 \frac{V}{S}) (100 - RH)$ , donde,  $K_{SH} = 1$  para elementos pretensados,  $V/S$  es la relación volumen-superficie y RH la humedad relativa.

Las pérdidas por relajación del acero se producen por su elongación constante con el tiempo.

$\Delta f p_R = f'_{pi} \frac{\log t}{10} (\frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0.55)$ , donde, t es el periodo ingresado en horas para el cual se calculan las pérdidas.

Una vez calculadas las pérdidas diferidas es posible obtener la fuerza de tensado efectiva,

$$P_e = \Delta f p_{CR} - \Delta f p_{SH} - \Delta f p_R.$$

En la Figura 9 se muestra un esquema representativo de la variación de la fuerza de pretensado.

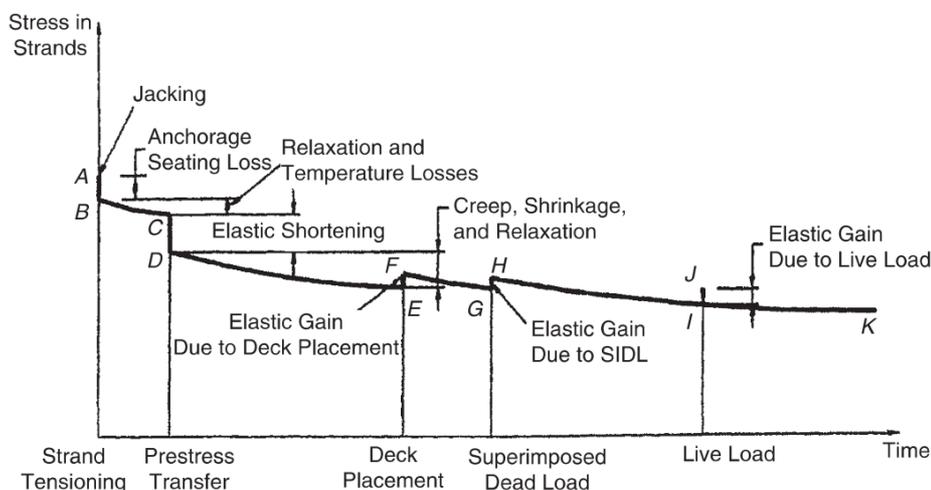


Figura 9. Variación de la fuerza de tensado en vigas prefabricadas [8].

Para el cálculo de los esfuerzos en el concreto, el diseño a flexión y cortante, se evalúan las combinaciones de diseño de acuerdo con AASHTO LRFD [6], en donde las combinaciones de carga predominantes son:

- Servicio I:  $DC + DW + LL + IM + PL$
- Resistencia I:  $1,25DC + 1,5DW + 1,75(LL+IM +PL )$

En elementos simplemente apoyados, que son los que se tratan en este trabajo, actúan principalmente dos esfuerzos, flexión y cortante.

#### 2.3.4.2. Flexión

La flexión es una condición que se presenta en casi todos los elementos estructurales, sin importar el material. Utilizar acero de alta resistencia (acero presforzado) permite que el elemento de hormigón resista adecuadamente los esfuerzos de flexión. En elementos simplemente apoyados con carga uniformemente distribuida, el momento flector máximo se localiza en el centro del vano [8].

En los elementos pretensados, cuando se transfiere la carga del acero al hormigón, es decir, durante el proceso de destensado, se genera un esfuerzo de flexión. En este proceso, las fibras inferiores del elemento se comprimen, mientras que las fibras superiores se traccionan, como se muestra en la Figura 10 [2].

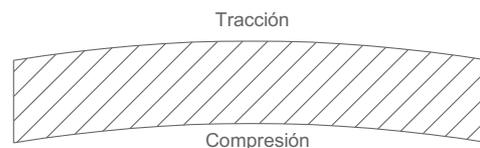


Figura 10. Flexión al destensar, etapa de transferencia.

Por otra parte, cuando se aplican cargas de servicio al elemento, este comienza a experimentar esfuerzos de compresión en las fibras superiores y de tracción en las fibras inferiores, tal como se ilustra en la Figura 11.

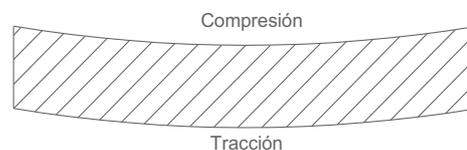


Figura 11. Flexión al actuar las cargas de servicio.

En las Tablas 4 y 5 se presentan los esfuerzos máximos permisibles en las fibras extremas del elemento viga para etapa de transferencia y servicio respectivamente.

**Tabla 4.** Esfuerzos máximos permisibles especificados por AASHTO LRFD [6], Art. 5.9.2.3.1 en etapa de transferencia ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

Elemento	Estado	Límite según AASHTO 2020
----------	--------	--------------------------

Fibra superior	Tensión	$0,80\lambda\sqrt{f'ci}$
Fibra inferior	Compresión	$-0,60f'ci$

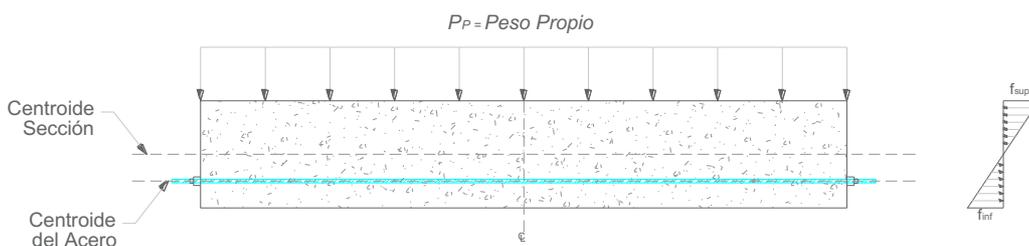
**Tabla 5.** Esfuerzos máximos permisibles especificados por AASHTO LRFD [6], Art. 5.9.2.3.2 en etapa de servicio ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

Elemento	Estado	Límite según AASHTO 2020
Fibra superior	Compresión	Caso I: Carga total $-0,60\phi_w f'c$
		Caso II: Cargas permanentes $-0,45f'c$
Fibra inferior	Tensión	$1,60\lambda\sqrt{f'c}$

Los esfuerzos que actúan en las fibras extremas del elemento se calculan mediante las relaciones de las Tablas 6 y 7 respectivamente. En las Figuras 12 y 13 se muestra una representación gráfica de los esfuerzos que actúan en el elemento en etapa de transferencia y servicio.

**Tabla 6.** Esfuerzos que actúan en las fibras extremas del elemento en etapa de transferencia ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

Elemento	Estado	Esfuerzo actuante
Fibra superior	Tensión	$-\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S_t}$
Fibra inferior	Compresión	$-\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b}$



**Figura 12.** Esfuerzos en etapa de transferencia.

**Tabla 7.** Esfuerzos que actúan en las fibras extremas del elemento en etapa de servicio ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

Elemento	Estado	Esfuerzo actuante
Fibra superior	Compresión	$-\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D + M_{SD}}{S_t} - \frac{M_{CSD} + M_L}{S_{tc}}$

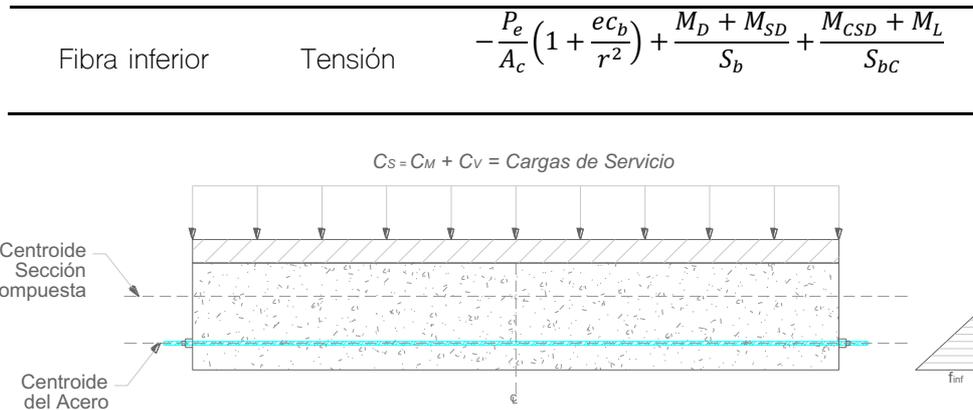


Figura 13. Esfuerzos en etapa de servicio.

La verificación de esfuerzos en etapa de servicio se la realiza considerando una sección compuesta donde interviene la losa del tablero. Dado que la resistencia del hormigón de la losa es diferente al de la viga se debe analizar un ancho de losa efectivo (ver Figura 14) el cual se determina mediante la siguiente relación:

$b_e = \frac{E_{losa}}{E_{viga}} * S$ , donde,  $S$  es la separación entre vigas,  $E_{losa}$  es el módulo de elasticidad del hormigón para la losa del tablero y  $E_{viga}$  es el módulo de elasticidad del hormigón de la viga.

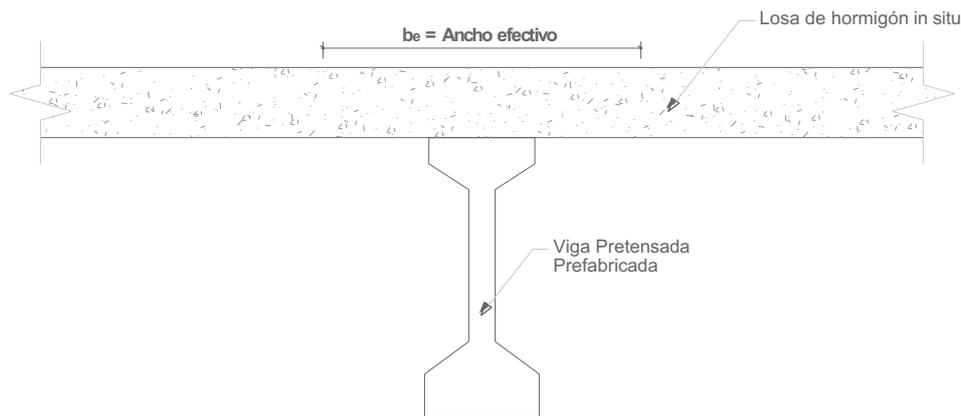


Figura 14. Ancho efectivo de losa para una viga de sección compuesta.

La característica más crucial de una estructura es su resistencia, ya que esta está directamente vinculada con la seguridad del miembro estructural. La resistencia de un elemento de concreto presforzado no está garantizada automáticamente por la limitación de los esfuerzos bajo carga de servicio. Si el elemento se sobrecargara, se producirían cambios significativos en su comportamiento debido al agrietamiento y porque uno o ambos materiales alcanzarían niveles de esfuerzo dentro del rango inelástico antes de la falla. El factor de seguridad real solo puede determinarse calculando la resistencia del elemento, teniendo en cuenta plenamente estos efectos, y comparando la carga que provocaría la falla del elemento con la carga esperada durante su uso [13].

La resistencia a flexión del elemento se calcula conforme con AASHTO LRFD [6], Art. 5.6.3.2 mediante la ecuación  $\phi M_n = \phi \left( A_{ps} f_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left( d_s - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y \left( d'_s - \frac{a}{2} \right) \right)$ .

### 2.3.4.3. Cortante

Las cargas normales al eje del elemento estructural generan esfuerzos cortantes que deben ser soportados parcialmente por el hormigón y parcialmente por el acero, empleando estribos colocados de manera perpendicular al eje del elemento [13].

Las vigas también deben estar protegidas contra fallas prematuras de diferentes tipos, que pueden ser más peligrosas que las fallas por flexión, ya que, si ocurrieran, la sobrecarga y el colapso catastrófico podrían suceder de manera repentina y sin previo aviso [13]. Un ejemplo de esto es la falla por cortante, también conocida como falla por tensión diagonal, en la Figura 15 se muestra un esquema de las grietas que se producen por cortante en estos elementos.

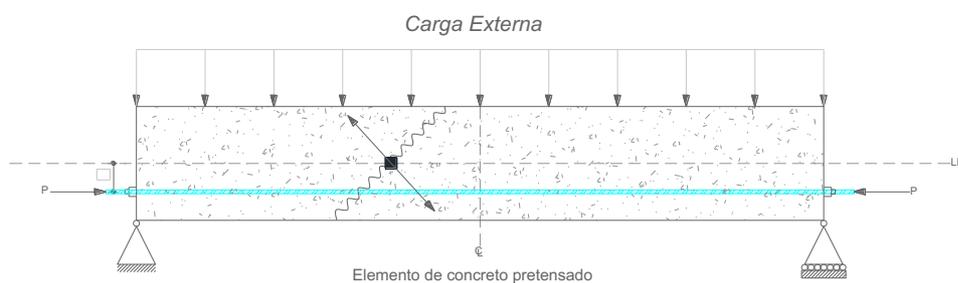


Figura 15. Grietas tendidas en el hormigón pretensado.

La resistencia por cortante del elemento se calcula conforme con AASHTO LRFD [6], Art. 5.7.3.3 mediante la ecuación  $\phi V_n = \min(V_c + V_s + V_p, 0.25f'_c b_v d_v + V_p)$ .

### 2.3.5. Validación y Comparación

Se compararon los resultados del análisis con las normativas y estándares relevantes en el campo de la ingeniería estructural para validar la precisión del modelo y los resultados obtenidos.

Se verificaron las pérdidas de pretensado, tanto pérdidas diferidas como pérdidas inmediatas, lo cual permitió un análisis de la sección considerando las pérdidas para sus propiedades.

Se verificaron y compararon los esfuerzos que actúan en el elemento tanto en estado de transferencia como servicio, esto conforme con los límites establecidos según AASHTO LRFD Art. 5.9.2.3.

Se realizó el diseño a flexión conforme con AASHTO LRFD Art 5.6.3.2, considerando la sección compuesta y el aporte del acero corrugado además de los torones. Las propiedades de la sección compuesta se verificaron de acuerdo con lo establecido en AASTHO LRFD Art. 5.6.3.1. Al analizar la sección compuesta se determinó un comportamiento como sección rectangular dado que la altura del bloque a compresión "a" es menor que el espesor del tablero "hf".

El diseño a cortante se lo verificó de acuerdo con lo establecido en AASTHO Art. 5.7.3 y la deflexión máxima del elemento según AASHTO LRFD Art. 2.5.2.6.2.

## 2 Resultados

### 3.1. Verificación de las pérdidas de pretensado

Al analizar las pérdidas de pretensado se obtuvo un porcentaje de pérdidas de 18.73%, pasando de una fuerza de tensado original de  $P_j=375.30$  Ton a una fuerza de tensado inicial de  $P_i=326.67$  Ton y luego a una fuerza de tensado efectiva de 307.81 Ton, tal como se muestra en la Figura 16.

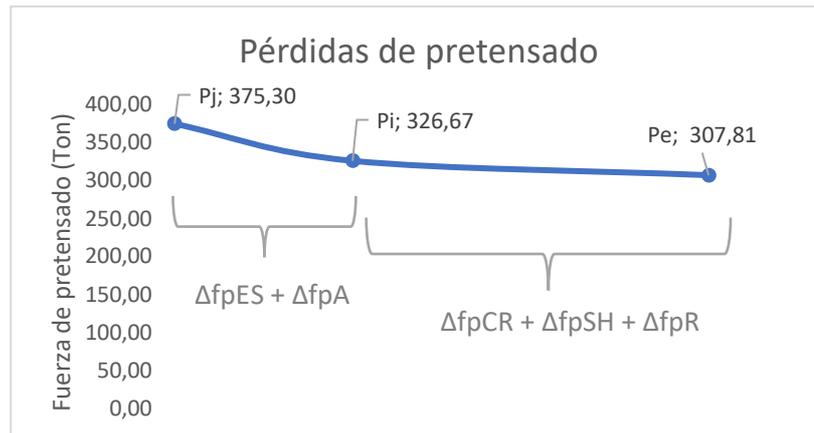


Figura 16. Variación de la fuerza de tensado.

### 3.2. Verificación de esfuerzos en etapa de transferencia y servicio

Al verificar los esfuerzos en etapa de transferencia considerando únicamente la sección de la viga se determinó que son menores a los esfuerzos límites, tal como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Verificación de esfuerzos en etapa de transferencia.

Elemento	Estado	Esfuerzo límite (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo actuante (kg/cm <sup>2</sup> )
Fibra superior	Tensión	16	-40.70
Fibra inferior	Compresión	-240	-181.06

Los esfuerzos en etapa de servicio se verificaron con la sección compuesta y se comprobó que están dentro de los límites establecidos (ver Tabla 9).

Tabla 9. Verificación de esfuerzos en etapa de servicio.

Elemento	Estado	Esfuerzo límite (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo actuante (kg/cm <sup>2</sup> )
Fibra superior	Compresión	-202.5	-175.94
Fibra inferior	Tensión	33.94	15.30

### 3.3. Verificación de la capacidad a flexión

En la Figura 17 se muestra el diagrama de momento flector para la combinación predominante.

El diseño a flexión se realizó considerando la sección compuesta y se verificó que el momento resistente de la sección es mayor que el momento de la demanda, obteniéndose una relación demanda/capacidad de 0.99 (ver figura 18).

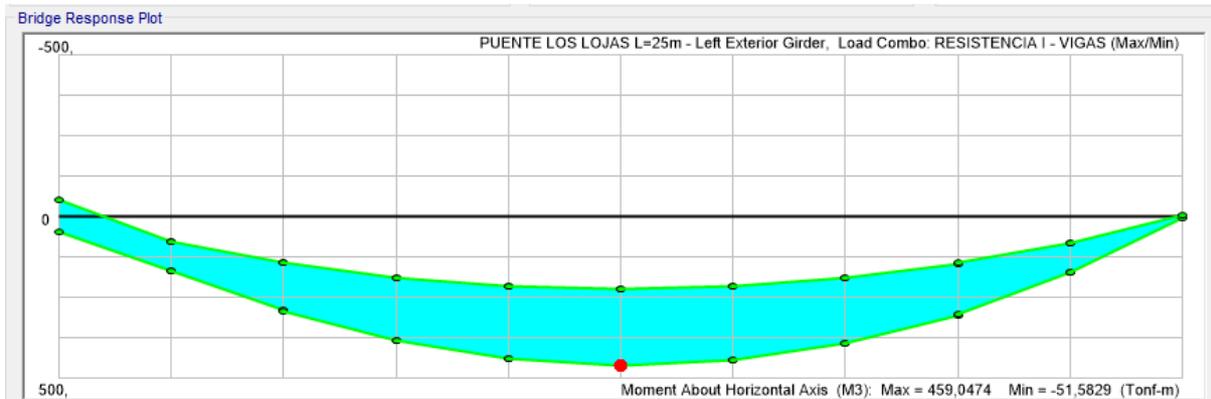


Figura 17. Diagrama de momento flector en viga exterior para combinación de RESISTENCIA I.

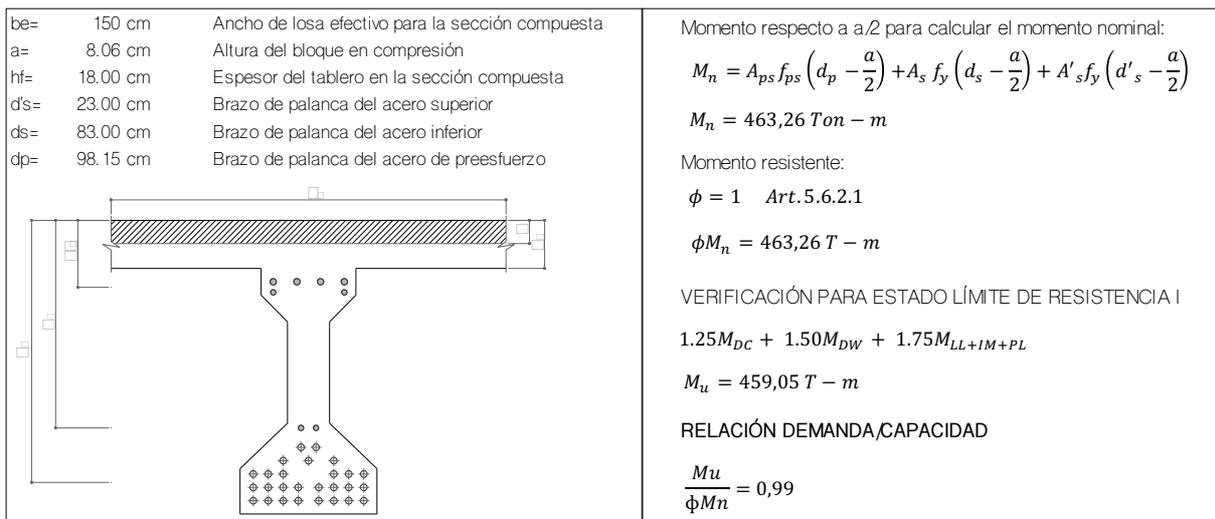


Figura 18. Verificación de la resistencia a flexión y relación Demanda/Capacidad del elemento.

### 3.4. Verificación de la capacidad a cortante

En la Figura 19 se muestra el diagrama de fuerza cortante para la combinación predominante.

El diseño a cortante se lo verificó conforme a lo establecido y se comprobó una adecuada separación de estribos y su diámetro, obteniéndose una relación demanda/capacidad de 0.86 (ver figura 20).



Figura 19. Diagrama de fuerza cortante en viga exterior para combinación de RESISTENCIA I.

<p> <math>b_v = 16.00 \text{ cm}</math> Ancho del alma de la viga presforzada  <math>d_v = 94.12 \text{ cm}</math> Profundidad efectiva de corte  <math>f'_c = 450.00 \text{ kg/cm}^2</math> Espesor del tablero en la sección compuesta  <math>V_c = 40.63 \text{ Ton}</math> Resistencia al corte proporcionada por el concreto  <math>V_s = 56.01 \text{ Ton}</math> Resistencia al corte proporcionada por el acero  <math>V_p = 0.00 \text{ Ton}</math> Resistencia al corte proporcionada por los torones                 </p>		<p>                     La resistencia nominal a corte:  <math>V_n = \min(V_c + V_s + V_p ; 0,25f'_c b_v d_v + V_p)</math>  <math>V_n = \min(96,63 \text{ Ton}; 169,41 \text{ Ton})</math>  <math>V_n = 96,63 \text{ Ton}</math> </p> <p>                     La resistencia de diseño a corte:  <math>\phi = 0,9</math>  <math>\phi V_n = 86,97 \text{ Ton}</math> </p> <p>                     VERIFICACIÓN PARA ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA I  <math>1.25 DC + 1.50 DW + 1.75 (LL + IM + PL)</math>  <math>V_u = 74,94 T - m</math> </p> <p>                     RELACIÓN DEMANDA,CAPACIDAD  <math>\frac{V_u}{\phi V_n} = 0,86</math> </p>
--	--	--

Figura 20. Verificación de la resistencia a corte y relación Demanda/Capacidad del elemento.

### 3.5. Verificación de la deflexión máxima

Así mismo, se revisó la deflexión máxima por carga viva vehicular permitida para el elemento y se comprobó que está dentro del límite establecido.

Las deflexiones fueron calculadas de acuerdo con AASHTO LRFD, Art. 2.5.2.6.2, considerando el máximo efecto entre (caso 1: Camión ó caso 2: 0,25 Camión + Carril). Se presentan la deformada de la viga en la figura 21.

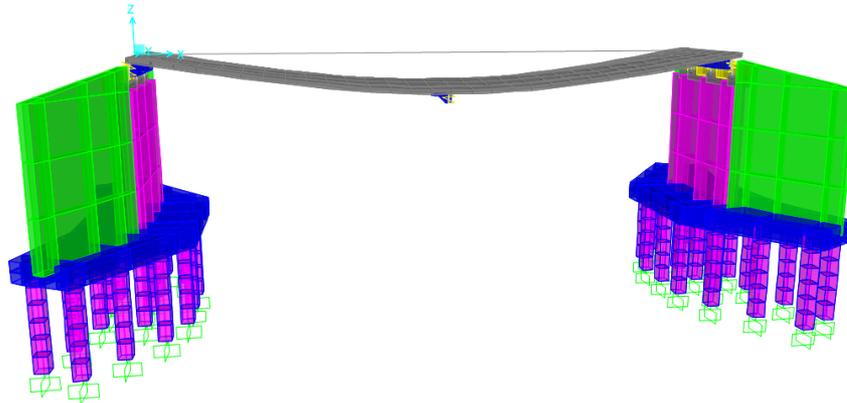


Figura 21. Deformación máxima por carga viva vehicular.

L=	25000 mm
$\Delta_{max} = \frac{L}{800}$	
$\Delta_{Max} =$	31,25 mm
$\Delta =$	27,64 mm
$\Delta < \Delta_{max}$	CUMPLE

Figura 21. Verificación de la deflexión máxima del elemento.

### 3 Discusión

Los resultados obtenidos en la evaluación estructural del Punte Los Lojas proporcionan información crucial sobre el comportamiento de las vigas de hormigón pretensado bajo diferentes condiciones de carga. El uso del software CSI Bridge fue fundamental para el desarrollo del modelo matemático tridimensional del puente y la simulación de su comportamiento estructural.

Específicamente, se observó que las pérdidas de pretensado, que alcanzaron un 18.73%, se encuentran dentro de los rangos aceptables según la literatura existente, la cual establece un valor de hasta 20% para el diseño de estos elementos. Este resultado es consistente con estudios previos que indican una disminución progresiva de la fuerza de pretensado debido a factores como la fluencia y contracción del hormigón, así como la relajación del acero. La variación desde una fuerza de tensado original de 375.30 Ton a una fuerza efectiva de 307.81 Ton refleja la naturaleza del proceso de pretensado y subraya la importancia de considerar estas pérdidas en el diseño y evaluación de puentes pretensados.

Los esfuerzos verificados en la etapa de transferencia y servicio también mostraron conformidad con los límites establecidos por las normativa AASHTO LRFD. En la etapa de transferencia, los esfuerzos actuantes en la fibra superior y la fibra inferior de la viga fueron de  $-40.70 \text{ kg/cm}^2$  y  $-181.06 \text{ kg/cm}^2$ , respectivamente, ambos por debajo de los límites permitidos. Este resultado confirma que las vigas pretensadas están adecuadamente diseñadas para soportar las tensiones iniciales inducidas durante la transferencia del pretensado.

Durante la etapa de servicio, los esfuerzos en la sección compuesta se mantuvieron dentro de los límites permitidos, con valores de  $-175.94 \text{ kg/cm}^2$  en la fibra superior y  $15.30 \text{ kg/cm}^2$  en la fibra inferior. Estos hallazgos son cruciales, ya que garantizan que la estructura puede resistir las cargas de servicio previstas sin comprometer su integridad estructural.

Además, el diseño a flexión de las vigas mostró una relación demanda/capacidad de 0.99, indicando una optimización adecuada del material y del proceso de pretensado para resistir las cargas aplicadas. En cuanto al diseño a cortante, la apropiada disposición y separación de los estribos se verificó conforme a las especificaciones de AASHTO LRFD, asegurando que la estructura puede resistir adecuadamente las fuerzas cortantes inducidas, con una relación demanda/capacidad de 0.86. La deflexión máxima observada también se mantuvo dentro de los límites permitidos, garantizando la funcionalidad y seguridad del puente bajo condiciones de carga normal.

#### 4 Conclusión

La pérdida total de pretensado en las vigas del Puente Los Lojas es del 18.73%, lo que subraya la importancia de realizar cálculos específicos en lugar de depender de estimaciones genéricas. Los resultados indican que las pérdidas de pretensado se mantienen dentro del rango considerado generalmente para el diseño de estos elementos presforzados.

Los esfuerzos en las fibras extremas están dentro de los límites permisibles según AASHTO LRFD, confirmando la adecuación del diseño de las vigas pretensadas para las condiciones de carga previstas, tanto en etapa de transferencia como de servicio.

La sección compuesta de las vigas con la losa del tablero proporciona una resistencia a flexión adecuada, permitiendo una respuesta eficiente a las cargas aplicadas y garantizando la estabilidad estructural en servicio mediante una relación demanda/capacidad cercana a 1. Por otro lado, la adecuada disposición de los estribos en el diseño a cortante confirma la optimización del proceso de pretensado y la distribución de refuerzos.

La deflexión máxima se mantuvo dentro de los límites permisibles establecidos por las normativas de diseño, tales como AASHTO LRFD. Esto indica que el diseño y la construcción del puente son adecuados para minimizar las deformaciones bajo las cargas de servicio.

Estos hallazgos no solo garantizan la seguridad y durabilidad del Puente Los Lojas, sino que también aportan valiosa información para futuros proyectos de infraestructura que utilicen elementos pretensados. La aplicación de CSi Bridge como herramienta de modelado y análisis estructural se ha demostrado altamente efectiva, facilitando el desarrollo de modelos precisos y la simulación de respuestas estructurales bajo diferentes escenarios de carga.

En resumen, este estudio contribuye al conocimiento en el campo de la ingeniería de puentes, proporcionando un caso de referencia sobre la evaluación y diseño de vigas de hormigón pretensado. Los resultados obtenidos pueden ser aplicables a otros proyectos de infraestructura, promoviendo prácticas de diseño y mantenimiento que garanticen la seguridad y eficiencia en la construcción de puentes a nivel global.

**Contribución de autores:** Todos los autores han contribuido sustancialmente al trabajo.

**Financiamiento:** Los autores financiaron a integridad el estudio.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias

1. Mejia, J. Evaluación Estructural Del Puente Lacramarca Ubicado En La Norte. Propuesta de Mejora, Chimbote – Áncash – 2018, 2018.
2. Nawy, E. *Prestressed Concrete*; Fifth.; 2009; ISBN ISBN-13: 978-0-13-608150-0.
3. Meza, L. ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL CONCRETO PRESFORZADO, 2017.
4. Garcia, A. PÉRDIDAS DIFERIDAS DE PRETENSADO EN COMPUESTAS, 2019.
5. Aalami, B. *Prestressing Losses and Elongation Calculations* 2004.
6. American Association of State Highway and Transportation Officials. *LRFD Bridge Design Specifications*; 2020; ISBN 9781560517382.
7. Nilson, A.H.; Darwin, David. *Design of Concrete Structures*; McGraw-Hill, 2001; ISBN 007046586X.
8. Barker, R.M. (Richard M.); Puckett, J.Alan. *Design of Highway Bridges: An LRFD Approach*, 2013; ISBN 9780470900666.
9. Chen, W.-F.; Duan, L. *SUPER STRUCTURE DESIGN Bridge Engineering Handbook*; 2014; ISBN 9781439852217.
10. Benavides, J.; Díaz, J. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PUENTE SOBRE EL RÍO MEDIANTE EL ANÁLISIS TEÓRICO DE CAPACIDAD DE CARGA PLANTEADO POR THE MANUAL FOR BRIDGE (AASHTO)., 2020.
11. Mañueco, I. Evaluación de 4 Puentes Vehiculares Tipo Viga Sobre El Rio Rímac Utilizando El Manual de Inspección Del MTC y Software Csibridge, Lima, 2018., 2018.
12. Jiménez, R.; Carreño, J. ANÁLISIS Y DISEÑO SISMORRESISTENTE DE UNA PILA TIPO PÓRTICO TRANSVERSAL CON PILOTES HINCADOS MEDIANTE CSI BRIDGE PARA EL PUENTE BYPASS 3, PROVINCIA DEL GUAYAS, 2023.
13. Nilson, A. *CONCRETO PRESFORZADO*; 1997; ISBN 9681813049.



© 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>