

# **Análisis de capacidad de carga del puente de acceso de la Planta Hidroeléctrica del ICE en Cachí**



# Resumen

El presente proyecto consiste en la evaluación de la capacidad del puente de acceso de la Planta Hidroeléctrica del I.C.E., en Cachí de Cartago. Se requiere asegurar el transporte de un transformador de 50 ton, el cual es parte del equipo que se debe llevar a la subestación elevadora de la planta Hidroeléctrica Cachí. Dicho problema surge por la necesidad del Instituto Costarricense de Electricidad de modernizar la Planta mencionada con el reemplazo de varios equipos de generación y transformación.

Para llegar al sitio es indispensable pasar por un puente construido hace 40 años, construido con concreto postensado. Este está formado de dos tramos de vigas simplemente apoyadas, uno de 13.03 m y otro de 17.86 m de longitud. Las vigas portadoras están reforzadas con acero postensado y barras acero estructural pasivo. Además es importante mencionar que fue diseñado por Productos de Concreto S.A. y construido por el ICE.

Como punto de partida se procedió a la elaboración de los objetivos por cumplir, para así tener un desarrollo ordenado y lógico.

Como objetivo general se propuso determinar si el puente de acceso de la Planta Hidroeléctrica del ICE en Cachí resistirá una carga de 60 ton.

# Abstract

The following work consists in the evaluation of the capacity and performance of an existing bridge. It is required to support the transportation of a 50 ton high tension transformer, which is part of the equipment to be taken to the Cachi's Hydraulic Plant Slave Station Raiser. The above problem rises because of the need of the ICE to bring up to date such Plant with the replacement of the generation and transformation equipment.

In order to arrive at this location it is necessary to cross a 40 year old bridge built with post tensed concrete. It has two beam spans simply supported, one of them is 13.03m and the other one is 17.86m long. The carrying beams are reinforced with post tensed steel and structural steel passive bars. It is important to say that these structures were designed by Productos de Concreto and ICE.

As the starting point we proceeded to write the goals to be accomplished so that we can have a logical and neat work. The following are such goals:

- Gathering information.
- Site visits.
- Previous information about any problems, if necessary.
- Slab's flexion analysis.
- Slab's shear analysis.
- Beam's normal strength analysis.

Algunos procedimientos realizados son:

- Recopilación de información.
- Visita al sitio en mención. .
- Análisis de la losa por flexión y por cortante
- Análisis de las vigas por esfuerzos normales, flexión y cortante.

Para iniciar el análisis fue necesario ordenar por pasos la estrategia a seguir. Primero se realizó una investigación sobre las condiciones actuales, se realizó una visita al sitio, se revisaron los planos y se buscó bibliografía sobre el tema como los códigos de diseño internacionales , especialmente el AASHTO, ya que con este código se elaboró el diseño de dicho puente, y libros relacionados con concreto presforzado y postensado.

Fue preciso investigar sobre los posibles tipos de transporte ( tractor y plataforma ) que se utilizarán y así crear un modelo crítico para conocer el comportamiento de la superestructura ( vigas y losa ) bajo las condiciones menos favorables. Una vez concluida esta fase se tomaron como componentes del modelo un camión de 7 ton, una plataforma de 3 ton ( 10 m de longitud ) y, además, el transformador de 50 ton que el ICE requiere llevar al proyecto, sumando un total de 60 ton por transportar. Después fue necesario utilizar estos componentes para crear el modelo crítico tanto en condición de cortante como para la flexión.

Luego se procedió a realizar el análisis teórico utilizando como base lo expuesto en la literatura de diseño de concreto presforzado En esta sección se obtuvieron los momentos y cortantes nominales para saber la capacidad del puente y poder compararla con los datos anteriores y dar la conclusión correspondiente.

- Beam's flexion analysis.
- Beam's flexion analysis.

In order to begin the analysis, it was necessary to put in order by steps the strategy to follow. First of all we made an investigation about the actual conditions. We visited the site, we checked out the drawings y searched for the bibliography about the international designed code subject, specially AASHTO, since this bridge was made under this code, and related books about pre-stress and post-tensed concrete.

It was necessary to search about several types of transportation (such as tractor and platform) to be used and thus create a critical model to get to know the performance of the superstructure (beams and slabs) under the least favorable conditions. Once it is finished this stage, we took as the components of the model a 7 ton truck (10m long) plus the 50 ton high tension transformer, that the ICE requires to move to the site, with a total of 60 ton to be transported.

Afterwards it was necessary to use these components to create the critical model under shear conditions so as the flexion. Then we proceeded to make a theoretical analysis by using as a basis the already said in the pre-stress concrete design literature. In this section we got the momentum and nominal shears to know the bridge capacity and be able to compare it with the previous data and give the respective conclusion.

From the revealed data into the analysis by flexion, we realized that there is an acting maximum momentum of 2.1ton-m, and it has a supporting capacity of 3.19ton-m, it is important to mention that this slab is not pre-stress; it is a reinforced concrete slab. Besides we got in the same analysis (by flexion), for each

De los datos revelados en el análisis por flexión se obtuvo que en la losa actúa un momento máximo de 2.1 t-m , y tiene una capacidad de soporte de 3.19 t-m. Es importante mencionar que la losa no es presforzada, es de concreto reforzado. También se obtuvo en el mismo tipo de análisis ( por flexión ), para cada viga portadora, que el momento máximo que actúa es de 112.73 t-m, y tiene una capacidad de carga de 129.43 t-m.

En el caso del análisis por cortante en la losa se obtuvo una fuerza cortante máxima actuante de 7.58 ton y un cortante máximo que puede soportar la losa de 7.9 ton. Al analizar la viga por cortante se puede ver que el cortante actuante es de 22.6 ton, y la viga tiene una capacidad nominal de 23.6 ton.

Como los resultados revelaron que la superestructura soporta las solicitaciones impuestas no será necesario realizar algún tipo de refuerzo. Es importante mencionar que la subestructura fue revisada en forma previa a este análisis por parte del ICE. De dicho estudio se concluyó que la capacidad de carga de la subestructura es sobrada. Además, el ICE estudió los apoyos de neopreno y llegó a la misma conclusión.

También es relevante mencionar que el transporte del transformador se realizó el día viernes 2 de abril del 2004 y el puente resistió adecuadamente. Para dicho transporte se utilizó un equipo más liviano que el usado para el análisis en este proyecto de revisión de capacidad. Se utilizó una carreta de aproximadamente 10 m de longitud, con un peso aproximado de 6 ton y, en la parte trasera de la carreta, solo dos ejes en tándem. No obstante el peso menor, el hecho de que la carreta tuviera dos

supporting beam, the maximum momentum acting is 112.73 ton-m, and has a supporting capacity of 129.43 ton-m. In the shear analysis case of the slab we got a maximum acting shearing strength of 7.58 ton and a maximum shear that can bear the slab of 7.9 ton. When analyzing the beam by shear it can be seen that the acting shearing strength is 22.6 ton, and the beam has a nominal capacity of 23.6 ton.

Because the results revealed that the superstructure supports all of the acting loads, it is not necessary to add any type of reinforcement. It is important to mention that the substructure was checked prior to this analysis by the ICE. From this study we concluded that the supporting capacity of the substructure is way beyond what it is needed. Besides, the ICE studied the neoprene bearing supports reaching to the same conclusion.

It is important to mention that the transportation of the transformer was made on Friday 2<sup>nd</sup>, 2004 and the bridge resisted it properly. For the saying transportation it was used lighter equipment than the one used for the analysis in this work of checking capacity. It was used a trailer of 10 m long, weighing aprox. 6 ton and, having in the rear just two tandem axes. However, the lowest weight, the fact that the trailer had two axes instead of three, concentrates more the loads and can cause problems. For the actual study we do not use trailers of that type because overpass the single axe weight allowed by the MOPT to be moving on the national roads

We have to point out that if it is necessary for the ICE to move to this

ejes en lugar de tres concentra más las cargas y puede causar problemas.

Para el presente estudio no se usaron carretas de este tipo porque superan el peso por eje permitido por el MOPT para la circulación en las carreteras nacionales.

Hay que resaltar que si al ICE le fuera necesario trasladar hasta esta Planta equipos más pesados, se debe hacer el estudio preliminar respectivo. Esto pues, aunque los datos teóricos de capacidad estaban en general distanciados de las solicitudes, el rango de seguridad para cortante en la losa es pequeño.

Además hay que tener presente que por ser equipos pesados no se puede utilizar cualquier tipo de carreta para así evitar contratiempos y accidentes.

Palabras claves: puente, concreto presforzado, concreto postensado, capacidad de carga

plant heavier equipment, they should do the previous respective study So this, although the theoretical data of capacity was far away from the acting loads, the range of safety for the slab's shearing strength is small.

Besides we have to keep in mind that being heavy equipments it can not be used any type of trailer to avoid any delay and accidents.

Key words: bridge, supporting capacity, post tensed concrete.

# **Análisis de capacidad de carga del puente de acceso de la Planta Hidroeléctrica del ICE en Cachí**

ANDREA GUILLÉN MOYA



Julio del 2004

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

PREFACIO .....	1
RESUMEN EJECUTIVO .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
METODOLOGÍA .....	4
RESULTADOS .....	6
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	11
CONCLUSIONES .....	12
APÉNDICES .....	13
ANEXOS .....	14
REFERENCIAS.....	15

# Prefacio

Este trabajo es el desarrollo de un tema, el cual propuesto por el Ing. Adrián Chaverri, funcionario del ICE (Instituto Costarricense de Electricidad) y docente de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, para el curso Proyecto de Graduación del Programa de Licenciatura

El desarrollo del estudio está dividido en dos etapas, la investigación y el análisis de un puente ya existente, cuya edad es de 40 años y que está construido en concreto postensado.

Dicho proyecto está basado en la necesidad que tuvo el ICE de cambiar el equipo de la planta hidroeléctrica ubicada en Cachí. Parte del equipo a transportar es un transformador de gran tamaño, cuyo peso es de 50 ton y el peso del transporte alrededor de las 10, por lo que existía la posibilidad de que dicho puente no soportara las 60 ton.

El proyecto se basa en el análisis de capacidad de la capacidad de carga del puente aplicando la teoría del concreto presforzado.

Las características del puente son:

- ❑ Puente diseñado por Productos de Concreto.
- ❑ Construido en 1964
- ❑ Dos tramos simplemente apoyados con una pila central.
- ❑ Tramos de 13,0 m, el primero y de 17,8 m, el segundo.
- ❑ Cada tramo consta de cuatro vigas de concreto postensado.
- ❑ Ancho de superestructura: 4,5 m (un solo carril)

Los datos obtenidos por el análisis fueron de base para la decisión de pasar o no la carga.

El estudio contempló el análisis de la super estructura, pues si ella soportaba la subestructura también lo hacia.

La elaboración del trabajo se basó básicamente en consultas bibliográficas referentes al análisis y el diseño del concreto presforzado, también se acudió a profesionales concedores de este tipo de estructuras.

La importancia que tiene la solución de este problema es la siguiente:

Este problema surge al tener el ICE la necesidad de modernizar los equipos con los que la planta funciona, por lo que es necesario evaluar la situación actual del puente, y de ser necesario reforzarlo para que los equipos puedan ser trasladados hasta el interior de la planta.

Al contener el puente elementos postensados se tiene la oportunidad de aprender el diseño y revisión de elementos postensados. Este tema que no esta incluido en los contenidos de los cursos de estructuras de la Carrera de Ingeniería en Construcción, por lo que es importante instruirse en lo que se refiera al mismo. Además es importante documentar las soluciones y conclusiones finales, para que así los estudiantes de la carrera puedan tener fuentes bibliográficas sobre el tema.

Para la realización del proyecto se planteó el siguiente objetivo:

Determinar si el puente de acceso de la Planta Hidroeléctrica del ICE en Cachí resistirá una carga de 60 ton y en caso de que no sea así, diseñar el reforzamiento correspondiente.

La autora agradece al Ing. Adrián Chaverri por la guía y facilitación de material bibliográfico, además su confianza y su experiencia facilitó la investigación y solución del problema planteado.

Ing. Andrea Guillén Moya



# Resumen ejecutivo

Este es un trabajo que se inició como parte del desarrollo del curso Proyecto de Graduación que corresponde al nivel de Licenciatura de la Escuela de Ingeniería en Construcción del ITCR.

Su contenido y desarrollo se basa en la revisión por capacidad de carga de un puente de paso ubicado en Cachí de Cartago y fue construido en por Puente Prefa a solicitud del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

El análisis nace por la necesidad del ICE de actualizar y cambiar la maquinaria con la que opera en el Proyecto Hidroeléctrico de Cachí.

El puente fue construido en 1964 con el sistema postensado, por lo que despierta dudas sobre su capacidad de carga.

La forma de enfrentar el problema se inició con la recopilación de información y la consulta a profesionales del campo involucrado.

El trabajo de análisis se basó en la teoría de tensión y flexión expuesta en el libro Concreto Presforzado de Nielsen.

Dado que el puente fue diseñado bajo los criterios y normas de la AASHTO, fue necesario revisar nuevamente en lo que se refiere a superestructura (losa y vigas)

Puesto que para el transporte de los elementos se hace uso de maquinaria especializada se procedió a investigar sobre diferentes tipos de cabezales y carretas para crear un modelo lo mas real posible para el análisis. Las fuentes consultadas sobre camión y plataforma fueron transportistas y algunos manuales del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT)

Luego de obtener las bases teóricas y construir los modelos necesarios se inicia la etapa de análisis . Esta de divide en varias secciones:

- Análisis de la losa por flexión.
- Análisis de la losa por cortante
- Análisis de las vigas por esfuerzos normales
- Análisis de las vigas por flexión
- Análisis de las vigas por cortante

Una vez terminado este proceso de análisis se procedió a exponer las conclusiones del estudio.

Cabe mencionar que egresados de la carrera así como estudiantes topan con la falta de fuentes bibliográficas y practicas sobre el tema de concreto presforzado, por lo que este trabajo será de gran ayuda para su consulta.

Una vez finalizado el proyecto se obtuvieron valores muy acertados y acordes a la realidad.

En lo que se refiere al análisis por flexión se obtuvo que en la losa producido por el paso del camión es de 1.44 ton m , y tiene una capacidad de soporte de 7.17 ton m.

Los datos obtenido en el mismo tipo de análisis pero en la viga el momento máximo que actúa es de 88.3 ton m, y tiene una capacidad de carga de 112.73 ton m

En al caso del análisis por cortante en la losa se obtuvo un cortante máximo producido por las sollicitaciones es de 5.23 ton y un cortante máximo que pude soportar la misma de 7.9 ton.

Al analizar la viga por cortante se puede ver que el cortante actuante es de 24.9 ton, y la viga tiene una capacidad nominal de 27.8 ton.

El transporte del transformador se realizo el día viernes 2 de abril del 2004.

# Introducción

El presente trabajo de Análisis de capacidad de carga de un puente nace de la decisión del ICE para modernizar la Planta Hidroeléctrica Cachí ( inaugurada en 1964 ) que implica el reemplazo de muchos equipos existentes.

Es importante mencionar que para acceder a este plantel hidroeléctrico es necesario atravesar un puente de concreto postensado, el cual tienen aproximadamente 40 años de edad.

Este estudio será para estimar la capacidad de dicho puente para una nueva condición de carga, pues es necesario trasladar por el mismo elementos más pesados que los del diseño original. En particular, interesa el transporte seguro de dos transformadores de 50 ton cada uno.

La naturaleza del problema corresponde al campo de la ingeniería estructural.

Para la ejecución del análisis se planteó una serie de objetivos.

El objetivo general fue determinar si el puente de acceso de la Planta Hidroeléctrica del ICE en Cachí resistirá una carga de 50 ton del transformador más el peso del vehículo de transporte y, en caso de que no sea así, diseñar el reforzamiento correspondiente

Los objetivos específicos son:

- Investigar y aprender el procedimiento de análisis de capacidad de carga para elementos estructurales postensados.
  
- Verificar si el puente en cuestión resiste la carga de 60 T siguiendo el procedimiento de análisis para elementos estructurales postensados.

- Diseñar el reforzamiento correspondiente en caso de que el puente no resista la carga de 60 ton

Para cumplir dichos objetivos se recurrirá a consultar las normas de la AASTHO (Secciones 3 y 8), algunos manuales de maquinaria del MOPT y literatura técnica como el libro de concreto presforzado de Nilsen (Capítulos del 1 al 7).

Además se hará consulta a profesionales y personas que laboran en las áreas involucradas, llámese ingeniería estructural o maquinaria pesada utilizada para el transporte.

# Metodología

## Fase de investigación

Dado el tipo de proyecto primero se procedió a investigar sobre las condiciones actuales del puente, su ubicación, su edad, material del cual esta hecho, en este caso es concreto postensado, además de revisión de planos de diseño, así como visitar el sitio para un análisis visual tanto del puente como de los alrededores. Esta información fue facilitada por el Ing. Adrián Chaverri, ingeniero del ICE de la sección de Diseños.

Una vez concluida esta etapa se procedió a indagar en libros relacionados con el análisis y el diseño en concreto presforzado, así como consulta de las normas internacionales, en este caso el código AASHTO, pues con esta norma fue diseñado originalmente el puente.

## Creación del modelo para el diseño

Al concluir esta etapa el paso a seguir fue el de investigar algunos datos sobre pesos y medidas de cabezales de trailer, así como de

diversos pesos y tamaños de carretas. Con esta información se pretende lograr el criterio suficiente para elaborar un modelo más cercano a la realidad en el cual ubicar las diversas cargas a las cuales estaría sometido el puente. La información fue facilitada por el transportista Gerardo Moya, el cual tiene gran de experiencia en el transporte de carga convencionales y pesadas.

Cuando se contó con esta información se procedió a crear un modelo de ubicación de cargas para la losa y otro para las vigas

procurando determinar la ubicación más desfavorable de las cargas.

Este modelo esta compuesto por un cabezal y una carreta de 10 m sumando ambas partes un total de 10 ton.

## Revisión de la losa

El siguiente paso fue analizar la losa. Por sus dimensiones se trata de una losa en una dirección. Entonces se puede revisar como una viga de concreto reforzada, continua, de ancho unitario y simplemente apoyada en las vigas portadoras, Con este procedimiento se logró obtener la capacidad última de la losa. Para facilitar el proceso de búsqueda de la posición más crítica se usó el programa de análisis SAP2000 en su versión estudiantil. Con esta herramienta se logró obtener las acciones que actuarían realmente sobre la losa en el momento de que pasara el trailer con el transformador. Al finalizar se procedió a comparar ambos datos para llegar a la conclusión respectiva.

La revisión de la losa se hizo por cortante y por flexión.

## Revisión de las vigas

Al concluir la revisión de la losa se siguió con el análisis de las vigas portadoras; primero se ubicaron las cargas y buscó la posición del vehículo que produce mayor sollicitación, o sea, la más crítica. Se procedió al análisis tanto por flexión y por cortante.

Al iniciar este estudio fue necesario hacer uso de dos modelos diferentes, uno en la situación más crítica en cortante y el otro, también en condición crítica pero para flexión. El análisis se basó en los procedimientos normales encontrados en la literatura consultada.

Para efectuar el cálculo de los esfuerzos se transformó el área de acero convencional

(Grado 40) en su área equivalente en con acero de  $f_y = 15\ 000\ \text{kg/cm}^2$ .

Una vez desarrollados estos modelos se procedió a hacer una revisión de los esfuerzos en las fibras extremas, otra revisión del cortante y otra de la capacidad en flexión. Finalmente se procedió a emitir las conclusiones del caso.

# Resultados

## Creación del modelo para el diseño

Una vez concluida la fase de investigación se procedió a crear un modelo lo más real posible, para lo cual se tomó en cuenta una carreta de 30 pies junto con cabezal estándar, cuya suma de los pesos fuera aproximadamente 10 toneladas.

Acto seguido se crearon dos modelos, uno especial para el análisis por cortante y otro para el análisis por flexión. En ambos modelos se procedió a distribuir las cargas tanto de la maquinaria de transporte como el peso del transformador de 50 toneladas

. También se hizo el cálculo de las reacciones correspondientes y los respectivos diagramas de cortante y momento flector.

Es de importancia acotar que para la escogencia del eje de la carreta más apto para crear un modelo crítico se utilizó la siguiente tabla deducida de la información de diversos manuales del MOPT.

<b>CUADRO # 1 PESOS SOPORTADOS POR DISTINTOS TIPOS DE EJES</b>	
Eje simple	8 000 kg
Eje doble	14 500 kg
Eje triple	21 000

Los modelos se muestran en la Memoria de cálculo ).

## Revisión de la losa

Para iniciar el análisis de la losa fue necesario ubicar los ejes del vehículo en forma transversal sobre la carreta del trailer ( ya que esta es la carga crítica ) y proceder a calcular los diagramas de cortante y momento flector en la sección transversal del puente.

El valor de  $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$  esta estipulado en planos, y el de  $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$  también. Sin embargo la losa será revisada con un valor de  $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$  para obtener valores mas conservadores.

En dicho cálculo se usó del software SAP2000 . Los gráficos se muestran en la sección de Apéndices.

La combinación de carga a utilizar se basó en lo normado en el AASHTO, según tabla 3.22.1.A.

Los datos revelados por los gráficos para dos cargas aplicadas de 14.5 ton y la combinación de carga 1.3 ( 1CM + 1.1 CV ) fueron los siguientes:

<b>CUADRO # 2 DATOS IMPORTANTES DEL OBTENIDOS DEL SAP2000</b>		
	Positivo	Negativo
M máx.	5.42 Tm	3.72 Tm
V máx.	19.70 T	19.70 T

## Propiedades de la losa

Las propiedades de la losa son las siguientes:

$$f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$$

$$fy = 2800 \text{ kg/cm}^2$$

Diámetro de la varilla : 1/2 " ( # 4 )

Area de cada varilla : 1.27 cm<sup>2</sup>

$$\beta 1 = 0.85 \text{ pues } f'c < 280 \text{ kg/cm}^2$$

Recubrimiento : 3 cm

As = 14.1cm<sup>2</sup>/m en la zona mayor sollicitación ( centro de tramo, en la parte inferior y, sobre las vigas portadoras, en la parte superior )

A's= 7.1 cm<sup>2</sup>/m en la zona de menor sollicitación.

Por ser una losa en una dirección se procedió a analizarla como una viga de base unitaria, y además se considera como viga simplemente reforzada.

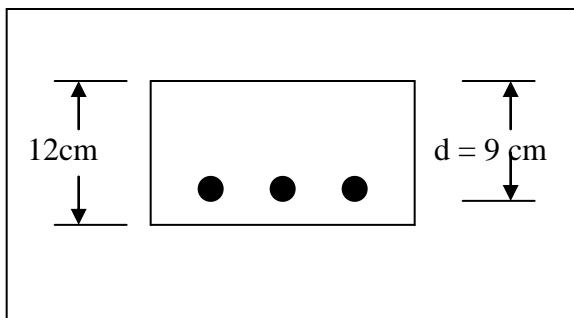


Figura 1 : Detalle de losa

Como parte del proceso de cálculo el valor de la cuantía de refuerzo para la losa ( viga longitud unitaria de base de 100 cm ). El valor de pb es de 0.045 y el valor del ρ de la losa es de 0.0072, por lo que se considera una viga subreforzada al ser ρ ≤ pb .

El valor del momento subreforzado utilizando la formula:

$$Mnb = \rho b d^2 fy \left( 1 - 0.59 \frac{\rho fy}{f'c} \right)$$

$$\phi Mn = 3.19 \text{ Tm}$$

El valor de φ es de 0.90 según normas AASHTO.

El momento máximo obtenido mediante el SAP2000 fue de 5.42 t-m, pero es importante acotar que este se distribuye a través de las tres llantas de los ejes traseros de la carreta según diagrama de la siguiente figura:

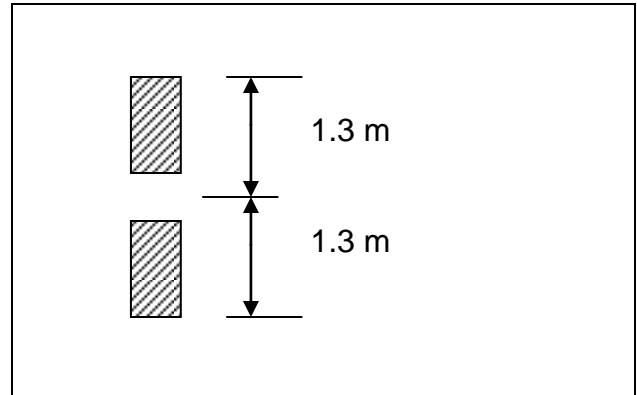


Figura 2: Diagrama de los ejes traseros de la carreta.

Realizando el procedimiento correspondiente de dividir el momento último entre los 2,6m de contacto se obtiene un momento máximo aplicado en la losa de 2.1t-m/m, dando por finalizado el análisis por flexión en la viga.

En cuanto al análisis por cortante se puede mencionar que el máximo valor del cortante aplicado en la losa según el SAP2000 también se procede a distribuir a través de los 2.6 m del área de contacto, teniendo como resultado un cortante máximo de 7.58 T/m.

Este dato debemos de compararlo con el obtenido por la fórmula:

$$\text{Para } M = 3.71 \text{ t-m}$$

$$\phi V = 0.5 \sqrt{250 + 175 \times 0.0072 \times \frac{9.4 \times 0.09}{3.71}}$$

$$\phi V = 7.9 \text{ ton/m}$$

Donde φ vale 0.85 según AASHTO.

## Revisión de las vigas

Para el análisis de las vigas fue necesario realizar cálculos mediante el Microsoft Excel, dichos

cálculos son el centroide de área tanto del acero como del concreto.

## Propiedades de la viga

El puente está formado por dos tramos de viga simplemente apoyados. Ambos tramos están compuestos de concreto con un  $f'c = 500$  psi, acero estructural de grado 40 y torones con una resistencia mínima a la ruptura de 17 000 kg/cm<sup>2</sup> y un punto de fluencia de 15000kg/cm<sup>2</sup> y una deformación permanente de 0.2 %. Además el concreto es de  $f'c=350$ kg/cm<sup>2</sup>

El tramo # 1 es de 17.80 m. Las vigas contienen 4 cables postensados LEOBA, 8 alambres de Ø 8.0 mm.

El tramo # 2 es de 13.03 m y las vigas contienen 4 cables postensados LEOBA, 12 alambres de Ø 5.4 mm

La fuerza inicial es de 0.7 fpu, dando un resultado de 11900 kg/cm<sup>2</sup> o sea 168903 lb/pulg<sup>2</sup> El porcentaje de pérdidas fue consultado directamente con el constructor del puente, el cual las estimo mediante estudios previos un valor del 20% de fpu. Sin embargo cabe mencionar que el AASHTO estipula que para aceros de  $f_y = 15\ 000$  es de 2 400 kg/cm<sup>2</sup>. Además, en la memoria de cálculo se anexa un cálculo aproximado de las pedidas asumiendo ciertos valores que se desconocen.

Además los módulos de sección son  $S1=2\ 554.62$  pulg<sup>3</sup> y  $S2 = 1\ 334$  pulg<sup>3</sup>, el radio de giro tiene un valor de  $r = 11.74$  pulg<sup>2</sup>

## Revisión de los esfuerzos.

Siguiendo el procedimiento descrito en el libro Concreto Presforzado de Nilsen se obtuvieron los diferentes esfuerzos de flexión actuantes en la sección transversal de la viga.

Los esfuerzos se calcularon de la siguiente manera:

### 1. Pi

$$f1 = - \frac{P1}{Ac} \left( 1 - \frac{ec1}{r^2} \right)$$

$$f1 = - 168\ 903 \left( 1 - \frac{2.264 \times 16.24}{137.83} \right)$$

$$f1 = -411.31 \text{ lb/pulg}^2 \equiv -28.98 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f2 = - \frac{P1}{Ac} \left( 1 + \frac{ec2}{r^2} \right)$$

$$f2 = - 168\ 093 \left( 1 + \frac{2.264 \times 19.19}{137.83} \right)$$

$$f2 = -737.9 \text{ lb/pulg}^2 \equiv -52 \text{ Kg/cm}^2$$

### 2. Pi + Mo

$$f1 = - \frac{P1}{Ac} \left( 1 - \frac{ec1}{r^2} \right) - \frac{Mo}{S1} =$$

$$- 168\ 903 \left( 1 - \frac{2.264 \times 16.24}{37.83} \right) - \frac{494.4 \times 11.81}{2\ 554.62}$$

$$f1 = -413.6 \text{ lb/pulg}^2 \equiv -29.15 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f2 = - \frac{P1}{Ac} \left( 1 + \frac{ec2}{r^2} \right) + \frac{Mo}{S2} =$$

$$- 168\ 093 \left( 1 + \frac{2.264 \times 19.19}{137.83} \right) + \frac{494.4 \times 11.81}{1\ 334}$$

$$f2 = 69.4 \text{ lb/pulg}^2 \equiv 4.89 \text{ Kg/cm}^2$$

### 3. Pe + Mo

$$Pe = 0.54 \text{ fpu}$$

$$f1 = - 222.11 \text{ lb/pulg}^2 \equiv 15.65 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f2 = - 398.466 \text{ lb/pulg}^2 \equiv 28.08 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f1 = - 222.11 - 2.2856$$

$$f1 = - 224.4 \text{ lb/pulg}^2 \equiv 15.8 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f2 = - 398.466 - 4.377$$

$$f2 = - 402.8 \text{ lb/pulg}^2 \equiv 28.4 \text{ Kg/cm}^2$$

### 4. Pe + Mo + Md

$$\delta \text{ concreto} = 2\ 400 \text{ kg/m}^3 = 0.086 \text{ lb/pulg}^3$$

$$W \text{ losa} = b \times h \times \delta \text{ concreto}$$

$$W \text{ losa} = 0.12 \times 2.4 \times 1.33 =$$

$$W \text{ losa} = 0.383 \text{ T/m}^2 = 0.5434 \text{ lb/pulg}^2$$

Para una longitud unitaria

$$W \text{ losa} = 0.4086 \text{ lb/pulg}$$

$$W \text{ viga} = b \times h \times \bar{\delta} \text{ concreto}$$

$$W \text{ viga} = 324 \times 1 \times 0.086$$

$$W \text{ viga} = 28.03 \text{ lb/pulg}$$

$$W \text{ total} = W \text{ losa} + W \text{ viga}$$

$$W \text{ total} = 28.57 \text{ lb/pulg}$$

$$M_o = \frac{W l^2}{8}$$

$$M_o = \frac{28.57 (11.85)^2}{8}$$

$$M_o = 4992.370.93 \text{ lb pulg} = 57.64 \text{ Tm}$$

Md

$$f_1 = -\frac{M_d}{S_1} = -\frac{112165.13}{11.81} = -2554.62$$

$$f_1 = 371.74 \text{ lb/pulg}^2 \approx 26 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_2 = -\frac{M_d}{S_2} = \frac{112165.13}{11.81} = 2554.62$$

$$f_2 = 711.9 \text{ lb/pulg}^2 \approx 50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_1 = -459927.7 - 59159.6$$

$$f_1 = -519087.3 \text{ lb/pulg}^2 = 36581.2 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_2 = 389622.746 + 59159.6$$

$$f_2 = 448782.3 \text{ lb/pulg}^2 = 31626.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_1 = -222.11 - 2.2856 - 371.74$$

$$f_1 = -598.42 \text{ lb/pulg}^2 \approx -42.17 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_2 = -398.466 + 4.377 + 711.9$$

$$f_2 = 1114.74 \text{ lb/pulg}^2 \approx 78.56 \text{ Kg/cm}^2$$

## Análisis de la viga por flexión.

El cálculo del momento nominal se hizo como si la viga fuera una viga T, dado que es una estructura compuestas ( viga + losa ), pues la losa no está desligada de las vigas.

Se calcula como una viga T

$$M_n = 0.85 f'_c b_w a \left( d - \frac{a}{2} \right) + 0.85 f'_c ( b - b_w ) \left( d - \frac{h_f}{2} \right)$$

Donde :

$$\begin{aligned} h_f &= 12 \text{ cm} \\ f'_c &= 350 \text{ Kg/cm}^2 \\ b_w &= 40 \text{ cm} \\ d &= 77.14 \text{ cm} \\ b &= 133 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$a = \frac{M_n}{0.85 f'_c b} = \frac{63.96 \times 2800}{0.85 \times 350 \times 133}$$

$$a = 4.526$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$M_n = 0.85 \times 350 \times 133 \times 4.526 \left( 77.14 - \frac{4.526}{2} \right) +$$

$$0.85 \times 350 ( 133 - 40 ) \left( 77.14 - \frac{12}{2} \right)$$

$$\emptyset M_n = 137310.97 + 12805625.7$$

$$\emptyset M_n = 12942936.67 \text{ kg cm}$$

$$\emptyset M_n = 129.43 \text{ t m}$$

El valor de  $\emptyset$  es 0.90 según AASHTO.

Según el AASHTO 3.18.2.3 se debe de cumplir con lo expuesto en la tabla 3.22.1A, además se debe de distribuir el momento resultante según la posición de cada viga, como se está revisando una viga central corresponde multiplicar este valor por 0.62 y por 1.3 según procedimiento expuesto en la tabla 3.23.1.



Aplicando lo anterior se obtiene:

$$Mu = 112.73 \text{ t m}$$

Otro dato importante de mencionar es el valor del momento máximo que la carga equipo más el transformador aplicaran a sobre las vigas. El valor del momento es de 88.3 ton, aplicando ya todo lo dispuesto en el ASSTHO , dicho procedimiento se explica claramente en la memoria de calculo.

El valor de cortante producto de las solicitaciones y ya aplicándole lo dispuesto en la AASHTO es de 24.9 ton.

Análisis de la viga por cortante.

El cortante perpendicular al eje del miembro se calculo con la formula:

$$Vs = \frac{Av fy d}{S}$$

Y se calculo para los diferentes espaciamientos S de los aros en la viga según planos:

Para S = 25 cm

$$Vs = 1\ 673\ 375.616 \text{ lb} = 19.32 \text{ T}$$

Para S = 35 cm

$$Vs = 1195263.12 \text{ lb} = 13.8 \text{ T}$$

Para S = 45 cm

$$Vs = 929653.12 \text{ lb} = 10.7 \text{ T}$$

El cortante nominal fue calculado con la expresión:

$$\phi Vn = \frac{Av fy d}{S} + Vc$$

Además aplicando lo dispuesto por la AASHTO:

$$\phi Vn = = 23.6 \text{ ton}$$

Donde  $\phi$  es 0.85 según

El valor del cortante ultimo se calculo mediante la combinación de carga mencionada al principio y su resultado se muestra en el grafico de cortante, cuyo valor es de: 22.6 ton.

# Análisis de los resultados

Al finalizar el desarrollo del proyecto se obtuvieron resultados positivos, los cuales se exponen seguidamente:

Para la mayoración de las cargas no se tomo en cuenta el sismo, ya que la probabilidad de que ocurra un evento de estos es muy baja, además de que por la edad del puente ya ha soportado varios eventos de gran fuerza.

En lo que se refiere a la losa, se obtuvo en el análisis por flexión un momento máximo aplicado de 2.1 t-m, el cual se comparó con el  $\emptyset M_n$  que es capaz de soportar por sus propiedades y tiene un valor de 3.19 ton m. Lo anterior indica que la losa es capaz de soportar el paso del vehículo con el transformador.

De igual manera se procedió con el análisis por cortante, el valor crítico de cortante aplicado por la carga a soportar es de 7.58 ton y el que es capaz de soportar la losa por su capacidad es de 7.9 ton dicho resultados lo que revelan es que la losa no sufre daños representativos por cortante al pasar la carga total de 60 ton.

Para lo referido a vigas se obtuvo en el análisis por flexión la viga no tiene problemas por capacidad de carga, ya que al comparar el momento último es de 112.73 t-m con el momento que es capaz de soportar es de 129.4t-m. Dado esto se puede afirmar que las vigas soportan el paso de la carga de 60 T.

Al referirnos al análisis por cortante en las vigas se puede decir que también se resultados positivos, pues el cortante máximo aplicado fue de 23.6, el cual compara con el  $\emptyset V_n$  de 27.8 T .

Es importante resaltar el hecho de que los valores por cortante no tienen una holgura significativa, por lo que la estructura puede tener daños al transitar la carga.

Aunque se presenta esta situación se puede justificar el darle el visto bueno a la losa, pues los diafragmas se revisaron en forma previa a este estudio y el resultado fue positivo, y además se le puede sumar el hecho de que la

losa se reviso con un f'c menor que el estipulado es planos.

En general, también los resultados se respaldan con el hecho de que la revisión de esfuerzos fue positiva. Además, la prioridad para el ICE era conocer si la estructura soportaba, pues el fabricante del transformador tenia premura de entregarlo.

Por lo anterior, se tenia contemplada la posibilidad de reparar o del todo volver a construir dicho puente.

Para el futuro transporte de otros equipos de igual o mayor peso es conveniente no solo hacer el estudio previo para compararlo con los datos obtenidos en este análisis, también es conveniente asegurarse el quipo a usar es el idóneo, para así evitar imprevistos y accidentes.

Hay que resaltar que si al ICE le fuera necesario trasladar equipos mas pesados, se haga el estudio preliminar respectivo, pues aunque los datos teóricos estaban en general distanciado en menor valor de los teóricos, el margen de seguridad de cortante en la losa está ajustado.

# Conclusiones

Mediante el análisis de la posible maquinaria pesada que se pudiera utilizar para transportar el transformador de 50 toneladas, se crearon dos diferentes modelos uno para el análisis por cortante y otro para el análisis por flexión.

Para su realización se hizo la ubicación del transformador en la posición mas idónea en la carreta para así tener una carga crítica en los tres ejes traseros de la carreta de 29 toneladas, una carga de 24 toneladas en el doble eje trasero del trailer y una carga de 7 toneladas en el eje sencillo del cabezal.

Esta información se introdujo en el SAP200 y se analizó la losa en el sentido transversal del puente obteniendo un valor de momento máximo de 5.42 T m, y un valor de cortante máximo aplicado de 19.7 T.

Los valores anteriores hubo que distribuirlos sobre el área de contacto formada por las llantas que conforman los ejes traseros de la carreta, por lo que fue necesario dividirlos entre 2.6m obteniendo un valor máximo de momento de 2.1 Tm/m y un cortante de 7.58 T/m

Haciendo es estudio analítico se obtuvo un  $\phi M_n$  de 3.19 T m, y una capacidad al cortante de 7.9 T.

En cuanto al análisis de las vigas se siguió el procedimiento planteado en el libro Concreto Presforzado de Nilsen.

Primeramente se realizo una revisión de esfuerzos por flexión producidos por las cargas impuestas en la viga.

De dicho estudio se conoció los siguientes resultados:

Primero se procedió a calcular los esfuerzos producidos por la carga pretensora, obteniendo los siguientes resultados:

Pi

$$f1 = -28.98 \text{ kg/cm}^2$$

$$f2 = -52 \text{ kg/cm}^2$$

Pi + Mo

$$f1 = -27.15 \text{ kg/cm}^2$$

$$f2 = 4.89 \text{ kg/cm}^2$$

Pe + Mo

$$f1 = -15.8 \text{ kg/cm}^2$$

$$f2 = 28.4 \text{ kg/cm}^2$$

Pe + Mo + Md

$$f1 = -42.17 \text{ kg/cm}^2$$

$$f2 = 78.5 \text{ kg/cm}^2$$

Analizando la viga como viga T se calculo en valor momento nominal , siendo  $\phi M_n = 129.43$  t m y un valor de  $\phi V_n$  de 23.6 ton.

De los diagramas de momento y cortante de las fuerzas aplicadas se obtuvieron un valor de momento máximo actuante de 112.73 t m y un valor de cortante máximo actuante de 22.6 t. (a estos valores se les aplico lo estipulado en el AASHTO )

# Apéndices

- I. Memoria de calculo
- II. Fotos

# Anexos

- I. Sección 3, parte A: TYPES OF LOADS (AASHTO)
- II. Sección 4-204 GENERAL RULES SIMPLE BEAMS CARRYING MOVING CONCENTRATED LOADS ( AISC ).
- III. Planos.

# Referencias

AASHTO, SISTENNTNTH EDITION 1996  
**STANDARD SPECIFICATIONS FOR  
HIGHWAY BRIDGES.** United Stades of  
American.

Nilson A, 1988 **DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE  
CONCRETO PRESFORZADO**  
Editorial Limusa, México.

El siguiente trabajo está relacionado con el análisis de capacidad de carga de un puente de 40 años de edad propiedad del ICE, en la Planta Hidroeléctrica ubicada en Cachí. Este puente esta construido en concreto postensado y la carga a aplicar es de 60 ton.