

Prefacio

La infraestructura vial en Costa Rica ha venido en decadencia en los últimos años, y esto afecta de manera directa al desarrollo del país y su competitividad. La falta de innovación y aplicación de tecnologías por parte del gobierno ha dado como producto vías congestionadas, carreteras y puentes en mal estado.

Por tal razón es que un grupo de profesionales se han interesado en el tema y decidieron iniciar un proyecto que brinde herramientas para la toma de decisiones y se pueda atacar el problema de manera integral y en tiempo real. Por esta razón como parte del proyecto de investigación del TEC e-Bridge, se ha iniciado el monitoreo del puente sobre el Río Purires, en la provincia de Cartago utilizando una red de sensores.

Como consecuencia de esta iniciativa, nace este proyecto de graduación con el principal objetivo establecer un procedimiento para determinar la carga viva que se puede aplicar de forma segura sobre dicho puente. En este documento se presentan los resultados obtenidos y se analiza la deformación, el desplazamiento y las deflexiones que se generaron partir de la aplicación de diferentes cargas vivas al puente. No se encuentran registros en el país de que se hayan realizado este tipo de pruebas, por lo tanto se obtendrán datos únicos a partir de la aplicación de tecnología.

La ejecución de este proyecto se realiza como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción. Las pruebas que se realizaron se llevaron a cabo directamente en el puente sobre el Río Purires

que se ubica en la entrada a San Isidro del Guarco en la provincia de Cartago, específicamente en la ruta nacional 2.

Agradezco a Dios por darme sabiduría y dedicación, a mis padres, Osvaldo Cubero Soto y Marielos Cordero Jiménez por el apoyo incondicional durante toda mi vida, y por darme la oportunidad de crecer como persona, para ellos es este trabajo. Un agradecimiento profundo al proyecto e-Bridge, en especial a la Ingeniera Giannina Ortiz Quesada por la confianza que depositó en mí para formar parte del equipo de trabajo de e-Bridge, para la realización de este proyecto y por su tiempo y dedicación; y al Ingeniero Mauricio Carranza Solano por la ayuda brindada y por compartir su conocimiento. A todo el equipo de trabajo de e-Bridge.

Osvaldo Josué Cubero Cordero

Resumen ejecutivo

El Tecnológico de Costa Rica a través del proyecto de investigación e-Bridge y la escuela de Ingeniería en Construcción, consciente de la problemática en la infraestructura nacional y la falta de información sobre su comportamiento. Es por ello que se evidencia la necesidad de conocer con mayor detalle la configuración, características y posible comportamiento de las estructuras de puentes. Adicionalmente, el trabajo en conjunto con otras disciplinas como la ingeniería electrónica, ha permitido innovar en la aplicación de tecnologías de monitoreo estructural, que generen herramientas para la predicción remota de fallas en puentes, para el desarrollo y mantenimiento óptimo de la infraestructura del país.

Como resultado de este planteamiento nace la idea de realizar un estudio que permita determinar la carga viva real sobre el puente Piloto (Puente sobre el Río Purires) en estudio, mediante el uso de instrumentación electrónica desarrollada en el TEC.

Se realizaron pruebas de carga al Puente sobre el río Purires mediante la aplicación de cargas estáticas y dinámicas para estudiar el comportamiento de la superestructura. A las vigas principales con sección W27X94 se le colocaron sensores de deformación (ST350) y de deflexión (SR50A) en el tramo central del puente, sensores VW Crackmeter 4420 en las juntas de expansión, y sensores que miden las vibraciones. Para tal efecto se desarrolló un protocolo de aplicación de las cargas, que considera además la ubicación de los medidores.

Entre las dos condiciones de carga aplicadas sobre el puente, la que provoca mayores solicitaciones en términos de esfuerzos, deflexiones y desplazamientos, corresponde a dos vagonetas (longitud:2.2m, ancho:2.4m y un peso de 30 ton y 27 ton) ubicadas en el tramo central, denominada condición de carga I. En cambio, la condición de carga II, en donde solo se carga un carril, no provocó condiciones críticas.

Las deflexiones que experimentan las vigas alcanzan magnitudes de 10 mm para la condición I y de 5 mm en el caso II, las variaciones entre modelo teórico y los datos reales alcanzan valores entre el 42% y 62%.

Para los desplazamientos en juntas se determinó que ambas juntas no cuentan con un comportamiento homogéneo, pues hay diferencias entre los dos ejes de hasta los 0.06 mm, sin coincidir con el comportamiento ideal mostrado por el modelo. En el caso II las desviaciones entre datos corresponden a una variación de hasta del 50%.

El análisis de esfuerzos teóricos a tensión (mediante el programa de análisis estructural SAP 2000) son de alrededor los 500 kg/cm^2 . Esto indica que el modelo distribuye de forma equitativa las cargas, sin embargo los esfuerzos medidos mediante los sensores ST350 proporcionaron datos entre los 1800 kg/cm^2 y 2200 kg/cm^2 para las vigas centrales, para la condición I, mientras que para el caso II alcanzan valores máximos de 915 kg/cm^2 para la viga D. Dichos resultados evidencian los problemas de configuración estructural en el puente, producto

de falta de mantenimiento. Ninguna viga alcanza una magnitud crítica de 2320 kg/cm^2 , la cual corresponde a un límite establecido por la AASHTO para el tipo de acero utilizado, por lo que cada elemento se encuentra en el rango establecido y por tanto su comportamiento debe obedecer a condiciones elásticas.

Con los datos teóricos y reales de esfuerzos se formuló una ecuación de calibración, la cual relaciona los esfuerzos proporcionados por el modelo y los traslada a condiciones reales. Con dicho procedimiento se realizaron incrementos de carga en el modelo con el programa SAP 2000, para determinar cuál sería la carga viva que puede soportar el puente. El puente sobre el río Purires tiene la capacidad de soportar dos camiones estándar tipo HS20 + 25% en el tramo central bajo una condición de carga similar al caso I, con un factor de seguridad de 1.4.

Se necesita, mediante más estudios sobre el puente, determinar las deflexiones generadas por las cargas permanentes y temporales que han ocurrido en el transcurso de su vida útil, para valorar si sobrepasa las deflexiones permitidas de diseño.

Además el programa SAP 2000 no cuenta con herramientas necesarias para la evaluación de puentes y no permite el modelaje de las condiciones reales, por lo que esta herramienta tiene limitaciones. Es un programa que utiliza propiedades mecánicas de materiales nuevos y no considera pérdidas por concepto de fatiga o número de ciclos de carga.

Finalmente es importante recalcar que este proyecto es una primera aproximación a un modelo que debe validarse y calibrarse con mayores datos y con la aplicación de otras herramientas de análisis estructural.

Introducción

Costa Rica enfrenta un gran problema en su infraestructura vial, donde uno de los componentes que más puede comprometer el desempeño son los puentes. El país, carece de información y registros históricos que permitan establecer planes de mantenimiento preventivo y tomar decisiones acertadas a un costo y tiempo razonable. No existe un monitoreo, mantenimiento o estudios para estas obras, y lo que se realiza en la actualidad son inspecciones visuales que se dan hasta el momento que el puente ha colapsado o presenta síntomas muy evidentes de que va a fallar. Es por esta razón que nace en el Tecnológico de Costa Rica un proyecto con el objetivo principal de generar la predicción de fallas de puentes realizando el diseño, desarrollo e implementación de un modelo de confiabilidad estructural que se alimenta a partir de una red inalámbrica de sensores. Como puente piloto se selecciona uno ubicado sobre la ruta 2, en la provincia de Cartago. Es así como se plantea el presente proyecto de graduación, como una forma de innovar en la aplicación de nuevas tecnologías que pueden desarrollarse y aportar al avance del país en este tema.

Se plantea entonces en el presente proyecto como objetivo general determinar la carga viva real en el Puente sobre el río Purires utilizando instrumentación electrónica.

En este sentido, los objetivos específicos que conllevan a la realización de este proyecto son:

- Plantear y ejecutar pruebas de carga estáticas y dinámicas sobre el puente

Purires para analizar el comportamiento estructural de la superestructura.

- Comparar el modelo teórico con los datos suministrados por los sensores (deformación ST350, desplazamiento en juntas VW 4420 y deflexiones SR50A).
- Correlacionar los datos de los sensores de deformación con el modelo teórico, mediante una función característica que considere esfuerzos reales y teóricos.

Los alcances de este proyecto de graduación son: generar experiencia en el diseño y ejecución de pruebas de carga sobre puentes, con cargas estáticas y dinámicas e identificar las variables que pueden afectar el experimento; identificar las zonas relevantes para el monitoreo estructural, según el comportamiento del puente sobre el río Purires en la realización de las pruebas de carga; además aplicar tecnología electrónica para el monitoreo de ciertas variables relevantes en los puentes y fortalecer su aplicación en el país, para proporcionar medios científicos en la toma de decisiones.

Como limitaciones se tiene el tiempo, pues solo se cuenta con cuatro meses para la realización del proyecto. Al ser un tema de poco desarrollo a nivel nacional, la información es escasa; así como la experiencia por parte de profesionales.

La disponibilidad de equipos llegó a ser un factor determinante, ya que fueron necesarios más sensores en las vigas principales para obtener datos más globales de la estructura.

En este proyecto solo se realizaron análisis de pruebas estáticas, debido al tiempo,

las pruebas dinámicas no pudieron ser tomadas en cuenta, en el modelo de análisis.

Sin embargo de acuerdo al manual de evaluación de estructuras de puentes de la AASHTO, las pruebas estáticas son las que pueden brindar mayores herramientas para la calibración de modelos matemáticos. (AASHTO Manual for Bridge evaluation, 2011).

Marco Teórico

Generalidades de Puentes

La Real academia Española define puente como: "Construcción de piedra, ladrillo, hierro, hormigón, etc., que se construye y forma sobre los ríos, fosos y otros sitios, para poder pasarlos" (Real Academia; 2012).

Los puentes han sido parte de la historia de la humanidad, independiente de la época en la que se encuentre, estos fueron medios de comunicación de ciudades, pueblos y hoy en día de metrópolis. Su evolución se basa según el crecimiento de la población y de los avances en la ingeniería; se pasó de un simple tronco sobre un río a puentes de más de un kilómetro de longitud.

Dichas estructuras son íconos de las ciudades modernas e implican o determinan el potencial de la nación, y se convierten en una estructura que no solo cumple la función de soportar cargas, sino que llega a ser parte de las ciudades y a darle identidad a las mismas.

Actualmente los puentes pertenecen a la rama de estudio de la Ingeniería Civil, que es la encargada de los diseños estructurales y arquitectónico, de sus métodos de construcción y de los materiales disponibles para la ejecución de estas obras.

Además son uno de los componentes más vulnerables de una red vial, la cual es fundamental para la competitividad de un país.



Figura 1. Puente de la bahía de Sídney.

Componentes

Los puentes están compuestos por una variedad de partes o elementos según lo explica el manual de Inspecciones del MOPT, los cuales se mencionaran a continuación,

Superestructura

Se compone de elementos principales y secundarios, estos son: las vigas, cerchas, losas, vigas diafragma o secundarias, aceras, barandas y superficie de ruedo. Para cierto tipo de puentes, la superestructura se puede identificar con facilidad, ya que existe un desligue entre la parte superior de la estructura con la inferior (bastiones y pilas).

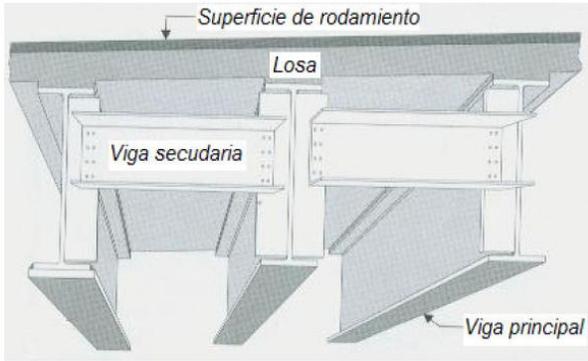


Figura 2. Elementos de una superestructura. (Manual de inspección de puentes del MOPT)

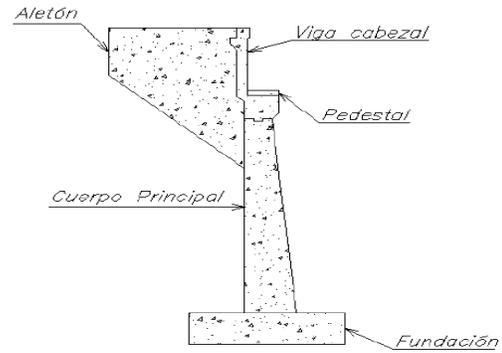


Figura 4. Partes de un bastión. (Manual de inspección de puentes del MOPT)

Subestructura

Se compone de los bastiones y pilas que se encuentran o forman parte de la cimentación, los apoyos forman parte de esta.

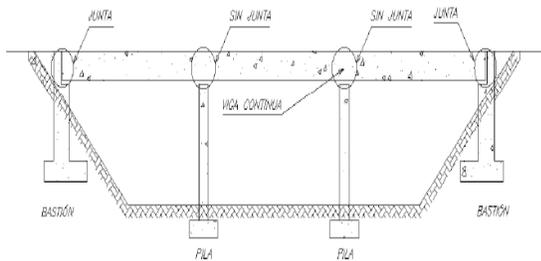


Figura 3. Elementos de una subestructura. (Manual de inspección de puentes del MOPT)

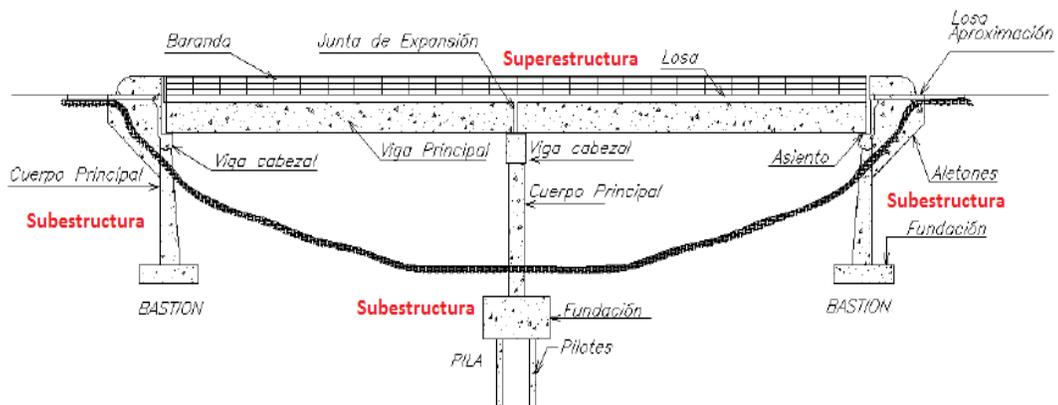


Figura 5. Componentes generales de un puente. (Manual de inspección de puentes del MOPT)

Accesorios del Puente

Los accesorios, si bien no son elementos que cumplen funciones estructurales y no llegan a ser variables de integridad estructural, cumplen funciones y velan por el adecuado funcionamiento de la estructura, sea en términos de seguridad o comportamiento. Los siguientes elementos componen los accesorios de un puente:

- Superficie de ruedo
- Baranda
- Juntas de expansión

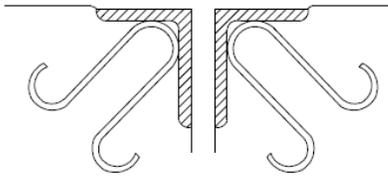


Figura 6. Ejemplo de una junta de expansión abierta. (Manual de inspección de puentes del MOPT)



Figura 7. Superficie de ruedo, Puente Calcurrupe.

Clasificación de puentes

Los puentes debido a su evolución han alcanzado diversidad de tipos, formas y materiales, entre otros, por eso su clasificación es complicada y no

existe un estándar para hacerlo, y los criterios varían.

Una de las formas para clasificarlos se encuentran:

- Según su material: concreto, acero o madera.
- Según su uso: peatonal, vehicular, vía férrea.
- Según su extensión: corta, intermedia, larga.
- Según su configuración estructural.

Según su uso

Los puentes peatonales se utilizan principalmente para el cruce de calles, sean estas de alta densidad vehicular o de alta velocidad. Los vehiculares y férreos permiten el paso de vehículos y trenes para sobrepasar los obstáculos como ríos, acantilados y depresiones.



Figura 8. Puente Peatonal.

Según su Extensión

La clasificación según su extensión se basa en la distancia entre apoyos; estos a su vez forman la cantidad de tramos de la superestructura.

Para extensión corta pertenecen aquellos con distancias hasta los 15 metros. Se considera extensión intermedia a puentes con longitudes de entre los 15 - 50 metros.

La extensión larga comprende los 50 a 150 metros y los extra largos son aquellos que superen los 150 metros. Los puentes suspendidos y atirantados pertenecen a este tipo de clasificación.

Configuración estructural

La clasificación estructural es compleja y existen una diversidad de criterios, se menciona en general sus tipos:

- Tipo losa: la losa es la encargada de soportar la carga y transmitirla a la subestructura, su restricción se da en su longitud ya que son usadas únicamente en luces muy cortas.
- Vigas simples: su configuración se compone de vigas simplemente apoyadas, las juntas de expansión se encuentran al inicio y final del tramo.

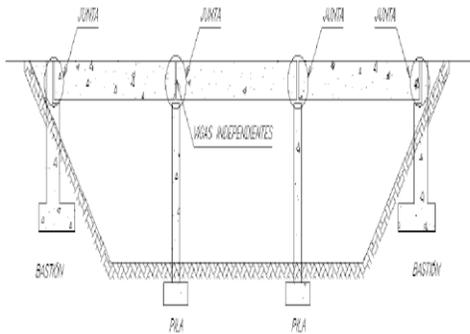


Figura 9. Vigas Simples. (Manual de inspección de puentes del MOPT)

- Vigas Continuas: las vigas, como su nombre lo indica, presentan continuidad, para ello se utilizan conexiones apernadas o soldadas, esto provoca que

el comportamiento y fuerzas presentes en los elementos sean distintas a una viga simple.

- Atirantado: es la única alternativa para luces mayores a 600 metros y es considerado competitivo en luces inferiores a los 300 metros. El uso de cables de alta resistencia en tensión conduce a una economía en material, peso y costo.

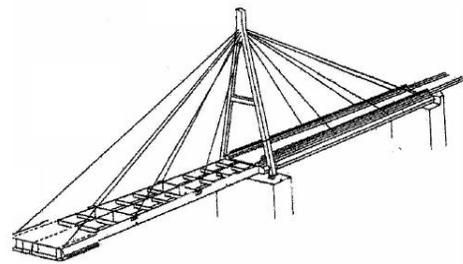


Figura 10. Puente atirantado. (Manual de inspección de puentes del MOPT)

- Tipo armadura: consiste de dos armaduras planares vinculadas con vigas transversales y soportes laterales con el fin de formar una estructura tridimensional que pueda resistir un sistema global de cargas.

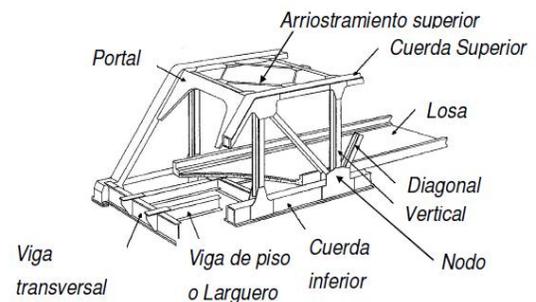


Figura 11. Puente Tipo cercha. (Manual de inspección de puentes del MOPT)

- Arco: el arco es una estructura que resiste gracias a la forma que se le da. Mediante la forma del arco se reparten las tensiones de manera que se producen compresiones en todas las partes del arco. Del mismo modo, es una estructura que salva una luz determinada sometida a esfuerzos de compresión donde las tracciones y flexiones se evitan o reducen al mínimo, con lo que conseguimos que materiales que no resistan tracciones puedan ser utilizables para la construcción.

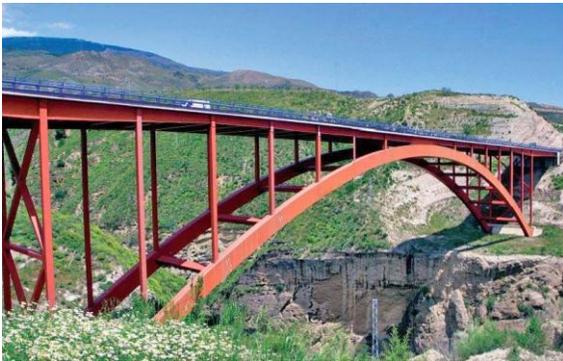


Figura 12. Puente Tipo arco de paso superior.

- Suspendido: en esta clase de construcciones de gran altura, el peso del puente se sostiene sobre los soportes verticales que se apoyan en el suelo y en los anclajes de las cuerdas. Las torres se fijan a los pilares de sujeción, que pueden estar muy separados entre sí, y sirven de apoyo para los distintos cables.

Diseño estructural

La metodología de diseño utilizada a nivel internacional son las normas AASTHO, actualmente vigentes, debido a que Costa Rica

no cuenta con un código de Puentes y el código sísmico solo rige para edificaciones y vivienda.

Para el diseño se utilizan las cargas vivas establecidas por la AASTHO las cuales corresponden a:

- **Sobrecarga vehicular:** Este tipo de sobrecarga, como lo explica el AASTHO, designada por HL-93, consiste en la combinación del camión de diseño y la sobrecarga vehicular.
- **Camión de Diseño:** Sus ejes traseros varían entre los 4,3 a 9 m, cuyas cargas en estos corresponde a 14. 785 ton y de 3.569 en sus ejes delanteros.
- **Tandem de Diseño:** Consiste en un par de ejes con una separación de 1.2m, con una carga de 11 ton.
- **Carga de Carril:** Consiste en una carga distribuida uniforme de 310 kg/m^2 , representa un flujo vehicular constante sobre el puente.
- **Carga Peatonal:** corresponde a una carga de 367.1 kg/m^2 , representa el paso de personas sobre el puente.
- **Carga Frenado:** Se determino que la carga de frenado máxima correspondía al 25% del peso por eje ya sea del camión de diseño o tandem.

Problemática de Puentes en Costa Rica

El periodo de mayor auge en la construcción de puentes data de los 50 y 60, los cuales corresponden alrededor del 40% de los existentes. La vida útil de una estructura como un puente es de 50 años, esto implica que el país cuenta con una importante cantidad de estructuras que requieren una rehabilitación importante o su sustitución.

Se estima que existen alrededor de 37 km de puentes, en unas 245 rutas que contemplan las primarias y secundarias. Cerca del 90% de los puentes se encuentran sobre ríos y quebradas y el 79% son de longitud menor a los 35 m, en su mayoría son estructuras de concreto.

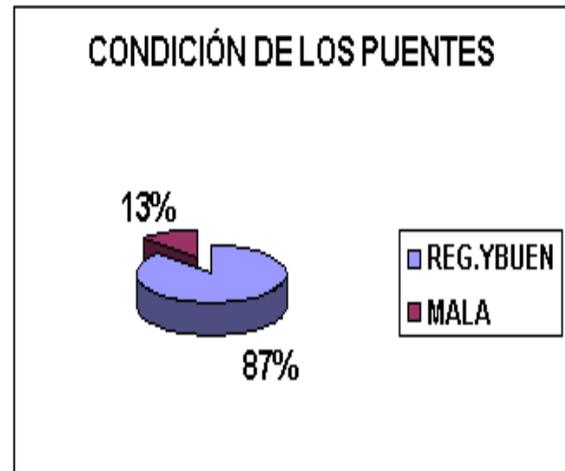


Figura 13. Condición de Puentes.
Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes

CUADRO 1. TOTAL DE PUENTES INVENTARIADOS.		
Tipo de estructura	Total de puentes	Número de puentes con elementos críticos
Concreto	929	623
Acero	178	152
Madera	79	63
Alc. Cuadro	97	70
Falta Puente	12	0
Paso Superior	22	8
Paso inferior	14	3
Alc. Acero Corrugado	4	6
Tubo Concreto	3	2
Total	1338	927

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

CUADRO 2. PUENTES INVENTARIADOS. SAEP.	
Rango	Cantidad
De 6 – 15 m	717
De 16 - 30 m	294
De 31 - 60 m	211
De 61 - 100 m	75
De 101 - 150 m	18
Más de 151 m	23
Total	1338

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes

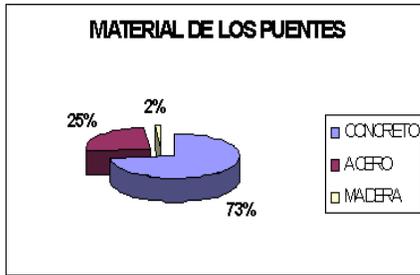


Figura 14. Materiales de los puentes.

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes

Entidades Encargadas

Las dos instituciones responsables en el tema de puentes son el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, denominada MOPT, y el Consejo Nacional de Vialidad, conocido como CONAVI.

El MOPT, por medio de la dirección general de planificación sectorial, se encarga en teoría de la planeación, diseño, construcción y mantenimiento de los puentes del país.

Otro ente involucrado es el CONAVI, este debe encargarse de la construcción y conservación de la red vial del país, por lo que le corresponde la rehabilitación y mantenimiento.

Sin embargo estas instituciones cuentan con limitantes en equipos, personal y conocimiento, por esta razón el gobierno de Costa Rica solicitó ayuda al gobierno de Japón para implementar la asistencia técnica en el sistema de administración de puentes.

El JICA, "Agencia de Cooperación Internacional de Japón", realizó un estudio sobre el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes basado en 29 puentes de la red nacional de carreteras.

Actualmente el Gobierno de Costa Rica se basa en el estudio y enfoca sus recursos a la rehabilitación de los mismos. El presupuesto destinado para este fin no logra cumplir las necesidades y con el transcurrir de los años se han hecho intervenciones menores o erradas.

Principales Problemas

- Personal no calificado e insuficiente.
- Sistema de administración de puentes deficiente.
- Presupuestos insuficientes para el mantenimiento y construcción.
- En las universidades no se cuenta con programas que cuenten con cursos de ingeniería en puentes, al igual que capacitaciones.
- Pocos especialistas en el país.
- El país y el sector privado no tiene el equipo necesario para la inspección de puentes o software para diagnóstico.
- Las políticas frenan el desarrollo de estos temas, no existe dinero para la investigación o puesta en marcha de estrategias.
- Las leyes no regulan los pesos y dimensiones de los automotores, y provocan que las sobrecargas impacten en la vida útil del puente.
- Diseños deficientes y empíricos, sin aplicar las normas de diseño AASHTO.
- Deficiencias en el "Sistema de Administración Estructural de Puentes", el cual hace muchos años no es utilizado y no ha cumplido con los objetivos para el cual fue diseñado.
- No se cuenta con un código de puentes, ya que estas estructuras tienen diferentes comportamientos a las estructuras comunes, como lo son las edificaciones, y sería un error aplicar el código sísmico para este tipo de estructuras (Vargas, 2012¹).

¹ Informe de Investigación: Problemática en Infraestructura de puentes en Costa Rica, agosto 2012.

Generalidades del Puente sobre el río Purires

El puente sobre el Río Purires se localiza en la ruta 2, sobre la carretera interamericana, y une el valle central con la zona sur. Es una de las vías más importantes del país y transitadas, por lo que representa una carretera de gran importancia económica. Constituye una vial esencial con pocas opciones de ruta alterna.



Figura 15. Puente sobre el Río Purires

El Puente Purires Se ubica en la latitud $9^{\circ}50'2.98''$ y longitud $83^{\circ}57'5.43''$.

El puente es administrado por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), ya que es una ruta nacional.



Figura 16. Ubicación Geográfica del Puente sobre el río Purires.(Google Earth)

La construcción del puente data de los años 50 del siglo pasado, sin embargo no se tienen registros de la construcción exacta, por lo que dificulta determinar la metodología de diseño que se utilizó, mas sin embargo se piensa que la que se utilizó fue la de esfuerzos de trabajo.

CUADRO 3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PUENTE SOBRE EL RÍO PURIRES

Fecha aproximada de construcción	1950
Dirección de la vías	Ambos sentidos
Longitud Total	39.45 m
Ancho Total	9.60 m
Ancho Superficie de Ruedo	6.60 m
N° Superestructuras	1
N° Tramos	3
N° Sub Estructura	4
Tipos de Juntas de Expansión	Abiertas
Pilas y Bastiones	Concreto
Tipo de Apoyos	Fijos y Expansivos
Composición Estructural	Vigas Principales y diafragmas de acero, con tablero de concreto reforzado
Configuración Estructural	Vigas continuas de acero.

Caracterización de la estructura

La estructura se apoya en dos bastiones y dos pilas, las cuales transfieren las cargas de la superestructura a la subestructura.

Sus apoyos son tipo balancín y fijos, permiten movimiento en caso de sismo, según su diseño.



Figura 17. Bastión y apoyos del puente.

El Puente Purires cuenta con una configuración de vigas principales I y con vigas tipo diafragma en I y C, las cuales contribuyen a rigidizar la estructura principalmente. Las vigas principales son las encargadas de tomar las cargas y trasladarlas a la subestructura al puente.



Figura 18. Configuración estructural de vigas I.

La superficie de rueda consta de una losa de concreto de 15 cm de espesor y una resistencia a la compresión de 284.5 kg/cm^2 , según ensayos realizados. Otras capacidades se muestran en el siguiente cuadro, sus resultados se obtuvieron mediante la extracción de núcleos sometidos a una prueba de compresión. (Estudio de capacidad estructural en el puente sobre el río Purires, 2012). Los elementos analizados corresponden a la losa de concreto, a los bastiones y pilas del puente.

CUADRO 4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	
Elemento	f^c (kg/cm ²) promedio
Losa de Concreto	284.50
Pila Norte	192.00
Pila Sur	176.00

Fuente: Laboratorio CIVCO.



Figura 19. Carpeta asfáltica y juntas de expansión.

Sobre la losa de concreto existen sobrecapas de asfalto, que se han ido añadiendo con el transcurso de la vida útil del puente.

Se determinó los espesores de capas asfálticas y se mapeó su distribución sobre la losa.

CUADRO 5. ESPESORES DE CARPETA ASFÁLTICA	
Tramo	Espesor (cm)
1	10.00
2	7.00
3	8.56

Fuente: Laboratorio CIVCO.

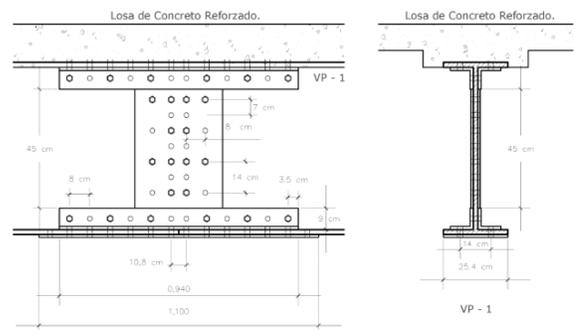


Figura 20. Vista Lateral del Puente.



Figura 21. Apoyo expansivo, tipo balancín.

Debido a la longitud entre tramos del puente, existen conexiones entre ellas, estas transfieren las fuerzas a los demás elementos, y dan continuidad a las vigas principales.



Conexión Tipo CN - 1.

Figura 22. Conexión pernada de placas y vigas principal.

Problemas existentes sobre el puente

- Sobrecapas de pavimento, las cuales proporcionan cargas muertas adicionales y estas no fueron tomadas en cuenta en el diseño de su época. Las sobrecapas rondan los 8.5 cm según pruebas realizadas en el laboratorio del CIVCO.
- La estructura globalmente requiere un mantenimiento preventivo, la seguridad vial en esta importante vía no cuenta con las condiciones óptimas. Un ejemplo de ello son las barandas, ya que en su mayoría se encuentran en mal estado.



Figura 23. Falta de Barandas.

- Las juntas de expansión se encuentran obstruidas por el concreto asfáltico. Esto provoca que el puente ante un sismo no se comporte de la manera adecuada, disipando la energía del evento sísmico y transfiriendo dichas fuerzas a toda la estructura, en sí a los bastiones y pilas.
- Otro de los problemas son las vibraciones excesivas sobre la estructura, que provocan sonidos extraños y fatiga en los materiales. Los asentamientos en el puente son evidentes.



Figura 24. Fatiga en la losa de concreto.

- Los problemas de corrosión son evidentes cerca de los apoyos, ya que no existe mecanismos para el control de las infiltraciones cerca de dichas zonas.



Figura 25. Mecanismos de drenaje deficientes.

- Los apoyos tipo balancín cuentan con rotaciones y desplazamientos relevantes en el comportamiento y transferencia de fuerzas a la subestructura.



Figura 26. Rotaciones en apoyos.

Las vigas principales cuentan con deformaciones críticas debido a la corrosión, localizadas cerca de los apoyos, en la mayoría de los casos existentes hay pérdidas de sección.



Figura 27. Deformaciones en vigas principales.

Tránsito promedio Mensual sobre la ruta 2, Puente Purires

CUADRO 6. CONTROL VEHICULAR AÑO 2011. RUTA N° 2. PARA VEHÍCULOS DE CLASIFICACIÓN TIPO C		
Meses 2011	Sentido San José - Ochomogo	Sentido Ochomogo - San José
Enero	49.68	44.58
Febrero	46.24	44.08
Marzo	47.65	47.53
Abril	39.767	38.91
Mayo	41.26	42.60
Junio	37.23	39.71
Julio	36.53	36.58
Agosto	39.87	36.98
Septiembre	42.68	39.16
Octubre	42.92	38.37
Noviembre	42.61	38.08
Diciembre	49.77	34.51

Fuente: CONAVI.

CUADRO 7. CONTROL VEHICULAR AÑO 2011, RUTA N° 2. PARA VEHÍCULOS DE CLASIFICACIÓN TIPO C		
TPD	Sentido San José - Ochomogo	Sentido Ochomogo - San José
Enero	1.60	1.43
Febrero	1.65	1.57
Marzo	1.53	1.53
Abril	1.32	1.29
Mayo	1.33	1.37
Junio	1.24	1.32
Julio	1.17	1.18
Agosto	1.28	1.19
Septiembre	1.42	1.30
Octubre	1.38	1.23
Noviembre	1.42	1.26
Diciembre	1.60	1.11

Fuente: CONAVI.

Determinación de la capacidad de carga viva sobre un puente

Uno de los problemas con que cuenta Costa Rica en la infraestructura vial y específicamente en el tema de puentes, es la falta de información sobre la capacidad real de carga viva que puede soportar el mismo de una forma segura.

La falta de información y la poca capacitación de profesionales, ya sea para diseño, inspección y evaluación, ha arrastrado al país en una deficiencia significativa en este aspecto.

Es por ello que se hace necesario determinar esta capacidad y la misma debe considerar el deterioro de los materiales en el tiempo y los cambios de las condiciones a las cuales se somete la estructura.

La evaluación de puentes en términos de capacidad es totalmente distinta al diseño tradicional, es un error evaluar una estructura utilizando dichas metodologías de diseño (AASHTO).

Debido a que los puentes al pasar de los años reducen su capacidad estructural, es importante basarse en las condiciones existentes (propiedades de materiales, condiciones de tráfico y de carga), para así determinar su comportamiento y capacidad real.

Las pruebas de carga pueden dar una solución a este problema ya que son mecanismos que permiten determinar los factores que no se consideran en el diseño convencional de puentes (corrosión, socavación, desplazamientos en apoyos, pérdida de pernos, condiciones de carga distintas y aumento de tráfico vehicular, entre otras).

Estas pruebas consisten en la aplicación de cargas, ya sean dinámicas o estáticas, con el

fin de obtener mediciones y observaciones, que más adelante serán utilizadas para entender el comportamiento de la estructura. Estas cargas sobre la estructura tienen que ser controladas y previamente validadas por un modelo teórico que simule el posible comportamiento de la estructura, sin que alcance un comportamiento elástico, para no llevar a la estructura a niveles críticos de esfuerzos.

La importancia de este tipo de experimentos es que suministran una gran variedad de datos, entre ellos:

- Rango de cargas vivas que puede soportar el puente.
- Capacidad estructural real.

Clasificación de las pruebas de carga

Para la evaluación de cargas en puentes se utilizan dos tipos de métodos, las pruebas de diagnóstico y pruebas de resistencia (AASHTO Manual for Bridge evaluation, 2011).

Las de diagnóstico miden la respuesta o comportamiento del puente mediante la aplicación de una serie de variables, como por ejemplo las cargas y sus distribuciones, con el fin de validar modelos matemáticos. En ellas pueden realizarse pruebas de cargas dinámicas o estáticas.

Las pruebas de resistencia tienen como fin determinar la capacidad máxima del puente, pero dentro de un comportamiento elástico del mismo y

cumpliendo con los requerimientos de seguridad estructural. Usualmente en las pruebas de resistencia se utilizan únicamente cargas estáticas.

Tipos de cargas

Las cargas dinámicas representan el flujo de vehículos que pasa por el puente en movimiento, al realizar este tipo de pruebas se tiene como objetivo poder medir las vibraciones y la frecuencia que experimenta al someterse a dichas condiciones (AASHTO Manual For Bridge Evaluation, 2011). Este tipo de experimento es muy útil en el diseño de puentes, ya que proporciona mediciones de esfuerzos, los cuales son utilizados en el diseño por fatiga.

Para las cargas estáticas es evidente que las vibraciones en el puente no se dan, pero la intensidad de carga y las posiciones de la misma pueden variar.



Figura 28. Ejemplo de pruebas de carga en puentes en Sydney.

Pruebas de diagnóstico

Este tipo de prueba puede realizarse con cargas dinámicas o estáticas, sus mediciones son utilizadas para la calibración de modelos teóricos,

mediante la comparación de comportamientos de la estructura.

Los puentes, con el pasar de los años, muestran deterioro y daños que pueden significar reducciones de resistencia para los cuales fueron diseñados. Este tipo de pruebas permite disminuir las incertidumbres asociadas a estas variables y conocer de manera real el comportamiento de la estructura.

Pruebas de Resistencia

Las pruebas de resistencia se efectúan con cargas previamente conocidas, ya que no se quiere provocar respuestas inelásticas de la estructura.

Su realización se limita a dos condiciones principales:

- Que el puente no entre a un comportamiento inelástico.
- Que se alcance una carga máxima que provoque daños.

Muchos de los puentes actuales con los que cuenta el país son puentes que se diseñaron en las décadas de los 50 y 60, por este motivo la mayoría o su totalidad no cuenta con planos o información sobre su diseño, por lo que crear modelos estructurales resulta bastante complejo. Al utilizar las pruebas de resistencia, se nos facilita analizar la estructura y así conocer la respuesta que tienen ante las cargas.

Tipos de sensores para pruebas de carga

Los puentes son estructuras que se someten a una gran variedad de fuerzas externas y variables, desde cargas permanentes como lo son las vigas, losas o todo elemento propio del puente, hasta cargas temporales, vehículos, cargas peatonales, de viento de sismo y de nieve, entre otras.

Los modelos teóricos de las estructuras brindan un posible comportamiento, sin embargo no necesariamente lo teórico se comporta igual a lo real.

Galgas extensiométricas ST350

Uno de los parámetros importantes en el monitoreo de puentes es la deformación, la cual corresponde al cambio en la longitud del elemento producto de las cargas aplicadas, para puentes correspondería a las cargas vivas (vehicular). Las deformaciones se relacionan con los esfuerzos, y estos se comparan con el esfuerzo último para así verificar si la estructura cumple su objetivo.

Usos

El ST350 es un sensor de la compañía Bridge Monitoring (CHEQUEAR EL MANUAL), compatible con el equipo de adquisición de datos CR1000 de CampbellScientific, mide las deformaciones sobre algún miembro estructural. Estas pueden ser debido a la compresión y tensión, en consecuencia de las cargas vivas, su uso típico se da en puentes y edificios.



Figura 29. Galga extensiométrica ST350.

Funcionamiento

Su funcionamiento se basa en que el sensor, al experimentar un cambio de voltaje, la convierte en una señal electrónica, y es asociada a una deformación.

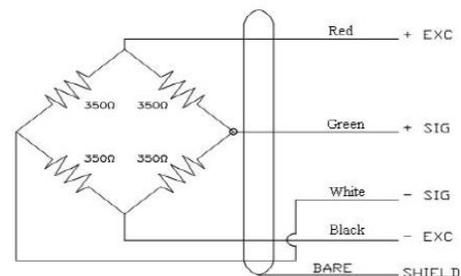


Figura 30. Funcionamiento eléctrico ST350.

CUADRO 8. GENERALIDADES DEL SENSOR ST350	
Longitud efectiva de la galga	3.0 in (76.2 mm)
Tamaño	4.375 in x 1.25 in x 0.5 in (111 mm x 32 mm x 13 mm)
Longitud del cable	15 ft (5 m)
Material	Aluminio
Circuito	Puente wheatstone completo con 4 galgas extensiométricas activas de aluminio de 350 Ω , 4 cables de conexión
Precisión	\pm 2% lectura individual calibrado de acuerdo a estándares NIST
Rango de deformación	Aproximadamente \pm 2000 $\epsilon\mu$
Fuerza requerida para 1000 $\mu\epsilon$	Aproximadamente 17 lbs. (76 N)
Sensibilidad	Aproximadamente 500 $\epsilon\mu/mV/V$
Peso	Aproximadamente 3 oz. (85 g)
Protección al ambiente	Construido con protector y resistente al agua
Rango de temperatura	Rango de operación - 58°F a 185°F (- 50°C a 85°C)
Cable	BDI RC-187: calibre 22, 2 pares aislados individualmente con sumidero

Variables de error

Entre las variables o posibles incertidumbres que pueden afectar los datos se encuentran: la temperatura, propiedades del material, el adhesivo que une el sensor con la superficie a medir y la estabilidad del material.

Instalación

Para su colocación se requiere que la superficie a la cual se va a adherir se encuentre libre de suciedad.

Existen dos maneras para su instalación, mediante tornillos o mediante un adhesivo (loctite

410 black). También se puede usar un acelerante para su rápida colocación.

Se marcan líneas de referencia sobre el elemento para su correcta alineación, ya que las deformaciones horizontales sobre su eje son las que se pretenden medir, una variación en su eje brindará deformaciones sobre otro eje.

Una vez instalados se conectan al datalogger CR1000, para cada prueba a ejecutar se requiere su calibración en cero (Campbell Scientific, 2008).

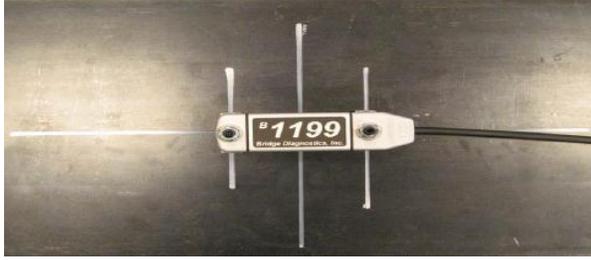


Figura 31. Instalación ST350.

Dataloger CR1000

El dataloger CR1000 es un dispositivo de adquisición de datos, lee la salida de tensión o pulsos o cambios de estado, y estas las convierte en unidades de ingeniería. El CR1000 almacena los datos en la memoria en espera de transferirlos a la PC (Campbell Scientific, 2011).

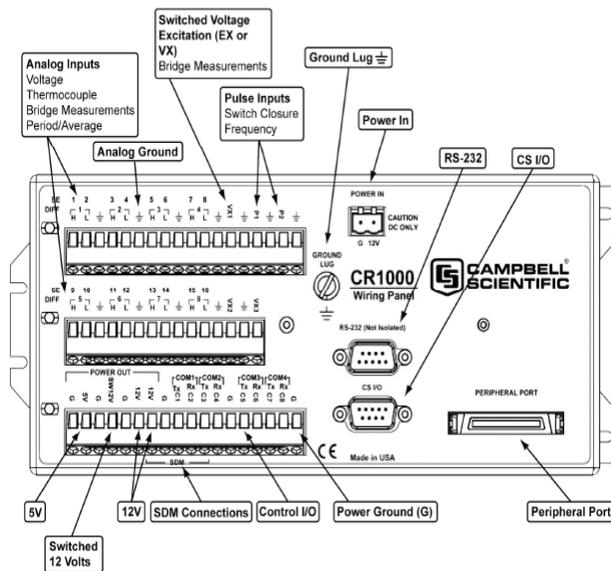


Figura 32. Dataloger CR1000.

El dataloger cuenta con canales para cada sensor, entradas analógicas de tierra, brinda energía a cada sensor y opera a 12 voltios, cuenta con entrada para su conexión a una computadora y visualización de las mediciones.

Sensor ultrasónico SR50A

El sensor SR50A es un dispositivo que mide distancias, determina la distancia del sensor a un objetivo, por lo que logra medir las deflexiones de un elemento estructural debido a las cargas vivas a las que se someta el elemento.

Usos

Sus aplicaciones más comunes son para la medición de espesores de nieve y agua. Igualmente se ha utilizado para el monitoreo en puentes, para los desplazamientos verticales de su elementos.



Figura 33. Sensor ultrasónico SR50A.

Funcionamiento

El SR50A determina la distancia de un blanco mediante el envío de impulsos ultrasónicos y escuchando los ecos de retorno que se reflejan desde el objetivo. El tiempo de retorno de cada eco es la base para la obtención de la distancia. El SR50A basa cada medición en varias lecturas y aplica un algoritmo para mejorar la fiabilidad de la medición.

El haz ultrasónico puede recoger los datos si se encuentra en un campo de visión de menos de 30° (Campbell Scientific, 2011).

Instalación



Figura 34. Instalación Sensor ultrasónico SR50A.

Sensor Crackmeter 4420

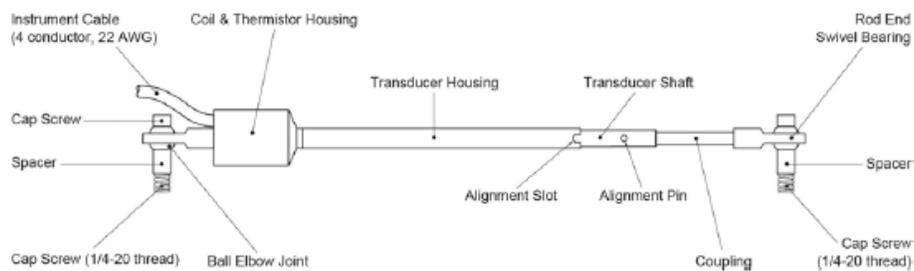


Figura 35. Componentes del sensor Crackmeter 4420.

El sensor 4420 mide los desplazamientos horizontales en juntas o uniones en edificios, puentes, tuberías y presas, entre otras.

Funcionamiento

El sensor consiste en cuerdas vibrantes con resortes que al ser estirado o elongado causa un incremento en la tensión, el cual es censado por la cuerda vibrante. La tensión en la cuerda es directamente proporcional a la extensión, por lo que la apertura de la junta puede ser determinada por la medición de la tensión (Geokon Inc, 2011).

Instalación

Sus uniones pueden realizarse mediante tornillos o varillas. Para las pruebas de carga se utilizaron varillas, las cuales mediante un epóxico permiten que se pegue el sensor.

Entre los cuidados que se debe tener es que su colocación tiene que ser totalmente horizontal, ya que puede medir desplazamientos que no corresponden o que no sean representativos.

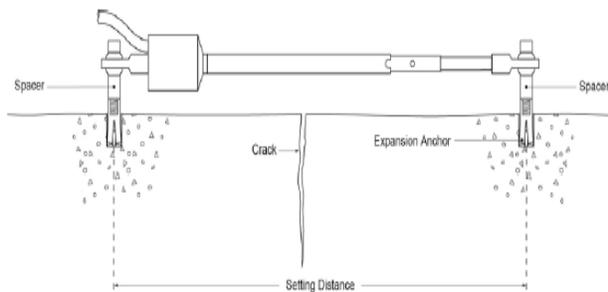


Figura 36. Instalación Sensor Crackmeter 4420.

Metodología

Prueba de carga, Planeamiento

Una prueba de carga es la medición de la respuesta de una estructura sujeta a cargas conocidas y controladas, cuidando por que la estructura no entre a un comportamiento inelástico.

Las pruebas de carga desarrolladas en el Puente Purires se efectuaron el 5 de octubre del 2012, con la finalidad de analizar el comportamiento de la estructura y compararlo con el modelo teórico previamente desarrollado. Entre las variables a medir se encuentran las deformaciones, desplazamientos, deflexiones y vibraciones, con el fin de revisar las condiciones estructurales del puente.

Para la puesta en marcha del experimento se desarrollaron una serie de pasos y protocolos, para que en campo se ejecutaran de la mejor manera, además para considerar las variables que pueden afectar el experimento.

A continuación se detallan las múltiples tareas desarrolladas durante el experimento de carga, correspondientes al planeamiento.

Dentro del equipo que participó en la elaboración de las pruebas se encuentra:

Ing Giannina Ortiz
Ing Johan Carvajal
Ing Casia Soto
Ing Hugo Navarro
Geovanny Figueroa

Juan Diego Chacón
José Alberto Chacón
Alberto Fernández
Pedro Cuadra
Osvaldo Casares
Osvaldo Cubero
Katherine Vargas
Jesús Santamaría
Daniel Vargas
José Antonio Chavarría
Eduardo Arce
Joaquin Solano Rivera
Efrain Obando Redondo
Mauricio Sandoval Molina
Edwin Arce Mena
Carlos Sojo Picado

Programa de actividades

Las pruebas de carga se dividen en 3 pasos, los cuales corresponden a: Planeamiento y Ejecución y análisis de resultados.

El planeamiento consiste en el diseño de cada uno de los protocolos, estos a su vez engloban los pasos para cada ítem a desarrollar, considerando tiempos, equipos, rutas críticas, personal requerido y diseños de sitios.

La ejecución es la puesta en práctica de los protocolos y su correcto desarrollo en campo. En este ítem se plantea las labores realizadas y si los protocolos fueron ejecutados con éxito, además se explica los detalles no considerados o imprevistos, los cuales se consideraran para posteriores experimentos a desarrollar.

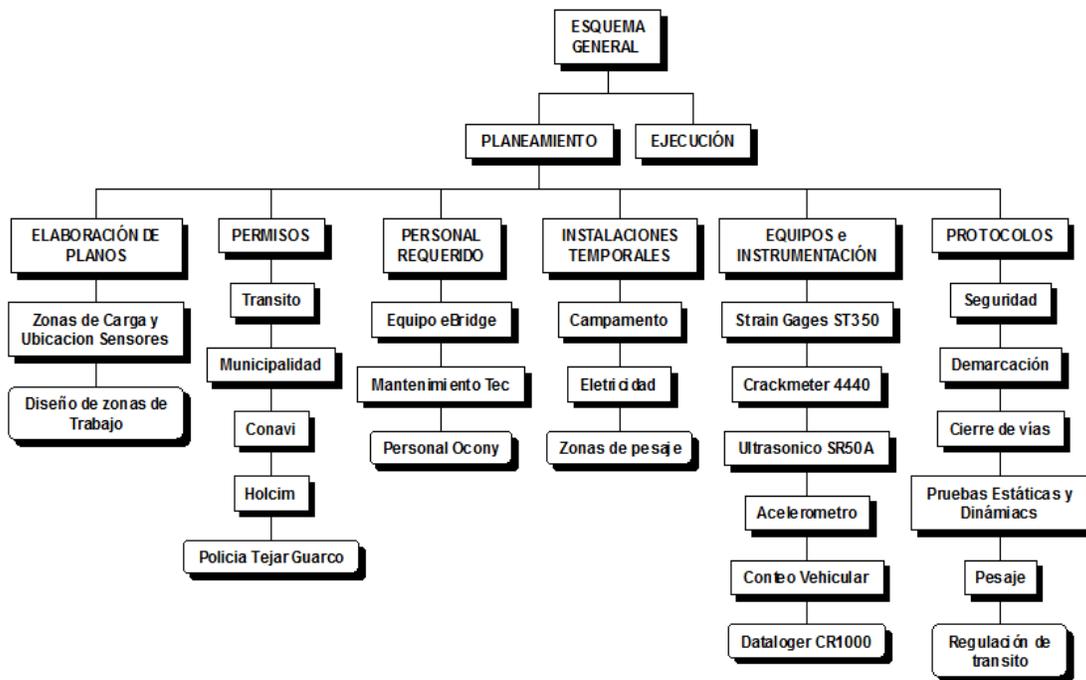


Figura 37. Esquema General Planeamiento.

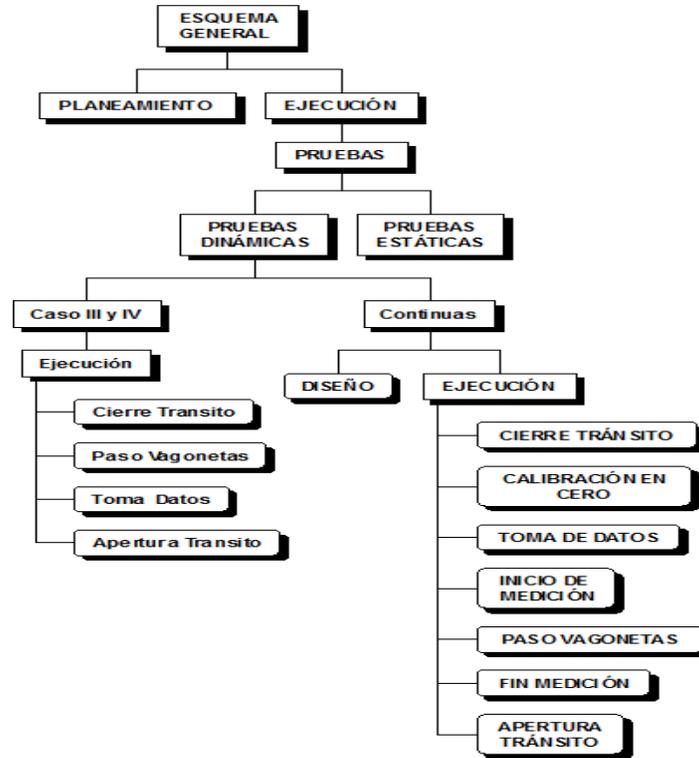


Figura 38. Esquema General Ejecución.

Diseño de Sitio

Las pruebas de carga requieren además de su planeamiento y ejecución, el diseño de sitio, con el fin de velar por que cada propuesta cumpla con el espacio y condiciones requeridas. Mediante las visitas en campo, se determina los lugares apropiados para implementar cada prueba y cada tarea.

Los cierres de vías se efectuaron del lado de San Isidro y del lado de Cartago. En cada extremo se contó con oficiales de tránsito para el cierre de vías. Los cierres se realizaron a 400 metros a ambos lados del puente, para brindar seguridad tanto a usuarios como a los encargados de las pruebas de carga.

Las zonas de pesaje se ubicaron a doscientos metros del puente, en una zona amplia de un parqueo en un restaurante, se

pesaron en dicho lugar, además sirvió de sitio de espera. Las romanas se instalaron en dicha zona y mediante el equipo de trabajo de eBridge, se procedió a la toma de pesos y dimensiones de las dos vagonetas de 12 m³ de capacidad de tanque.

El campamento de eBridge se instala del lado de Cartago, para lo cual se instalan los toldos y se colocan los equipos desde dicha zona. La planta de abastecimiento de energía es colocada, para brindar energía a los sensores y computadoras requeridas para las pruebas, igualmente esta planta sule a las luces temporales necesarias en la noche por razones de seguridad.

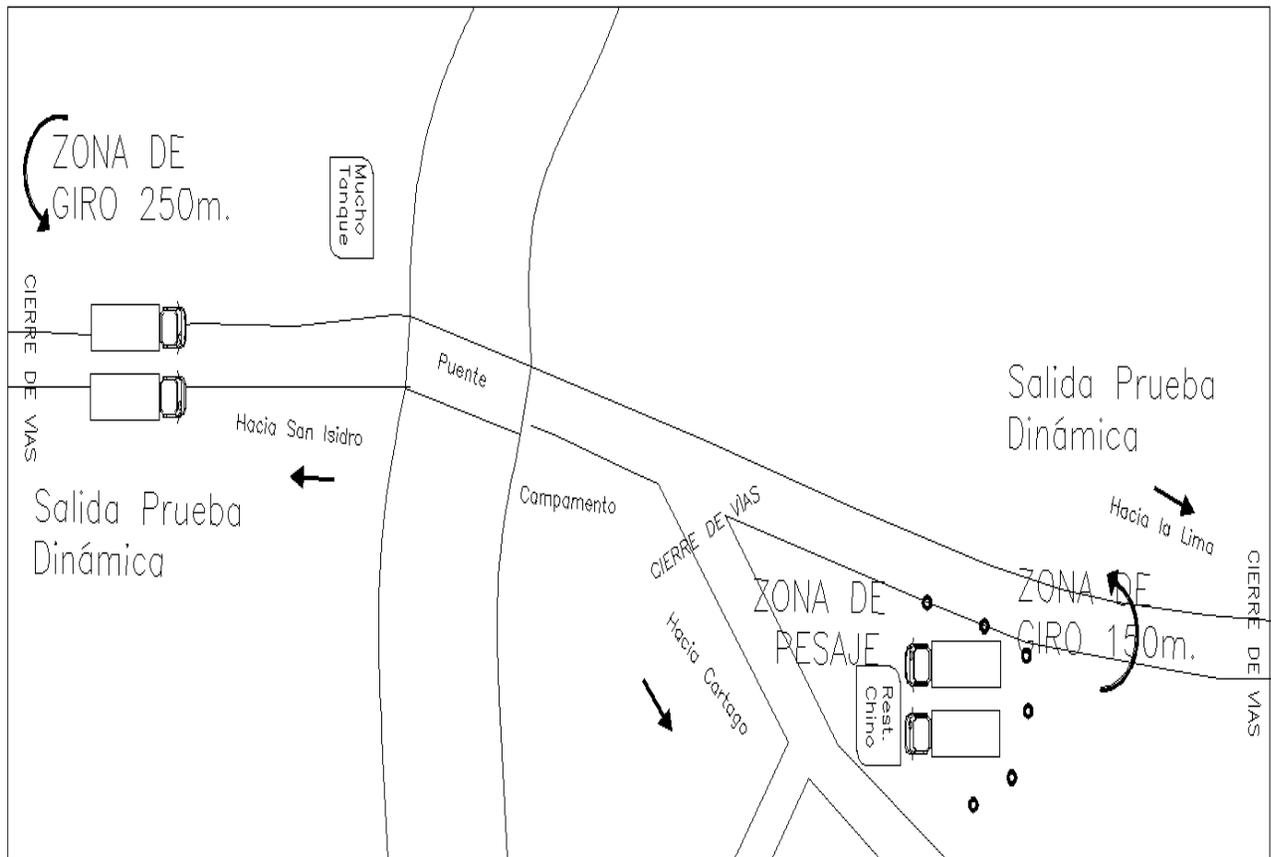


Figura 39. Diseño de Sitio Pruebas de Carga.

Itinerario y Tiempos

CUADRO 9. ITINERARIO DE LAS PRUEBAS DE CARGA SOBRE EL PUENTE			
Día	Hora	Ítem de Trabajo	Equipo de Trabajo
PREPARACIÓN			
04-oct	02:00:00 p.m.	Demarcación de las zonas de carga	Asistentes e-bridge
05-oct	4:00:00 a.m.	Salida de TEC	e-Bridge, Mantenimiento
05-oct	04:30:00 a.m.	Descarga de equipo en el puente	e-Bridge
05-oct	05:00:00 a.m.	Montaje de equipo para el acceso al tramo central del puente.	Mantenimiento TEC
05-oct	05:00:00 a.m.	Instalación de campamentos, equipos de electricidad	e-Bridge
05-oct	5:00:00 a.m. - 9:15 a.m.	Instrumentación del Puente Sensores de deformación Sensores de desplazamiento Sensores de desplazamiento en Juntas Sensores de aceleración Conteo vehicular	e-Bridge
05-oct	09:00:00 a.m.	Llegada de Balanza OCONY. Preparación de zonas de Pesaje	e-Bridge
05-oct	09:00:00 a.m.	Llegada de Vagonetas Holcim. Explicación de Protocolos respectivos.	e-Bridge
05-oct	09:00:00 a.m.	Llegada de Tránsito de Cartago. Explicación de cierres de vías según Protocolos.	e-Bridge
05-oct	09:15:00 a.m.	Pruebas de funcionamiento de los equipos electrónicos.	e-Bridge
EJECUCIÓN			
05-oct	9:30 am - 11:00 am	Pruebas Estáticas Casos de carga II y II	e-Bridge
05-oct	11:00 - 11:40 am	Pruebas Dinámicas Casos de carga II y IV	e-Bridge
05-oct	11:00 - 11:40 am	Pruebas Dinámicas Casos de carga II y IV	e-Bridge
5 6 oct.	12:00 m.d - 12:00 m.d	Pruebas Dinámicas Duración 24 horas	e-Bridge

Mediciones para cada tipo de Prueba

CUADRO 10. CONTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE CARGA			
Tipo de Prueba	Mediciones a realizar	Casos de carga	Duración de la prueba
Estáticas	Deformaciones, desplazamientos y deflexión.	Caso I - Caso II	20 min cada una
Dinámicas	Deformación, desplazamientos, aceleración.	Caso III - Caso IV	10 min cada una
	Deformación, aceleración, conteo vehicular.	Caso V	24 horas

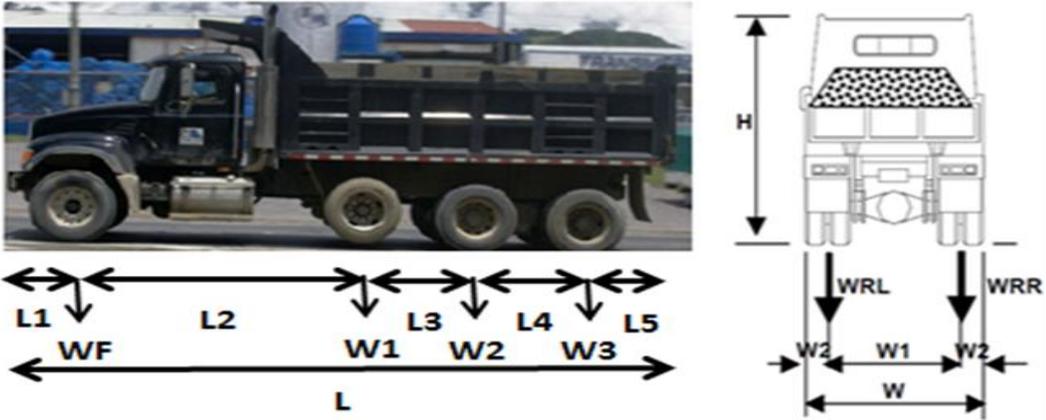
Programa de Pruebas Estáticas

CUADRO 11. PROGRAMA DE PRUEBAS ESTÁTICAS	
Hora	Ítem de Trabajo
09:00 a. m	Pesaje de ejes de las vagonetas
09:30 a. m	Cierre de Tránsito sobre el puente y ubicación de vagonetas en zonas de carga. Caso de carga I
09:40 - 10:00 a.m.	Toma de Datos
10:00:00 a.m.	Apertura del tránsito
10:15:00 a.m.	Cierre de Tránsito sobre el puente Ubicación de vagonetas en las zonas de Carga Caso de Carga II
10:15 - 10:35	Toma de Datos
10:40	Apertura del tránsito

Programa de Pruebas Dinámicas

CUADRO 12. PROGRAMA DE PRUEBAS DINÁMICAS	
Hora	Ítem de Trabajo
11:00:00 a.m.	Cierre de Tránsito sobre el puente
11:10:00 a.m.	Vagonetas en movimiento. Caso de carga III Toma de Datos simultáneamente
11:30:00 a.m.	Vagonetas en movimiento. Caso de carga IV Toma de Datos simultáneamente
11:40:00 a.m.	Apertura del tránsito

Cargas aplicadas sobre el puente

Diagrama:		CUADRO 13. DIMENSIONES Y PESOS PARA PRUEBAS DE CARGA.			
					
Vagoneta		Placa N°		1	2
Dimensiones (m)	Longitud		L	151316	151430
			L1	8.20	8.20
			L2	1.40	1.30
			L3	3.10	3.20
			L4	1.30	-
	Ancho		L5	1.30	1.30
			W	1.10	1.10
			W1	2.40	2.40
			W2	2.00	2.00
			W2	0.20	0.20
Pesos (ton)	Llantas Delanteras (WF)	Izquierda	3480.00	3180.00	
		Derecha	3480.00	3180.00	
		Total	6960.00	6360.00	
	Llantas Traseras 1 (W1)	Izquierda	3860.00	-	
		Derecha	3860.00	-	
		Total	7720.00	-	
	Llantas Traseras 2 (W2)	Izquierda	3860.00	5155.00	
		Derecha	3860.00	5155.00	
		Total	7720.00	10310.00	
	Llantas Traseras 3 (W3)	Izquierda	3860.00	5155.00	
		Derecha	3860.00	5155.00	
		Total	7720.00	10310.00	
	Total			30120.00	26980.00

Condiciones de Carga

Definir las condiciones de carga en el puente es de suma importancia, ya que toda estructura posee su respectiva capacidad y sus características propias. No se puede llegar a tomar una decisión sin su análisis previo por expertos, ya que la estructura puede someterse a esfuerzos que provoquen daños y comprometan la seguridad de todos los usuarios.

El puente sobre el Río Purires se localiza en una zona de alto flujo vehicular, según las características de la estructura y análisis estructurales, el puente cuenta con una capacidad de 103 ton a flexión, 97 ton a cortante, 184 ton a compresión y 399 ton a tensión (Informe de capacidad estructural del puente sobre el río Purires, 2012).

Caso de Carga I

Corresponde a dos vagonetas de 12 metros cúbicos, cargadas de puzolana, proporcionadas por la empresa Holcim. Las dimensiones y pesos se explican en la sección de cargas aplicadas sobre el puente.

Las dos vagonetas se ubican sentido San Isidro - Cartago, la ubicación sobre el puente se ejemplifica en el apéndice 2, en la lámina 5, de las pruebas de carga sobre el puente Purires.

El caso de carga I corresponde a una condición estática, su duración es de 20 minutos sobre el puente.



Figura 40. Condición de carga I

Caso de Carga II

Se utilizan las dos vagonetas del caso I de carga, para esta condición las vagonetas se ubican una de tras de otra, en un solo carril o sentido, en la dirección de San Isidro - Cartago, con el fin de cargar un solo carril. Dicha condición corresponde igualmente a cargas estáticas y con una duración en la toma de datos de 20 minutos.

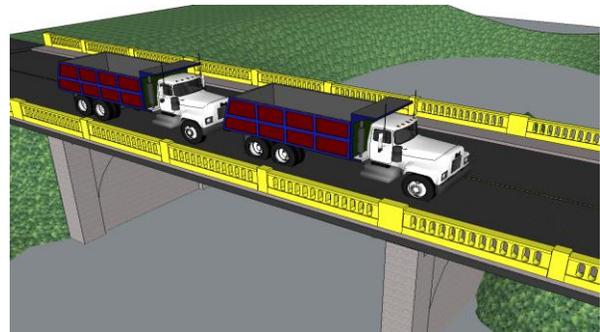


Figura 41. Condición de carga II

Caso de Carga III

Corresponde a cargas dinámicas sobre el puente, de igual manera se utilizan las vagonetas del caso I y II, por lo que sus pesos no varían.

La diferencia radica en que esta vez las vagonetas entran juntas en el puente a 40 Km/hora, sentido San Isidro - Cartago.



Figura 42. Condición de carga III

Caso de Carga IV

Condición de carga dinámica, corresponde al caso II, solo que en movimiento, las vagonetas entran al puente una de tras de otra, distanciadas aproximadamente a 5 metros, con una velocidad total de 40 km/hora.



Figura 43. Condición de carga IV

Protocolos

Los protocolos representan una herramienta útil a la hora de planificar y diseñar las pruebas de carga, eliminan los posibles errores y dan una comprensión mayor a la hora de ejecutar.

Para la realización de las pruebas de carga se diseñaron protocolos para las principales actividades, a continuación se detalla cada uno de ellos.

Protocolo de Seguridad

Las pruebas de carga tanto en su preparación como ejecución cuentan con una serie de actividades y labores, de las cuales, si no se manejan con el adecuado orden y se identifican las de mayor riesgo, podrían generar peligro tanto a los que desarrollan las pruebas como a los usuarios que utilizan el puente.

Equipo Requerido:

- Focos
- Radios
- Botas de hule
- Toallas de cloro
- Cascos de seguridad
- Chalecos reflectivos
- Anteojos de seguridad
- Arnés
- Barreras de seguridad
- Rótulos de señalización

Medidas de seguridad:

- Los encargados y participantes en las pruebas de carga deben portar identificación visible.

- Toda persona debe utilizar el equipo básico de seguridad, chalecos reflectivos, calzado adecuado y casco de seguridad.
- Para la instalación de las escaleras y de los sensores es necesario el uso de líneas de vida y arneses, junto con equipo de protección para el río.
- Las pruebas de carga de 24 horas requieren presencia policial, para el cuidado de los equipos y personal en sitio.
- Las pruebas estáticas y dinámicas requieren el cierre de las vías que comunican al puente sobre el río Purires. Dichos cierres se deben ejecutar con oficiales de tránsito en ambos sentidos para velar por el orden en el desarrollo de los mismos.
- Los cierres de vías se deben realizar al menos a 400 metros de distancia para garantizar una zona libre para la ejecución de las pruebas.
- Visitantes y participantes de las pruebas deben ubicarse en zonas previamente establecidas para velar por la seguridad de todos durante las pruebas estáticas y dinámicas.
- Durante la puesta en marcha de las pruebas dinámicas, el puente no debe contar con ninguna persona en dicha zona.

Medidas en caso de emergencias:

- Las pruebas se suspenderán en caso de presencia de algún vehículo de emergencia, se dará prioridad de paso y posteriormente se repetirá la prueba.



Figura 44. Líneas de vida y arneses de seguridad durante la prueba.

Protocolo de demarcación

El protocolo de demarcación tiene como objetivo determinar las zonas sobre el puente que se van a cargar durante las pruebas de carga.

CUADRO 14. ITINERARIO DE DEMARCACIÓN	
Actividad	Duración
Explicación de Procedimientos de demarcación.	10 min
Cierre de vías sentido Cartago - San Isidro Demarcación sentido Cartago - San Isidro. Casos I y Caso III	25 min
Cierre de vías sentido San Isidro - Cartago Demarcación sentido San Isidro - Cartago. Casos I, Caso II, Caso III	25 min
Apertura del carril.	-

Las zonas a demarcar representan las posiciones de las vagonetas que van a generar mayores esfuerzos y deformaciones sobre la estructura.

Los tiempos estimados para la demarcación de cada carril rondan los 25 minutos, a continuación se explican los procedimientos a seguir.

CUADRO 15. EQUIPO REQUERIDO		
Equipo	Cantidad	Especificaciones
Aerosol	5	Aerosoles de diferente color.
Cinta	2	Una de 15 m mínimo, Una de 5 m.
Chalecos	4	Reflectivos de seguridad.
Cascos	4	Seguridad.
Conos	13	5 en Cartago, 5 en San Isidro.
Radios	2	Regular tránsito Cartago y San Isidro
Planos de carga	1 juego	
Protocolos de Carga	2 juegos	
Moldes	4	Para la demarcación de las zonas de carga

CUADRO 16. PERSONAL REQUERIDO	
Actividad	Cantidad
Demarcación	2
Regular tránsito Cartago	1
Regular tránsito San Isidro	1

Demarcación Carril sentido San Isidro - Cartago

1. Para la demarcación del carril se requiere la colocación de conos en los dos extremos del puente, para poder delimitar las zonas de trabajo y efectuar una adecuada movilización de los vehículos. El paso de los automotores sobre el puente lo supervisarán dos oficiales de tránsito, ubicados en el lado de Cartago y San Isidro y serán los encargados de regular el paso.

La figura 45 ejemplifica la correcta forma de ejecutarlo:



Figura 45. Demarcación San Isidro - Cartago.

2. Una vez cerrado el sentido San Isidro - Cartago, se pinta sobre el pavimento las zonas de ubicación para las llantas del camión de acuerdo con las especificaciones del plano en la lámina 5, caso de carga I (ver Apéndice 3).

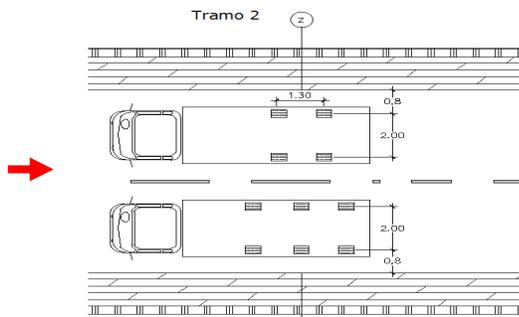


Figura 46. Pruebas Estáticas Caso de Carga I

3. Seguidamente se demarca el caso de carga III (prueba dinámica) como se indica en los planos, lamina 7. Las marcas van cada 2 metros, para coordinar y asegurar el recorrido.

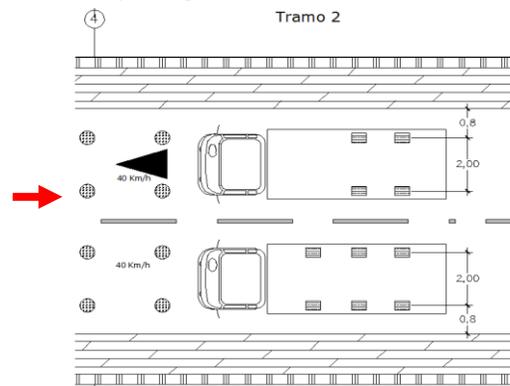


Figura 47. Pruebas Estáticas Caso de Carga III

Demarcación Carril sentido Cartago - San Isidro

1. Se efectúan los mismos procedimientos que para la demarcación del carril anterior, se utilizan conos para cerrar el carril de trabajo y dar guía a los vehículos al momento de entrar al puente. Los oficiales de tránsito siguen regulando ambos sentidos.



Figura 48. Demarcación Cartago - San Isidro.

2. Se demarcan los ejes para la vagoneta ubicada sobre dicho carril.

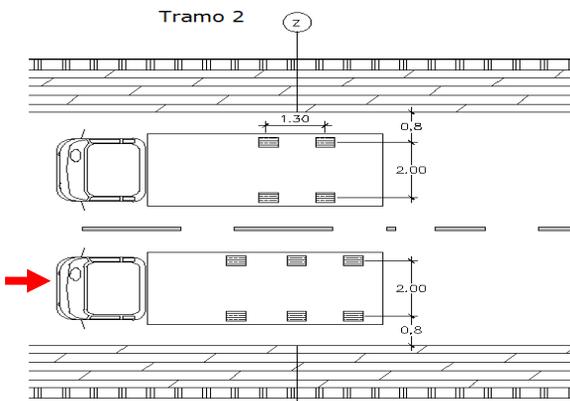


Figura 49. Pruebas Estáticas Caso de Carga I

3. Se demarcan las posiciones sobre el carril indicado para el Caso II (Prueba Estática), para

especificar colocación de las dos vagonetas espaciadas a dos metros, sobre el tramo central del puente.

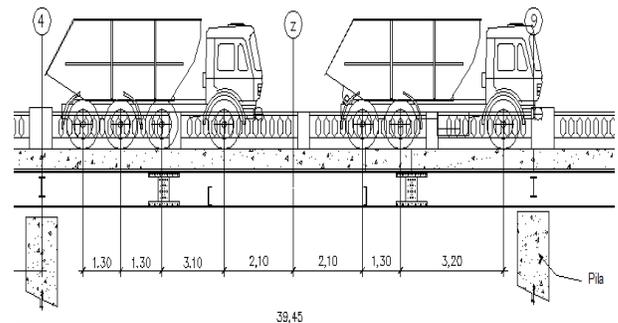


Figura 50. Pruebas Estáticas Caso de Carga II.

4. Seguidamente se realiza la demarcación del Caso III (lámina 7), misma para el Caso IV (lámina 8).

Protocolo de Pesaje de Vagonetas

El objetivo de este protocolo consiste en determinar el peso exacto en cada eje de las vagonetas a utilizar, antes de ejecutar las pruebas de carga. Esto con el fin de determinar las cargas exactas a las cuales se está sometiendo la estructura, además para el modelaje estructural.

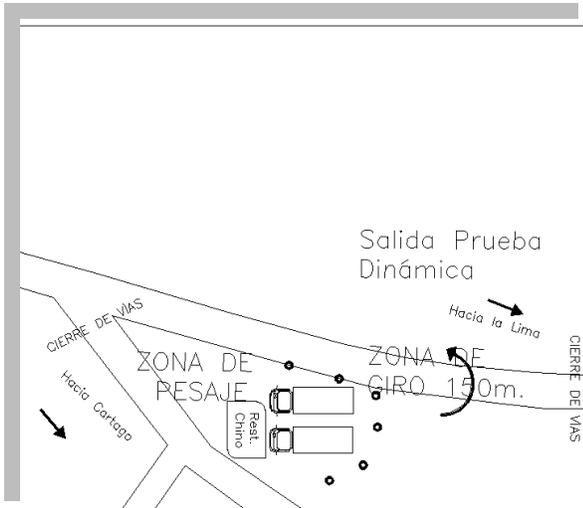


Figura 51. Zonas de pesaje.

- Demarcación de la zona de pesaje mediante conos y personal, para evitar obstrucciones a la hora del pesaje y salida de las vagonetas.
- Llegada de personal y vagonetas a las 8:30 a.m.
- Descargar y ubicar la romana en sitio designado.
- Colocar cada vagoneta en la romana y medir cada eje (WF, W1, W2, W3), anotar sus pesos en la hoja de cargas aplicadas en el puente, de igual manera se procede a medir sus dimensiones según las longitudes requeridas.

CUADRO 17. PERSONAL REQUERIDO	
Actividad	Cantidad
Descarga de equipo	6
Delimitación zona de pesaje	2
Mediciones de peso y dimensiones	1

CUADRO 18. EQUIPOS	
Actividad	Cantidad
Romana	1
Conos	10
Tabla de registro de pesos y dimensiones	1



Figura 52. Zonas de pesaje.

Protocolo de Pruebas de carga

Las pruebas de carga se dividen en dos partes, las estáticas y dinámicas, cada una de ellas importante para el análisis de la estructura.

Instalación de sensores

Se utilizaron 10 sensores de deformación ST350 ubicados en las cinco vigas principales, como se observa en la figura 53. Estos sensores se colocan en el ala superior e inferior del patín de cada una, cada sensor es conectado al Dataloger CR1000.

Para las deflexiones se utilizó el sensor SR50A, se ubica en el tramo central, específicamente en la viga D del puente. Al igual que los sensores de deformación, este se conecta al CR1000 para la recolección de datos.

Los sensores de vibración VBC se colocan en las cinco vigas principales.

Equipos y herramientas para las pruebas:

- 10 sensores ST350, 1 sensor SR50A, 5 sensores de vibración (VBC), 4 sensores VW 4420.
- Pegamento Loctite 410 black y 752.
- Computadora software RTDaq
- Fuente de poder, multímetro
- Dataloger CR1000
- Epóxico
- Varillas de metal
- Lápiz blanco
- Escuadra, nivel, cinta métrica, brocha, diluyente.

Procedimiento instalación sensores ST350:

- Previo a la instalación, las vigas se limpiaron para dejar el acero expuesto y eliminar pintura o grasa presente.
- Se marca la viga para colocar el sensor, de manera que quede centrado.
- Se aplica el pegamento y se deja sujetado el sensor a la viga por lo menos 20 segundos sin que se haga presión sobre la galga.

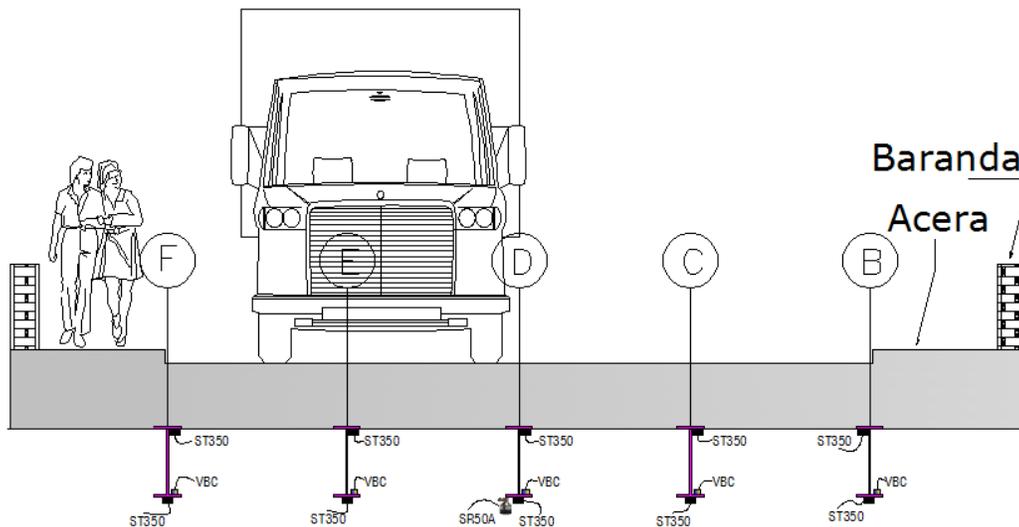


Figura 53. Ubicación de los diferentes sensores.

Procedimiento instalación sensores SR50A

- Se coloca el sensor en placas de madera y mediante prensas metálicas se une a las vigas principales W27X94.
- Se colocan en el tramo central del puente en la viga central y se conecta al CR1000, para la toma de medidas.



Figura 54. Instalación de sensor SR50A.

Detalle de Instalación de sensor VW4420

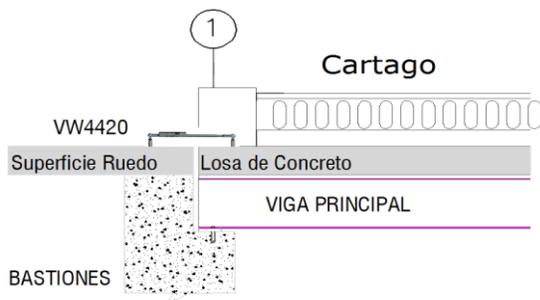


Figura 55. Instalación de sensor VW4420.

Para cada prueba de carga I, II, III y IV, se requiere:

1. Cierre de las vías.
2. Inicio del programa en el Dataloger RTDaq.
3. Calibración de sensores, al menos cinco minutos, sin que pase ningún vehículo o persona sobre el puente.

4. Colocación de vagoneta según la condición de carga a ejecutar.
5. Quitar las vagonetas sobre el puente.
6. Finalización del Programa.
7. Apertura de tránsito.

Desarrollo de las pruebas

Las pruebas de carga a ejecutar consisten en pruebas estáticas y dinámicas, cada prueba cuenta con sus respectivas mediciones y usos de los sensores. En el apéndice 3 se encuentra a detalle cada una de estas consideraciones, ubicación de sensores, mediciones a tomar, dimensiones y ubicación de las vagonetas, entre otras.

Caso I y III

El caso I corresponde a una condición estática y el caso III una dinámica, ambas vagonetas sentido San Isidro – Cartago.

La prueba dinámica se realiza a una velocidad controlada de 40 km/hora.

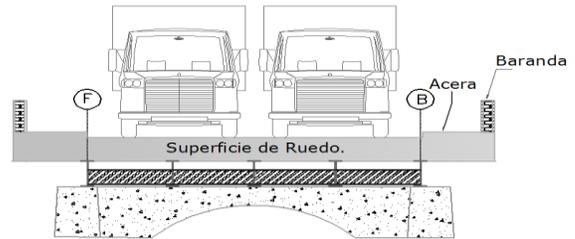


Figura 56. Casos I y III.

Caso II y IV

El caso II corresponde a una condición estática y el caso IV una dinámica, ambas vagonetas sentido Cartago – San Isidro.

La prueba dinámica se realiza a una velocidad controlada de 40 km/hora.

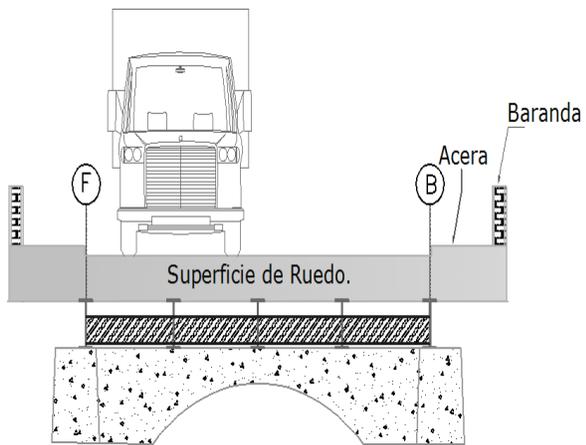


Figura 57. Casos II y IV.

Pruebas de Carga: Ejecución

El 4 de octubre del 2012 se procedió a la demarcación sobre la carpeta asfáltica de los casos de carga I, II, III y IV. Se marcaron las zonas en donde se colocaron las llantas de las vagonetas.



Figura 58. Demarcación sobre el puente Purires.

El 5 de octubre del 2012 a las 4:30 am, se sale del TEC y se llega al puente sobre el Río Purires, llega personal de eBridge y mantenimiento del TEC y se procede a la instalación del campamento e instalaciones temporales.



Figura 59. Instalación de campamento y equipos.



Figura 60. Instalación campamento.

Se implementan los protocolos de seguridad con la confesión de las líneas de vida. Además se instalan las escaleras para colocar los sensores en las vigas principales.



Figura 61. Líneas de vida.



Figura 62. Instalación de escaleras.

Una vez con los arneses y equipos de seguridad, se empieza con la limpieza de las superficies para la instalación de sensores.



Figura 63. Preparación para la instalación de sensores.

Se inicia con la instalación de los sensores de deformación ST350, en el tramo central del puente, en las cinco vigas principales.



Figura 64. Preparación para la instalación de sensores

Sobre una viga se instalan los sensores de deformación, vibración y deflexiones. La figura 65 muestra cómo quedan las vigas totalmente sensoreadas durante las pruebas de carga.



Figura 65. Viga totalmente sensoreada.



Figura 66. Tramo central del puente con sensores.



Figura 68. Dataloger CR1000.



Figura 67. Instalación de sensores en Juntas de expansión.

Los sensores de deformación, deflexión y los de juntas se conectan al Dataloger CR1000, el cual se colocó en el tramo central sobre la acera, debido a problemas de longitudes de cables.

El personal de eBridge toma las medidas de las dos vagonetas suministradas por la empresa Holcim, además se pesa cada eje, se lleva un registro y se aplicaron los protocolos previamente diseñados.



Figura 69 Pesaje de vagonetas.

Una vez instalados los sensores y comprobado su funcionamiento, se procede al desarrollo de las pruebas de carga. La figura 68 muestra la condición II.



Figura 70. Colocación de vagonetas, prueba estática

Para las pruebas dinámicas se utilizó un medidor de velocidad para comprobar que ambas vagonetas entraran a 40 Km/hora al puente.



Figura 71. Medición de velocidad de las vagonetas



Figura 72. Prueba dinámica, condición III.

Calibración del Modelo Teórico

Para la calibración del modelo teórico del programa SAP 2000, se utilizaron las mediciones de los sensores de deformación ST350 para la condición de carga del caso I. Esta condición representó el estado más crítico de esfuerzos sobre las vigas principales y es la que registró en este caso para la determinación de la carga viva real del puente.

Regresión Lineal

La relación de esfuerzos reales y teóricos corresponde a un cálculo complejo y relaciona gran cantidad de variables y fenómenos. Por eso, su cálculo requiere de procesos más complejos.

Debido a la poca cantidad de datos representativos y a las limitaciones del programa de análisis estructural (SAP 2000), el cálculo de la ecuación de calibración se efectuó mediante regresión lineal, con ajuste lineal. En este el coeficiente de correlación dicta que existe una correlación de datos media perfecta, indicando que la dependencia total entre las dos variables es proporcional y constante.

El gráfico 1 muestra la curva característica entre los esfuerzos teóricos y reales y su línea de tendencia, dicha ecuación se utilizó para la calibración de los esfuerzos resultantes del programa teórico, para la determinación de la carga viva real del puente.

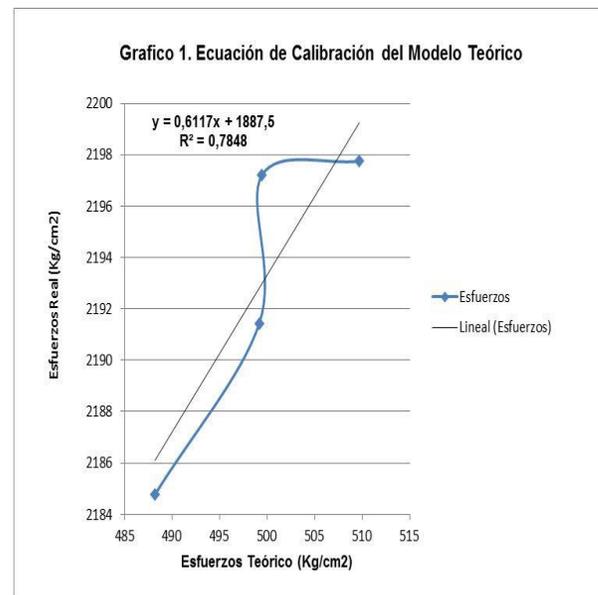
Ecuación 1. Ajuste Lineal

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$$

Ecuación 2. Coeficiente de Correlación.

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n - (m + 1)}}$$

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)^2$$



Cálculo de la carga viva

Con ayuda del programa de análisis estructural (SAP 2000) se realizaron incrementos de carga del 5%. Se evalúa únicamente la condición de carga I, ya que los esfuerzos reales en la estructura son críticos en dichas condiciones, el caso II de carga no rige para el análisis.

Con cada incremento de carga, al programa se le solicita los esfuerzos de tensión de las vigas principales W27X94. Con la ecuación de calibración del modelo teórico, los esfuerzos son corregidos y llevados a una condición real en la estructura.

Cada incremento de carga es comparado con el esfuerzo límite, estos finalizan una vez que se alcance dicho parámetro.

Una vez que se conocen las cargas en el modelo y el incremento de carga límite, se puede determinar la carga viva máxima de la estructura.

Resultados

Caso de Carga I

Las pruebas de carga efectuadas en el puente sobre el Río Purires cumplieron con el objetivo propuesto de brindar una serie de datos para su respectiva interpretación y análisis.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de carga efectuadas el 5 de octubre del 2012. Los datos obtenidos corresponden a deformaciones, deflexiones y desplazamientos en juntas.

Deformaciones

Mediante los sensores electrónicos ST350, conocidos como Strain Gages, se obtuvieron las deformaciones de cada una de las cinco vigas presentes sobre el puente. Dichas mediciones se tomaron del tramo central de la estructura, justamente en el centro del claro y con la condición de carga del caso I.

CUADRO 19. DEFORMACIONES EN LAS VIGAS PRINCIPALES CASO DE CARGA I		
Vigas	ala Superior	ala Inferior
	Deformaciones ($\mu\epsilon$)	
B	15.60	419.54
C	-272.39	907.73
D	-268.96	1057.05
E	-199.73	427.51

Fuente: Datos tomados el 5 octubre 2012, por proyecto e-Bridge.

Desplazamientos

En los desplazamientos en juntas se utilizaron sensores 4440 crackmeter, colocados en las juntas de expansión. Se colocaron cuatro sensores en cada extremo, sin embargo solo dos funcionaron en la realización de las pruebas.

CUADRO 20. DESPLAZAMIENTOS EN JUNTAS		
Prueba Estática Caso I		
Secciones		
Eje A - 1	Eje A - 12	Eje G - 1
(mm)	(mm)	(mm)
0.09	-0.32	0.15

Fuente: Datos tomados el 5 octubre 2012, por proyecto e-Bridge.

Deflexiones

Los sensores SR50A Ultrasónicos fueron los responsables en la obtención de los datos de deflexiones.

Se colocó un sensor en el tramo central, específicamente sobre el eje D, de la viga principal.

CUADRO 21. DEFLEXIONES TRAMO CENTRAL
Prueba Estática Caso de Carga I
Eje de Medición Z
Deflexión (cm)
0.95

Fuente: Datos tomados el 5 octubre 2012, por proyecto e-Bridge.

Caso de Carga II

Deformaciones

Los sensores designados corresponden a los utilizados para la medición de deformaciones los ST350, la variación corresponde al caso de carga II. Su posición sobre el puente se expresa en los planos para las pruebas de carga, apéndice 3.

Los sensores se colocaron en las vigas principales del tramo central, en el ala superior e inferior de cada una de ellas.

CUADRO 22. DEFORMACIONES EN LAS VIGAS PRINCIPALES. CASO DE CARGA II		
Vigas	ala Superior	ala Inferior
	Deformaciones ($\mu\epsilon$)	
B	-8.20	-3.75
C	-35.81	184.98
D	-49.16	441.52
E	-104.15	310.51

Fuente: Datos tomados el 5 octubre 2012, por proyecto e-Bridge.

Desplazamientos

De igual manera que para el caso I, es importante medir los desplazamientos en juntas, tomados para una condición de carga diferente y así comparar sus variaciones.

Su instalación se hizo sobre el eje A - 1, A -12 y G -1, en cada lado de la junta de expansión.

CUADRO 23. DESPLAZAMIENTOS EN JUNTAS		
Prueba Estática Caso II		
Secciones		
Eje A - 1	Eje A - 12	Eje G - 1
(mm)	(mm)	(mm)
-0.038	-0.05	-0.09

Fuente: Datos tomados el 5 octubre 2012, por proyecto e-Bridge.

Deflexiones

Los datos obtenidos para la deflexión corresponden al caso II de carga, y su proceder se realizó según se explicó para las deflexiones del caso I. Su única variante corresponde a la ubicación de las cargas.

CUADRO 24. DEFLEXIONES TRAMO CENTRAL
Prueba Estática Caso de Carga II
Eje de Medición Z
Deflexión (cm)
0.55

Fuente: Datos tomados el 5 octubre 2012, por proyecto e-Bridge.

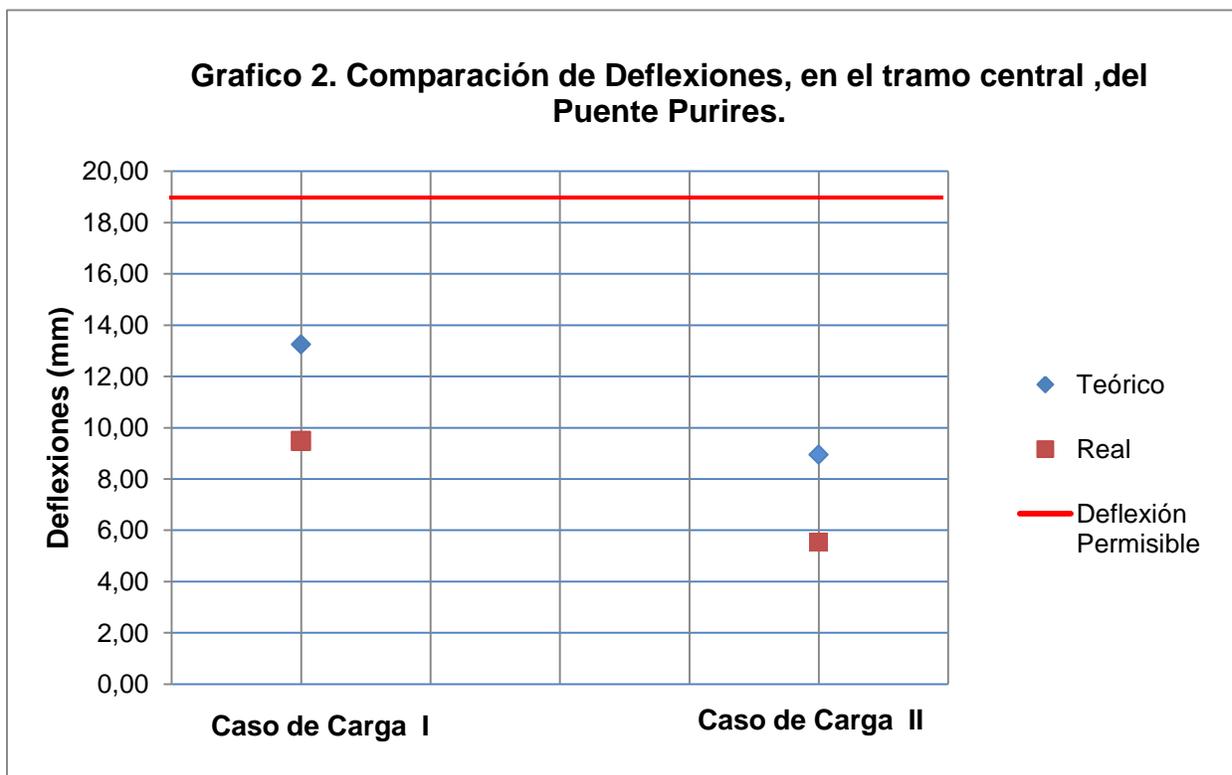
Comparación de deflexiones

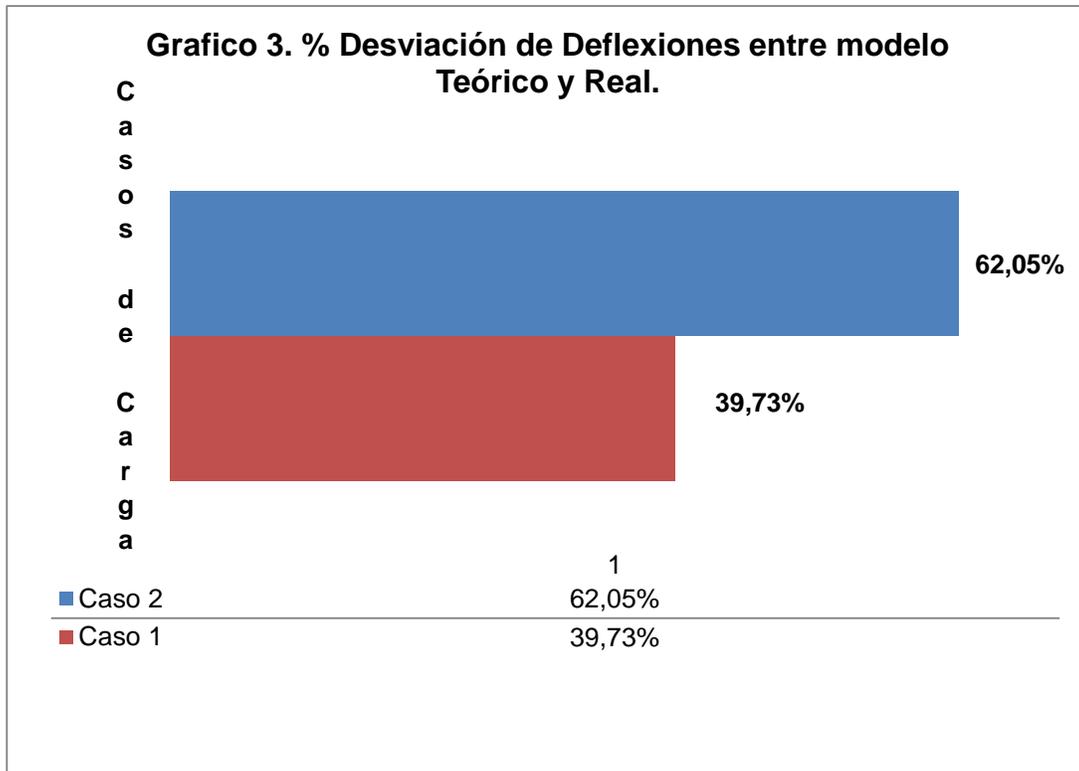
Los datos obtenidos en las pruebas de carga proporcionan los medios para la comparación y brindan información importante entre el comportamiento que tiene el puente en la realidad con el supuesto modelo teórico.

Su análisis se efectuó con el programa SAP 2000, con base en un modelo de vigas principales, diafragma y elementos rígidos (ver Apéndice 2).

En el gráfico 1 se muestran las deflexiones en milímetros, tanto del modelo teórico de SAP 2000, como las deflexiones medidas en campo, mediante los sensores ultrasonicos SR50A, de las pruebas de carga y su respectiva comparación entre ellos.

Se definió una deflexión permisible, la cual se basa en las normas AASHTO de diseño y consiste en un parametro de comparación límite. Cada deflexión es producto únicamente de las condiciones de carga, no fueron consideradas las deflexiones producto de las cargas permanentes. En el gráfico 2 se representan las desviaciones porcentuales de la deflexión entre el modelo teórico y las reales para las dos condiciones de carga I y II.





Comparación de desplazamiento

Las juntas de expansión son elementos que cumplen una función relevante en la estructura, son mecanismos que disipan la energía de las diferentes fuerzas en las que se puede someter un puente.

Para la comparación de los desplazamientos se utilizó el programa SAP 2000, pero con una modelación completa del puente, losa de concreto, bastiones y vigas (ver Apéndice 2).

El gráfico 3 muestra comparaciones de desplazamientos en juntas del puente Purires, para las dos condiciones de carga, caso I y II.

Sobre los ejes A – 1 y G – 1, dichos ejes se localizan en los extremos del puente del lado de Cartago y San Isidro, sobre las juntas de expansión, igualmente se representan los valores teóricos del modelo estructural y se compara con los tomados en campo.

El gráfico 4 provee una idea de las variaciones del modelo con lo que sucede en la realidad, dichos errores se brindan en porcentajes para cada eje y condición de carga.

Grafico 4. Comparación de Desplazamientos en juntas, del Puente Purires.

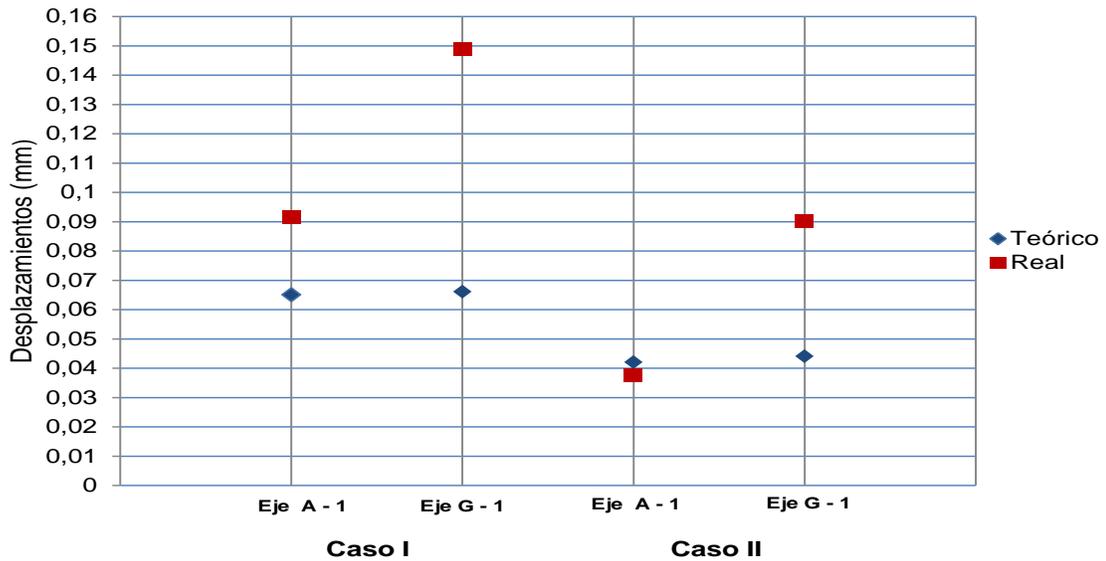
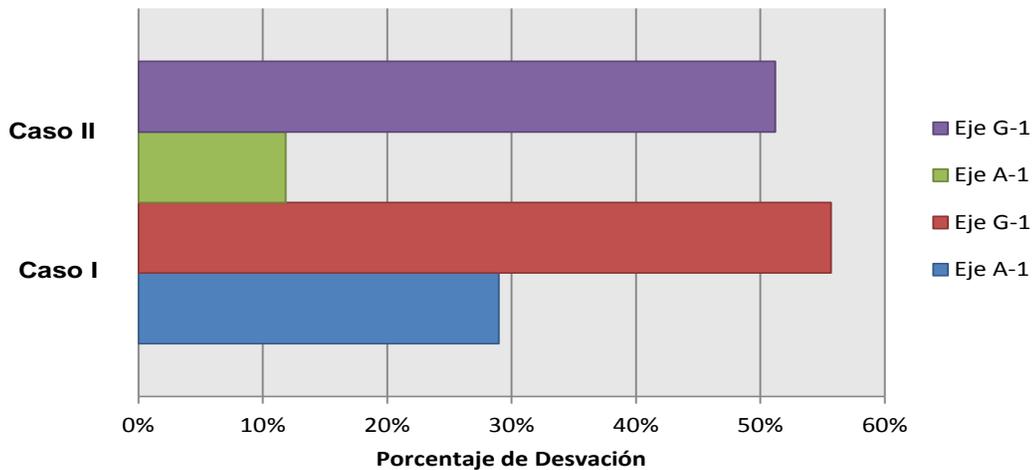


Grafico 5. % Desviación de desplazamientos en Juntas Modelo teórico y Real.



Comparación de Esfuerzos

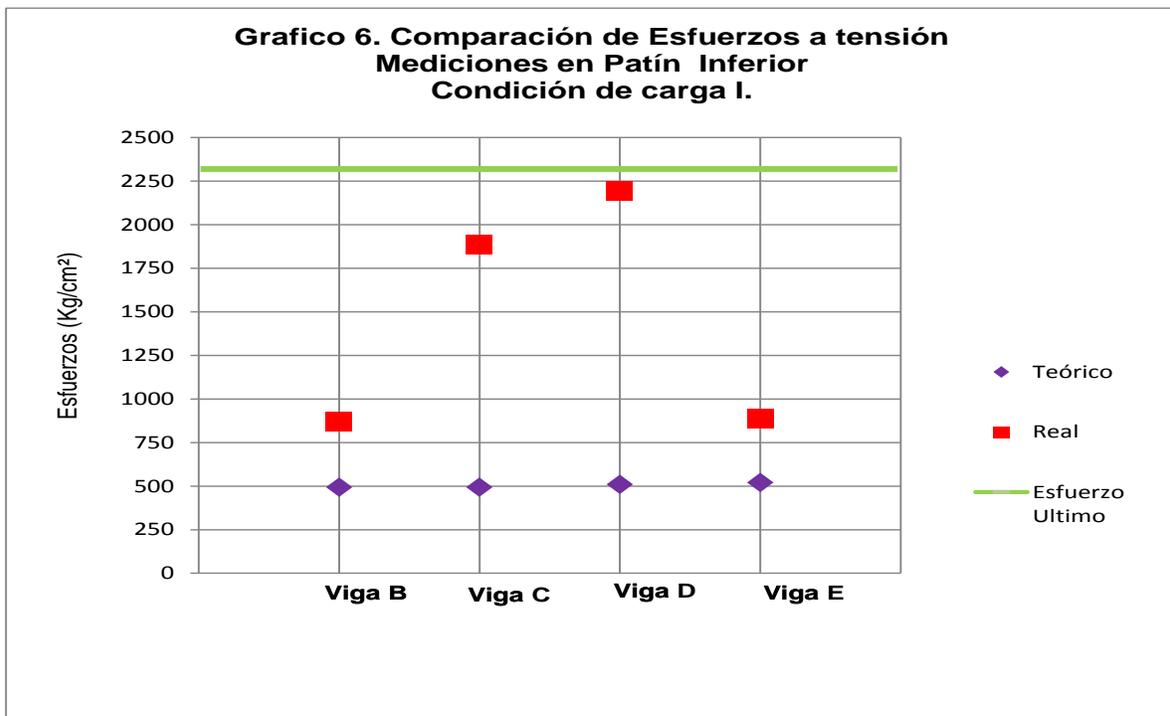
Los datos teóricos de esfuerzos se proporcionaron por el programa SAP 2000, la modelación de dicho puente se explica en el apéndice 2. Consiste en una configuración de vigas principales, diafragmas y elementos rígidos, con el fin de contar con una distribución de esfuerzos lo más real posible.

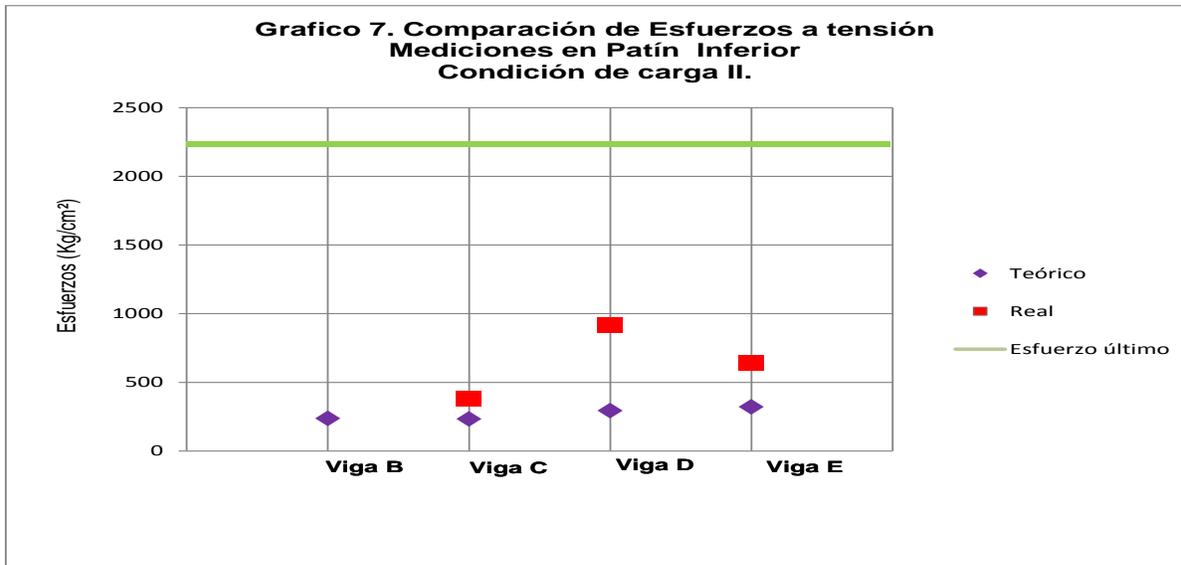
Los gráficos 5 y 6 muestran los esfuerzos presentes en las cuatro vigas principales W 27X94, sobre los ejes B, C, D, E, para las dos condiciones de carga.

Los esfuerzos que se muestran corresponden a esfuerzos de tensión medidos en el patín inferior de la viga, mediante los sensores de deformación ST350. Su comparación se hace con el modelo teórico.

El esfuerzo último corresponde al límite de fluencia del acero A33, que es el tipo de acero

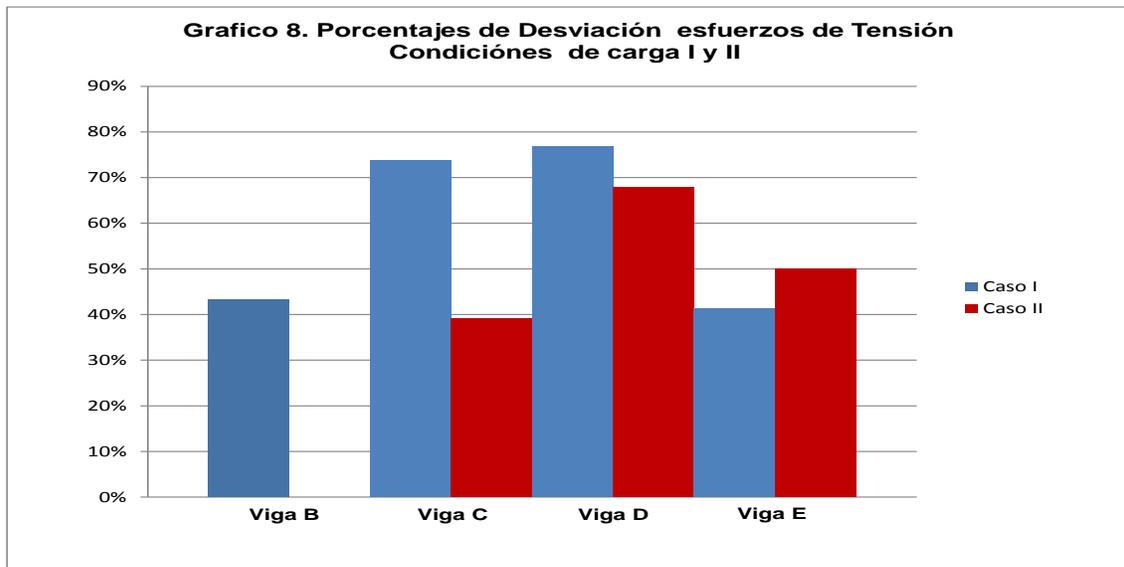
indicado en el “*Manual For Bridge Evaluation, 2011*” para construcciones realizadas en los años cincuentas y sirve como medida límite de esfuerzos a los cuales la estructura puede soportar.





El gráfico 7 muestra los porcentajes de desviación de esfuerzos entre los casos I y II, para cada viga del puente en estudio, respecto a las diferencia de esfuerzos a tensión entre el modelo teórico y real.

Para la viga B, se presentaron problemas con la instalación del sensor, y las mediciones tomadas en campo no corresponden a datos confiables, por lo que no se tomó en cuenta en el análisis.

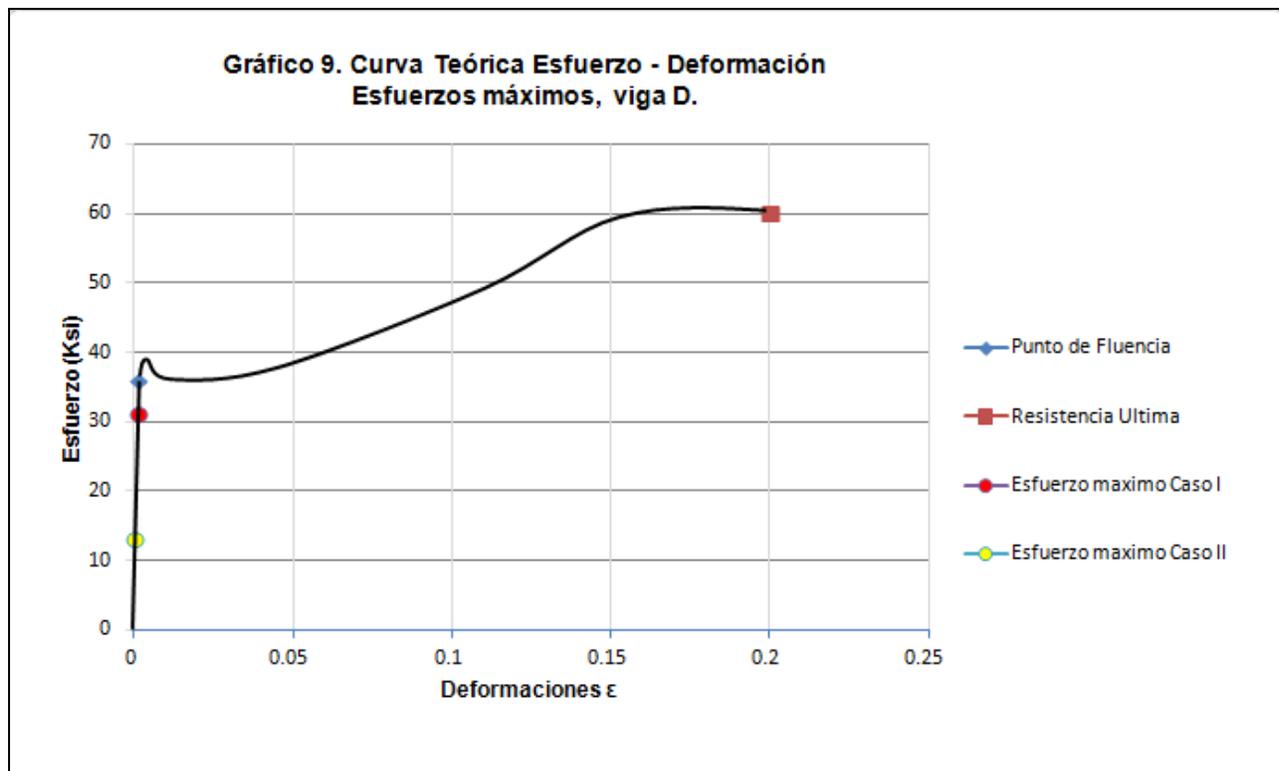


Comportamiento de las vigas Principales

Conocer el rango en que se encuentra las vigas principales (elástico o plástico), determina si el comportamiento del puente se encuentra en rangos seguros y si satisface la función para la que fue diseñado.

Mediante la curva teórica del diagrama esfuerzo – deformación del acero A36, se determinó el punto de fluencia y el de ruptura,. Se utilizó este porque el valor del modulo de elasticidad es similar al del A33. Con el fin de graficar la curva característica de dicho acero, se utiliza el acero A36, ya que el modelo de elasticidad es semejante al del A33 y sus variaciones corresponden al límite de fluencia, por lo que sirve de parámetro de comparación.

El gráfico 8 detalla las máximas sollicitaciones en términos de esfuerzos provocados en el puente para las condiciones de carga I y II, las cuales se originaron en la viga central de la estructura.



Determinación del Eje Neutro

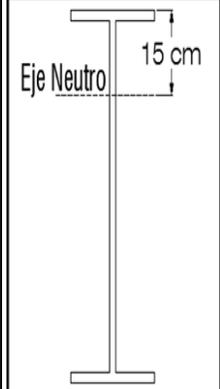
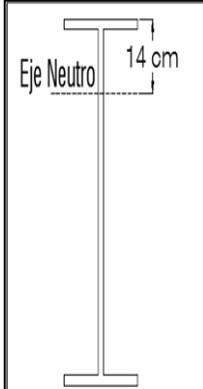
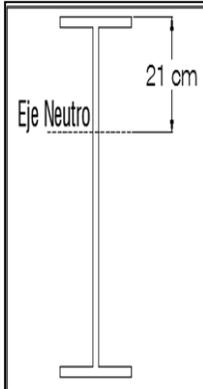
La importancia en la determinación del eje neutro radica en que por medio de su localización, se determina cuáles zonas de la viga se encuentra en compresión y cuales en tensión, y así determinar si las vigas y la losa funcionan como una sección compuesta, lo cual implica que existan conectores por cortante.

El cuadro 24 y 25 muestra la ubicación de los ejes neutros de las diferentes vigas principales W27X94 del puente.

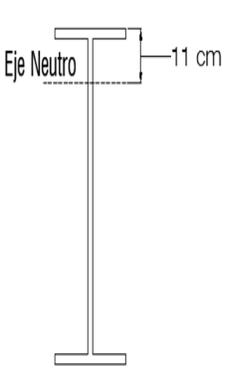
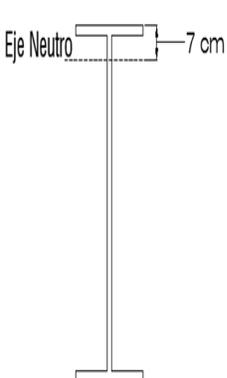
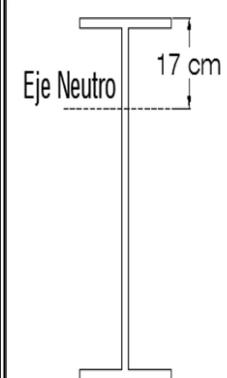
Mediante los datos de los sensores de galgas extensiométricas ST350, se determinaron las

deformaciones en cada viga, y se calcularon los esfuerzos relacionados a dichas deformaciones.

Mediante los esfuerzos de tensión y compresión, se determina el eje neutro para cada una.

CUADRO 25. DETERMINACIÓN DEL EJE NEUTRO PARA CADA VIGA DEL PUENTE, CASO I.					
Viga C, Caso de Carga I.	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Viga D, Caso de Carga I.	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Viga E, Caso de Carga I.	Esfuerzo (Kg/cm ²)
 <p>Eje Neutro 15 cm</p> <p>Viga C</p>	<p>Compresión -564,95</p> <p>Tensión 1882,64</p>	 <p>Eje Neutro 14 cm</p> <p>Viga D</p>	<p>Compresión -557,83</p> <p>Tensión 2192,32</p>	 <p>Eje Neutro 21 cm</p> <p>Viga E</p>	<p>Compresión -414,25</p> <p>Tensión 886,65</p>

CUADRO 26. DETERMINACIÓN DEL EJE NEUTRO PARA CADA VIGA DEL PUENTE, CASO II.

Viga C, Caso de Carga II.	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Viga D, Caso de Carga II.	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Viga E, Caso de Carga II.	Esfuerzo (Kg/cm ²)
 <p>Eje Neutro 11 cm</p> <p>Viga C</p>	<p>Compresión -74,28</p> <p>Tensión 383,67</p>	 <p>Eje Neutro 7 cm</p> <p>Viga D</p>	<p>Compresión -101,97</p> <p>Tensión 915,72</p>	 <p>Eje Neutro 17 cm</p> <p>Viga E</p>	<p>Compresión -216,03</p> <p>Tensión 644,00</p>

Determinación de la carga viva real

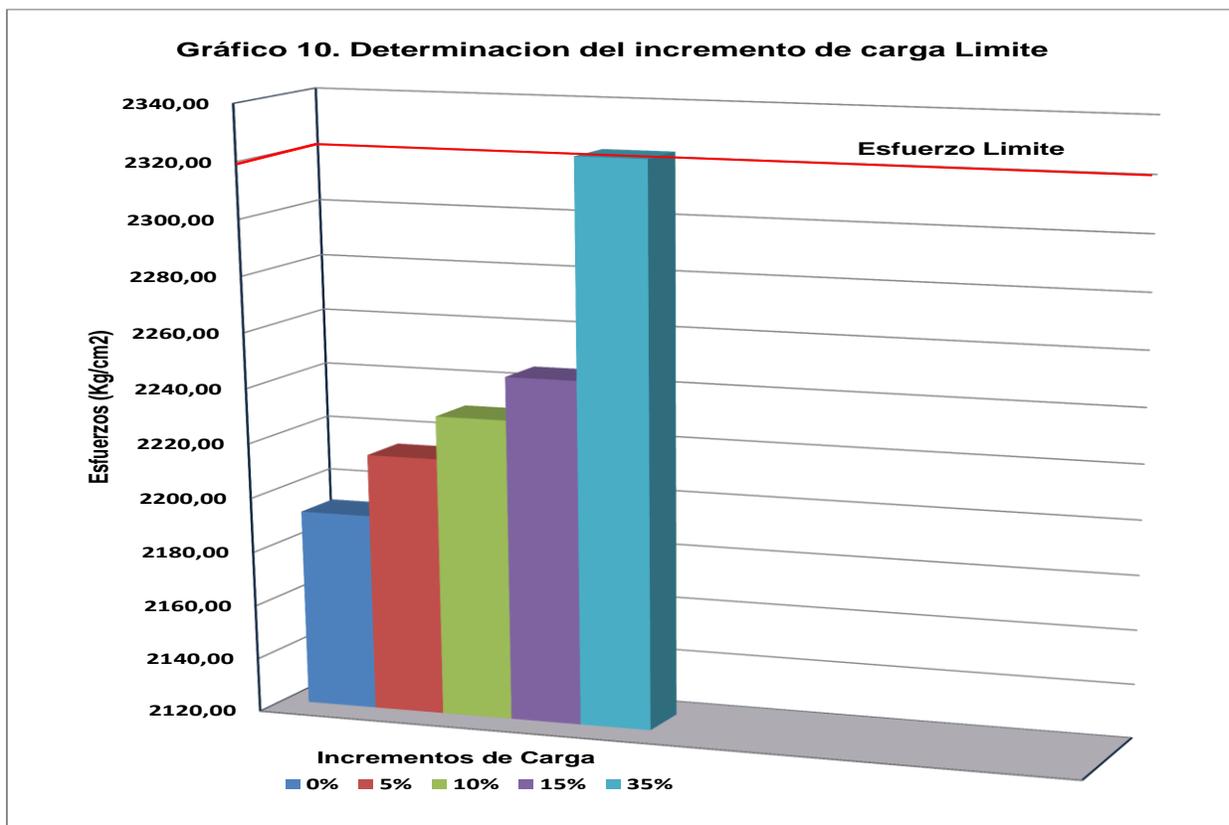
El gráfico 10 muestra los esfuerzos corregidos del modelo estructural, relacionados a incrementos de carga.

Los incrementos de carga corresponden a las dos vagonetas utilizadas en las pruebas, más porcentajes de aumento.

El esfuerzo límite corresponde a un incremento de la condición de carga I, que ocasiona una situación crítica en la estructura.

El cuadro 1 muestra la capacidad teórica de la estructura, calculada con ayuda del programa SAP2000 y el incremento de carga que induce a esfuerzos últimos en la estructura.

La reducción de capacidad teórica es la diferencia de la capacidad del puente en una condición nueva, menos la capacidad real calculada en este apartado.



CUADRO 27. DETERMINACIÓN DE LA CARGA VIVA MÁXIMA				
Condición de carga I				
Peso (ton)		Incremento Límite	Capacidad Límite (ton)	Reducción de capacidad Teórica (ton)
Vagoneta 151316	30.12			
Vagoneta 151430	26.98	35%	77.09	26
Recomendación de Carga Viva Sobre el Puente Purires				
Dos HS20 + 25%, Factor de seguridad de 1.4				

La AASHTO indica el peso del camión HS20, por lo que se verificó este valor. Luego se determinó la capacidad límite a la cual se puede llegar, para así determinar el valor de cuántos camiones HS20 soporta el puente en estudio de manera segura.

Modelo estructural del puente sobre el río Purires

Para el análisis estructural, comportamiento y para su comparación con los datos reales obtenidos en campo, fue necesaria la modelación de la estructura en el programa SAP2000, versión 15.

Se realizaron dos modelos para el análisis individual de esfuerzos y desplazamientos.

Modelaje Parcial

Para el análisis de esfuerzos se utilizó un modelo con únicamente una configuración de vigas principales W27x94 y vigas diafragma, además se utilizaron elementos sumamente rígidos, los cuales transfieren de manera eficiente las fuerzas. En dichos elementos se colocaron las cargas provenientes de las vagonetas. Los elementos rígidos solo transmiten una reacción vertical y cortante, los momentos no se transfieren, se liberaron en el modelo.

Los apoyos son tipo rodillo y articulado, que representan la realidad en campo de la estructura.

No se consideraron las pilas en el análisis de esfuerzos, ya que pueden provocar tensiones a la superestructura, además la losa de concreto en el modelo toma esfuerzos y distribuye de manera equitativa o parcial las fuerzas, por lo que no representa una modelación ideal. Su enfoque consiste en que las vigas principales se lleven en su totalidad las cargas de las vagonetas, y la única forma de que esto ocurra es que los elementos rígidos transfieran esas fuerzas.

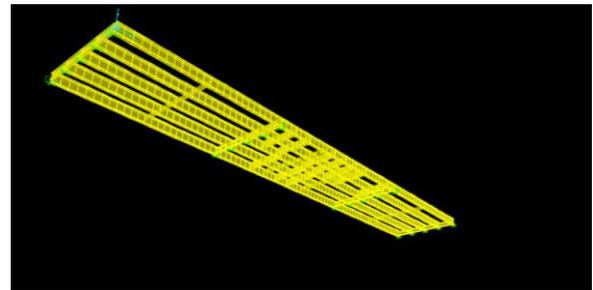


Figura 73. Modelo estructural parcial.
Fuente: Sap2000.

Modelaje total

En el análisis de los desplazamientos en juntas se utilizó el modelo en su totalidad, considerando losa, y bastiones, en conjunto con las cargas aplicadas.

La losa de concreto se modeló como sección no compuesta, según los resultados obtenidos de los sensores de deformación ST350. Las cargas son aplicadas sobre los Shell y se transfieren a las vigas principales.

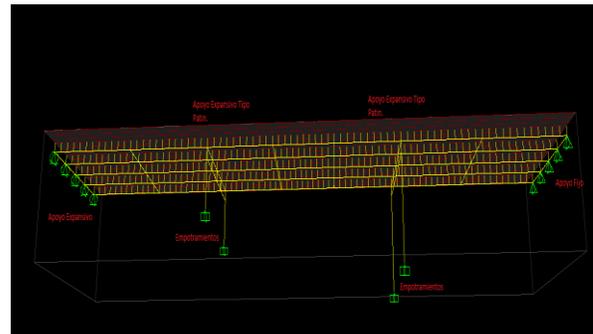


Figura 74. Modelo estructural total.
Fuente: Sap2000.

El modelo estructural cuenta con una serie de características que son importantes a considerar para la comprensión del estudio realizado en el proyecto de graduación “Metodología para la determinación de la carga viva real sobre un

puente utilizando instrumentación electrónica”. A continuación se explican detalles de la modelación.

Características de la modelación

Mediante la inspección visual, el levantamiento de planos de la estructura y conociendo sus características se empieza con la modelación en SAP2000 del Puente Purires.

Las vigas principales se introducen como secciones de W27X94 según AISC al modelo, las vigas diafragma como secciones de W16X40 y C12X20.7. El material de las vigas es un acero A33 sus características se muestran en el siguiente cuadro.

CUADRO 28. MATERIAL: ACERO A33	
Propiedades	Unidades
Peso por unidad de volumen	7849.05 kg/m ³
Módulo de Elasticidad "E"	2.074E+10 kg/cm ²
"Fy"	2320 kg/cm ²

Fuente: Sap2000

Como se muestra en la figura, los diferentes tipos de apoyo del puente Purires, estos son los encargados de transferir todo tipo de fuerza a los cimientos según su tipo. Sus características varían según los grados de libertad con que cuenta.

Del lado de Cartago su apoyo es tipo expansivo y del lado de San Isidro apoyos fijos, los bastiones cuentan con empotramientos en sus extremos.

Para el análisis de esfuerzos, lo cual corresponde a la modelación parcial, no se considera la losa de en el análisis de la estructura, ya que el programa debido a su rigidez y su poca flexibilidad para el estudio de

ciertas variables trae consigo distribuciones de esfuerzos que no corresponden a la realidad de la estructura.

El remplazo de la losa de concreto se efectúa mediante elementos rígidos sin masa, los cuales transfieren solo cargas axiales y cortantes, se restringe la transferencia de momentos mediante los releases que el programa SAP 2000 permite. Las cargas de las vagonetas se colocaron en estos elementos rígidos, específicamente en los joints de los elementos, con el fin de obtener una distribución de esfuerzos más real y que las cargas provenientes de las vagonetas lleguen efectivamente a las vigas principales del puente.

La losa de concreto y las vigas principales no se encuentran conectadas por conectores de cortante o estos son insuficientes, por lo que no funciona como sección compuesta, según los datos obtenidos de los sensores de deformación.

Para el análisis de desplazamiento se utilizó el modelaje total de la estructura. Entre sus características son que los bastiones cuentan con columnas de sección variable, y muros tipo Shell. En los cuadros siguientes se muestran las características de sus materiales.

El arco formado en el bastión cuenta con un espesor de 85 cm, tanto del lado sur como norte, en cambio los muros norte y sur tienen un espesor de 50 cm.

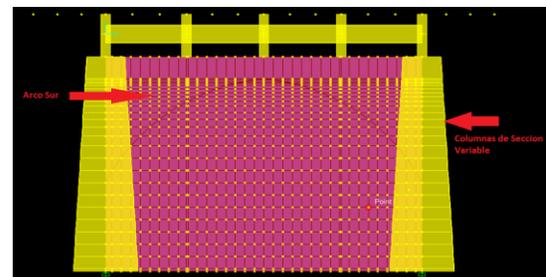


Figura 75. Modelación de muro y arco.
Fuente: Sap2000.

Materiales

CUADRO 29. TIPO DE MATERIAL: CONCRETO LOSA	
Propiedades	Unidades
Peso por unidad de volumen	2402.77 kg/m ³
Módulo de Elasticidad "E"	2.54E+09 kg/cm ²
Esfuerzo de compresión f'c	281.22 kg/cm ²

Fuente: Sap2000.

CUADRO 30. TIPO DE MATERIAL: CONCRETO PILA NORTE	
Propiedades	Unidades
Peso por unidad de volumen	2402.77 kg/m ³
Módulo de Elasticidad "E"	2.09E+09 kg/cm ²
Esfuerzo de compresión f'c	192.00 kg/cm ²

Fuente: Sap2000.

CUADRO 31. TIPO DE MATERIAL: CONCRETO PILA SUR	
Propiedades	Unidades
Peso por unidad de volumen	2402.77 kg/m ³
Módulo de Elasticidad "E"	2.09E+09 kg/cm ²
Esfuerzo de compresión f'c	176.00 kg/cm ²

Fuente: Sap2000.

Dimensiones de los elementos

Conexiones

CUADRO 32. CONEXIÓN TIPO CN-1	
Elementos	Dimensiones
Placa rectangular Inferior	25.4 x 110 x 1.1 cm
Pernos	1.9 cm
Angulares	94 x 9 cm x 1/2 in

Fuente: e-Bridge.

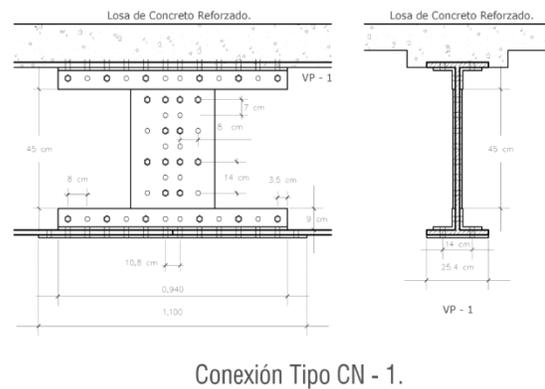


Figura 76. Conexión Tipo CN-1
Fuente: Planos Puentes sobre el río Purires.

Apoysos

CUADRO 33. APOYO AP-1	
Elementos	Dimensiones
Placa	27 x 25.5 x 4 cm
Pernos	4.1 cm

Fuente: e-Bridge.

CUADRO 34. APOYO AP-2	
Elementos	Dimensiones
Placa rect sup Apoyo	26 x 41 x 3 cm
Placa rect inf Apoyo	33 x 50 x 0.95 cm
Placa rect inf Viga	244 x 25.4 x 0.95 cm
Angulares	40 x 10 x 0.95 cm
Pernos Viga - Apoyo	1.9 cm
Pernos Viga - Angular	1.9 cm

Fuente: e-Bridge.

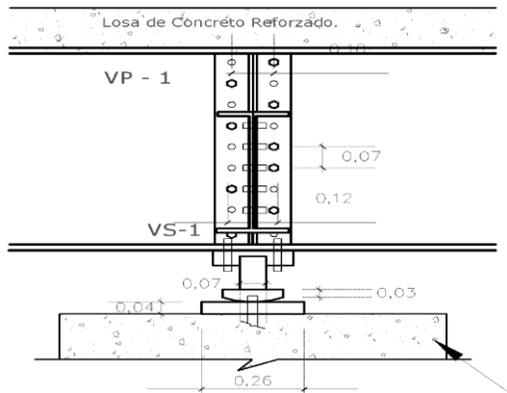


Figura 77. Apoyo Tipo AP-2
Fuente: Planos Puente Purires.

CUADRO 35 APOYO AP-3	
Elementos	Dimensiones
Placa Rectangular	25.5 x 58.5 x 4 cm
Pernos de unión en placas	1.9 cm
Pernos de unión placa - pila	2.54 cm

Fuente: e-Bridge.

CUADRO 36 APOYO AP-4	
Elementos	Dimensiones
Placa rect sup Apoyo	26 x 41 x 3 cm
Placa rect inf Apoyo	33 x 50 x 0.95 cm
Placa rect inf Viga	244 x 25.4 x 0.95 cm
Angulares	40 x 10 x 0.95 cm
Pernos Viga - Apoyo	1.9 cm
Pernos Viga - Angular	1.9 cm

CUADRO 37 APOYO AP-5	
Elementos	Dimensiones
Placa rectangular	25.4 x 58.5 x 4 cm
Pernos entre placas	1.9 cm
Pernos entre placa y pila	2.54 cm

Fuente: e-Bridge.

Vigas Principales y Diafragma

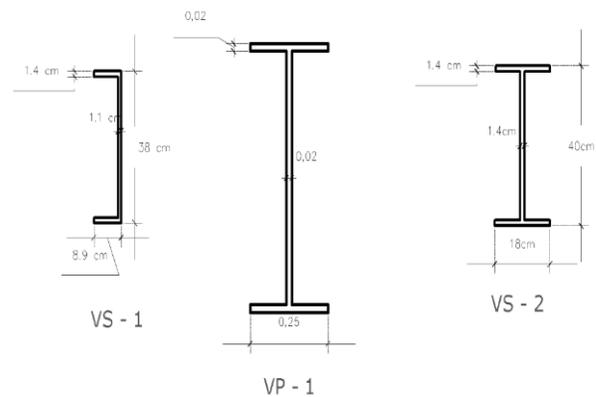


Figura 78. Tipos de Vigas
Fuente: Planos Puente Purires.

CUADRO 38 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS: VP-1	
Unidades	
Dimensiones	
Altura Exterior "d"	66.8 cm
Ancho del ala "bf"	25.4 cm
Espesor del ala "tf"	1.91 cm
Espesor del alma "tw"	2 cm

Fuente: Sap2000.

CUADRO 39 CARACTERISTICAS VS-1.	
GEOMÉTRICAS	
Dimensiones	
Altura Exterior "d"	0.377 m
Ancho del ala "bf"	0.089 m
Espesor del ala "tf"	0.0136 m
Espesor del alma "tw"	0.01 m
Tipo de Viga	C 12x20.7

Fuente: Sap2000.

CUADRO 40 CARACTERISTICAS: VS-2.	
GEOMETRICAS	
Dimensiones	
Altura Exterior "d"	0.4 m
Ancho del ala "bf"	0.180 m
Espesor del ala "tf"	0.0136 m
Espesor del alma "tw"	0.01 m
Tipo de Viga	W 16X40

Fuente: Sap2000.

Análisis de los resultados

Comparación de deflexiones

En los puentes se revisan tanto condiciones de capacidad estructural como de servicio, las deflexiones caen en esta último parámetro.

Las deflexiones pueden exceder los valores permisibles sin que haya riesgo estructural, sin embargo, con el tiempo el uso de la estructura, sumado a esta condición, se puede conducir a un estado de falla.

La condición de carga I es la que somete al puente a sus mayores deflexiones, ya que las cargas sobre la estructura se localizan en su totalidad en el centro del tramo, y alcanzan deflexiones de casi los 10 mm, en la viga central, mientras que la condición de carga II se ubica sobre un solo carril y genera deflexiones de 5.5 mm, casi la mitad del caso I.

Dichos desplazamientos verticales son menores ya que las vagonetas se localizan más cerca de las pilas y no transfieren cargas al centro de las vigas principales, sino que la llevan directamente a los apoyos. Esto implica que al cargar un carril con vagonetas distanciadas alrededor de los dos metros, las fuerzas se distribuyan equitativamente entre los apoyos y vigas, de manera que no provocan solicitaciones máximas. Esto conduce a que el cortante aumente en dichas zonas, sin embargo no representan condiciones críticas.

Este comportamiento concuerda con el esperado y verifica que los sensores tomaron medidas correctas.

Además de los datos suministrados por los sensores SR50A, el modelaje parcial de la estructura dicta que las deflexiones esperadas exceden a las tomadas en campo.

Para el caso I se miden desplazamientos verticales de 13 mm, sobre la viga del eje D, mientras que para el caso 2 alrededor de 9 mm. Las variaciones entre el modelo teórico y real alcanzan valores entre el 62% y 40% para dichos casos.

Esta diferencia se explica con base en la modelación efectuada, ya que esta busca trasladar las cargas de manera más efectiva a las vigas principales, y trae consigo aumentos en los esfuerzos y deflexiones.

Una limitante en el análisis de las deflexiones es el programa SAP 2000, este considera la estructura nueva en su totalidad y la transferencia de cargas las realiza de forma óptima e ideal. En la realidad, la estructura posee deflexiones implícitas, producto de las cargas permanentes y vivas a lo largo de su vida útil, imposibles de medir, además cuenta con corrosión, deformaciones en las vigas y apoyos no cuantificadas, de manera que para una correcta comparación se debe utilizar un programa que permita el modelaje de estas variables.

Las deflexiones son producto de una condición de carga sobre el puente, el determinar la deflexión total es imposible de cuantificar ya que no se midió el nivel del puente al terminar su construcción, ni se tiene referencia de algún punto que proporcione una ubicación correcta.

La deflexión permisible en la viga central del puente es de 18.65 mm siendo un parámetro de comparación para determinar si las condiciones de carga aplicadas en la estructura provocan deflexiones aceptables. Como se observa en el gráfico 1, ninguna de las condiciones de carga alcanzan los límites y satisfacen su uso, no obstante, por la incapacidad de medir las deflexiones ya existentes no se puede asegurar que la estructura cumple hasta obtener más mediciones en campo para llegar a comprobar la funcionalidad del puente.

Comparación de Desplazamientos en juntas

Se utilizaron tres sensores para medir los desplazamientos en las juntas, sin embargo solo se hizo la comparación de dos, aquellos en donde existen apoyos tipo rodillo, los cuales cuentan con capacidad para desplazarse horizontalmente. Como se mencionó anteriormente, los datos teóricos se obtuvieron del modelaje total.

Como se observa en la gráfica 3, para el caso I, el comportamiento real de desplazamientos en ambas juntas no es proporcional pues hay diferencias entre ejes de hasta 0.06 mm, lo cual no coincide con el comportamiento ideal mostrado por el modelo.

Las variaciones encontradas radican en la instalación de los sensores crackmeter 4420, ya que deben estar perfectamente nivelados para que tomen lecturas correctas. Sin embargo, debido a los asentamientos en el eje G-1, existen desniveles entre la superestructura y la carretera, de manera que los datos de dicho sensor no pueden ser representativos. Además, se muestra un desacople de la losa de concreto con la viga principal, que genera movimientos en el momento

de colocar las cargas en el puente, mismos que se ven reflejados en el sensor.

En el caso II, para el eje A-1 se observa similitud respecto al modelo teórico, mientras que el eje G-1 presenta variaciones con el modelo superiores al 50%.

Ambas condiciones de carga no provocan desplazamientos horizontales que llegan a afectar a la estructura.

Un análisis más amplio y representativo se puede obtener de la aplicación de cargas de sismo a las juntas de expansión, donde sea posible valorar el comportamiento y funcionamiento ante tal condición.

Comparación de Esfuerzos a tensión

Según el gráfico 5, los esfuerzos a tensión teóricos para el caso de carga I son de 500 kg/cm² para todas las vigas, esto indica que el modelo distribuye las cargas de forma equitativa. Sin embargo, realmente las vigas C y D toman esfuerzos de 1800 kg/cm² y 2200 kg/cm² respectivamente, es decir, les corresponden los esfuerzos cercanos al esfuerzo último de 2320 kg/cm². Mientras que para las vigas de los extremos se tienen valores entre 750 kg/cm² y 1000 kg/cm², por lo que realmente no existe una distribución homogénea de esfuerzos para el puente analizado.

Los esfuerzos para el caso de carga II alcanzan valores máximos en la viga central de 915 kg/cm², muy por debajo del esfuerzo límite, y solamente para la viga C se observa concordancia con los esfuerzos teóricos.

Dichos resultados evidencian los problemas de configuración estructural en el puente, producto de falta de mantenimiento y los daños provocados por tránsito continuo que se traducen en la distribución de esfuerzos que

dependen de la ubicación de las cargas en las diferentes vigas. De esta forma, se encuentran variaciones de esfuerzos para el caso I del 40% al 75% y para el caso II, del 40% al 70%.

El programa SAP 2000 es ampliamente utilizado en diseño estructural y modela condiciones ideales y estructuras en óptimas condiciones, la dificultad radica en la imposibilidad de incluir variables que tomen en consideración las pérdidas de sección, la corrosión, los asentamientos, desacoples entre viga y losa, apoyos que no transfieren de forma adecuado las fuerzas entre otros, de forma que se pueda obtener un modelo teórico más coherente con el estado real del puente.

Debido a la configuración del modelo estructural, en el que no se contempla la losa de concreto, los esfuerzos de tensión igualan a los de compresión. De esta manera, no es representativo, para una verificación en campo, realizar el análisis considerando esfuerzos a compresión.

El modelaje parcial representa mejor las condiciones en sitio, debido a que los resultados obtenidos del modelo completo provienen de una distribución no equitativa de los esfuerzos entre las vigas, y además la losa de concreto toma esfuerzos de compresión, disminuyendo los de tensión. La limitante del programa de análisis estructural radica en simular condiciones congruentes con la distribución real de los esfuerzos.

Comportamiento de las vigas principales

Cualquier estructura sometida a esfuerzos en el rango elástico debe ser capaz de deformarse y volver a su estado original en condiciones de uso normal, y para un puente no es la excepción.

Para ambos casos analizados la Viga central (Viga D) es la que cuenta con los máximos valores de esfuerzos. Se observan mayores solicitaciones para la condición de carga en donde las vagonetas se ubicaron en el centro del tramo, situación que no se presenta en donde únicamente se carga un carril en el puente.

La condición crítica de carga I, que considera únicamente los efectos de las cargas vivas, alcanza valores de esfuerzos de 2190 kg/cm^2 , inferior al valor límite establecido por la AASHTO de 2320 kg/cm^2 . De esta manera se evidencia una estructura con esfuerzos cercanos a la fluencia, mientras que para el caso de carga II se alcanza un esfuerzo cercano a los 915 kg/cm^2 . Se garantiza entonces para ambas condiciones que las deformaciones asociadas a tales esfuerzos se encuentran en el rango establecido y por tanto su comportamiento debe obedecer a condiciones elásticas.

Mediante inspecciones en campo se observó que el tramo central (aproximadamente 15 m) no presenta daños de corrosión en las vigas principales, por lo que los elementos de sección W27X94 no muestran afectaciones de capacidad estructural, tal como sí ocurre en los elementos cercanos a los apoyos.

El inconveniente cerca de los apoyos radica en pérdidas de sección, por lo que las deformaciones son evidentes. Estas zonas son de vital importancia puesto que se encargan de transferir las fuerzas de las vigas a los cimientos, de manera que a falta de conocimiento de deformaciones en estos puntos, no es posible asegurar que si el tramo central del puente soporta las cargas sin alcanzar esfuerzos críticos, también lo hará en los elementos extremos, pues estos no tendrán la misma capacidad.

Las vigas en estas zonas pueden experimentar los mayores esfuerzos, por lo que para una mejor comprensión se deben colocar sensores en diferentes ubicaciones de la viga

para lograr determinar las variaciones de esfuerzos según las condiciones en las que se encuentra.

Eje Neutro

El eje neutro define el funcionamiento de las vigas principales y la losa de concreto, al categorizarlas como sección compuesta o como elementos individuales.

Es común que la viga y la losa se encuentren unidas por conectores de cortante que los definen como un solo elemento y aumentan su capacidad de resistencia (sección compuesta).

Para la condición I, las vigas principales no toman de manera homogénea los esfuerzos a tensión, ya que entre los elementos C, D y E se observan diferencias que van desde los 300 kg/cm² hasta los 1300 kg/cm², para los esfuerzos de compresión rangos entre los 415 kg/cm² y los 565 kg/cm². Las zonas de tensión y compresión son indicadores de tres condiciones: que no existen conectores por cortante en la estructura, que estos son insuficientes o que se encuentran tan distanciados que no llegan a cumplir su función. Por esto, el funcionamiento estructural entre la losa y las vigas principales es característico de sección no compuesta, donde los esfuerzos de tensión y compresión son equivalentes en magnitud, sin embargo no lo es dado que la losa de concreto sí llega a tomar esfuerzos de compresión.

Las variaciones en la ubicación del eje neutro para las distintas vigas se deben a que la cantidad de carga tomada por cada elemento no es equitativa, por la configuración y los daños en la estructura

En el caso II se muestran menores esfuerzos de tensión y compresión, los valores son cercanos a 1500 kg/cm² en la viga C y 1200 kg/cm² en la viga D. Además se observa una

disminución de esfuerzos de compresión entre los 460 kg/cm² y los 490 kg/cm².

Se evidencia entonces la relación existente entre la ubicación de carga y los esfuerzos provocados en la estructura, de tal forma que debe existir una configuración que genere estados críticos de esfuerzos para análisis de otros fenómenos.

Debido al comportamiento estructural entre las vigas y la losa de concreto, la modelación en el software utilizado se cambio, de una sección compuesta a un modelo que no contara con conectores por cortante, por lo que la losa se ubico en el centro de las vigas principales, con el fin de simular la condición real en la estructura.

Carga Viva Real

El modelo estructural teórico no contempla condiciones en sitio, tales como deformaciones, deflexiones, corrosión, pérdidas de sección, asentamientos, entre otros aspectos de importancia vital para la correcta evaluación de la capacidad del puente. El programa utilizado no permite incluir dichas variables, por lo que imposibilita la obtención de resultados exactos a pesar del esfuerzo por simular estas condiciones reales mediante modelados parciales y totales.

Con los datos obtenidos en campo y los teóricos brindados por el modelo, es posible determinar una ecuación lineal de ajuste con un coeficiente de correlación $R^2=0.78$. La relación obtenida no es la más representativa debido a que solamente se pueden extraer cuatro datos del análisis del modelo y no hay capacidad de asociar tales esfuerzos a tiempos de aplicación de cargas, como sí se hace en las pruebas de campo.

Los esfuerzos límites en la estructura corresponden a los de fluencia del acero ASTM

A-33 con $f_y=2320 \text{ Kg/cm}^2$, con este parámetro como referencia se aplican incrementos de carga del 5% en el modelo estructural y se observan, mediante la corrección de esfuerzos del modelo teórico, valores de 2215 Kg/cm^2 para el 5% y de 2310 Kg/cm^2 para un aumento de carga del 35%. De esta manera, la estructura tiene capacidad para soportar las dos vagonetas de casi 60 toneladas más un incremento del 35% donde la viga en el tramo central tomaría esfuerzos cercanos al límite establecido por la AASHTO en el manual de evaluación de puentes.

No obstante, las vigas podrían tener mayor capacidad si el tipo de acero posee un límite de fluencia mayor, aunado al fenómeno de endurecimiento por deformación, en donde el material soporta mayores esfuerzos asociados a deformaciones cercanas al punto de ruptura del material. La limitante se debe a que no se conoce el tipo de acero de las vigas principales W27X94 y solo se basó en la recomendación de la AASHTO.

Al determinar el incremento de carga límite (35%) se obtiene una capacidad de 77 toneladas en el tramo central del puente para la viga crítica (Viga D), esto traducido a las cargas estándar en el diseño de puentes para Costa Rica, donde rige el HS20 + 25%, con ejes de 28 toneladas cada uno, el puente Purires tiene la capacidad de soportar dos HS20 + 25% en el tramo central bajo una condición de carga similar al caso I, con un factor de seguridad de 1.4.

Cabe destacar que la capacidad estructural no se puede generalizar pues se desconocen propiedades del acero de los elementos, además de que durante las pruebas de carga solo se evaluaron dos condiciones, solo se colocaron sensores en el tramo central y el análisis únicamente incluye las pruebas estáticas,

de manera que pueden existir variaciones con las dinámicas o al analizar otros tramos del puente.

Conclusiones y Recomendaciones

- La condición de carga I (las vagonetas en el tramo central del puente) provoca las mayores solicitaciones de deflexiones y desplazamientos en juntas.
- Las condiciones de carga I y II no alcanzan las deflexiones permisibles de 18.65 mm, considerando únicamente las cargas vivas aplicadas sobre la estructura.
- Las cargas aplicadas sobre el puente no afectan la estructura en términos de desplazamiento en juntas, para obtener datos más representativos las juntas deberían someterse a fuerzas de sismo para comprobar su funcionalidad.
- Los desplazamientos horizontales presentan variaciones de más del 50%. Entre los dos ejes en estudio A-1 y G-1, su discrepancia se debe a la instalación del sensor Crackmeter 4420.
- Para ambos casos de carga, el modelo teórico distribuye los esfuerzos de forma homogénea sobre toda la estructura, aunque realmente el puente tiende a cargar más las vigas centrales y someterlas a mayores esfuerzos que las de los tramos extremos.
- La repartición desequilibrada de esfuerzos se debe al uso continuo y la falta de mantenimiento en el puente, que han provocado deficiencias en el desempeño estructural de la superestructura.
- Los modelos estructurales parcial y total no proporcionaron los medios para la comparación de esfuerzos a compresión, debido a las limitantes del programa.
- Las desviaciones entre el modelo teórico y datos reales de esfuerzos abarcan un rango entre 40%-77%.
- El esfuerzo máximo lo alcanza la viga central (Viga D) con 33 Ksi para la condición del caso I, por lo que las vigas principales responden a un comportamiento elástico producto de las cargas vivas.
- El comportamiento de la losa y las vigas principales corresponde al de sección no compuesta, por lo que existe un faltante total o parcial de conectores por cortante sobre la estructura.
- SAP 2000 no cuenta con herramientas necesarias para la evaluación de puentes, no permite el modelaje de las condiciones reales, por lo que no brinda confiabilidad en sus resultados.
- El incremento de carga que alcanza valores cercanos al de fluencia 2320 Kg/cm² en la viga central corresponde al 35% del caso de carga I.
- El tramo central del puente cuenta con capacidad de soportar dos HS 20 + 25%,

bajo una condición de carga I, y con un factor de seguridad de 1.4.

- Se debe analizar el puente bajo configuraciones que consideren ubicaciones diferentes de cargas, en los tres tramos de la estructura.
- La capacidad de carga encontrada en el estudio realizado corresponde únicamente al tramo central bajo condiciones similares a las de la configuración del caso I y en condiciones estáticas.
- Es necesario, mediante más estudios sobre el puente, determinar las deflexiones generadas por las cargas permanentes y temporales que han ocurrido en el transcurso de su vida útil, para valorar si sobrepasan las deflexiones permitidas de diseño.
- Para determinar el límite de fluencia real en el acero de las vigas principales, se debe realizar pruebas en el acero, tales como pruebas de tracción.
- Es necesario contar con un programa que relacione el tiempo y los esfuerzos producto de cargas vivas, para efectuar un ajuste preciso del modelo teórico con los datos en campo.
- Se debe velar por la adecuada instalación de los sensores de deformación ST350, estos deben ubicarse exactamente debajo del alma y completamente alineados, para que estos no midan esfuerzos en otras direcciones.
- Debido a que las vigas son continuas, es importante determinar más puntos por sensorear, tales como otros en el tramo central y ceca de los apoyos, para medir las variaciones ante la aplicación de cargas.

Anexos

Anexo 1: Información General del proyecto de investigación e-Bridge.

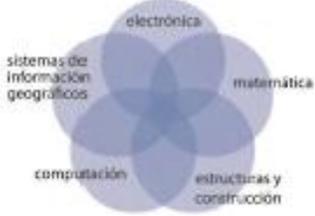
Anexo 1: Información General del proyecto de investigación e-Bridge.



Predicción remota de fallas en puentes
Proyecto Multidisciplinario



TEC Tecnología de Costa Rica

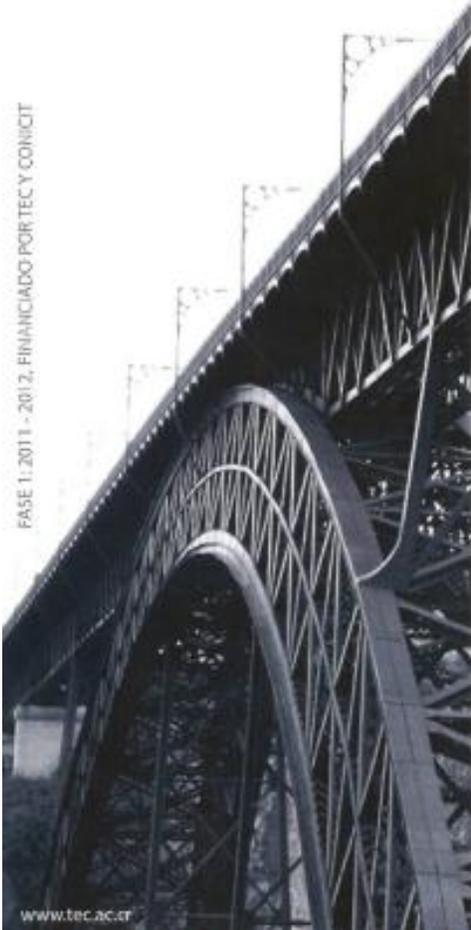


Objetivo General
Generar capacidad de predicción de fallas de puentes realizando el diseño, desarrollo e implementación de un modelo de confiabilidad estructural que se alimente a partir de una red inalámbrica de sensores.

Problemática en Costa Rica

- Poca inversión de recursos para mantenimiento.
- Recursos humano poco capacitado.
- Falta de Claridad en políticas de inversión.
- Falta de sistemas de información para la toma de decisiones.

ebridgetec@gmail.com



FASE 1: 2011 - 2012. FINANCIADO POR TEC Y CONICIT

www.tec.ac.cr

Apéndices

Apéndice 1: Inspección visual del puente sobre el Río Purires, mediante el manual de inspección de puentes del MOPT.

Apéndice 2: Planos de pruebas de carga, condición estática y dinámica.

Apéndice 3: Datos de pruebas estáticas condición de carga I, mediciones de deformación, desplazamiento en juntas y deflexiones.

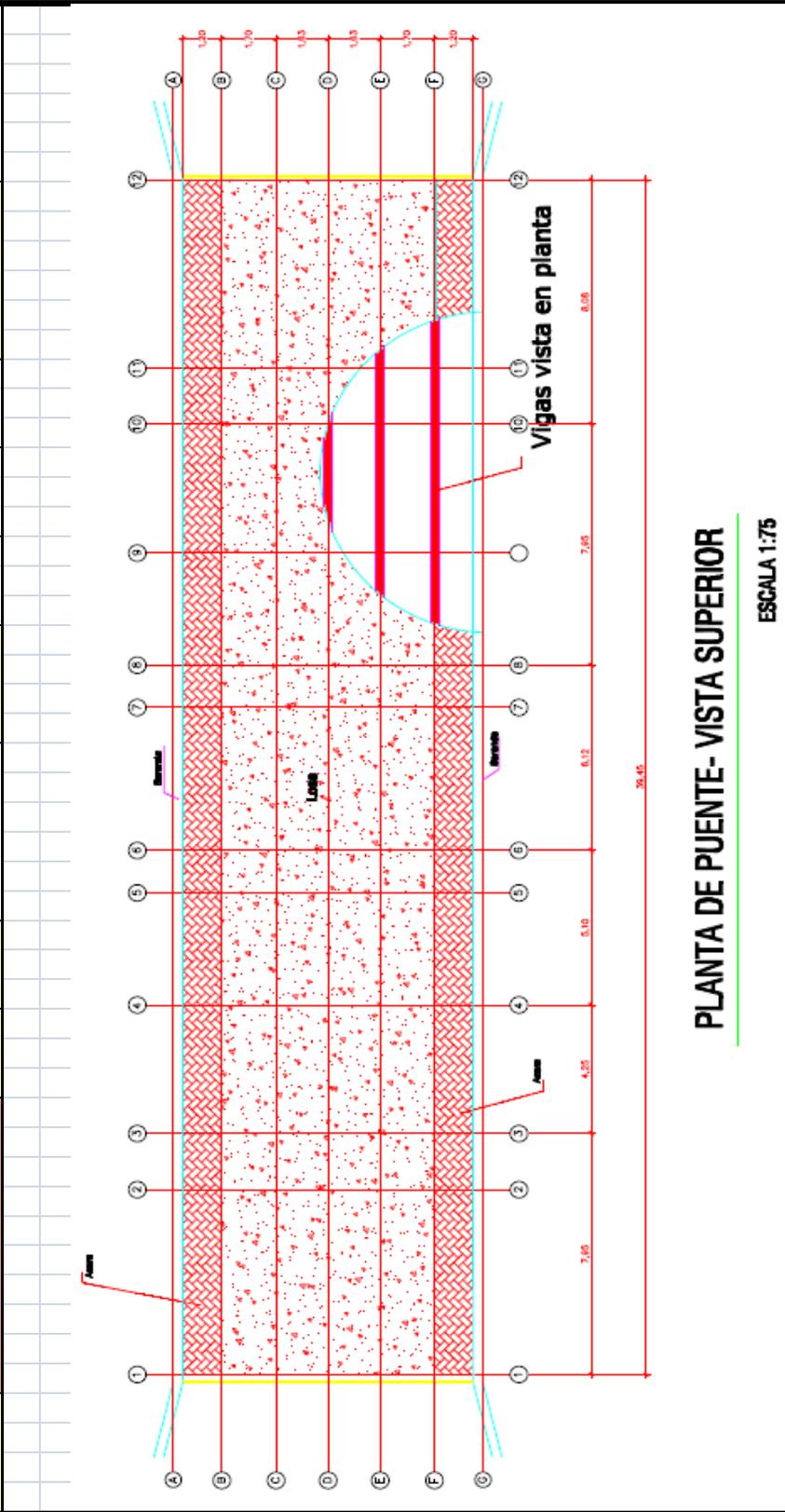
Apéndice 4: Datos de pruebas estáticas condición de carga II, mediciones de deformación, desplazamiento en juntas y deflexiones.

- **Apéndice 1**
Inspección visual del puente
sobre el río Purires.

NOMBRE DEL PUENTE		Puente Río Purities		PROVINCIA		Cartago		ADMINISTRADO POR		MOPT		DIA		MES		AÑO																																							
No. DE LA RUTA	2	CLASIFICACION	1	LOCALIDAD	CANTON	El Guarco	LATITUD NORTE	9	50	2,98	FECHA DE DISEÑO																																												
KILOMETRO			km	DISTRITO	San Isidro	LONGITUD ESTE	-83	57	5,43	FECHA DE CONCLUSION DE CONSTRUCCION	LN																																												
ELEMENTOS BASICOS																																																							
DIRECCION DE LA VIA HACIA	Ambos sentidos		ANCHO TOTAL		9,600		m		CALZADA		6,660		m																																										
TIPO DE ESTRUCTURA	1		ITEMS		2		3		4		5		6		7																																								
CARGA VIVA	9		W(m)		0,270		1,200		3,330		1,200		0,270																																										
LONGITUD TOTAL	39,45		m		H(m)		0,820		-		0,130		-		0,820																																								
ESPECIFICACION	LN																																																						
No. DE SUPER ESTRUCTURA	1																																																						
No. DE TRAMOS	3																																																						
No. DE SUB ESTRUCTURA	4																																																						
LONGITUD DE DESVIO	No		km																																																				
PENDIENTE LONGITUDINAL (*)	13		%																																																				
FECHA DE ULT. PINTURA	DIA		MES		AÑO																																																		
SERVICIOS PUBLICOS	1		agua potable		3		-																																																
	2		red de datos		4		-																																																
CRUZA SOBRE	1		Puentes																																																				
	2																																																						
TIPO	1																																																						
PAVIMENTO	ORIGINAL		mm																																																				
ESPESOR	SOBRECAPA		mm		85																																																		
AÑO	-		Year																																																				
CONTEO DE TRAFICO	TOTAL DE VEHICULOS		-		Car																																																		
	% DE VEHICULOS PESADOS		-		%																																																		
RESTRICCIONES	POR CARGA		LN		t																																																		
	POR ALTURA		N.A		m																																																		
	POR ANCHO		6,7		m																																																		
DIMENSIONES																																																							
CLARO LIBRE																																																							
<table border="1"> <tr> <td>ALTURA LIBRE VERTICAL</td> <td colspan="2">SUPERIOR</td> <td colspan="2">-</td> <td colspan="2">m</td> <td colspan="2">W.A PROX</td> <td colspan="2">6,7</td> <td colspan="2">m</td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="2">INFERIOR</td> <td colspan="2">-</td> <td colspan="2">m</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="6"></td> </tr> </table>																		ALTURA LIBRE VERTICAL	SUPERIOR		-		m		W.A PROX		6,7		m									INFERIOR		-		m													
ALTURA LIBRE VERTICAL	SUPERIOR		-		m		W.A PROX		6,7		m																																												
	INFERIOR		-		m																																																		
ANTECEDENTES DE INSPECCION																																																							
<table border="1"> <tr> <td>DIA</td> <td>MES</td> <td>AÑO</td> <td>INSPECTOR</td> <td>TIPO DE INSPECCION</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>LN</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>*</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>*</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>*</td> </tr> </table>																		DIA	MES	AÑO	INSPECTOR	TIPO DE INSPECCION					LN					*					*					*													
DIA	MES	AÑO	INSPECTOR	TIPO DE INSPECCION																																																			
				LN																																																			
				*																																																			
				*																																																			
				*																																																			
ANTECEDENTES DE REHABILITACION																																																							
<table border="1"> <tr> <td>DIA</td> <td>MES</td> <td>AÑO</td> <td>ELEMENTOS</td> <td>RESUMEN DE CONTRAMEDIDAS</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>LN</td> </tr> </table>																		DIA	MES	AÑO	ELEMENTOS	RESUMEN DE CONTRAMEDIDAS					LN																												
DIA	MES	AÑO	ELEMENTOS	RESUMEN DE CONTRAMEDIDAS																																																			
				LN																																																			
OBSERVACIONES																																																							
LN Información no encontrada																																																							
N.A No Aplica																																																							
Las vigas fueron construidas en 1942																																																							
(*) La pendiente al centro del puente.																																																							

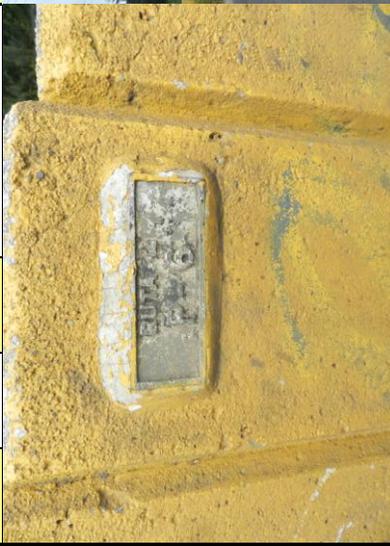
NOMBRE DEL PUENTE	Puente Río Puríes		LOCALIDAD	PROVINCIA	CANTON	Cartago	ADMINISTRADO POR	MOPT				DIA	MES	AÑO
	2	CLASIFICACION						1	9	50	2,98			
KILOMETRO			km											
No. DE ESTRUCTURA	No. DE TRAMOS	ALINEACION DE PLANTA		MATERIALES	SUPERESTRUCTURA	TIPOS	LONGITUD TOTAL	TRAMO MAXIMO	No. DE PRINCIPALES	ALTURA	FECHA DE CONCLUSION DE CONSTRUCCION			
		3	Recto											
1	3			Acero	Continua	Tipo 1	39,90	m	5	0,68				m
2								m						m
3								m						m
4								m						m
5								m						m
6								m						m
7								m						m
8								m						m
9								m						m
10								m						m
No. DE ESTRUCTURA	TIPO DE JUNTAS DE EXPANSION		LOSA			CARACTERISTICAS DE PINTURA								
	UBICACION INICIAL	UBICACION FINAL	MATERIALES	ESPESOR	TIPO DE PINTURA	AREA PINTADA	FECHA DE ULT. PINTURA			EMPRESA ENCARGADA				
1	Abierta	Abierta	Concreto	m	LN	m2								
2				m		m2								
3				m		m2								
4				m		m2								
5				m		m2								
6				m		m2								
7				m		m2								
8				m		m2								
9				m		m2								
10				m		m2								

NOMBRE DEL PUENTE	Puente Río Purites		PROVINCIA	CARTAGO	ADMINISTRADO POR	MOPT			DÍA	MES	AÑO
	2	CLASIFICACION				1	9	50			
Nº. DE LA RUTA			CANTON	El Guarco	LATITUD NORTE	9	57	5,43	Aprox. 1950		
KILOMETRO			DISTRITO	San Isidro	LONGITUD ESTE	-83			FECHA DE CONCLUCION DE CONSTRUCCION		
LN											



PLANTA DE PUENTE- VISTA SUPERIOR

ESCALA 1:75

NOMBRE DEL PUENTE		Puente Río Purites		PROVINCIA		CANTON		DISTRITO		MOPOT		FECHA DE DISEÑO		FECHA DE CONCLUCION DE CONSTRUCCION		DIA		MES		AÑO		
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
No. DE LA RUTA	2	CLASIFICACION	1	LOCALIDAD	Cartago	El Guarco	San Isidro	ADMINISTRADO POR	LATITUD NORTE	9	50	2,98	APROX. 1950									
KILOMETRO			km						LONGITUD ESTE	-83	57	5,43	LN									
No.	1	UBICACION	Rotulo		No.	2	UBICACION	Superficie de Rodamiento		No.	3	UBICACION	Vista General									
																						
NOTA																						
No.	4	UBICACION	Vista lateral viga principal		No.	5	UBICACION	Vista inferior		No.	6	UBICACION	Vista cause del rio									
																						
NOTA																						
No.																						
																						
NOTA																						
No.																						

NOMBRE DEL PUENTE	Puente Río Paríes		LOCALIDAD	PROVINCIA	CANTON	DISTRITO	Cartago	ADMINISTRADO POR	MOPT		DIA	MES	AÑO
	2	CLASIFICACION							1	9			
KILOMETRO			km				San Isidro	LONGITUD ESTE	-83	57	5,43	LN	FECHA DE CONCLUSION DE CONSTRUCCION
TIPO DE DAÑO Y EVALUACION DEL GRADO DEL DAÑO													
1. PAVIMENTO	ITEM EVALUACION	1. ONDULACION	2. ZURCOS	3. AGRIETAMIENTO	4. BACHES	5. SOBRECAPAS DE ASFALTO	5						1. Juntas de expansión obstruidas por el Concreto Asfáltico
2. BARANDA (ACERO)	ITEM EVALUACION	1. DEFORMACION	2. OXIDACION	3. CORROSION	4. FALTANTE								2. El Acero de refuerzo en losa no se encuentra expuesto, pero se detecto una corrosión saliendo de las grietas
3. BARANDA (CONCRETO)	ITEM EVALUACION	1. AGRIETAMIENTO	2. ACERO DE REFUERZO EXPUESTO	3. FALTANTE									3. Las juntas de expansión genera relleno, grietas en el concreto asfáltico, en el resto del pavimento no se aprecian grietas importantes
4. JUNTA DE EXPANSION	ITEM EVALUACION	1. SONIDOS EXTRANOS	2. FILTRACION DE AGUAS	3. FALTANTE O DEFORMACION	4. MOVIMIENTO VERTICAL	5. JUNTAS OBSTRUIDAS	5						4. No se puede aun determinar el numero de sobrecapas, pero se observa al menos una mas.
5. LOSA	ITEM EVALUACION	1. GRIETAS EN UNA DIRECCION	2. GRIETAS EN DOS	3. DESCASCARAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	5						5. Vigas Principales con alto Grado de oxidación en los apoyos, en el resto del tramo se observa comienzo de oxidación en algunos puntos. En los apoyos existe disminución de sección
6. VIGA PRINCIPAL DE ACERO	ITEM EVALUACION	1. OXIDACION	2. CORROSION	3. DEFORMACION	4. PERDIDA DE PERNOS	5. GRIETAS EN SOLDADURA O PLACA	2						6. En los sistemas de demaje su longitud no es la apropiada, ocasiona alto grado de corrosión a la sección
7. SISTEMA DE ARRIOSTRAMIENTO	ITEM EVALUACION	1. OXIDACION	2. CORROSION	3. DEFORMACION	4. ROTURA DE UNIONES	5. ROTURA DE ELEMENTOS	2						7. Estudio de apoyos: tomado en dirección Cartago- San Isidro. 1. Alta filtración, disminución de sección, altos desplazamientos. 2. Apoyos centrales con desplazamientos importantes (3 de ellos). 3. Apoyos nivelados y sin desplazamientos, apoyos cercanos no cumplen su función. 4. Presenta altas deformaciones, Disminución de sección, altos desplazamientos, altas filtraciones.
8. PINTURA	ITEM EVALUACION	1. DECOLORACION	2. AMPOLLAS	3. DESCASCARAMIENTO									8. Se necesita hacer pruebas para medir la socavación, con equipo especializado
9. VIGA PRINCIPAL DE CONCRETO	ITEM EVALUACION	1. GRIETAS EN UNA DIRECCION	2. GRIETAS EN DOS	3. DESCASCARAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	4						9. Se necesita determinar los desplazamientos en el superestructura y las pilas
10. VIGA DIAFRAGMA CONCRETO	ITEM EVALUACION	1. GRIETAS EN UNA DIRECCION	2. GRIETAS EN DOS	3. DESCASCARAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	4						10. Juntas de Construcción se pueden observar filtraciones
11. APOYOS	ITEM EVALUACION	1. ROTURA DE APOYOS	2. DEFORMACION EXTRAÑA	3. INCLINACION	4. DESPLAZAMIENTO								11. Determinar los servicios publicos que pasan en la parte inferior del puente
12. PARED CABEZAL Y ALETONES (BASTÓN)	ITEM EVALUACION	1. GRIETAS EN UNA DIRECCION	2. GRIETAS EN DOS	3. DESCASCARAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	5						
13. CUERPO PRINCIPAL (BASTÓN)	ITEM EVALUACION	1. GRIETAS EN UNA DIRECCION	2. GRIETAS EN DOS	3. DESCASCARAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	4						
14. MARTILLO (PILA)	ITEM EVALUACION	1. GRIETAS EN UNA DIRECCION	2. GRIETAS EN DOS	3. DESCASCARAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	4						
15. CUERPO PRINCIPAL (PILA)	ITEM EVALUACION	1. GRIETAS EN UNA DIRECCION	2. GRIETAS EN DOS	3. DESCASCARAMIENTO	4. ACERO DE REFUERZO	5. NIDOS DE PIEDRA	4						
EVALUACION													
										GRADO DEL DAÑO	SOCAVACION		
										1	Ningún daño visible		Sin Socavación
										2	En pocos lugares		Tendencia a socavarse
										3	En muchos lugares		Socavación no peligroso
										4	En menos de la mitad		Socavación peligroso
										5	En la mayoría de las partes		Condición de Emergencia
										FECHA	INSPECCION	NOMBRE DE INSPECTOR	FIRMA
										24	8	2011	Oswaldo Cubero/ Pablo Tames

- **Apéndice 3:** Planos de Pruebas de carga, condición estática y dinámica.

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

PROYECTO e-BRIDGE

Pruebas De Carga Estáticas y Dinámicas



Puente Piloto: Provincia de Cartago, Entrada de San Isidro del Guarco, Carretera Interamericana, Ruta 2, Sobre Río Puríres.
 Latitud 9° 50' 2.98" : Longitud -83° 57' 5.43"

OBJETIVOS:

Objetivo General:

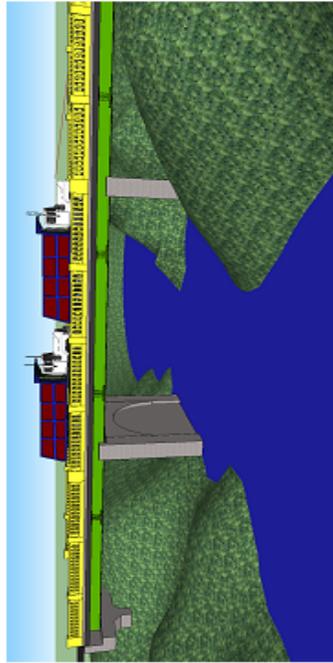
- 1) Comprender el comportamiento estructural del puente ante las cargas aplicadas.

Objetivos Específicos:

- 1) Determinar deformaciones, desplazamientos en juntas, desplazamientos verticales en vigas y aceleraciones asociadas con las cargas aplicadas.
- 2) Determinar la capacidad del puente con base en resultados.
- 3) Evaluar condiciones de resistencia y servicio del puente.

	RESPONSABLE:	CONTENIDO: PRESENTACIÓN OBJETIVOS	FECHA: 05/10/12	ESCALA: INDICADA	LAMINA:
PROYECTO: PRUEBAS DE CARGA.		IMAGEN DEL PUENTE PILOTO UBCACION DEL PUENTE PILOTO			1

GENERALIDADES



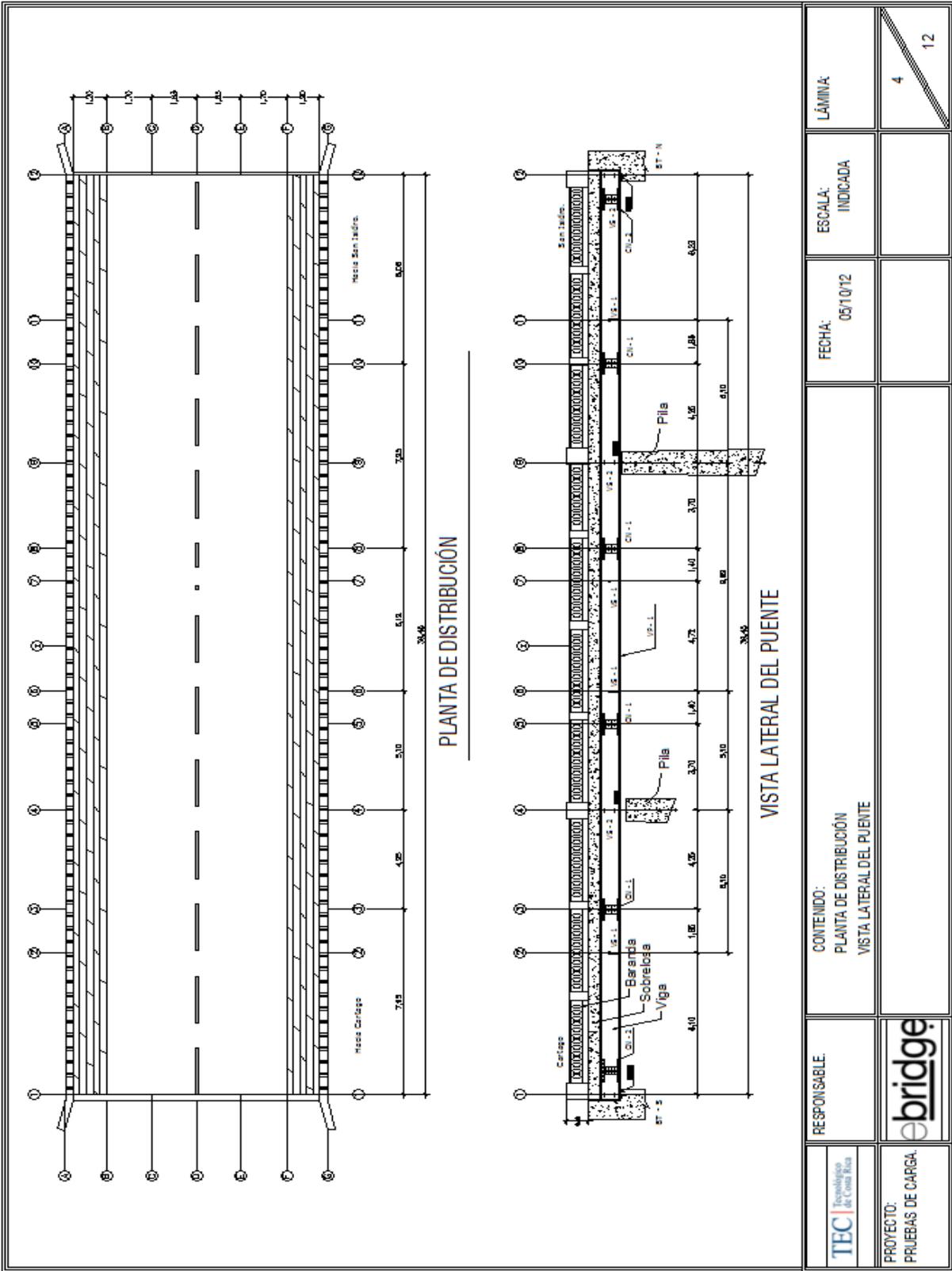
CARACTERÍSTICAS:

Fecha aprox. Construcción: 1950
 Dirección de la vías: Ambos sentidos
 Longitud Total: 39,45 m
 Ancho Total: 9,6 m
 Ancho Superficie de Ruedo: 6,6 m
 N° Superestructuras: 1
 N° Tramos: 3
 N° Sub Estructuras: 4
 Tipos de Juntas de Expansión: Abiertas
 Pilas y Bastiones: Concreto
 Tipo de Apoyos: Fijos y Expansivos
 Composición Estructural: Vigas Principales y diafragmas de acero, con tablero de concreto reforzado
 Configuración Estructural: Vigas continuas

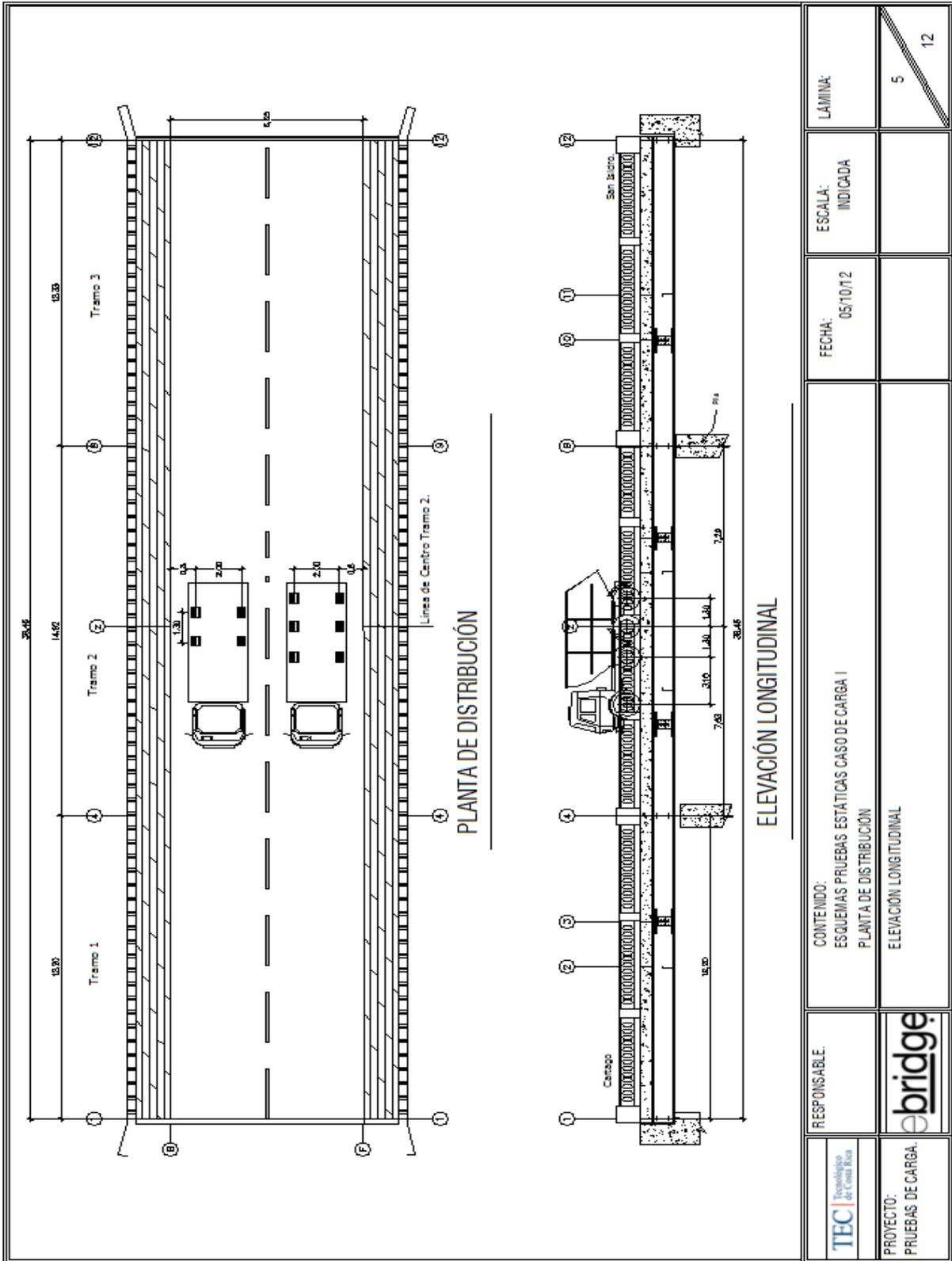
Modelo General Pruebas.

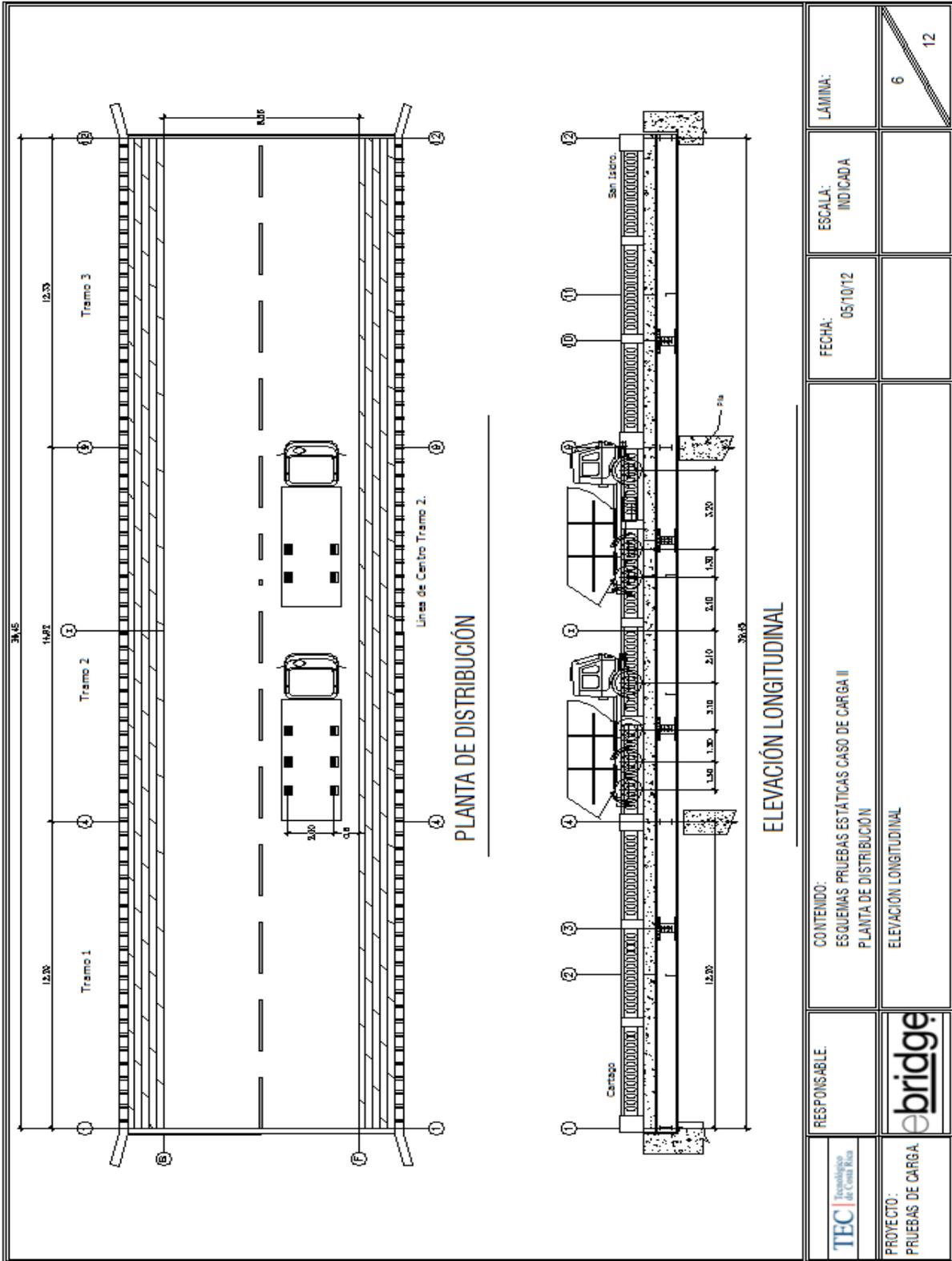
CONTENIDOS			
Tipo de Prueba	Mediciones a realizar	Casos de carga	Duración de la prueba
Estáticas	Deformaciones, desplazamientos y deflexión.	Caso I - Caso II	20 min cada una
Dinámicas	Deformación, desplazamientos, aceleración.	Caso III - Caso IV	10 min cada una
	Deformación, aceleración, conteo vehicular.	Caso V	24 horas

	RESPONSABLE:	CONTENIDO:		FECHA:	ESCALA:	LAMINA:
		CARACTERÍSTICAS GENERALES MODELO GENERAL	05/10/12	INDICADA	2	12
PROYECTO: PRUEBAS DE CARGA						

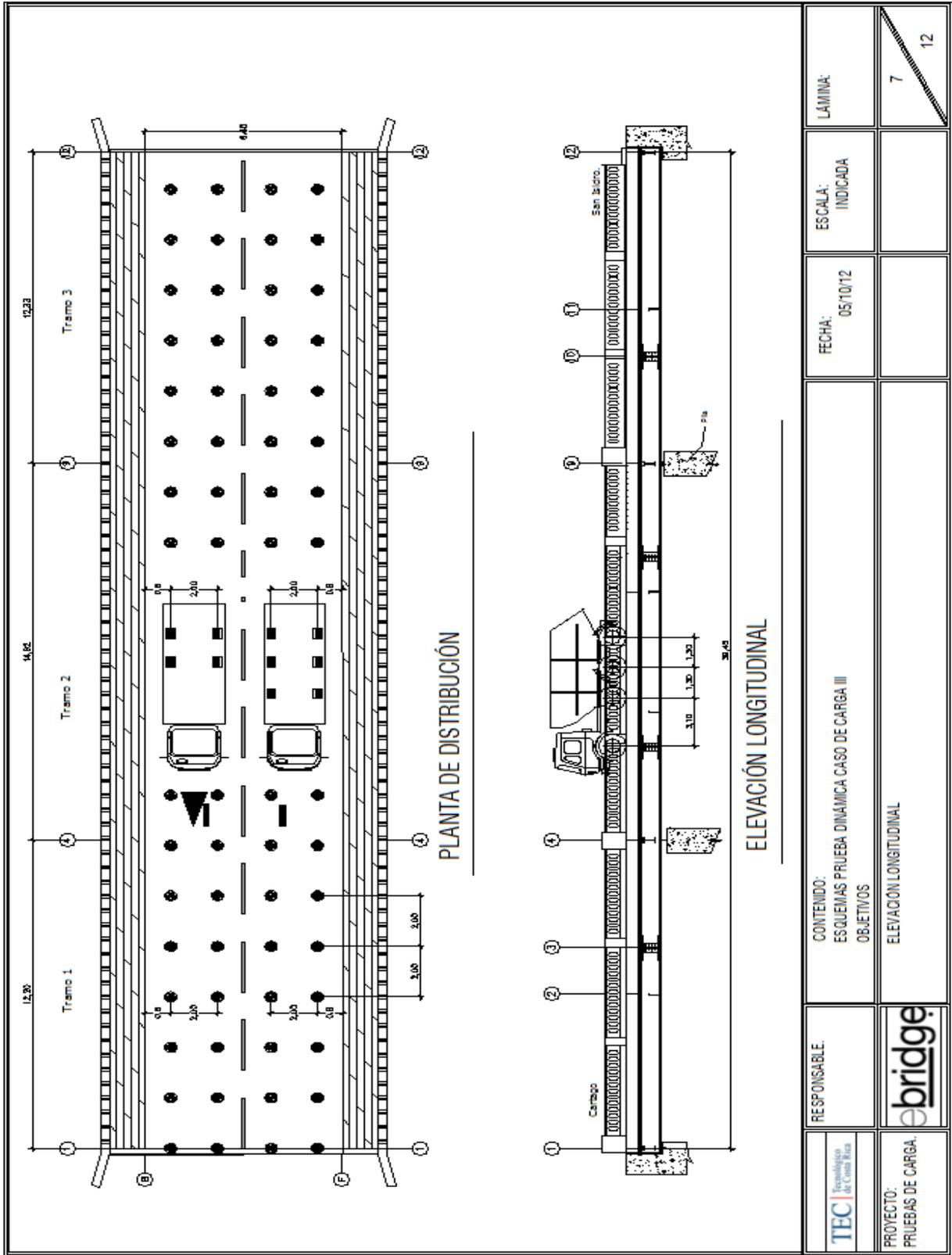


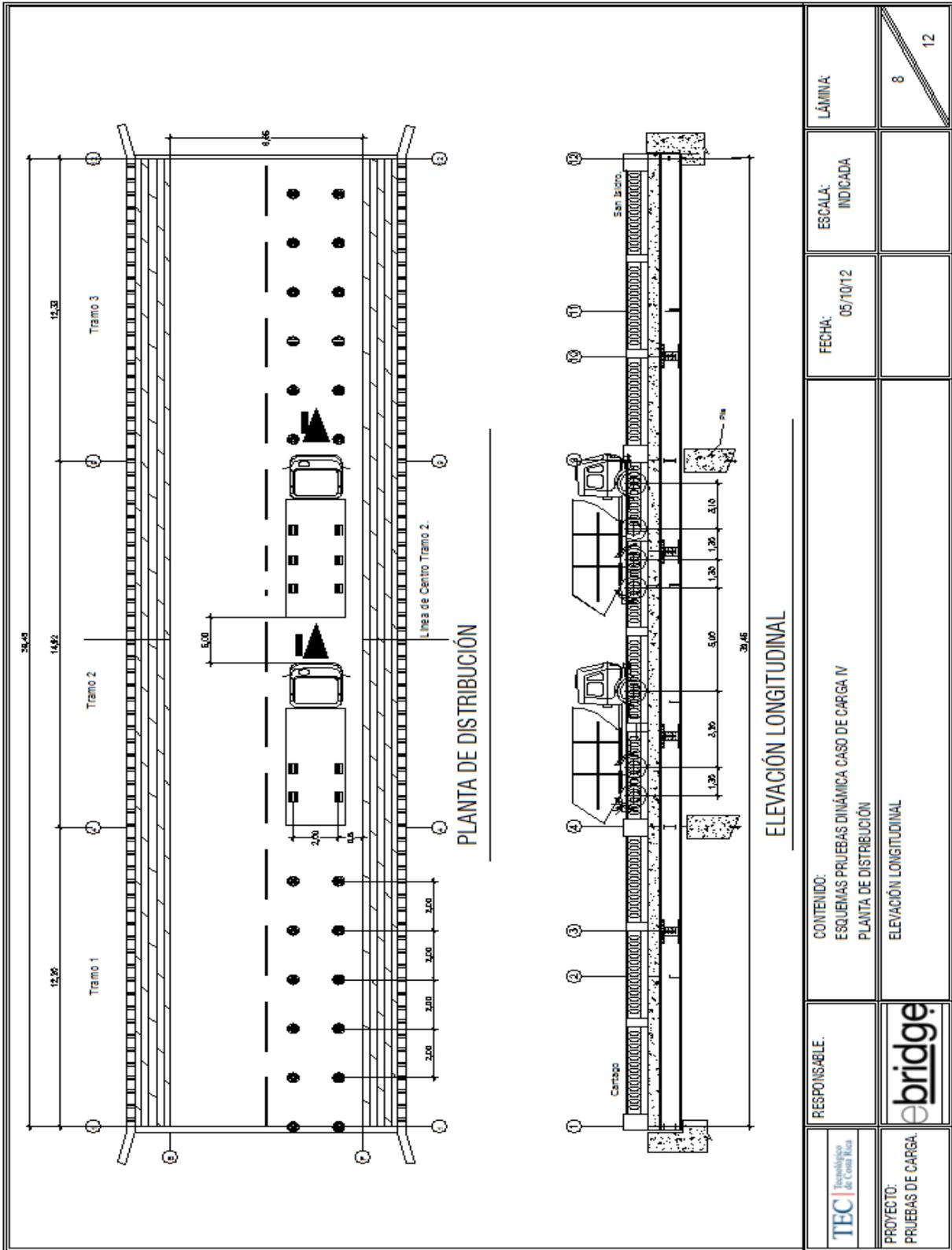
	RESPONSABLE:	CONTENIDO:		FECHA:	ESCALA:	LÁMINA:
		PLANTA DE DISTRIBUCIÓN VISTA LATERAL DEL PUENTE	05/10/12	INDICADA	4	12
PROYECTO: PRUEBAS DE CARGA						



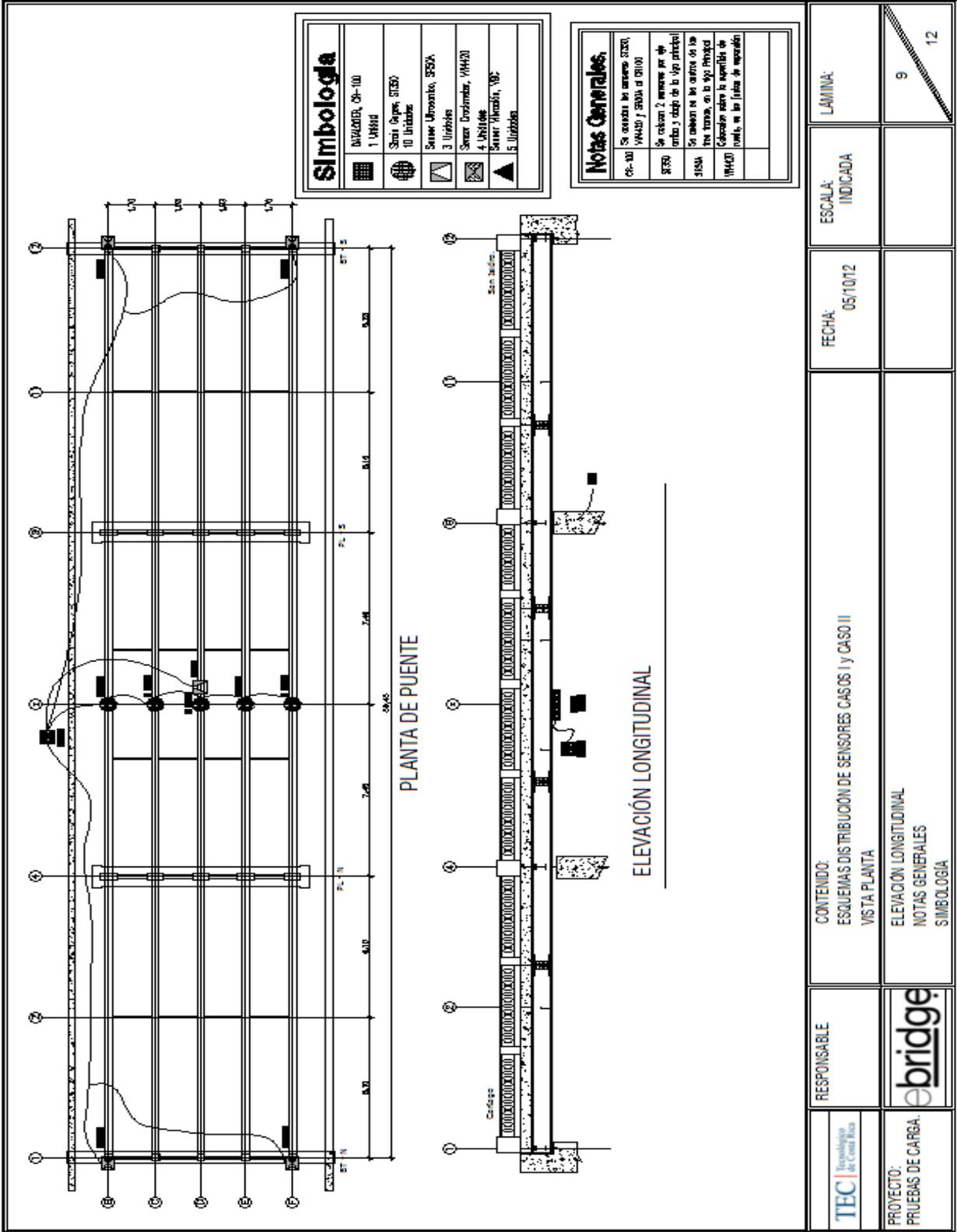


TEC <small>Instituto Tecnológico de Costa Rica</small>	RESPONSABLE:	CONTENIDO: ESQUEMAS PRUEBAS ESTÁTICAS CASO DE CARGA II PLANTA DE DISTRIBUCIÓN ELEVACIÓN LONGITUDINAL	FECHA: 05/10/12	ESCALA: INDICADA	LAMINA:
PROYECTO: PRUEBAS DE CARGA					6 / 12





	RESPONSABLE.	CONTENIDO: ESQUEMAS PRUEBAS DINÁMICA CASO DE CARGA IV PLANTA DE DISTRIBUCIÓN ELEVACIÓN LONGITUDINAL	FECHA: 05/10/12	ESCALA: INDICADA	LÁMINA:
PROYECTO: PRUEBAS DE CARGA				8	12



Apéndice 4: Datos de pruebas estáticas condiciones de carga I, mediciones de deformación, desplazamiento en juntas y deflexiones.

Deformaciones

Deformaciones en las vigas principales.							
Prueba Estática Caso de Carga I							
Deformación ($\mu\epsilon$)							
Viga B		Viga C		Viga D		Viga E	
Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
19,59207	425,2577	-270,5654391	904,5855521	-288,9148	1065,15	-209,9388462	482,7114107
21,21132	420,4326	-270,1528822	902,5098185	-285,6316	1061,839	-208,1694985	468,6537174
19,18726	422,6596	-270,9780957	905,8307918	-262,6492	1055,63	-199,7651236	457,635397
17,56813	423,0307	-272,2158661	908,7368188	-264,2908	1057,285	-200,2074868	454,9758745
19,99689	423,0307	-271,3906526	909,1519656	-267,1637	1058,527	-200,2074868	448,8968437
19,99689	422,2884	-271,3906526	907,4914789	-265,1116	1059,355	-199,7651236	446,6171716
18,35918	423,3657	-271,8253641	909,5547871	-264,7023	1058,117	-200,6418548	444,343488
19,57362	422,2521	-272,237921	910,8001271	-267,1646	1059,359	-199,3148704	441,6838705
20,78806	422,2521	-270,1749372	909,5547871	-265,9334	1060,601	-199,3148704	438,6443076
19,16881	422,2521	-271,0001506	908,7244937	-264,7023	1059,773	-199,3148704	437,1245261
18,764	422,2521	-272,237921	911,215374	-267,1646	1059,773	-199,7572336	435,6047447
19,16881	421,881	-271,4127075	910,8001271	-267,1646	1059,773	-198,430144	431,805291
18,764	421,5098	-271,0001506	909,9699338	-265,523	1059,773	-198,8725072	431,4253457
16,74005	422,2521	-273,0631345	910,3850806	-265,9334	1059,773	-198,8725072	431,0454003
17,54956	420,7675	-271,8253641	910,3850806	-267,5751	1059,773	-198,8725072	426,4860559
16,72303	419,2496	-271,8454231	907,4677305	-266,7552	1058,121	-198,8652484	425,351353
13,88934	419,6206	-272,2580798	909,1284175	-266,7552	1057,293	-199,3076117	424,9714076
15,9134	418,8783	-273,0832933	909,5435642	-268,3969	1058,121	-198,8652484	423,0716808
14,69896	417,3936	-272,2580798	907,8828772	-267,9865	1058,121	-198,4228852	421,5518043
13,48452	418,5073	-272,2580798	907,4677305	-267,576	1056,051	-199,3076117	420,4119682
12,6749	417,7649	-273,9086066	909,1284175	-269,2177	1056,879	-199,3076117	418,8922818
13,88934	417,3936	-271,8454231	907,4677305	-269,6281	1056,465	-197,980522	416,2325692
11,86527	417,3936	-273,0832933	905,3919969	-268,3969	1055,223	-199,3076117	415,8526238
11,05565	417,3936	-274,7338201	907,4677305	-268,8072	1054,809	-199,7499749	414,7127877
12,22116	416,9265	-273,9668875	907,4352643	-269,6309	1055,233	-199,286677	411,6874835
12,62598	415,8129	-272,7290173	904,9442838	-270,0413	1053,992	-198,8443138	411,3074431
11,00661	417,2978	-273,5542308	906,1897239	-270,0413	1053,164	-200,1714034	410,9274977
12,62598	416,5555	-274,3794443	907,4352643	-271,2726	1054,406	-198,8443138	409,0276758
11,81623	415,8129	-272,7290173	904,529137	-270,0413	1053,578	-198,4019506	407,8878397
11,00661	416,5555	-272,7290173	905,7745772	-269,6309	1052,336	-198,8443138	407,8878397
11,81623	416,5555	-274,3794443	907,0201175	-270,8622	1053,164	-198,8443138	406,3679632
13,4356	416,5555	-272,7290173	906,6049708	-270,8622	1053,578	-197,9595874	404,088196
12,22116	415,8129	-273,141674	904,1139903	-269,2204	1051,094	-197,9595874	404,088196
11,00256	417,2897	-274,3844341	908,2628522	-270,0416	1053,578	-199,2848886	403,3293509

Desplazamiento en juntas

Prueba Estática Caso I		
Desplazamiento en Juntas		
Secciones		
Eje A - 1	Eje A - 12	Eje G - 1
(mm)	(mm)	(mm)
0,09	-0,298	0,061
0,075	-0,306	0,016
0,083	-0,312	0,047
0,09	-0,316	0,136
0,07	-0,32	0,157
0,088	-0,329	0,105
0,096	-0,339	0,056
0,099	-0,341	0,124
0,099	-0,338	0,055
0,099	-0,338	0,14
0,1	-0,34	0,088
0,065	-0,334	0,067
0,06	-0,329	0,063
0,081	-0,337	0,206
0,072	-0,335	0,192
0,094	-0,341	0,28
0,082	-0,333	0,244
0,104	-0,339	0,032
0,103	-0,34	-0,024
0,104	-0,332	0,207
0,106	-0,329	0,216
0,106	-0,321	0,325
0,106	-0,321	0,242
0,104	-0,308	0,245
0,079	-0,324	0,114
0,089	-0,331	0,212
0,071	-0,323	0,067
0,069	-0,313	0,224
0,097	-0,305	0,243
0,105	-0,309	0,233
0,105	-0,303	0,173
0,103	-0,296	0,214
0,106	-0,286	0,273
0,111	-0,276	0,031

Deflexiones Tramo central

Prueba Estática Caso de Carga I	
Deflexiones en el Tramo Central	
Eje de Medición Z	
Sin Carga	Con carga
Altura (cm)	Altura (cm)
97,8	96,6
97,7	96,5
97,7	96,5
97,7	96,6
97,7	96,7
97,6	96,6
97,6	96,6
97,6	96,6
97,6	96,6
97,6	96,6
97,7	96,6
97,7	96,7
97,6	96,7
97,7	96,7
97,7	96,6
97,7	96,6
97,5	96,6
97,6	96,6
97,6	96,6
97,6	96,6
97,6	96,6
97,6	96,6
97,4	96,6
97,5	96,6
97,6	96,6
97,6	96,6
97,6	96,4
97,6	96,6
97,6	96,6
97,6	96,6
97,5	96,6
97,5	96,6
97,5	96,7
97,5	96,7
97,5	96,6

97,6	96,6
97,6	96,6
97,6	
97,5	
97,6	
97,6	
97,6	
97,5	
97,6	
97,6	
97,5	
97,5	
97,5	
97,5	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,4	
97,5	

Apéndice 4: Datos de pruebas estáticas condiciones de carga II, mediciones de deformación, desplazamiento en juntas y deflexiones.

Deformaciones

Deformaciones en las vigas Principales							
Prueba Estática Caso de Carga II							
Deformaciones Unidades($\mu\epsilon$)							
Viga B		Viga C		Viga D		Viga E	
ala Superior	ala Inferior	ala Superior	ala Inferior	ala Superior	ala Inferior	ala Superior	ala Inferior
-7,112736	-3,3797	-33,85880197	188,4103733	-45,61808	445,5199	347,5743459	-103,5043645
-7,112736	-3,750978	-34,68377595	189,2404664	-46,84902	446,7614	344,1556594	-103,0621424
-7,112736	-4,122038	-33,44632496	188,4103733	-46,84902	446,7614	340,3570239	-102,6199414
-7,517429	-4,493098	-33,85880197	187,1652338	-45,20778	446,3476	339,5973158	-102,6199414
-8,73163	-3,3797	-34,68377595	188,8254199	-46,4387	445,9337	337,6980455	-103,9466497
-6,708042	-4,864158	-34,68377595	188,4103733	-47,25932	445,5199	335,7986802	-102,6199414
-6,708042	-4,864158	-34,27128896	186,3351408	-45,61808	445,9337	335,0390672	-102,6199414
-7,112736	-3,00864	-35,09625297	187,9953268	-45,20778	444,6922	334,6591181	-104,3888508
-6,28716	-4,086024	-34,66811796	189,259906	-47,26102	446,766	332,7567109	-103,5122334
-5,882466	-2,972626	-33,0180702	188,4299132	-46,44042	446,3521	331,9970028	-103,0700113
-7,906055	-2,230506	-33,8430342	188,0148667	-45,61982	445,9383	331,9970028	-103,9544449
-6,28716	-2,230506	-34,66811796	190,5050455	-46,85072	447,1798	330,8574406	-103,9544449
-4,668384	-2,230506	-33,8430342	189,6749525	-47,26102	448,4213	330,0977325	-102,185525
-5,477772	-1,859446	-34,25551121	187,59972	-45,61982	447,5936	330,0977325	-103,0700113
-6,28716	-0,7462668	-34,66811796	190,5050455	-46,03012	448,0075	330,0977325	-103,5122334
-3,454183	-0,3752069	-34,25551121	191,3351386	-46,85072	448,4213	328,1984623	-102,6277471
-3,858877	-0,004147139	-33,0180702	189,6749525	-45,61982	448,4213	327,4388492	-102,6277471
-4,671241	1,473762	-34,25843523	190,9165849	-44,79889	448,4205	328,5788867	-104,3952784
-4,671241	1,473762	-34,25843523	192,9917172	-46,85043	449,2481	327,0594705	-103,5107922
-3,861852	2,958002	-33,43346125	192,5766707	-45,6195	449,2481	326,2996673	-102,6263164
-5,075934	0,7314244	-33,84594824	190,0863917	-45,6195	448,0066	326,2996673	-102,6263164
-5,885442	0,7314244	-34,67091224	192,1616242	-47,26072	448,8343	325,9199083	-102,6263164
-5,075934	-0,3817551	-33,84594824	190,5016386	-47,26072	449,2481	323,640784	-102,1840943
-5,075934	-0,3817551	-33,43346125	189,2563989	-46,0298	448,4205	324,7803462	-102,6263164
-5,885442	-0,01069525	-35,08339924	190,9165849	-47,26072	447,1789	323,26093	-103,0685806
-5,480628	-0,3817551	-33,02085451	190,5016386	-47,26072	448,4205	321,7414187	-102,1840943
-5,861993	-1,071708	-33,41065786	187,6246709	-46,03231	447,5994	321,7372361	-102,6377515

-8,290276	-0,7006482	-35,06059584	189,2847567	-47,2632	446,3579	321,3573821	-102,6377515
-6,6715	-1,813828	-33,82313487	190,9448425	-47,2632	447,1856	319,8379659	-102,6377515
-7,480889	-1,813828	-33,41065786	188,0397174	-47,6735	446,7717	318,3185497	-101,7532652
-8,69497	-1,813828	-33,82313487	188,4546637	-46,85289	445,9441	319,8379659	-103,079963
-9,504359	-2,184887	-35,47307285	189,6998032	-48,08379	445,5303	317,9386956	-102,1955294
-9,099665	-3,298067	-34,64809887	188,0397174	-48,9044	444,7026	314,8998632	-102,1955294
-11,52795	-3,669127	-35,06059584	185,5494383	-47,6735	443,4612	315,2797173	-103,079963
-11,52795	-4,040186	-37,53562756	187,6246709	-48,49409	443,4612	315,2797173	-104,848883
-10,67476	-3,94262	-35,84297687	187,2624321	-49,72952	443,8874	312,2332802	-103,5434457
-11,48415	-5,055799	-35,43048988	185,6024464	-47,6781	443,0598	312,6131342	-103,5434457
-12,29353	-4,68474	-37,08042786	186,0173927	-48,08839	442,646	312,9929883	-103,9856468
-11,07945	-5,055799	-36,66795085	187,2624321	-49,72952	443,8874	311,093718	-103,5434457
-11,07945	-5,426858	-35,01800289	183,5273141	-49,72952	442,2321	310,713959	-103,1012341
-12,69823	-5,055799	-36,25546386	183,5273141	-48,49868	441,4045	310,713959	-103,9856468
-12,29353	-4,68474	-37,49291485	185,6024464	-51,37067	440,9907	308,8147838	-104,4278688
-11,07945	-5,426858	-36,25546386	183,9423606	-49,72952	440,9907	308,0550757	-104,4278688
-11,0566	-4,6341	-36,23325924	182,309831	-49,32162	440,1696	308,4309373	-103,9967136
-11,0566	-5,005161	-37,47071023	184,8000098	-50,14218	440,9972	308,8107914	-104,4388515
-9,437942	-4,6341	-36,23325924	184,8000098	-50,14218	440,9972	306,5317621	-103,554502
-10,65191	-4,6341	-35,40829524	183,139924	-49,32162	439,7558	306,5317621	-103,554502
-10,65191	-4,263041	-36,64574623	184,3849633	-48,91133	439,7558	306,9116162	-105,3232747
-9,033248	-4,263041	-37,05822324	184,8000098	-50,55245	440,9972	305,7721491	-104,4388515
-9,437942	-5,74728	-35,82078223	183,139924	-49,73189	440,5834	305,3922951	-103,9967136
-9,842635	-5,005161	-36,64574623	182,7248775	-48,91133	439,342	306,5317621	-105,3232747
-9,437942	-3,891981	-37,05822324	185,6300026	-50,14218	440,9972	305,0125361	-104,4388515
-7,796907	-5,326455	-34,97421238	183,1669792	-49,32394	440,176	303,8692666	-104,0074964
-9,010869	-4,584335	-35,38657962	182,7519326	-48,5034	439,7622	304,6288797	-104,0074964
-9,010869	-4,584335	-37,44900459	183,5820257	-49,73421	439,7622	304,6288797	-104,0074964
-8,201601	-4,584335	-35,38657962	184,4119183	-50,14449	440,176	301,9700914	-103,5652954
-8,606295	-5,326455	-35,38657962	180,6770007	-48,09312	438,9346	302,7297995	-104,4497185
-9,415564	-4,213275	-35,79905663	183,1669792	-48,91367	438,9346	303,1095585	-104,891867
-8,606295	-4,584335	-35,79905663	184,8269648	-50,14449	438,9346	301,9700914	-104,4497185
-8,201601	-5,697514	-35,79905663	182,3369863	-50,14449	439,3484	301,2104784	-104,4497185
-9,010869	-4,955395	-36,21154362	182,3369863	-49,32394	438,5208	302,7297995	-105,3341101

-8,217313	-4,619477	-37,46440312	184,3928794	-51,37368	440,1714	301,592899	-105,3264306
-7,00323	-4,248416	-35,81446514	183,1478401	-51,37368	439,7577	300,833286	-103,999838
-8,217313	-4,619477	-36,22695213	182,3177471	-49,73257	438,5163	301,9727531	-104,8842611
-9,026701	-3,506297	-37,46440312	183,9778329	-50,55312	438,9301	301,213045	-106,2108327
-7,00323	-4,619477	-36,63943912	183,5627864	-51,37368	440,1714	299,6937238	-103,999838
-7,407925	-4,248416	-34,98950114	181,9028008	-50,14285	438,9301	299,6937238	-103,999838
-8,217313	-3,877357	-35,81446514	183,1478401	-49,73257	438,5163	301,213045	-106,2108327
-7,407925	-4,619477	-36,63943912	183,9778329	-51,37368	439,7577	298,1744977	-104,4420496
-6,598656	-4,619477	-35,40197815	182,7327936	-49,73257	439,7577	298,5542567	-103,5576159
-7,783457	-3,812313	-35,78607316	182,3531192	-49,7356	438,1109	299,3091168	-104,8983788
-7,783457	-4,183372	-36,61092739	184,4281514	-49,7356	438,9385	298,9292628	-105,3405272
-6,974188	-4,554432	-35,78607316	183,1832123	-51,37666	438,9385	297,7898908	-104,0140082
-6,974188	-4,925492	-35,78607316	182,7681658	-49,32533	438,1109	298,1696498	-104,4562198
-7,783457	-4,183372	-36,1984404	182,7681658	-50,14587	437,6971	297,7898908	-104,0140082
-6,569493	-4,554432	-35,78607316	182,7681658	-51,37666	438,1109	296,6503286	-103,5717966
-6,569493	-4,554432	-34,96110916	180,6932338	-49,7356	436,4557	295,5109566	-104,8983788
-6,974188	-4,554432	-36,1984404	180,6932338	-50,14587	435,6281	296,2705696	-105,7827809
-6,569493	-4,183372	-37,84837838	182,3531192	-52,60746	436,8695	295,1311025	-104,8983788
-6,508671	-4,789509	-36,55159864	181,1822311	-51,38292	436,8871	294,7414574	-104,4857384
-7,318058	-4,418449	-36,96396588	180,3523385	-50,97268	435,6458	295,1211214	-105,8122364
-7,722633	-3,67633	-38,20129711	182,8422168	-52,20342	436,0596	294,3616034	-105,8122364
-7,722633	-4,789509	-37,37645287	180,7671846	-52,20342	435,6458	292,4625233	-105,8122364
-7,722633	-4,789509	-37,37645287	178,6923529	-51,79316	434,8183	292,8423773	-105,8122364
-9,745985	-4,418449	-38,61378411	179,937292	-51,79316	434,8183	293,2221363	-106,25449
-8,127328	-4,418449	-38,61378411	181,1822311	-52,61366	436,0596	291,7029102	-105,3700879
-8,936596	-5,902471	-36,96396588	178,6923529	-52,20342	434,4044	290,5635382	-105,3700879
-10,13318	-4,750658	-37,77195457	178,713496	-52,20518	434,4095	291,7001535	-107,1472028
-9,728606	-5,492777	-39,00928581	180,3733815	-54,2564	434,4095	290,9405405	-106,7050543
-9,728606	-6,976797	-37,77195457	178,713496	-53,02567	433,582	289,8011684	-105,8207574
-11,34714	-6,976797	-37,77195457	177,4685569	-52,61543	431,9269	291,3203945	-106,7050543
-11,34714	-6,234896	-39,83413006	179,1285425	-53,43591	433,582	290,1809274	-107,1472028
-11,34714	-7,718918	-39,00928581	178,713496	-53,43591	433,582	288,6617964	-105,8207574
-12,15641	-7,718918	-39,00928581	177,0536106	-54,2564	432,7545	288,6617964	-106,2628007
-12,56111	-6,976797	-40,24661705	178,2985497	-53,84616	432,7545	289,4214095	-106,7050543

Desplazamiento en juntas

Prueba Estática Caso II		
Desplazamiento en Juntas		
Secciones		
Eje A - 1	Eje A - 12	Eje G - 1
(mm)	(mm)	(mm)
-0,02	-0,04	-0,045
-0,019	-0,025	-0,039
-0,014	0,022	-0,038
-0,009	0,024	-0,033
-0,006	0,02	-0,014
-0,009	-0,071	-0,011
-0,014	0,064	0,001
-0,013	-0,317	0,011
-0,012	0,078	0,001
-0,018	0,047	-0,027
-0,02	-0,114	-0,02
-0,029	-0,086	-0,012
-0,028	0,064	-0,009
-0,032	-0,085	-0,011
-0,042	-0,119	-0,036
-0,041	-0,05	-0,037
-0,035	-0,039	-0,031
-0,039	-0,093	-0,022
-0,035	0,063	-0,001
-0,032	0,008	0,016
-0,025	-0,007	0,023
-0,023	-0,146	0,023
-0,026	0,019	0,015
-0,027	0,022	-0,005
-0,027	0,028	0,005
-0,027	0,023	0,017
-0,023	0,06	-0,026
-0,023	0,011	0,008
-0,02	-0,216	0,017
-0,031	0,077	0,002
-0,031	-0,008	0,022

-0,029	0,006	0,017
-0,029	-0,055	0,018
-0,021	-0,042	0
-0,013	-0,155	0,018
-0,012	-0,041	0,004
-0,013	0,025	0,011
-0,015	-0,004	-0,002
-0,018	0,009	0,002
-0,026	-0,022	0,004
-0,036	-0,184	-0,001
-0,037	-0,068	-0,019
-0,036	0,03	-0,042
-0,038	-0,045	-0,03
-0,04	0,003	-0,027
-0,043	-0,131	-0,049
-0,051	-0,079	-0,066
-0,057	-0,082	-0,084
-0,058	-0,055	-0,088
-0,057	-0,086	-0,094
-0,059	-0,114	-0,069
-0,065	-0,156	-0,085
-0,062	-0,153	-0,094
-0,061	-0,402	-0,095
-0,062	-0,086	-0,088
-0,066	-0,016	-0,062
-0,066	-0,074	-0,097
-0,07	-0,144	-0,097
-0,075	-0,147	-0,101
-0,079	-0,151	-0,102
-0,08	-0,142	-0,104
-0,086	-0,16	-0,105
-0,085	-0,129	-0,104
-0,082	-0,252	-0,074
-0,077	-0,336	-0,068
-0,076	-0,33	-0,062

-0,072	-0,244	-0,057
-0,071	-0,169	-0,061
-0,066	-0,182	-0,061
-0,067	-0,072	-0,058
-0,066	-0,143	-0,054
-0,072	-0,127	-0,052
-0,07	-0,05	-0,046
-0,077	-0,312	-0,048
-0,084	-0,176	-0,049
-0,087	-0,192	-0,049
-0,089	-0,061	-0,069
-0,086	-0,124	-0,099
-0,085	-0,132	-0,067
-0,084	-0,308	-0,056
-0,083	-0,153	-0,052
-0,086	-0,051	-0,052
-0,081	-0,048	-0,05
-0,078	-0,158	-0,051
-0,081	-0,039	-0,062
-0,079	-0,128	-0,059
-0,075	-0,002	-0,054
-0,076	-0,113	-0,059
-0,079	-0,081	-0,052
-0,077	-0,349	-0,047
-0,075	-0,026	-0,045
-0,07	-0,331	-0,043
-0,068	-0,06	-0,019
-0,061	-	-0,008
-0,057	-	0,002

	97,4
	97,4
	97,3
	97,4
	97,2
	97,4
	97,4
	97,4
	97,4
	97,4
	97,3
	97,3
	97,3
	97,4
	97,4
	97,4
	97,3
	97,4
	97,3
	97,3
	97,4
	97,4
	97,3
	97,5
	97,5

Referencias

- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. *El sistema de puentes del Ministerio de Obras Públicas y Transportes*. Tomado desde la página del MOPT <http://www.mopt.go.cr/planificacion/carreteras/puentes.asp>. Consultado el 26 de julio de 2012 a la 1:15 p.m.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. *Informe Final sobre el Estudio sobre el Desarrollo de Capacidad en la Planificación de Rehabilitación, Mantenimiento y Administración de Puentes basado en 29 Puentes de la Red de Carreteras Nacionales*. Agencia de Cooperación Internacional de Japón. San José, Costa Rica. Febrero, 2007.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). 2007. *Manual de Inspección de Puentes*. San José, Costa Rica.
- Manual of Steel Construction LRDF. 1994. American Institute of Steel Construction, Inc. Estados Unidos.
- Proyecto E-bridge, (2012). Documentos Varios-Proyecto de prevención a fallas de un puente. Cartago, Costa Rica.
- Beer, Ferdinand; Johnston, Russell; Dewolf John. *Mecánica de materiales*. México D.F: McGraw-Hill, 2007.
- Cubero, Osvaldo; Tamez, Pablo; Vega, Adriana. *Estudio de capacidad estructural y propuesta de reforzamiento puente sobre el Río Purires, Cartago*. Taller de diseño: Tecnológico de Costa Rica, 2011.
- F, arbabi. *Structural Analysis and behavior*. Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc, 1991.
- Geokon, Inc. *Instruction Manual Model 4420 VW Crackmeter*. Estados Unidos: Geokon, Inc, 2004.
- Campbell Scientific, Inc. *Instruction Manual SR50A Sonic Ranging*. Estados Unidos: Campbell Scientific, Inc., 2011.
- Campbell Scientific, Inc. *Instruction Manual CR1000 Measurement and Control System*. Estados Unidos: Campbell Scientific, Inc., 2011.
- Campbell Scientific, Inc. *Instruction Manual ST350 Strain Traducer*. Estados Unidos: Campbell Scientific, Inc., 2008.
- American Association of State Highway of Transportation and Officials (AASHTO). *The Manual for Bridge Evaluation*. Estados Unidos: AASHTO, 2011.
- Vargas, Katherine. *Informe de investigación: Problemática en Infraestructura de puentes en Costa Rica; agosto del 2012*.

